# Adeguamento strutturale e funzionale del sistema arginale difensivo tramite interventi di adeguamento in quota ed in sagoma a valle della cassa fino al confine regionale per garantire il franco di 1 metro, rispetto alla piena di TR 20 anni nello stato attuale, e la stabilità e resistenza dei rilevati (MO-E-1323)

Progetto esecutivo II° stralcio - I° lotto

| | |
|---|---|
| Il Progettista - Responsabile di progetto e delle integrazioni e prestazioni specialistiche:<br>*Dott. Ing. Ivo FRESIA* | Il Geologo:<br>*Dott. Geol. Giancarlo VILLA* |
| Il Coordinatore per la sicurezza in fase di progettazione:<br>*Dott Ing. Giuseppe CAMPI* | VISTO: Il Responsabile del procedimento<br>*Dott. Ing. Federica PELLEGRINI* |

ELABORATI GENERALI

**RELAZIONE IDROLOGICO - IDRAULICA**

**E2.01.09**

| | |
|---|---|
| approvato | Dott. Ing. Ivo Fresia |
| verificato | Dott. Ing. Giuseppe Campi |
| elaborato | Dott. Ing. Andrea Alberini |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |
| | | | | |
| 00 | AE | GC | FR | Aprile 2018 |
| rev. | sigle | | | Data |

codice elaborato 0690-01-01-013R-01

Cert. N. 01296

Mod. PO01/06
Rev. 2
Data emissione: 11.2016

# Indice


1 Premessa ..... 1

2 Documentazione di riferimento ..... 1

3 Analisi idrologica ..... 2

3.1 Caratteristiche del bacino idrografico alla sezione di Rubiera ..... 2

3.2 Caratteristiche del modello HEC-HMS ..... 3

3.3 Elaborazioni condotte e risultati ottenuti ..... 4

4 Analisi morfologico – idraulica dell'alveo ..... 7

5 Analisi idraulica ..... 11

5.1 Allestimento del modello idrodinamico ..... 12

5.2 Simulazioni idrodinamiche ..... 108

6 Verifica della stabilità delle opere di protezione spondale (sezione tipo D) ..... 1

6.1 Calcolo delle condizioni critiche di moto incipiente ..... 1

6.2 Calcolo della tensione tangenziale ..... 2

6.3 Definizione del peso dei massi da impiegarsi ..... 3

6.4 Risultati delle verifiche di stabilità delle opere di protezione spondale ..... 3

7 Scenario di cantierizzazione ..... 5

8 Dimensionamento delle vasche di dissipazione delle opere di sfioro delle aree golenali ..... 11

9 Approfondimento degli scenari idraulici relativi alla progettazione degli interventi di ampliamento e di adeguamento della cassa di espansione del f. Secchia ..... 13

9.2 Dati di riferimento ..... 15

9.3 Punto 4.b) - Argine golenale a valle del manufatto regolatore ..... 16

9.4 Analisi con TR20 – 50 e 200 anni ..... 3

9.5 Punto 4.c) - Canale Calvetro ..... 8

9.6 Punto 4.d) - Canale Canalazzo ..... 3

9.7 Modellazione del I stralcio di interventi ..... 4

9.8 Precisazioni relative agli drogrammi di piena ..... 4

1 ALLEGATO 1 – Interventi "Cassa" ..... 7

# 1 Premessa

Il progetto definitivo in argomento concerne gli interventi di adeguamento strutturale e funzionale del sistema arginale del fiume Secchia nel tratto compreso tra l'attraversamento dell'autostrada A1 e il confine della Regione Emilia-Romagna, all'altezza dell'abitato di Concordia sulla Secchia.

Gli interventi in progetto sono organizzati secondo i seguenti due stralci funzionali:

- **I stralcio,** relativo al tratto compreso tra il ponte A1 e quello dell'Uccellina (circa 12,5 km);
- **II stralcio,** dal ponte dell'Uccellina al confine regionale (circa 30 km).

Nel seguito vengono illustrate le elaborazioni di carattere idrologico e idraulico condotte per la determinazione degli elementi necessari al dimensionamento delle opere di adeguamento dell'assetto difensivo del corso d'acqua costituite, prevalentemente, da interventi sui rilevati arginali, ma anche da miglioramenti morfologici della geometria dell'alveo attivo in corrispondenza dei ponti e da interventi sulle aree golenali con lo scopo di migliorarne le funzioni di invaso e di laminazione.

La finalità degli interventi è quella di conseguire un assetto difensivo del tratto di corso d'acqua adeguato alla piena con il tempo di ritorno di 20 anni; su tale grandezza sono pertanto state concentrate le elaborazioni di natura idrologica e idraulica che nel seguito vengono esposte.

Il sistema arginato, continuo su entrambe le sponde, si sviluppa a partire da valle del tratto compreso tra il ponte della Via Emilia (SS 9) e quello della A1 (circa 5,5 km) in cui hanno sede consistenti effetti di laminazione delle onde di piena provenienti da monte per la presenza, in successione, della cassa di espansione e di una estesa area di espansione naturale.

Sotto l'aspetto idrologico, la sezione di riferimento per il calcolo delle portate di piena è dunque costituita dal ponte della Via Emilia, in cui si può assumere un "funzionamento naturale" del bacino idrografico sotteso; la portata al colmo all'ingresso del tratto arginato è di conseguenza calcolata attraverso l'applicazione di un modello di simulazione idraulica che permette di tenere conto del comportamento della cassa e dell'area di espansione posta immediatamente a valle.

Il progetto definitivo sviluppato, infine, si colloca in prosecuzione del progetto preliminare degli stessi interventi redatto direttamente da AIPO, di cui si assumono le valutazioni di natura idrologica e idraulica; su tali valutazioni sono stati sviluppati gli approfondimenti necessari per il passaggio alla fase di progettazione di maggior dettaglio.

# 2 Documentazione di riferimento

Per gli aspetti idrologici e idraulici si è fatto riferimento alla seguente documentazione tecnica pregressa.

1. Adeguamento della Cassa di espansione del fiume Secchia in località Rubiera (RE) e Campogalliano (MO) alle attuali esigenze idrauliche e alle norme del DPR 1/11/1959 n. 1363 e successive (Regolamento Dighe). Documentazione parziale: Relazione generale (Allegato1); Relazione idrologica (Allegato 2); Verifiche idrauliche (Allegato 3); Rilevati arginali e manufatto limitatore – Verifiche strutturali (Allegato 4); Situazione attuale: Planimetria generale 1:10.000; Profilo longitudinale in asse Secchia; Profilo longitudinale in asse Cassa; Sezioni trasversali della Cassa 1:5000/1:200 (Allegato 15); Situazione attuale: Rilevati arginali – Sezioni caratteristiche 1:200 (Allegato 16); Situazione attuale: Manufatti – Sezioni caratteristiche 1:100 e 1:200 (Allegato 17). dott. ing. G. Susin, 1991.
2. Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del fiume Secchia nel tratto da Lugo alla confluenza in Po, Autorità di Bacino del Fiume Po, 2004.
3. Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA), Autorità di Bacino del fiume Po, 2015:
    - Mappe delle aree inondabili sul reticolo idrografico principale del bacino del fiume Po: bacino del Secchia – fiume Secchia;

- Area a rischio significativo di alluvione - ARS Distrettuali - 2. Schede monografiche - Fiume Secchia dalla cassa di espansione alla confluenza in Po.

4. Relazione tecnica di aggiornamento della proposta di intervento contenuta nello "*Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del fiume Secchia*", relativa al tratto cassa – Tre olmi (elaborato 3-4-2_1-3r_sc), sulla base dei risultati delle più aggiornate analisi sulla pericolosità di alluvione svolte ai sensi della direttiva 2007/60/CE, Autorità di Bacino del fiume Po, 2014;

5. Lavori di ampliamento della cassa di laminazione del fiume Secchia, Comuni di Modena e Rubiera - Progetto Preliminare, AIPO 2016.

# 3 Analisi idrologica

Il sistema di opere idrauliche che attualmente difende dalle inondazioni l'intera area di pianura adiacente al Secchia è costituito schematicamente:

- dalla cassa di espansione esistente, localizzata poco a valle del ponte della Via Emilia (SS 9);
- dall'area di naturale espansione compresa tra il termine della cassa e l'autostrada A1;
- dal sistema arginale che corre con continuità su entrambe le sponde a partire da valle della A1 fino alla confluenza in Po.

A livello idrologico è pertanto necessario definire le portate di piena per i diversi tempi di ritorno in una sezione del corso d'acqua posta a monte del tratto interessato dalla cassa di laminazione e valutare successivamente, per mezzo di strumenti di simulazione idraulica il trasferimento a valle di tali portate, il cui colmo è influenzato dagli effetti dovuti all'entrata in funzione della cassa e alla libera espansione nell'area inondata di valle, che avvengono in sequenza.

Per tali aspetti, l'implementazione del modello di simulazione idraulica è stata fatta in modo da permettere la rappresentazione con il massimo di accuratezza del comportamento nelle attuali condizioni di assetto. Ipotesi di adeguamento e/o ampliamento della cassa potranno consentire di disporre successivamente di ulteriori scenari idrologici-idraulici rispetto ai quali potranno essere valutati gli ulteriori adeguamenti necessari per portare il sistema complessivo di contenimento delle piene del corso d'acqua a valle della cassa di espansione al grado di sicurezza idraulica posto come obiettivo negli strumenti di pianificazione di bacino.

In ragione della presenza della cassa di espansione, la "situazione" idrologica del fiume Secchia alla sezione di Rubiera è stata affrontata in numerosi studi a partire da quello, risalente ai primi anni '70 del secolo scorso, per il progetto della stessa cassa.

Le elaborazioni più recenti, costituite dallo *Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del fiume Secchia* (Autorità di bacino del fiume Po, 2007), dal *Progetto preliminare per i lavori di ampliamento della cassa di laminazione del fiume Secchia* (AIPO, 2007) e dagli *Studi in attuazione della Direttiva 2007/60/CE* svolti dall'Autorità di bacino (2014) hanno raggiunto una sostanziale coerenza per quanto riguarda i valori al colmo a Rubiera (SS 9, monte cassa) delle portate di piena di riferimento. Il PGRA fissa per i tempi di ritorno di 20 e 200 anni rispettivamente 1.330 e 2.010 $m^3/s$.

## 3.1 Caratteristiche del bacino idrografico alla sezione di Rubiera

Il bacino idrografico del fiume Secchia alla sezione di Rubiera (SS 9), a monte della cassa di espansione, ha una superficie complessiva di 1.341 $km^2$, comprensiva del sottobacino del torrente Tresinaro che confluisce poco a monte.

La sezione della traversa di Castellarano (976 $km^2$), dove è stato tarato il modello di simulazione HEC-HMS messo a punto nell'ambito dello Studio di fattibilità prima citato, sottende i sottobacini rispettivamente dell'Alto Secchia (chiuso a Ponte Cavola, 359 $km^2$), dei torrenti Dolo e Dragone (affluenti di destra, complessivamente 271 $km^2$), del torrente Rossenna (affluente di destra a Lugo, 186 $km^2$) e l'interbacino, sviluppato prevalentemente in sinistra, a valle di Ponte Cavola (160 $km^2$, IB1, IB2, IB3, IB4).

Tra Castellarano e Sassuolo, sezione quest'ultima che rappresenta la chiusura del bacino montano, vi è l'interbacino IB5 (36 km$^2$); a valle di Sassuolo vi è l'interbacino IB6 (44 km$^2$) e il sottobacino del fosso Spezzano (in destra, 56 km$^2$). A valle ancora, in sinistra, vi è la confluenza del torrente Tresinaro (229 km$^2$), il cui sottobacino ha un andamento stretto e allungato (circa 40 km) parallelo a quello del Secchia.

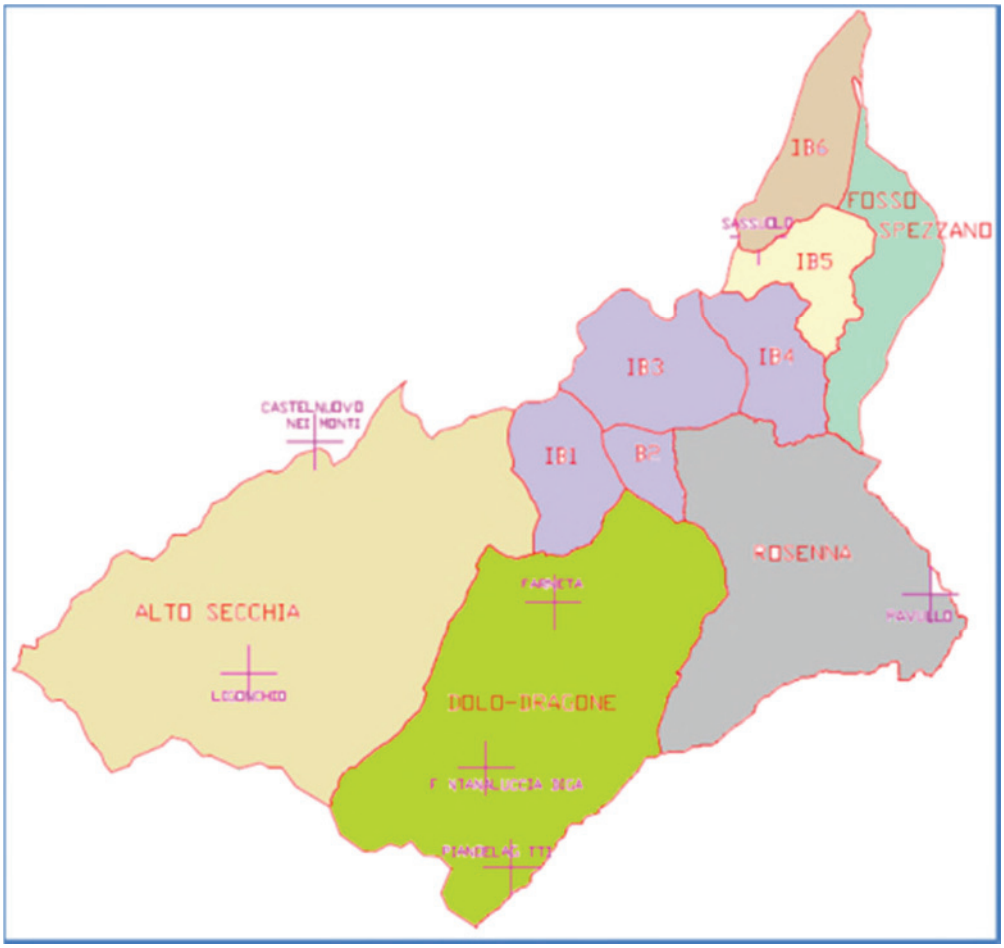



**Fig. 1 Rappresentazione schematica della suddivisione in sottobacini del bacino idrografico del fiume Secchia alla sezione di Rubiera (Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del fiume Secchia nel tratto da Lugo alla confluenza in Po, Autorità di Bacino del Fiume Po, 2004)**

Sotto l'aspetto idrometrico, solamente due delle stazioni di misura esistenti sono dotate di scala delle portate (Castellarano e Sassuolo); a livello pluviometrico sono disponibili le misurazioni nelle seguenti 9 stazioni: Frassinoro, Castelnuovo Monti, Pavullo, Piandelagotti, Farneta, Ligonchio, Sassuolo, Fontanaluccia.

## 3.2 Caratteristiche del modello HEC-HMS

Il modello HEC-HMS è stato implementato nello Studio di fattibilità citato rispetto alla sezione di chiusura di Castellarano e tarato su alcune piene significative per le quali sono a disposizione sia i dati di precipitazione che quelli idrometrici (eventi: ott., nov. e dic. 1996, nov. 1998, apr. e nov.99).

A seguito della taratura, il modello è stato applicato per la costruzione delle onde di piena di riferimento nella sezione di interesse attraverso i seguenti passi sequenziali:

- determinazione degli ietogrammi a intensità costante (rettangolari) per ogni sottobacino e per i vari tempi di ritorno, a partire dai valori ai nodi della griglia di Kriging su maglia di 2x2 km (Direttiva sulla piena di progetto del PAI);

- calcolo delle onde di piena di riferimento per durate delle piogge comprese tra 12 e 28 ore per identificare, a parità di tempo di ritorno le condizioni più gravose in termini di portata al colmo e di volume massimo defluito sopra la soglia di 750 $m^3/s$; identificazione delle durate di 12 e 24 ore come quelle critiche;
- estensione dei risultati alla sezione di Rubiera tramite: propagazione in moto vario dell'idrogramma valutato a Castellarano, con aggiunta dei contributi dei sottobacini del tratto (stimati ancora con il modello);

Il contributo del bacino del torrente Tresinaro è stato valutato mediante un'analisi con fondamento statistico.

In conclusione, dall'applicazione del modello descritto derivano i seguenti valori al colmo delle portate di riferimento (valori arrotondati):

**Tab. 1 Portate al colmo (durata critica 12 h)**

| Tempo di ritorno (anni) | Portata al colmo ($m^3/s$) |
|---|---|
| 20 | 1.350 |
| 50 | 1.600 |
| 100 | 1.900 |
| 200 | 2.050 |
| 500 | 2.250 |

I valori sopra indicati sono calcolati rispetto alla durata critica di 12 ore.

Il coefficiente di deflusso complessivo per il bacino sotteso a Castellarano risulta pari a 0,57, valore che risulta congruo rispetto alle caratteristiche morfologiche del bacino stesso e al grado di permeabilità del suolo.

## 3.3 Elaborazioni condotte e risultati ottenuti

In relazione alle esigenze legate alle elaborazioni necessarie per il progetto, si è proceduto a effettuare nuove simulazioni idrologiche attraverso l'utilizzo del modello messo a punto secondo i seguenti criteri:

- mantenere i valori delle portate al colmo nella sezione di Rubiera per i diversi tempi di ritorno che sono stati consolidati nei progetti più recenti di AIPO e nelle elaborazioni effettuate per il PGRA da parte dell'Autorità di bacino; tali valori fanno riferimento ai risultati che vengono ottenuti per le precipitazioni critiche con durata 12 ore; di particolare importanza per il progetto sono in questo caso i valori relativi ai tempi di ritorno rispettivamente di 20 e 200 anni; il primo infatti costituisce il dato di riferimento per il progetto, mentre il secondo permette di valutare lo scostamento esistente rispetto all'obiettivo posto dalla pianificazione di bacino,
- elaborare nuovi idrogrammi di piena per piogge critiche di durata pari a 24 ore, che danno luogo a idrogrammi caratterizzati dal massimo volume defluito al di sopra del valore soglia di 750 $m^3/s$;
- trasferire la sezione di chiusura del modello direttamente nella sezione di Rubiera, in modo da semplificare consistentemente le operazioni di calcolo di nuovi idrogrammi di piena.

L'implementazione del modello nella sezione di Rubiera è stata effettuata mantenendo sostanzialmente i parametri del modello esistente ed effettuando modeste modifiche dei dati di input per tenere conto dell'aumento della superficie del bacino idrografico sotteso, corrispondente sostanzialmente a quella del torrente Tresinaro, pari a poco più del 15% della superficie complessiva e per fare in modo che siano mantenuti i valori già consolidati delle onde di piena.

Nel seguito si presentano i risultati delle nuove elaborazioni idrologiche effettuate.

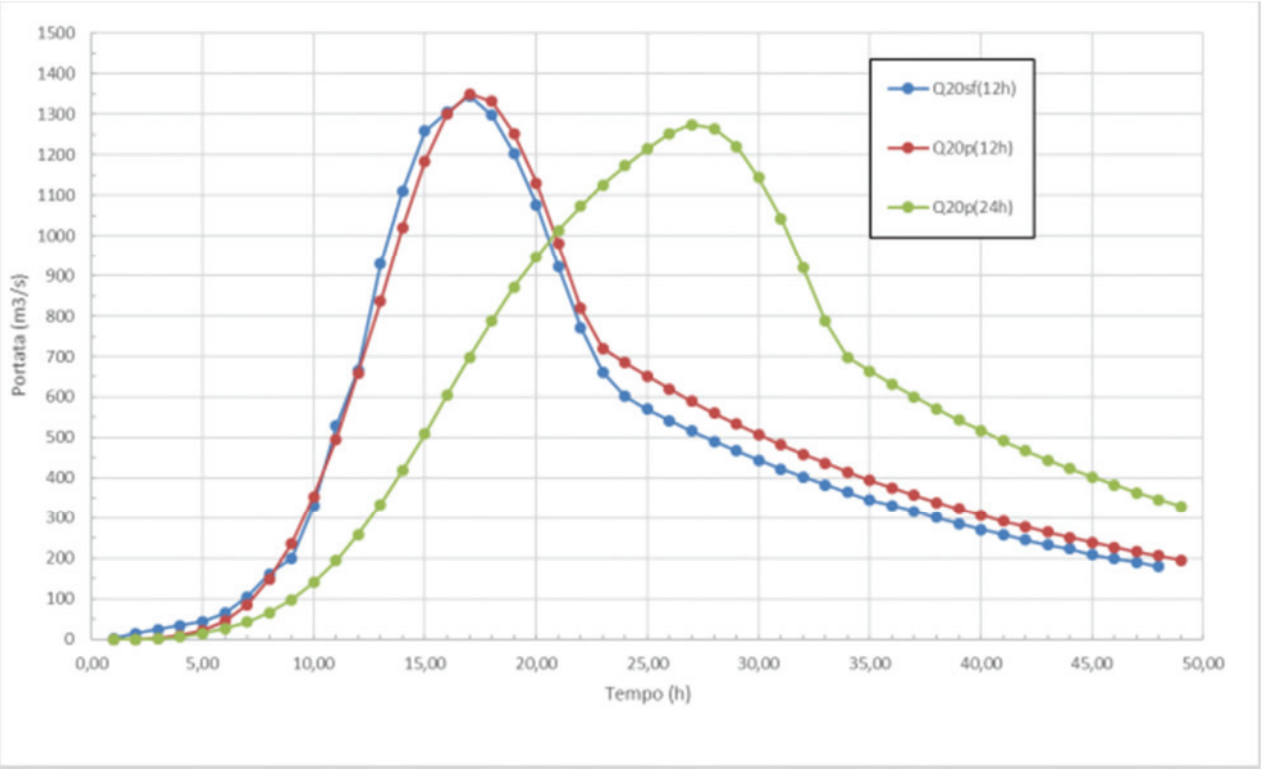



**Fig. 2** **Onde di piena nella sezione di Rubiera per il tempo di ritorno di 20 anni determinate rispettivamente nello Studio di fattibilità (Q20sf) e nel progetto (Q20p) per durate di 12 e di 24 ore**

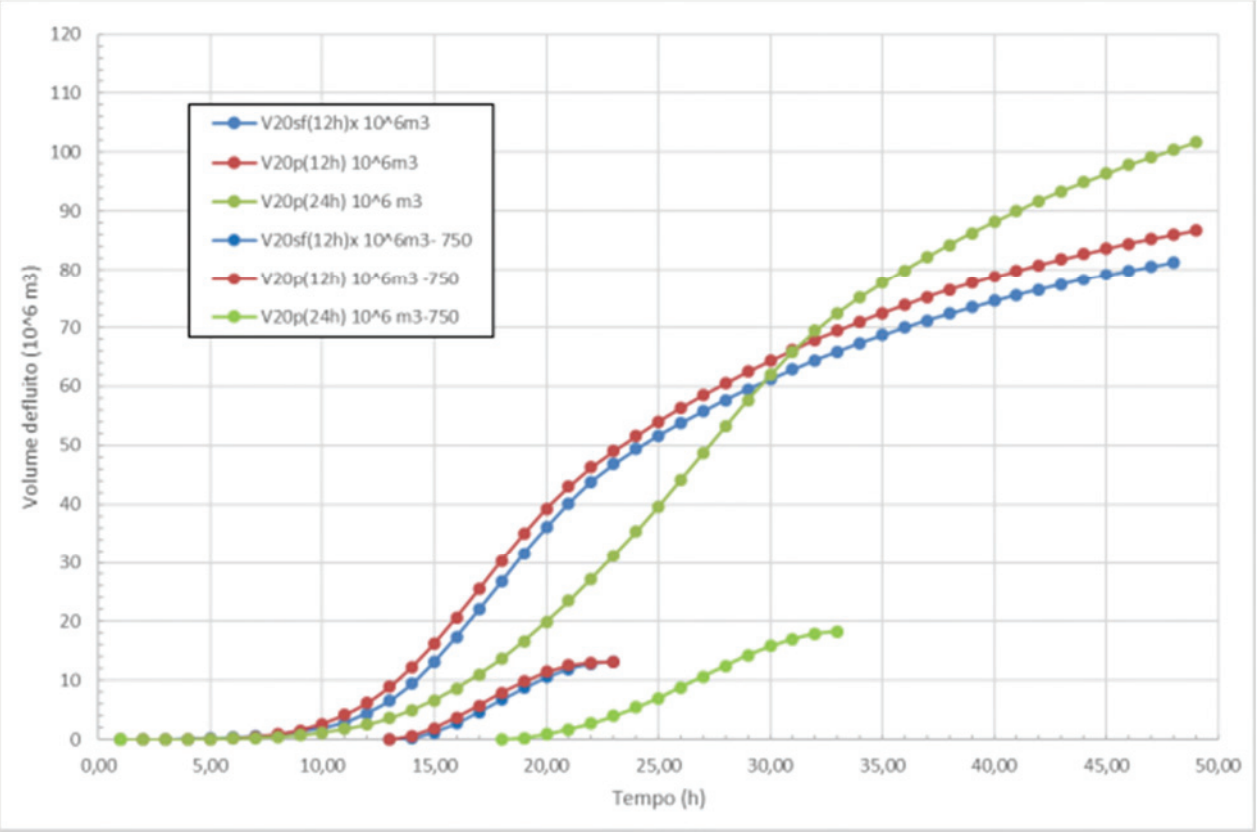



**Fig. 3** **Volumi totali e per portate superiori a 750 $m^3/s$ defluiti nella sezione di Rubiera per il tempo di ritorno di 20 anni determinati rispettivamente nello Studio di fattibilità (V20sf) e nel progetto (V20p) per durate di 12 e di 24 ore**

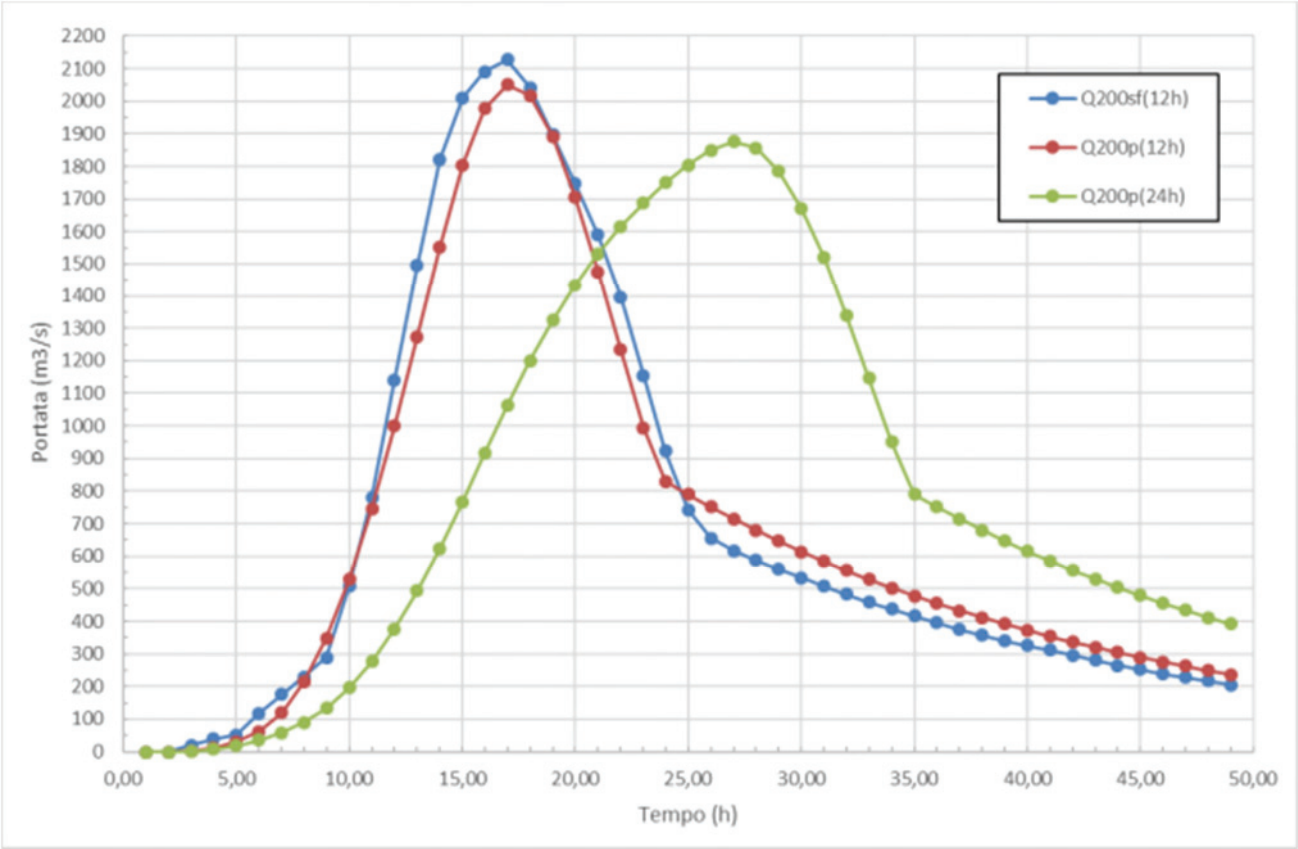



**Fig. 4** **Onde di piena nella sezione di Rubiera per il tempo di ritorno di 200 anni determinate rispettivamente nello Studio di fattibilità (Q200sf) e nel progetto (Q200p) per durate di 12 e di 24 ore**

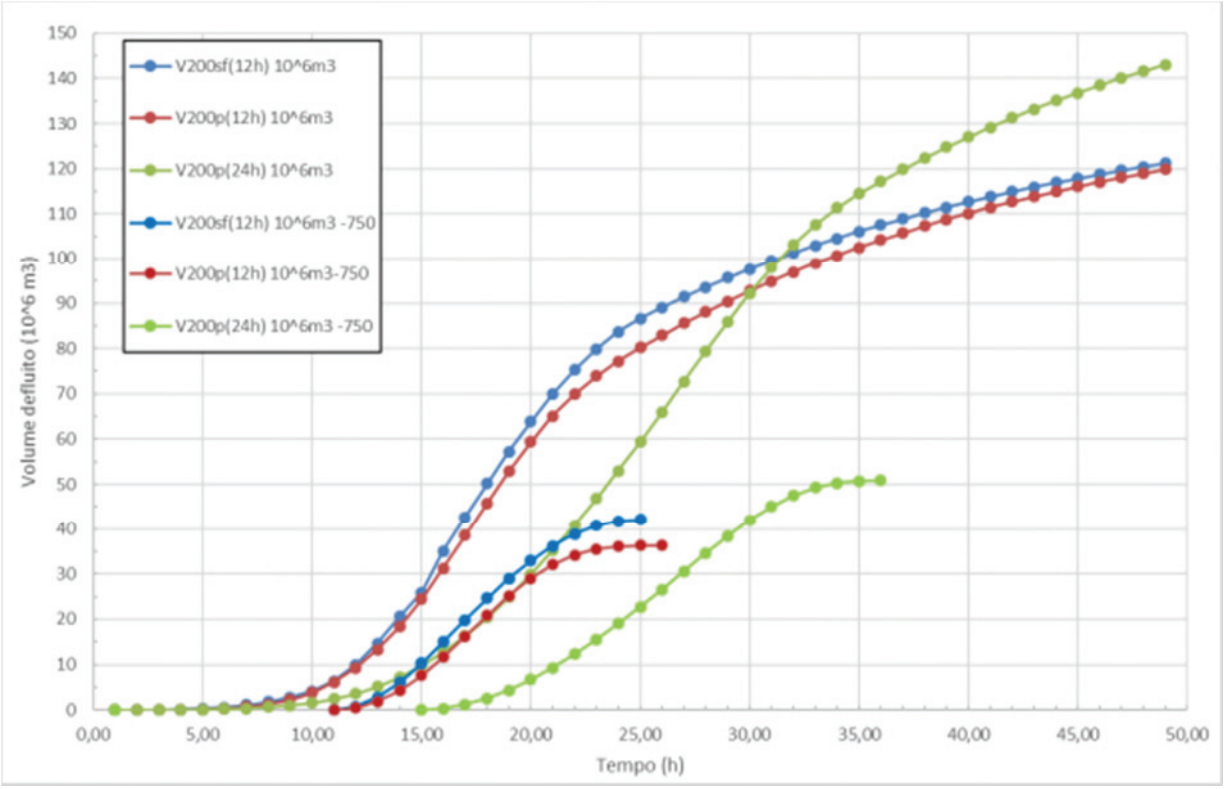



**Fig. 5** **Volumi totali e per portate superiori a 750 $m^3/s$ defluiti nella sezione di Rubiera per il tempo di ritorno di 200 anni determinati rispettivamente nello Studio di fattibilità (V200sf) e nel progetto (V200p) per durate di 12 e di 24 ore**

# 4 Analisi morfologico – idraulica dell'alveo

L'analisi dell'evoluzione morfologica dell'alveo attivo del corso d'acqua nel periodo recente è stata orientata principalmente a ricostruirne i fenomeni di erosione e di deposito significativi rispetto alla capacità di deflusso.

Allo scopo è stato utilizzato il software Hec – Ras 5.0.3, sul quale sono stati impostati tutti gli scenari di simulazione idraulica, in modalità mono-dimensionale, implementando modelli geometrici diversi, sulla base della disponibilità di sezioni topografiche dell'alveo rilevate in epoche diverse. Sono state utilizzate le geometrie dell'alveo descritte dalle campagne di rilievo degli anni 1969 e 2002 e sono state confrontate con quella più recente del 2015. La scelta degli anni è stata dettata dai dati storici disponibili e dalla confrontabilità degli stessi.

Il confronto tra la geometria del 1969 e quella 2015 è stato effettuato implementando due modelli di simulazione monodimensionali mediante l'utilizzo delle sole sezioni, relative alle due differenti epoche, coincidenti in termini di localizzazione lungo l'asse e orientamento. Per l'intero tratto considerato a valle dell'autostrada A1, della lunghezza di circa 60 km, sono risultate disponibili, con le caratteristiche dette, solamente 30 sezioni per ciascuno dei due anni; di tale elemento occorre tener conto nel valutare il grado di precisione dei risultati ottenuti.

Il confronto tra le geometrie dell'alveo relative ai due differenti periodi è stato effettuato prendendo a riferimento la portata a bordi pieni (*bankfull discharge*) e il corrispondente livello idrico, ottenuto attraverso il modello di simulazione idraulica; come indicatori delle trasformazioni dell'alveo sono stati assunti i seguenti indicatori, riferiti rispettivamente al 1969 e al 2015:

- quota di fondo minimo;
- quota di fondo medio;
- area della sezione bagnata.

I risultati ottenuti mostrano come il profilo del fondo medio per il primo tratto del corso d'acqua (fino circa a Ponte Pioppa, circa 40 km a valle del ponte A1) abbia subito un innalzamento nell'intero periodo intercorso con i valori più elevato che si manifestano nella parte di più a monte (dell'ordine di circa 1 m). Per i restanti 20 km a valle si può invece sostenere la sostanziale stabilità delle quote del fondo medio. Analogo andamento è mostrato dai valori del fondo minimo, pur nella maggiore variabilità dell'indicatore che è più influenzato da fattori legati alla morfologia locale dell'alveo (Fig. 6).

Si assiste in conclusione a un fenomeno di innalzamento del fondo dell'alveo inciso che si è manifestato complessivamente nel corso degli ultimi 45 anni circa; si tratta di un valore non elevato, ma comunque apprezzabile anche nei riflessi ipotizzabili sulla capacità di deflusso dell'alveo stesso.

Va considerato, nell'interpretazione dei dati che si riferiscono a un periodo che inizia solamente alcuni anni prima della costruzione e dell'entrata in funzione della cassa di laminazione, che costituisce un elemento di intercettazione del trasporto solido proveniente da monte (si può ipotizzare che possa defluire a valle solamente il trasporto solido in sospensione o comunque di dimensioni più fini); va in ogni caso tenuto conto che questo elemento non costituisce sicuramente l'unico fattore di monte con potenziale influenza sul trasporto solido a valle.

Un ulteriore elemento di confronto può emergere dai valori dell'area bagnata (sempre riferiti alla profilo a bordi pieni) che permettono di valutare il volume complessivo dell'alveo inciso nel tratto e la sua variazione nel periodo; per l'anno 1969 si ha un valore di circa 11,8 milioni di $m^3$, corrispondenti a circa 210 $m^2$ al metro; nel 2015 il volume totale è di 7,1 milioni di $m^3$, corrispondenti a circa 126 $m^2$ al metro; la riduzione del volume dell'alveo inciso è stata dunque di circa 4,7 milioni di $m^3$, corrispondenti a circa 84 $m^2$ al metro.

Complessivamente quindi l'analisi mostra un fenomeno di deposito che ha interessato i primi 40 km circa dell'alveo inciso e una situazione sostanzialmente stabile per la restante parte.

L'accuratezza dei risultati ottenuti deve comunque tenere conto del numero molto limitato delle sezioni disponibili utilizzate, che se da un lato possono indicare l'evoluzione intervenuta, devono indurre a

considerare con cautela le grandezze complessive ricavate a scala di intero tratto, quali ad esempio i volumi totali di sedimentati.

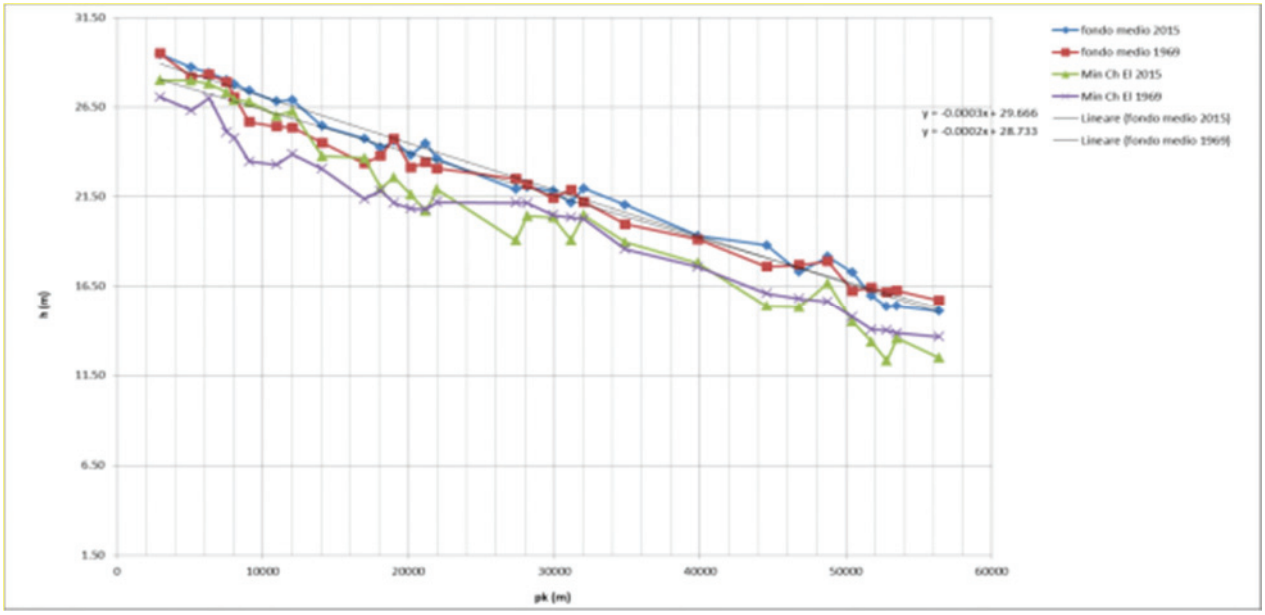



**Fig.6 Andamento del fondo minimo e del fondo medio dell'alveo inciso negli anni 1969 e 2015**

Il trend dei risultati ottenuti nell'analisi tra l'anno 1969 e 2015 sono stati confermati anche dal confronto tra l'anno 2002 e 2015 (Fig.7).

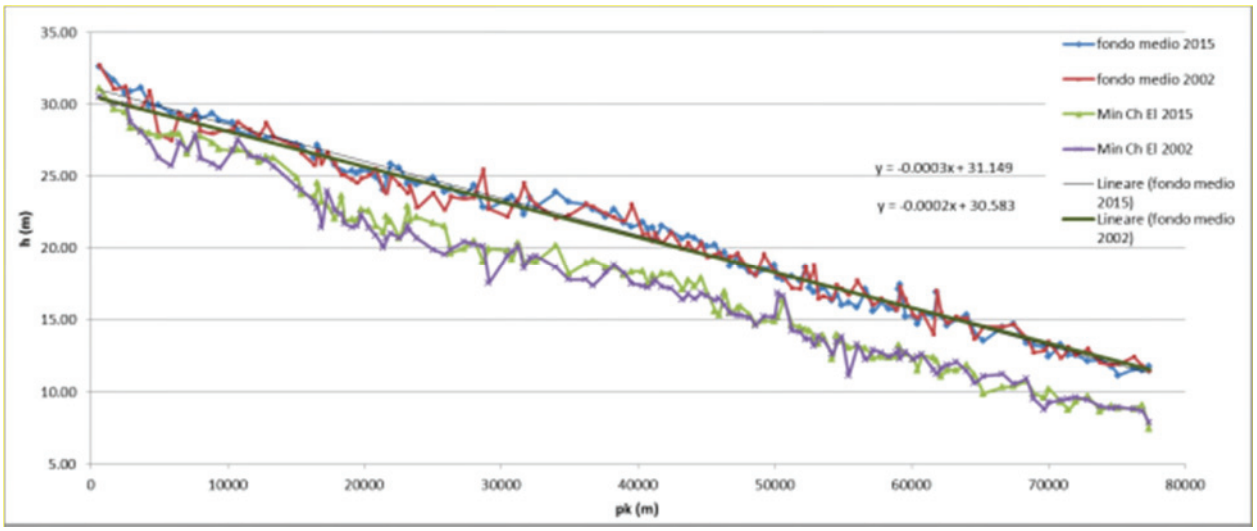



**Fig.7 Andamento del fondo minimo e del fondo medio dell'alveo inciso negli anni 2002 e 2015**

I dati geometrici in questo caso hanno permesso un'analisi più dettagliata poiché su 60 km circa di alveo il numero di sezioni utilizzate è stato di 132, cioè con una buona densità longitudinale che ha permesso una descrizione molto più accurata.

L'andamento del fondo medio mette in evidenza un innalzamento ridotto (il valore massimo è di circa 60 cm e si verifica nel tratto più a monte). L'andamento del fondo minimo risulta invece poco differente nei due anni (con l'eccezione di pochi casi a carattere puntuale), tanto da poter considerare una sostanziale stabilità delle quote minime di thalweg.

Si constata invece un innalzamento del fondo medio che è pertanto imputabile prevalentemente a una riduzione dell'area della sezione con depositi che hanno interessato le sponde. Il volume complessivo dell'alveo inciso risulta infatti pari a 13,1 milioni di $m^3$ nel 2002 contro i 10,7 milioni di $m^3$ nel 2015.

A sostegno dei dati esposti di seguito si riportano alcuni confronti rappresentativi tra le geometrie del 2002 (in linea magenta) e 2015 (in linea nera).

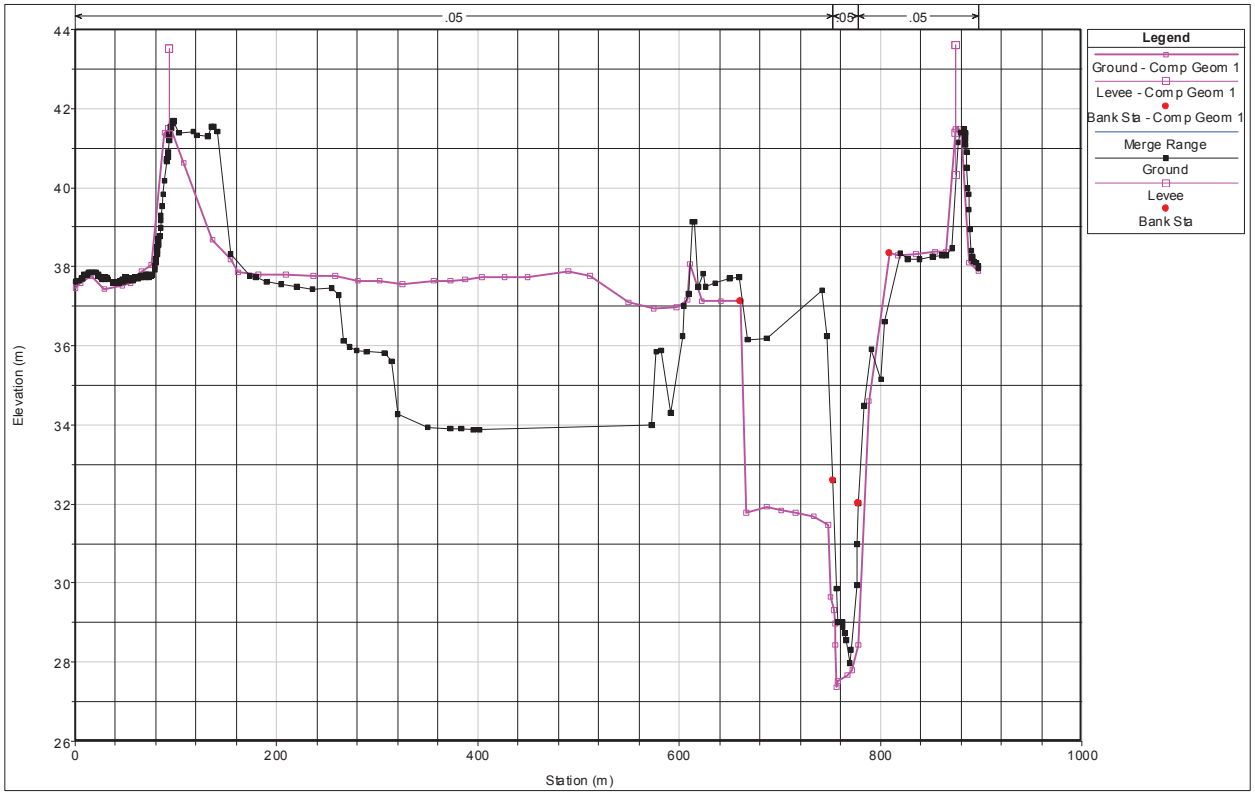



**Fig.8 sez. 149: confronto tra anno 2002 (magenta) e 2015 (nera)**

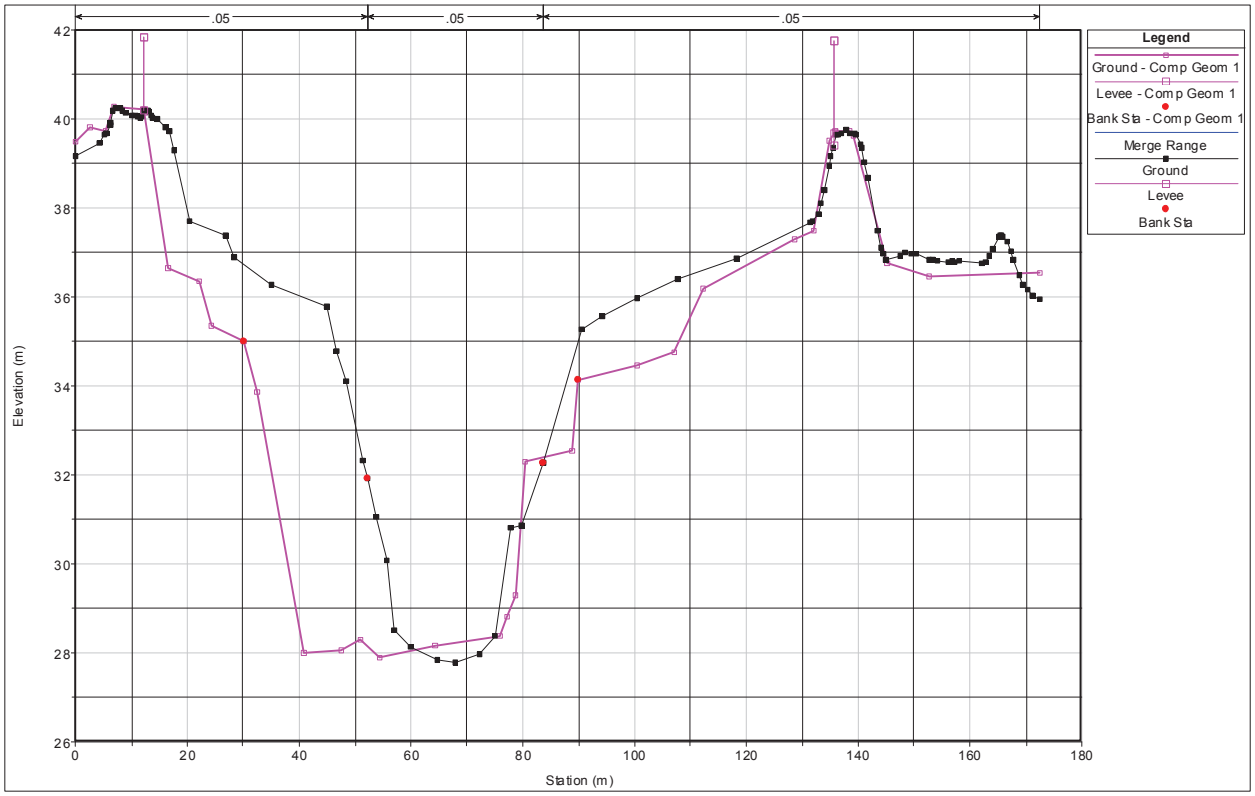



**Fig.9 sez. 141: confronto tra anno 2002 (magenta) e 2015 (nera)**

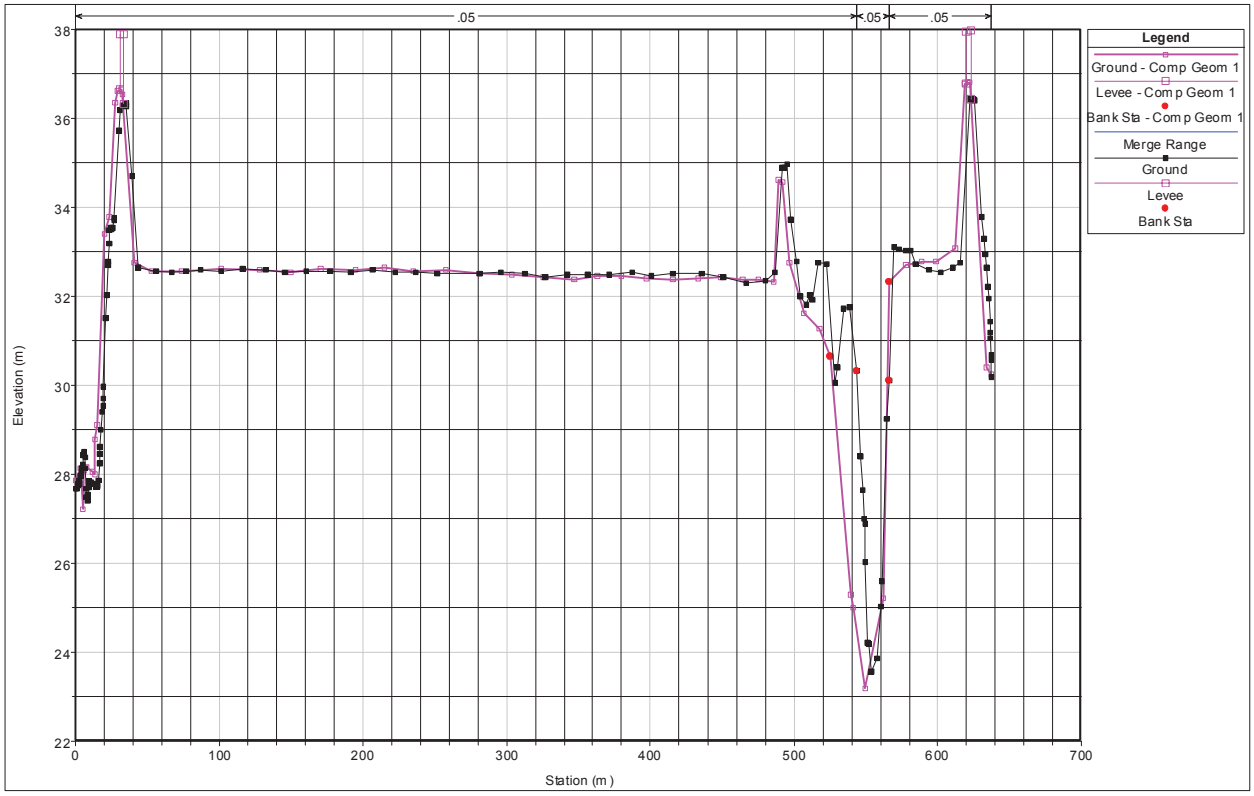



**Fig.10 sez. 127: confronto tra anno 2002 (magenta) e 2015 (nera)**

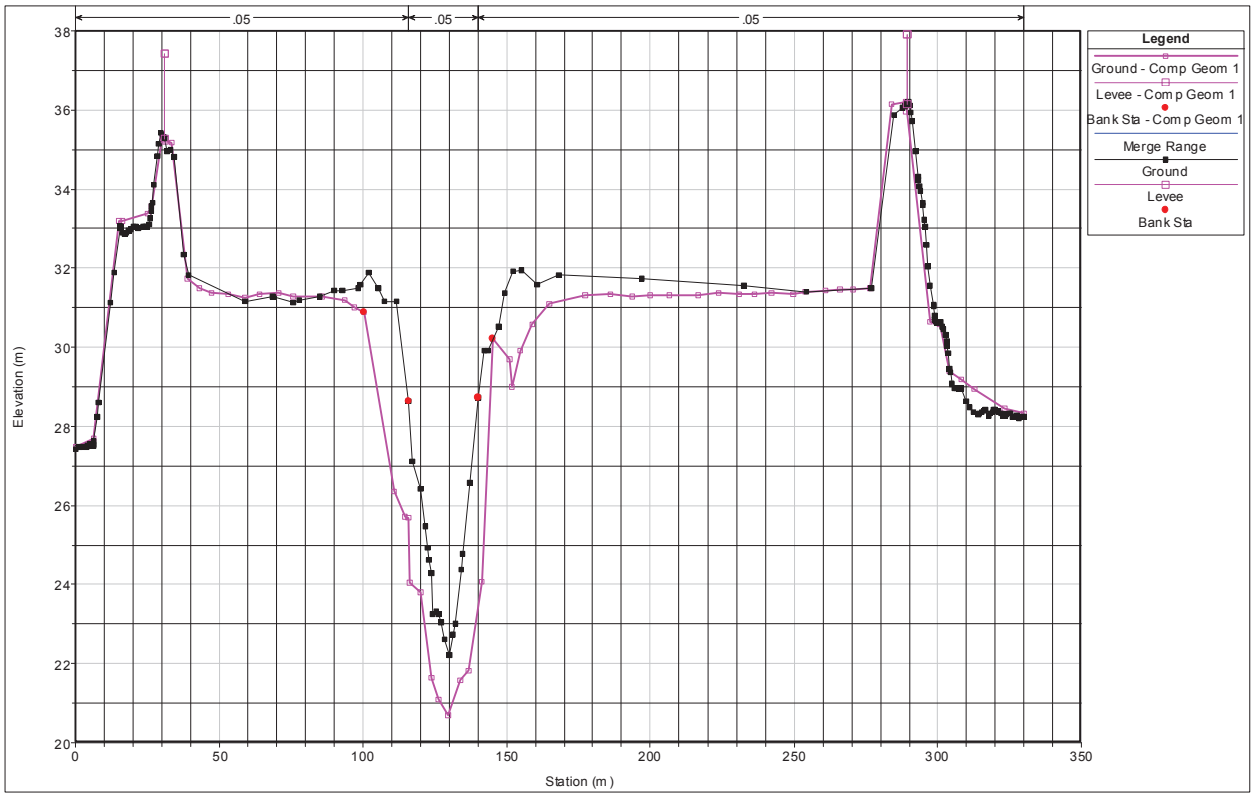



**Fig.11 sez. 114: confronto tra anno 2002 (magenta) e 2015 (nera)**

Infine è stata effettuata una simulazione con una portata di piena di 600 $m^3/s$, per le due configurazioni 2002 e 2015 per osservare la differenza dei profili idrici e quindi per capire quanto incide la modifica geometrica dell'alveo di magra sul deflusso di una piena. Dalle modellazioni effettuate in moto permanente e con modelli monodimensionali lo scostamento medio è di circa 30 cm, in cui il profilo idrico 2015 è più alto.

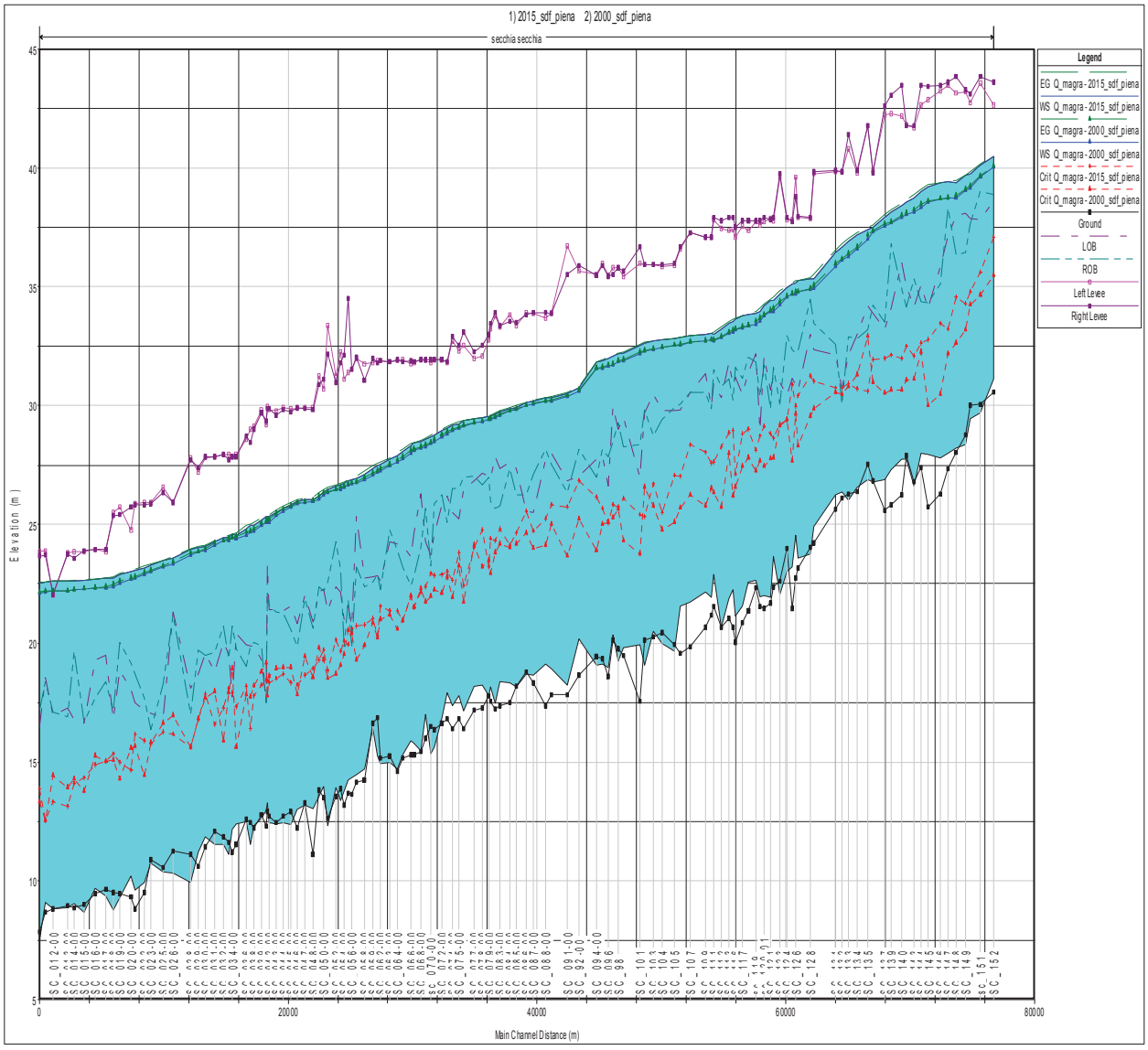



**Fig.12 Confronto tra i profili idrici di piena per la portata di 600 $m^3/s$ relativi alle configurazioni geometriche dell'alveo relative rispettivamente agli anni 2002 (linea magenta) e 2015 (linea nera)**

# 5 Analisi idraulica

L'analisi idraulica del tratto di corso d'acqua oggetto del progetto di adeguamento è stata svolta sia con riferimento alle condizioni attuali sia a quelle di progetto, rappresentata dagli interventi previsti per l'adeguamento del sistema arginale, delle golene e della morfologia dell'alveo.

E' stato utilizzato il codice di calcolo HEC-RAS 5.0.3 in grado di simulare le condizioni di deflusso di tipo non stazionario in condizioni 1D e 2D. Il modello è stato applicato al tratto di corso d'acqua compreso tra la sezione di Rubiera (ponte SS 9) e una sezione di controllo posta adeguatamente a valle del termine del tratto interessato dal progetto di interventi di adeguamento del sistema difensivo.

Il modello è stato riferito alle seguenti configurazioni geometriche dell'alveo:

- stato di fatto attuale (rappresentato dalla geometria rilevata al 2015),
- configurazioni di progetto per il tratto arginato secondo diversi scenari di assetto che hanno riguardato il disalveo e la riprofilatura dell'alveo attivo, il rialzo di tratti di argine e l'adeguamento delle golene chiuse esistenti con la finalità di ottimizzarne l'effetto di laminazione per la piena di progetto.

Il tratto iniziale del corso d'acqua, compreso tra il ponte della SS 9 e quello della A1, interessato dalla presenza della cassa di laminazione e dell'area di espansione naturale immediatamente a valle di essa, è stato considerato unicamente nell'attuale configurazione geometrica. Sono state approfondite adeguatamente le modalità di schematizzazione geometrica delle opere idrauliche presenti (sfioratore laterale, manufatto di regolazione con le relative luci di regolazione e lo sfioratore superficiale) e le relative modalità di funzionamento idraulico; è stata inoltre dettagliata la descrizione della geometria delle aree coinvolte nelle diverse condizioni di deflusso, in modo da poter rappresentare con precisione le modalità di funzionamento idraulico.

Sono stati considerati scenari idrologici relativi alle piene storiche del 2009 e del 2015 per le operazioni di taratura e verifica e la piena di progetto con tempo di ritorno di 20 anni per le piogge critiche di durata pari a 12 ore e 24 ore.

Il modello idraulico ha consentito di rappresentare in maniera quantitativa gli effetti sul profilo idrico derivanti dalla laminazione che trova sede nel tratto iniziale, in modo da definire le caratteristiche dell'onda di piena all'ingresso del tratto arginato oggetto di intervento.

Ha permesso inoltre di valutare gli effetti attesi da ipotesi di intervento sulla morfologia dell'alveo attivo, sulle golene e sulle opere interferenti nell'intero tratto arginato interessato dalle opere in progetto.

## 5.1 Allestimento del modello idrodinamico

### *5.1.1. Modello geometrico*

L'implementazione del modello è stata effettuata combinando tratti di schematizzazione monodimensionale con tratti bidimensionali, in relazione alle specifiche caratteristiche idrodinamiche della piena (alveo di piena prismatico o alveo di piena con modalità di deflusso 2D). La scelta combinata con schematizzazione mono e bi-dimensionale ha permesso di ridurre in misura consistente i tempi di simulazione e al contempo ha garantito una ricostruzione rigorosa dei numerosi manufatti interferenti, in funzione delle possibilità di implementazione delle varie strutture da parte del codice di calcolo HEC – RAS 5.0.3. Rispetto al modello idraulico utilizzato per la progettazione del I stralcio, sono state fatte alcune integrazioni al fine di implementare l'intero tratto di fiume da valle del ponte della SS9 fino al confine regionale e quindi ritarare i tempi di calcolo del modello riconfermando i risultati già esposti ed aggiornando le parti integrative.

#### *5.1.1.1. Elementi generali*

Il modello numerico è stato riscostruito utilizzando i dati topografici a disposizione:

- DTM 2015 passo 0,5 m realizzato sull'intero tratto di asta di interesse;
- DTM 2008 passo 1 m realizzato sull'intero tratto di asta di interesse;
- rilievi topografici 2015 in corrispondenza di tutte le sezioni AIPO;
- rilievi topografici 2015 di tutti gli attraversamenti.

Il DTM 2008 è stato utilizzato per le aree non coperte dal DTM 2015, in particolare la zona compresa tra l'autostrada A1, il canale Calvetro e il centro abitato di Campogalliano. Ii rilievi topografici delle sezioni sono stati utilizzati prevalentemente per ricostruire la batimetria poiché il dato restituito dal DTM laser-scanner non comprende le quote di fondo alveo al di sotto della superficie liquida.

Lo schema generale di funzionamento del modello è quindi sintetizzabile come segue: la componente 1D rappresenta la parte dell'alveo inciso, a geometria prismatica; nei tratti dove sono presenti golene (aperte o chiuse) che sono sede di fenomeni idrodinamici a caratteristiche nettamente bidimensionali la descrizione geometrica ha utilizzato maglie di calcolo del tipo *flexible mesh,* adatte a discretizzare in maniera dettagliata le varie geometrie da ricostruire (Fig. 13).

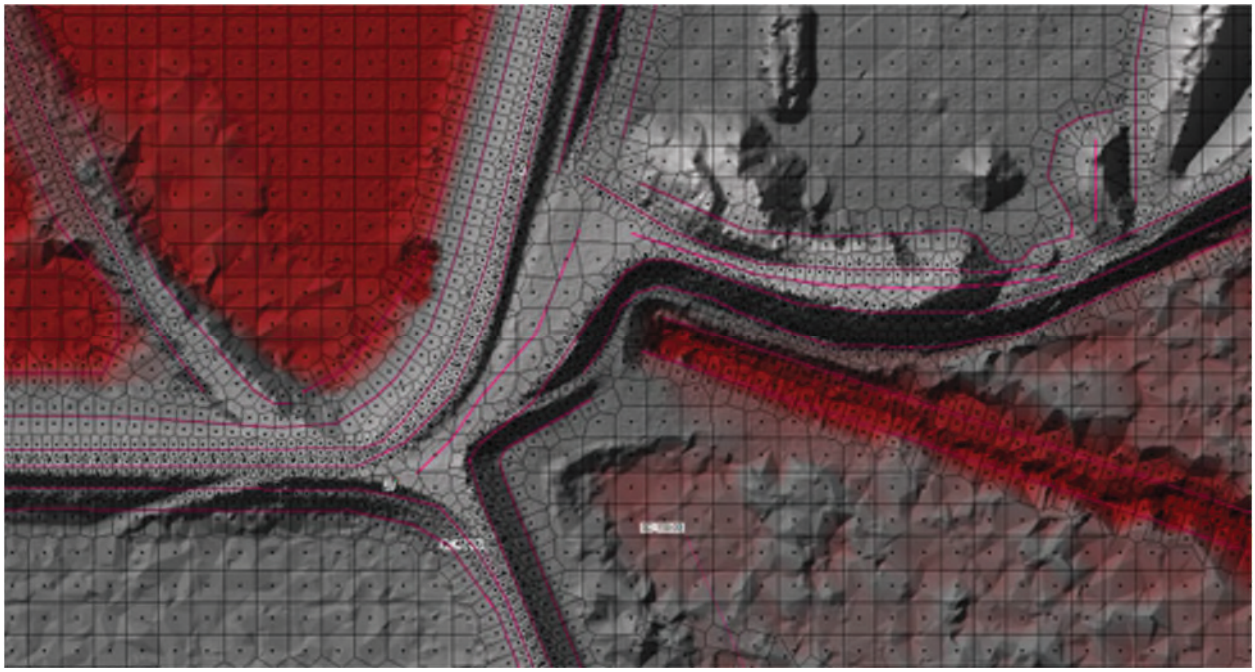


**Fig. 13 Esempio di discretizzazione con celle di calcolo per le aree 2D**

Il numero totale delle celle di calcolo adottate nel dominio 2D è di 72.404. La schematizzazione 2D *flexible mesh* ha consentito di definire celle variabili sia in dimensione sia in forma. La dimensione della maglia principale è costituita da celle 20X20 m; con l'inserimento delle *breakline* di dettaglio, il dominio di calcolo è passato da celle 20x20 m a celle anche 1x1 m nei punti in cui si è discretizzato al massimo dettaglio le discontinuità morfologiche del terreno.

Il collegamento tra il modello monodimensionale e bidimensionale è effettuato mediante la realizzazione di opportune *lateral structure* (Fig. 14), numericamente schematizzate con l'equazione del moto propria dello stramazzo laterale *(weir)*.

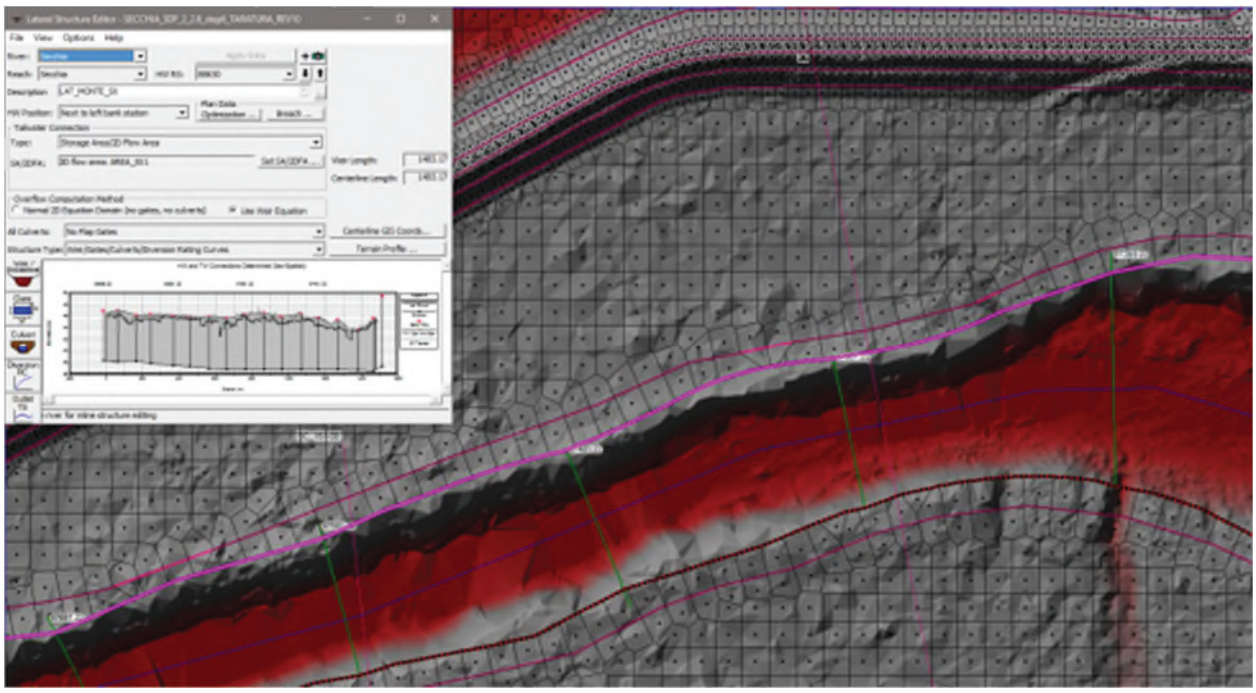


**Fig. 14 Collegamento idraulico tra geometria 1D e 2D (*lateral structure*)**

Per la costruzione geometrica della componente 1D, oltre all'utilizzo delle sezioni AIPO rilevate nel 2015, sono state inserite ulteriori sezioni estratte dal DTM 2015. Tale passaggio è stato necessario per discretizzare con maggior rigore il modello geometrico dell'alveo; in molti tratti infatti il passo delle sole sezioni topografiche risulta troppo rado per una buona rappresentazione dell'effettiva geometria (distanza tra le sezioni rilevate anche di 1 km). Le sezioni integrative estratte dal DTM sono state opportunamente corrette inserendo le quote batimetriche derivate per estrapolazione dai rilievi topografici nelle sezioni contigue.

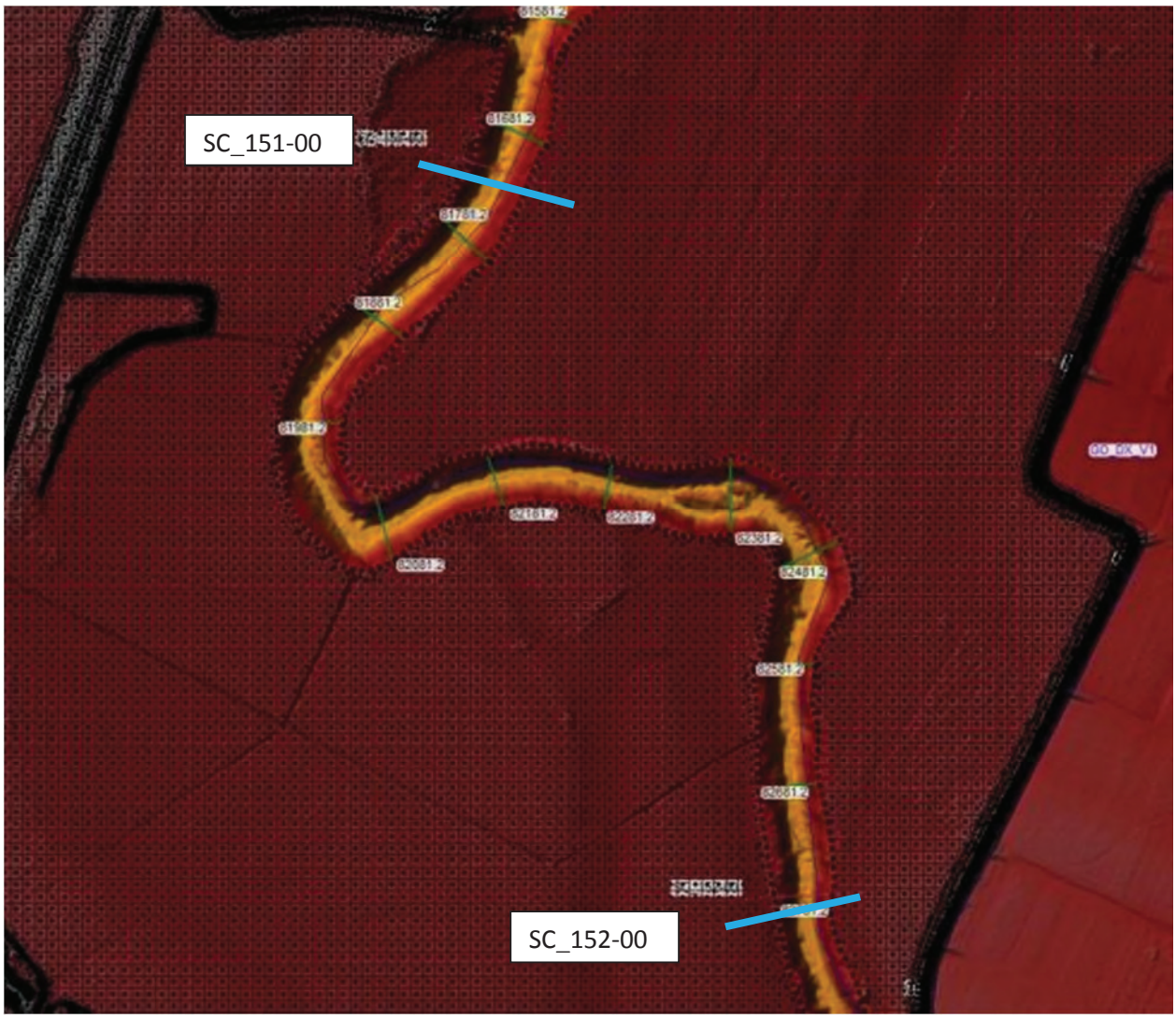



**Fig. 15** **Posizione delle sezioni trasversali dell'alveo inciso utilizzate per la costruzione del modello geometrico 1D lungo un tratto del corso d'acqua**

**Tab. 2** **Sezioni trasversali di riferimento**

| Progressiva (km) | Sezione |
|---|---|
| 88710,68 | |
| 88670,22 | |
| 88636,22 | |
| 88630 | LATERAL_MONTE_SX |
| 88576,19 | |
| 88483,73 | SC_165 |
| 88483 | LATERAL_MONTE_DX |
| 88381,22 | |
| 88281,22 | |
| 88181,22 | |
| 88151,22 | SC_164 |
| 88081,22 | |
| 87991,22 | SC_163-01 |
| 87981,22 | |

| Progressiva (km) | Sezione |
|---|---|
| 87881,22 | SC_163-00 |
| 87781,22 | |
| 87731,22 | SC_162-00 |
| 87681,22 | |
| 87581,22 | SC_161-00 |
| 87481,22 | |
| 87381,22 | |
| 87368,22 | SC_160-00 |
| 87281,22 | |
| 87210,35 | |
| 87127,55 | |
| 87125,55 | |
| 87117,56 | |
| 87109,57 | |
| 87103,87 | |
| 87100 | |
| 87095,85 | |
| 87081,22 | |
| 87081 | LATERAL_SX_VALLE |
| 87080,9 | LATERAL_DX_VALLE |
| 86981,22 | |
| 86881,22 | |
| 86781,22 | |
| 86681,22 | |
| 86581,22 | |
| 86481,22 | |
| 86394,22 | SC_157-01 |
| 86281,22 | SC_157-00 |
| 86181,22 | |
| 86081,22 | |
| 85981,22 | |
| 85881,22 | |
| 85781,22 | |
| 85681,22 | |
| 85621,22 | SC_156-00 |
| 85581,22 | |
| 85481,22 | |
| 85381,22 | |
| 85281,22 | |
| 85181,22 | |
| 85081,22 | |
| 84981,22 | |
| 84927,22 | SC_155-00 |
| 84881,22 | |
| 84781,22 | |

| Progressiva (km) | Sezione |
|---|---|
| 84681,22 | |
| 84581,22 | |
| 84481,22 | |
| 84381,22 | |
| 84281,22 | |
| 84181,22 | |
| 84081,22 | |
| 83981,22 | |
| 83881,22 | |
| 83781,22 | |
| 83681,22 | |
| 83581,22 | |
| 83481,22 | |
| 83412,98 | |
| 83402,98 | SC_153-00 - Monte Ponte A1 |
| 83380 | PONTE AUTOSTRADA A1 |
| 83347,7 | Valle Ponte Autostrada A1 |
| 83337,7 | |
| 83337 | |
| 83336 | |
| 83281,2 | |
| 83181,2 | |
| 83081,2 | |
| 82981,2 | |
| 82881,2 | |
| 82781,2 | |
| 82772,2 | SC_152-00 |
| 82681,2 | |
| 82581,2 | |
| 82481,2 | |
| 82381,2 | |
| 82281,2 | |
| 82181,2 | |
| 82081,2 | |
| 81981,2 | |
| 81881,2 | |
| 81781,2 | |
| 81714,2 | SC_151-00 |
| 81681,2 | |
| 81581,2 | |
| 81481,2 | |
| 81381,2 | |
| 81281,2 | |
| 81181,2 | |
| 81081,2 | |

| Progressiva (km) | Sezione |
|---|---|
| 80981,2 | |
| 80881,2 | SC_150-00 |
| 80816,2 | SC_149-01 - Ponte della Barchetta |
| 80781,2 | |
| 80681,2 | |
| 80581,2 | |
| 80530,65 | SC_149-00 |
| 80481,2 | |
| 80381,2 | |
| 80320,2 | |
| 80297,2 | |
| 80281,2 | |
| 80181,2 | |
| 80081,2 | |
| 80061,2 | |
| 80041,2 | SC_148-01 |
| 80061 | |
| 79981,2 | |
| 79881,2 | |
| 79781,2 | |
| 79745,2 | SC_148-00 |
| 79681,2 | |
| 79581,2 | |
| 79537,2 | SC_147-01 |
| 79481,2 | |
| 79381,2 | |
| 79281,2 | |
| 79181,2 | |
| 79081,2 | |
| 78981,2 | |
| 78881,2 | |
| 78781,2 | |
| 78681,2 | |
| 78581,2 | |
| 78500,2 | |
| 78481,2 | SC_146-00 |
| 78481 | |
| 78381,2 | |
| 78281,2 | |
| 78181,2 | |
| 78154,2 | |
| 78124,2 | |
| 78114,2 | |
| 78081,2 | |
| 77981,2 | |

| Progressiva (km) | Sezione |
|---|---|
| 77971 | |
| 77881,2 | |
| 77866,2 | SC_145-01 |
| 77781,2 | |
| 77681,2 | |
| 77581,2 | |
| 77521,2 | SC_145-00 |
| 77481,2 | |
| 77381,2 | |
| 77281,2 | |
| 77181,2 | |
| 77081,2 | |
| 76981,2 | |
| 76926,5 | SC_144-00 |
| 76901,5 | |
| 76881,5 | |
| 76828,93 | SC_143-05 |
| 76716,93 | SC_143-04 |
| 76655,7 | SC_143-03 |
| 76570,7 | SC_143-02 |
| 76452,7 | SC_143-01 |
| 76391,5 | SC_143-00 |
| 76150,2 | |
| 75832,5 | SC_142-00 - monte Ponte Alto |
| 75820 | PONTE ALTO |
| 75807,5 | valle Ponte Alto |
| 75784,3 | SC_141-00 |
| 75625,1 | |
| 75445,6 | SC_140-00 |
| 75107,5 | |
| 74846,6 | SC_139-01 - monte Ponte SP 413 |
| 74834 | PONTE SP 413 |
| 74824,4 | valle ponte SP 413 |
| 74711,7 | |
| 74539,7 | SC_139-00 |
| 74313,7 | |
| 74127,7 | SC_138-00 - monte Ponte FS Modena-Mantova |
| 74120 | PONTE FS Modena - Mantova |
| 74101,1 | valle Ponte FS Modena-Mantova |
| 74095,1 | |
| 74090,1 | SC_137_01 - monte Ponte pedonale |
| 74085 | PONTE DI FERRO PEDONALE |
| 74080,1 | valle Ponte pedonale |
| 74043 | SC_137-00 |
| 73778,9 | |

| Progressiva (km) | Sezione |
|---|---|
| 73441,3 | |
| 73093,2 | SC_136-00 |
| 72884 | |
| 72694,6 | SC_134-02 |
| 72440 | |
| 72131,3 | |
| 71820,1 | SC_134-00 |
| 71465,2 | |
| 71149,6 | SC_133-00 |
| 70911,6 | |
| 70709,6 | SC_132-02 - monte Ponte monte ponte TAV |
| 70700 | PONTE MONTE PONTE TAV |
| 70691,45 | valle Ponte monte ponte TAV |
| 70680,35 | |
| 70670,35 | SC_132-01 monte ponte TAV |
| 70640 | PONTE TAV |
| 70635,35 | valle ponte TAV |
| 70614,8 | SC_132-00 |
| 70321,1 | |
| 70059,2 | SC_131-00 |
| 69915,2 | SC_131-00 |
| 69869,5 | |
| 69810,02 | |
| 69750,08 | SC_130-02 |
| 69685,61 | SC_130_01 |
| 69586,8 | |
| 69287,6 | SC_130-00 - monte Ponte Basso |
| 69277 | PONTE BASSO (DELL'UCCELLINO) |
| 69267,6 | valle Ponte Basso |
| 68946,8 | |
| 68634 | |
| 68358,1 | SC_129-00 |
| 68358 | |
| 68287,83 | |
| 68187,83 | |
| 68052,47 | SC_128-00 |
| 67987,83 | |
| 67887,83 | |
| 67887 | |
| 67787,83 | |
| 67687,83 | |
| 67587,83 | |
| 67487,83 | |
| 67387,83 | |
| 67287,83 | |

| Progressiva (km) | Sezione |
|---|---|
| 67187,83 | |
| 67081,94 | SC_127-00 |
| 66987,83 | |
| 66872,32 | SC_126-00 |
| 66787,83 | |
| 66687,83 | |
| 66581,49 | SC_125-00 |
| 66487,83 | |
| 66387,83 | |
| 66287,83 | |
| 66166,38 | SC_124-00 |
| 66087,83 | |
| 65987,83 | |
| 65910,3 | |
| 65605,9 | SC_123-80 |
| 65356,6 | |
| 65120,7 | SC_122-00 |
| 65120 | |
| 64994,48 | |
| 64880,81 | SC_121-00 |
| 64794,48 | |
| 64684,48 | |
| 64594,48 | |
| 64514,48 | |
| 64394,48 | |
| 64326,54 | SC_120-01 |
| 64326 | |
| 64194,48 | |
| 64065,48 | |
| 63980,76 | SC_120-00 |
| 63794,48 | |
| 63714,48 | |
| 63687,21 | SC_119-00 |
| 63662,21 | |
| 63662 | |
| 63594,48 | |
| 63394,48 | |
| 63194,48 | |
| 63101,52 | SC_118 |
| 62994,48 | |
| 62932,48 | |
| 62907,48 | |
| 62879,48 | |
| 62794,48 | |
| 62625,15 | SC_117 |

| Progressiva (km) | Sezione |
|---|---|
| 62583,41 | SC_116-01 |
| 62580,41 | Metanodotto1 |
| 62578,41 | |
| 62394,48 | |
| 62257,48 | |
| 62242,48 | |
| 62194,48 | |
| 62050,97 | SC_116-00 |
| 61965,95 | |
| 61957,56 | SC_115-00 |
| 61947,84 | |
| 61938,12 | |
| 61925,9 | |
| 61925,8 | |
| 61925,1 | |
| 61831,32 | |
| 61652,23 | |
| 61517,83 | SC_113-00 |
| 61394,48 | |
| 61194,48 | |
| 60994,48 | |
| 60897,83 | SC_112-00 |
| 60794,48 | |
| 60594,48 | |
| 60394,48 | |
| 60275,03 | SC_110-00 |
| 60275 | |
| 60194,48 | |
| 60113,72 | SC_110-00 |
| 59994,48 | |
| 59794,48 | |
| 59594,48 | |
| 59551,08 | SC_109-00 |
| 59394,48 | |
| 59194,48 | |
| 59194 | |
| 59066,03 | |
| 58962,88 | SC_108-00 |
| 58794,48 | |
| 58594,48 | |
| 58424,25 | SC_107-00 |
| 58194,48 | |
| 57994,48 | |
| 57884,4 | |
| 57794,48 | |

| Progressiva (km) | Sezione |
|---|---|
| 57607,66 | SC_106-00 |
| 57607 | |
| 57394,48 | |
| 57194,48 | |
| 57143,82 | SC_105-00 |
| 56994,48 | |
| 56994 | |
| 56794,48 | |
| 56594,48 | |
| 56394,48 | |
| 56167,47 | SC_104-00 |
| 55994,48 | |
| 55794,48 | |
| 55594,48 | |
| 55439,84 | SC_103-00 |
| 55305,36 | |
| 55194,48 | |
| 54994,48 | |
| 54772,28 | SC_102-00 |
| 54594,48 | |
| 54468,78 | |
| 54367,98 | SC_101-00 |
| 54194,48 | |
| 54097,68 | |
| 53994,48 | |
| 53967,68 | SC_100-00 |
| 53956 | PONTE SAN MARTINO |
| 53946,3 | valle Ponte San Martino |
| 53769,35 | |
| 53769 | |
| 53569,35 | |
| 53369,35 | |
| 53169,35 | |
| 53046,69 | SC_099-00 |
| 53046 | |
| 52969,35 | |
| 52769,35 | |
| 52676,43 | SC_098-00 |
| 52569,35 | |
| 52460,68 | |
| 52460 | |
| 52369,35 | |
| 52253,65 | SC_097-00 |
| 52169,35 | |
| 51969,35 | |

| Progressiva (km) | Sezione |
|---|---|
| 51849,66 | SC_096-00 |
| 51769,35 | |
| 51569,35 | |
| 51400,29 | SC_095-00 |
| 51400 | |
| 51293,69 | |
| 51169,35 | |
| 50938,01 | SC_094-00 |
| 50872,3 | |
| 50769,35 | |
| 50691,54 | |
| 50691 | |
| 50569,35 | |
| 50415,01 | |
| 50369,35 | |
| 50169,35 | |
| 50106,79 | |
| 50100,07 | SC_093-00 |
| 50086 | PONTE MOTTA |
| 50080,35 | valle ponte Motta |
| 50080 | |
| 50072,35 | |
| 49969,35 | |
| 49769,35 | |
| 49569,35 | |
| 49503,18 | SC_092-00 |
| 49503 | |
| 49369,35 | |
| 49136,34 | |
| 48969,35 | |
| 48769,35 | |
| 48604,55 | SC_091-00 |
| 48604 | |
| 48569,35 | |
| 48369,35 | |
| 48169,35 | |
| 47914,6 | |
| 47836,34 | |
| 47636,34 | |
| 47436,34 | |
| 47436 | |
| 47306,84 | SC_089-00 |
| 47169,35 | |
| 46969,35 | |
| 46828,25 | SC_088-00 |

| Progressiva (km) | Sezione |
|---|---|
| 46569,35 | |
| 46369,35 | |
| 46169,35 | |
| 45969,35 | |
| 45840,42 | SC_087-00 |
| 45769,35 | |
| 45569,35 | |
| 45369,35 | |
| 45247,2 | SC_086-00 |
| 45169,35 | |
| 45069,35 | |
| 45069 | |
| 44894,35 | |
| 44719,35 | |
| 44517,9 | SC_085-00 |
| 44517 | |
| 44369,35 | |
| 44219,71 | |
| 44194,61 | |
| 43960,42 | SC_084-00 |
| 43769,35 | |
| 43569,35 | |
| 43369,35 | |
| 43152,46 | SC_083-00 |
| 42969,35 | |
| 42754,74 | SC_082-00 |
| 42569,35 | |
| 42434,18 | SC_081-00 |
| 42336,63 | |
| 42324,63 | SC_080-00 |
| 42317,6 | PONTE PIOPPA |
| 42311,8 | valle ponte Pioppa |
| 42301,14 | |
| 42301 | |
| 42283,98 | SC_079-00 |
| 42169,35 | |
| 41969,35 | |
| 41869,35 | |
| 41771,56 | SC_078-00 |
| 41569,35 | |
| 41369,35 | |
| 41169,35 | |
| 41096,12 | SC_077-00 |
| 41096 | |
| 40969,35 | |

| Progressiva (km) | Sezione |
|---|---|
| 40769,35 | |
| 40569,35 | |
| 40444,35 | |
| 40369,35 | |
| 40287,8 | |
| 40287 | |
| 40257,8 | SC_076-00 |
| 40169,35 | |
| 39994,35 | |
| 39858,76 | SC_075-00 |
| 39819,76 | |
| 39819 | |
| 39669,35 | |
| 39569,35 | |
| 39469,35 | |
| 39469 | |
| 39358,75 | SC_074-00 |
| 39269,35 | |
| 39169,35 | |
| 38951,33 | SC_073-00 |
| 38769,35 | |
| 38619,35 | |
| 38498,45 | SC_072-00 |
| 38492,18 | |
| 38492 | |
| 38473,35 | |
| 38369,35 | |
| 38169,35 | |
| 37937,09 | SC_071-00 |
| 37769,35 | |
| 37626,09 | SC_070-00 |
| 37369,35 | |
| 37269,35 | |
| 37214,54 | SC_069-00 |
| 37214 | |
| 37020,35 | |
| 36814,28 | SC_068-00 |
| 36569,35 | |
| 36469,35 | |
| 36469 | |
| 36369,35 | |
| 36277,86 | SC_067-00 |
| 36144,35 | |
| 36037,79 | SC_066-00 |
| 35969,35 | |

| Progressiva (km) | Sezione |
|---|---|
| 35769,35 | |
| 35569,35 | |
| 35380,42 | SC_065-00 |
| 35169,35 | |
| 34963,17 | SC_064-00 |
| 34769,35 | |
| 34569,35 | |
| 34432,99 | |
| 34402,99 | |
| 34402 | |
| 34325,13 | SC_063-00 |
| 34169,35 | |
| 33969,35 | |
| 33769,35 | |
| 33571,61 | SC_062-00 |
| 33480,35 | |
| 33387,99 | SC_061-00 |
| 33370 | PONTE DI CONCORDIA |
| 33369,57 | valle ponte Concordia |
| 33326,93 | SC_060-00 |
| 33184,88 | |
| 32943,56 | SC_059-00 |
| 32784,88 | |
| 32584,88 | |
| 32434,88 | |
| 32404,88 | |
| 32294,94 | SC_058-00 |
| 32184,88 | |
| 31984,88 | |
| 31784,88 | |
| 31684,84 | SC_057-00 |
| 31654,84 | SC_057-00 |
| 31584,88 | |
| 31294,31 | SC_056-00 |
| 31013,35 | SC_055-00 |
| 30859,88 | |
| 30677,03 | SC_054-00 |
| 30459,88 | |
| 30389,57 | SC_053-00 |
| 30184,88 | |
| 30031,5 | SC_052-00 |
| 29584,88 | |
| 29382,45 | SC_051-00 |
| 29134,88 | |
| 29038,18 | SC_050-00 |

| Progressiva (km) | Sezione |
|---|---|
| 28934,88 | |
| 28784,88 | |
| 28673,24 | SC_049-00 |
| 28584,88 | |
| 28484,88 | |
| 28337,86 | SC_048-02 |
| 28273,54 | SC_048-01 |
| 28175,78 | SC_048-00 |
| 27992,33 | |
| 27558,46 | SC_047-00 |
| 27184,88 | |
| 27059,84 | |
| 26939,5 | SC_046-00 |
| 26784,88 | |
| 26584,88 | |
| 26392,93 | SC_045-00 |
| 26184,88 | |
| 25984,88 | |
| 25805,54 | SC_044-00 |
| 25584,88 | |
| 25384,88 | |
| 25249,21 | SC_043-00 |
| 25059,88 | |
| 24859,88 | |
| 24663,99 | SC_042-00 |
| 24609,88 | |
| 24516,89 | SC_041-00 |
| 24419,49 | SC_040-00 |
| 24334,88 | |
| 24184,88 | |
| 24084,88 | |
| 24021,98 | SC_039-00 |
| 23936,52 | SC_038-01 |
| 23924 | PONTE DI BONDANELLO |
| 23920,74 | valle ponte Bondanello |
| 23784,88 | |
| 23584,88 | |
| 23453,1 | SC_038-00 |
| 23158,5 | SC_037-00 |
| 22809,8 | SC_36-00 |
| 22514,6 | |
| 22255,4 | |
| 21993,5 | SC_035-00 |
| 21723,3 | SC_034-00 |
| 21423,5 | SC_033-00 |

| Progressiva (km) | Sezione |
|---|---|
| 21227,5 | |
| 20970,1 | SC_032-00 |
| 20716,7 | |
| 20508,3 | |
| 20280,7 | SC_031-00 |
| 19859 | |
| 19537,7 | SC_030-00 |
| 19306,2 | |
| 18957,7 | SC_029-00 |
| 18696,1 | |
| 18330,8 | SC_028-00 |
| 17760,4 | SC_027-00 |
| 17750 | PONTE FS DI QUISTELLO |
| 17740 | valle ponte FS di Quistello |
| 17739,98 | |
| 17291,5 | |
| 17291,48 | |
| 16927,2 | SEZ_026-00 |
| 16927,18 | |
| 16554,5 | |
| 16554,48 | |
| 16399,99 | |
| 16107 | SEZ_025-00 |
| 16106,99 | |
| 15748,3 | |
| 15437,7 | |
| 15213,1 | SEZ_024-00 |
| 15200 | PONTE DI QUISTELLO |
| 15191 | valle ponte di Quistello |
| 15178 | SC_023-00 |
| 15177,99 | |
| 15177,98 | |
| 14904,8 | |
| 14904,79 | |
| 14904,78 | |
| 14660,8 | SC_022-00 |
| 14660,79 | |
| 14660,78 | |
| 14424,1 | |
| 14424,09 | |
| 14424,08 | |
| 14129,4 | |
| 14129,39 | |
| 14129,38 | |
| 13875,6 | SC_021-00 |

| Progressiva (km) | Sezione |
|---|---|
| 13875,59 | |
| 13875,58 | |
| 13695,99 | |
| 13553,8 | SC_020-00 |
| 13553,79 | |
| 13553,78 | |
| 13503,78 | |
| 13087,3 | |
| 13087,29 | |
| 13087,28 | |
| 12927,88 | |
| 12648,6 | SC_019-00 |
| 12648,59 | |
| 12648,58 | |
| 12107,3 | SC_018-00 |
| 12107,29 | |
| 12107,28 | |
| 11557,6 | SC_017-00 |
| 11557,59 | |
| 11557,58 | |
| 11343,7 | |
| 11343,69 | |
| 11343,68 | |
| 11098,68 | |
| 10695,7 | SC_016-00 |
| 10695,69 | |
| 10695,68 | |
| 10228,9 | |
| 10228,89 | |
| 10228,88 | |
| 9993,88 | |
| 9775,7 | SC_015-00 |
| 9775,69 | |
| 9775,68 | |
| 8997,7 | SC_014-00 |
| 8997,69 | |
| 8997,68 | |
| 8740,7 | |
| 8740,69 | |
| 8740,68 | |
| 8563,28 | |
| 8468,8 | SC_013-00 |
| 8468,79 | |
| 8468,78 | |
| 8137,05 | |

| Progressiva (km) | Sezione |
|---|---|
| 7835 | |
| 7834,99 | |
| 7834,98 | |
| 7584,18 | |
| 7345,3 | SC_012-00 |
| 7345,29 | |
| 7345,28 | |
| 7238,18 | |
| 6726,2 | SC_011-00 |
| 6726,19 | |
| 6726,18 | |
| 6217,2 | SC_010-00 |
| 6217,19 | |
| 6217,18 | |
| 5728,94 | |
| 5350,5 | |
| 5350,49 | |
| 5350,48 | |
| 4750,4 | SC_008-00 |
| 4750,39 | |
| 4750,38 | |
| 4480,1 | |
| 4480,09 | |
| 4480,08 | |
| 3774,5 | SC_007-00 |
| 3774,49 | |
| 3774,48 | |
| 3478,3 | |
| 3478,29 | |
| 3478,28 | |
| 3188 | SC_006-00 |
| 3178 | PONTE SAN SIRO |
| 3170 | valle ponte San Siro |
| 3158,2 | SC_005-00 |
| 3158,19 | |
| 3158,18 | |
| 2823,4 | SC_004-00 |
| 2823,39 | |
| 2823,38 | |
| 1568,6 | SC_003-00 |
| 600 | |
| 200 | SC_001-00 |

### *5.1.1.2. Cassa di espansione*

La cassa inizia circa 500 m a valle del ponte della via Emilia ed è costituita da una parte in linea, che interessa propriamente l'alveo del corso d'acqua per una lunghezza di circa 1.400 m (con espansione in destra in aree interessate da attività di cava), sbarrata da un manufatto regolatore, e da una parte in derivazione, in sinistra idrografica, alimentata da uno sfioratore laterale posto sull'argine di separazione tra le due casse elementari con ciglio sfiorante a quota 45,80 m s.m.

Complessivamente la superficie impegnata è pari a circa 200 ha, con volume invasabile dell'ordine di circa 15 milioni di $m^3$ complessivi (14,75 $Mm^3$ alla quota di invaso 48,75 m s.m.).

I dati dimensionali delle opere inseriti nel modello sono i seguenti.

**Tab. 3 – Caratteristiche dei manufatti di regolazione della cassa**

| | |
|---|---|
| Traversa di regolazione | 4 luci fisse, dimensioni 5,0 m x 2,5 m<br>quota fondo luci 37,5 m s.m.<br>quota sfioratore 46,5 m s.m.<br>lunghezza sfioratore 150 m<br>quota controbriglia a valle 36,5 m s.m. |
| Sfioratore laterale verso la cassa fuori linea | quota sfioratore 45,8 m s.m.<br>lunghezza sfioratore 120 m |
| Scarico di fondo cassa fuori linea | dimensione luce 2 m x 2 m<br>quota fondo luce 39,5 m s.m. |
| Argini maestri cassa | quota sommità argini 49,5 m s.m.<br>altezza massima argini 10 m |

**Fig. 16 – Planimetria di insieme della cassa di espansione con evidenziazione delle opere componenti**

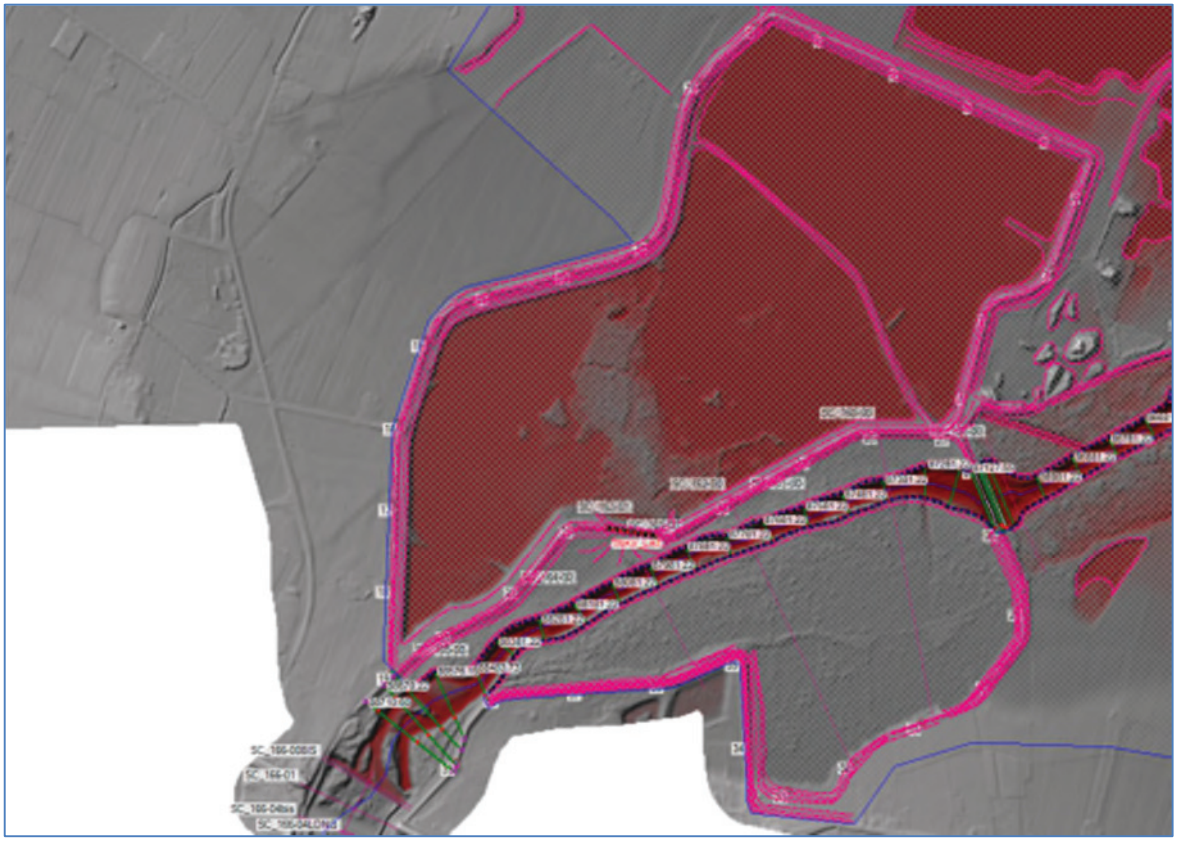


**Fig. 17 Rappresentazione del DTM della cassa di espansione implementato nel modello di simulazione**

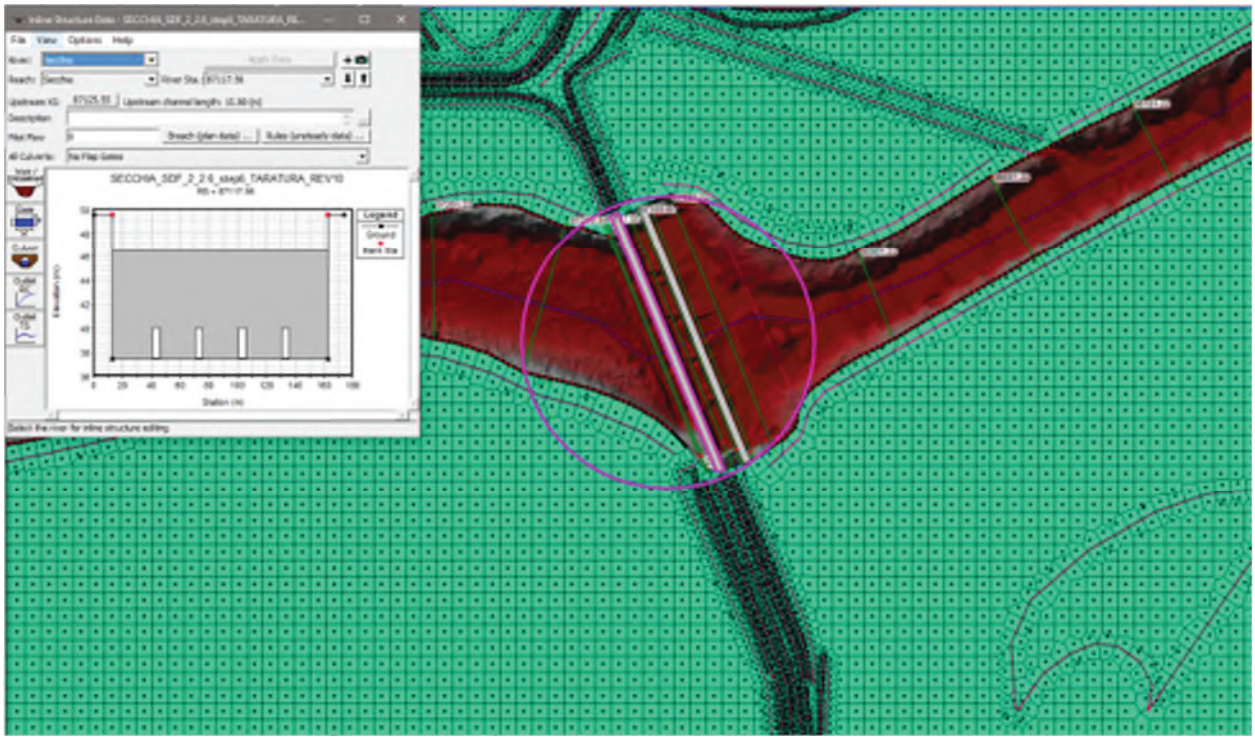


**Fig. 18 Traversa di regolazione della cassa di espansione implementata nel modello**

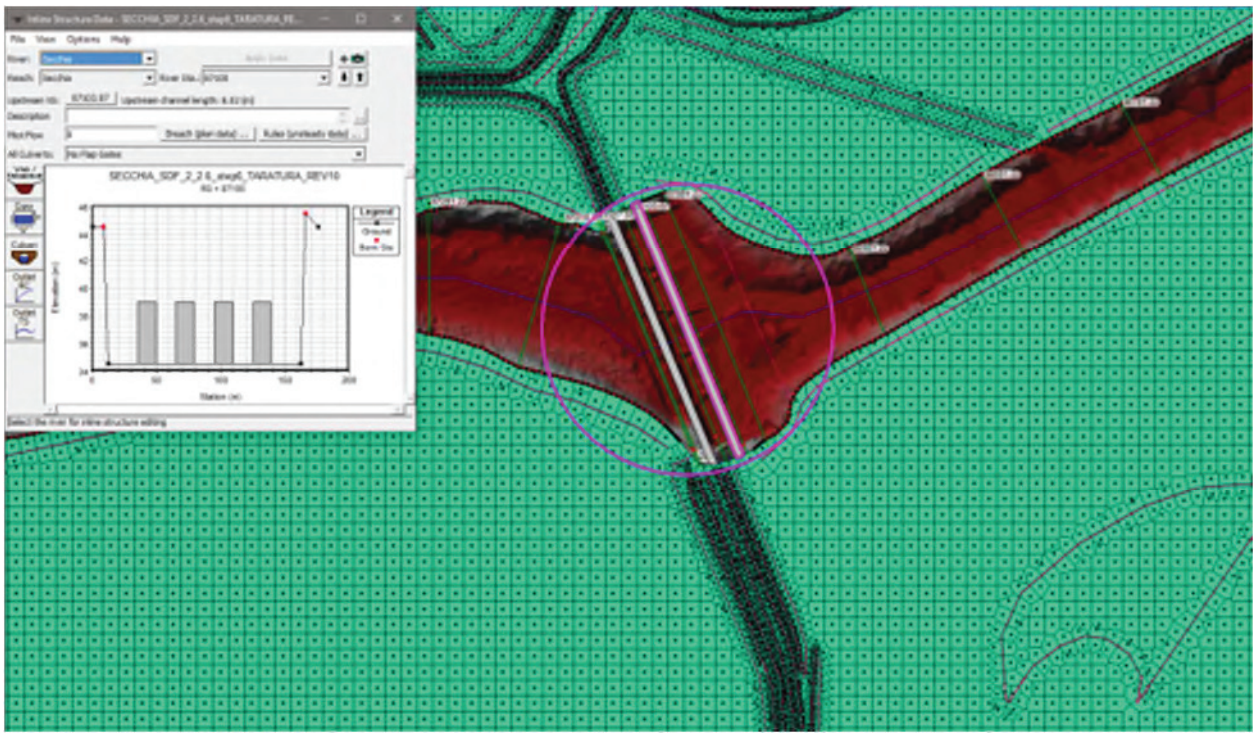


**Fig. 19 Blocchi di dissipazione a valle della traversa di regolazione implementati nel modello**

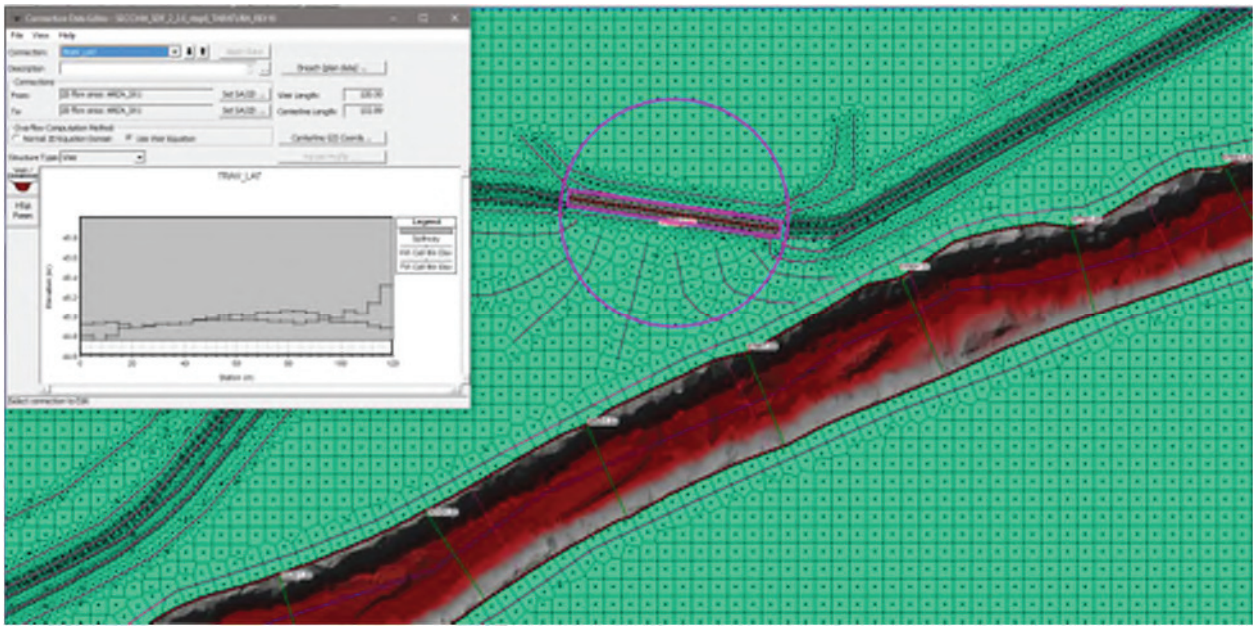


**Fig. 20 Sfioratore laterale di immissione nella cassa fuori linea**

### *5.1.1.3. Area di espansione libera*

L'area compresa tra la cassa di laminazione e l'inizio del tratto arginato ha una dimensione pari a circa 350 ha e risulta inondabile per una porzione significativa per tempi di ritorno inferiori a 20 anni. Pur trattandosi di modalità di invaso libere, l'area svolge un effetto considerevole nella riduzione dei colmi delle onde di piena che fuoriescono dalla cassa, prima del loro ingresso nel tratto arginato.

Nella porzione orientale, fino alla sponda dell'alveo inciso del Secchia è destinata in prevalenza ad uso agricolo; la strada vicinale che sovrappassa la A1 e si spinge fino alla sponda dell'alveo del corso d'acqua segna l'inizio di una vasta porzione occupata prevalentemente da laghi di cave dismesse; all'interno di tale area corre, leggermente in rilevato, una strada vicinale (via Carandini o via dell'Albone) che

sovrappassa anch'essa la A1 e mette in collegamento con l'argine esistente che delimita l'invaso fuori linea della cassa d'espansione.

L'area è stata schematizzata con una maglia 2D sulla base del rilievo laser-scanner 2015 disponibile e 2008 per le aree mancanti, collegata con le sezioni trasversali dell'alveo del rilievo topografico 2015.

**Fig. 21 Rappresentazione planimetrica dell'area di espansione libera compresa tra la cassa di espansione e l'autostrada A1**

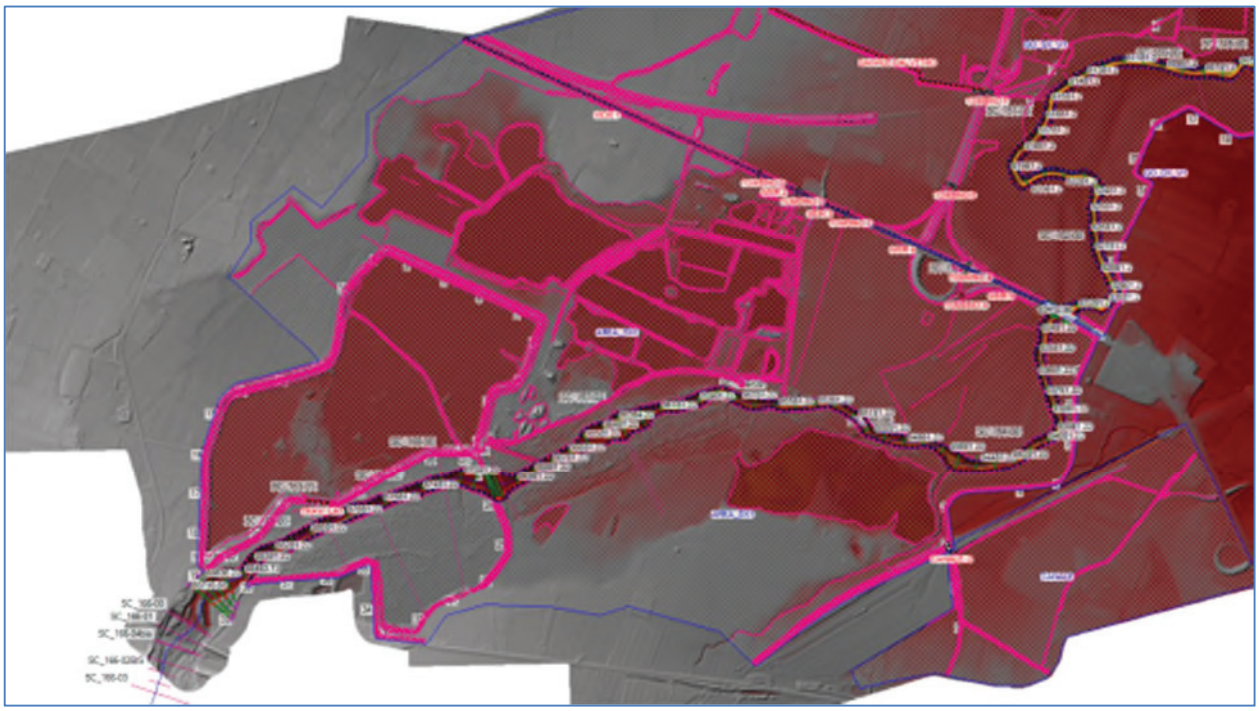


**Fig. 22 Rappresentazione del DTM dell'area di espansione libera compresa tra la cassa di espansione e l'autostrada A1**

Inoltre nella schematizzazione sono stati considerati i vari fornici, tombini e sottopassi presenti sia in corrispondenza del rilevato dell'autostrada A1 sia in prossimità dello svincolo di Campogalliano e del collegamento con l'autostrada A22 (Fig. 23).

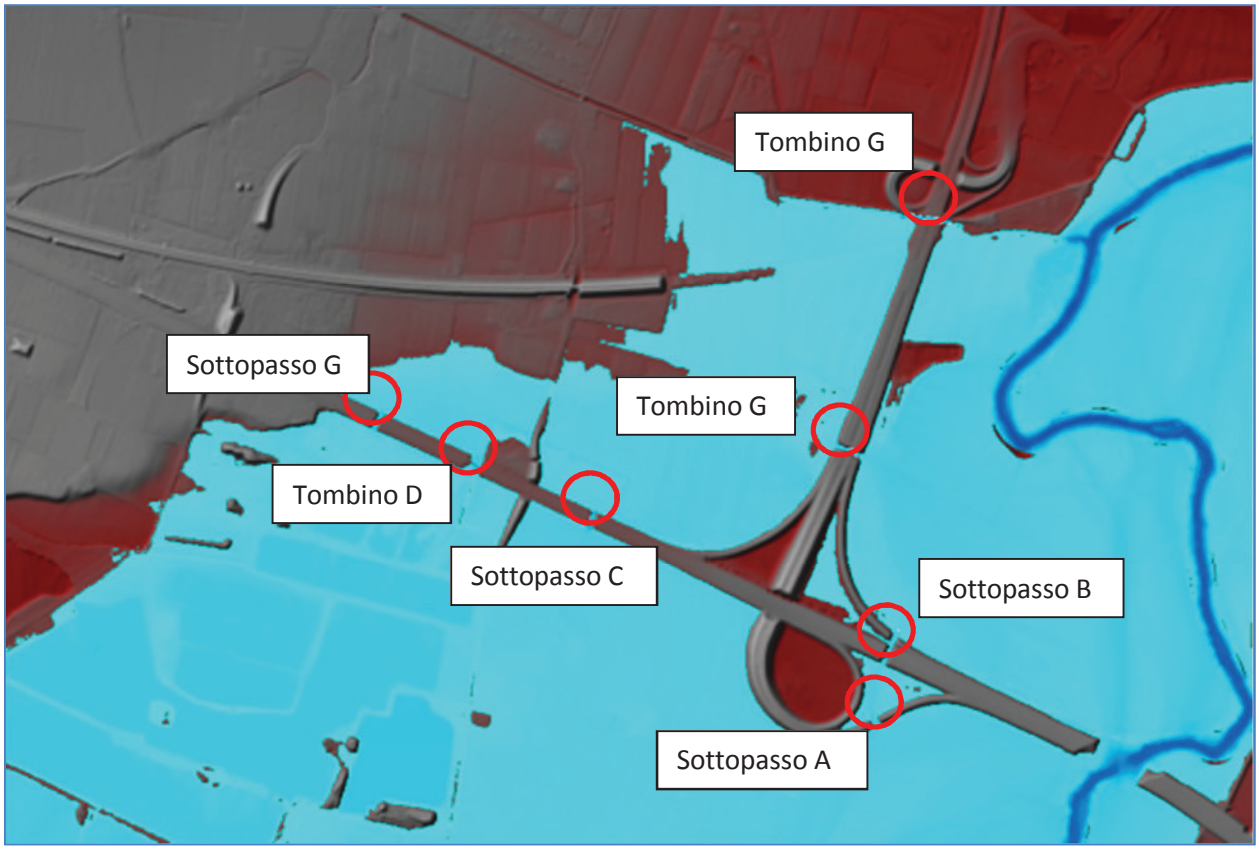



**Fig. 23 Schematizzazione dei fornici, sottopassi e tombini nel modello 2D**

I tombini sono stati schematizzati come *"connection culvert"* interni alla schematizzazione bidimensionale.

Il sottopasso G costituisce un sottopasso autostradale della A1. Le dimensioni del fornice sono 4x4,15 m con una lunghezza di circa 40 m.

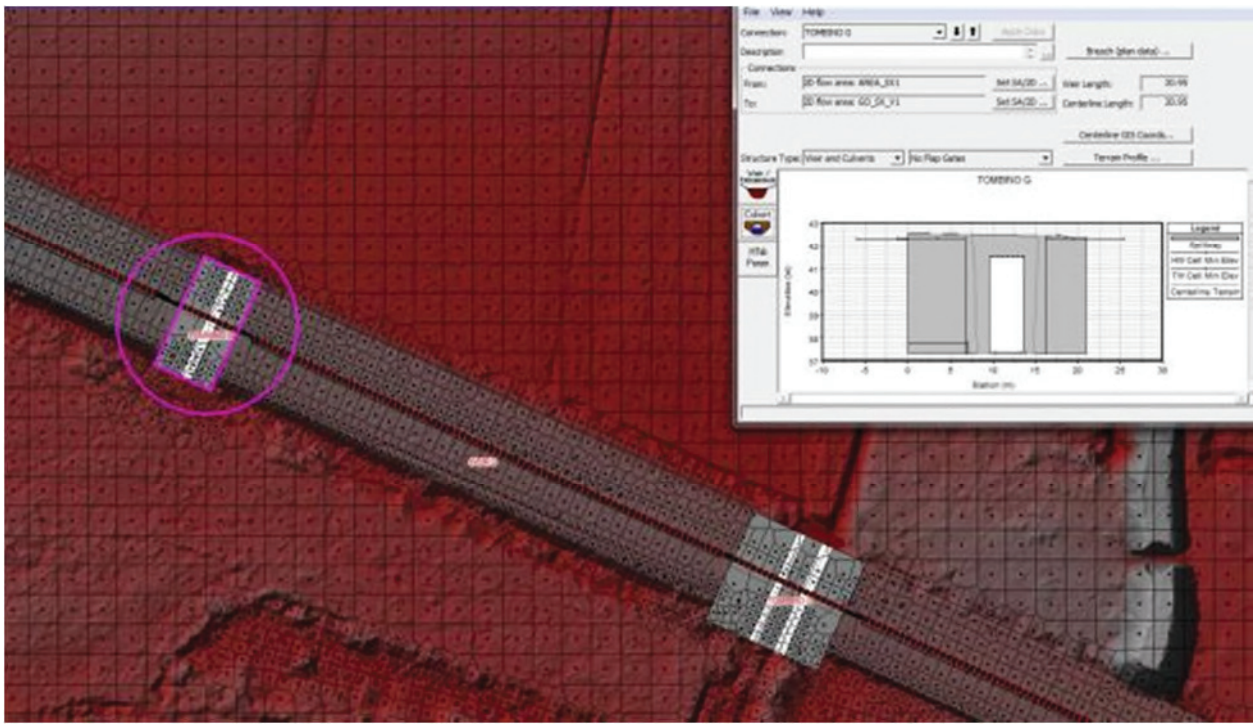



**Fig. 24 Implementazione del sottopasso G**

Il tombino denominato D ingloba due differenti fornici, il più piccolo di dimensioni 3X1,3 m mentre il più grande misura 4x2,37; entrambe di lunghezza pari a circa 40 m.

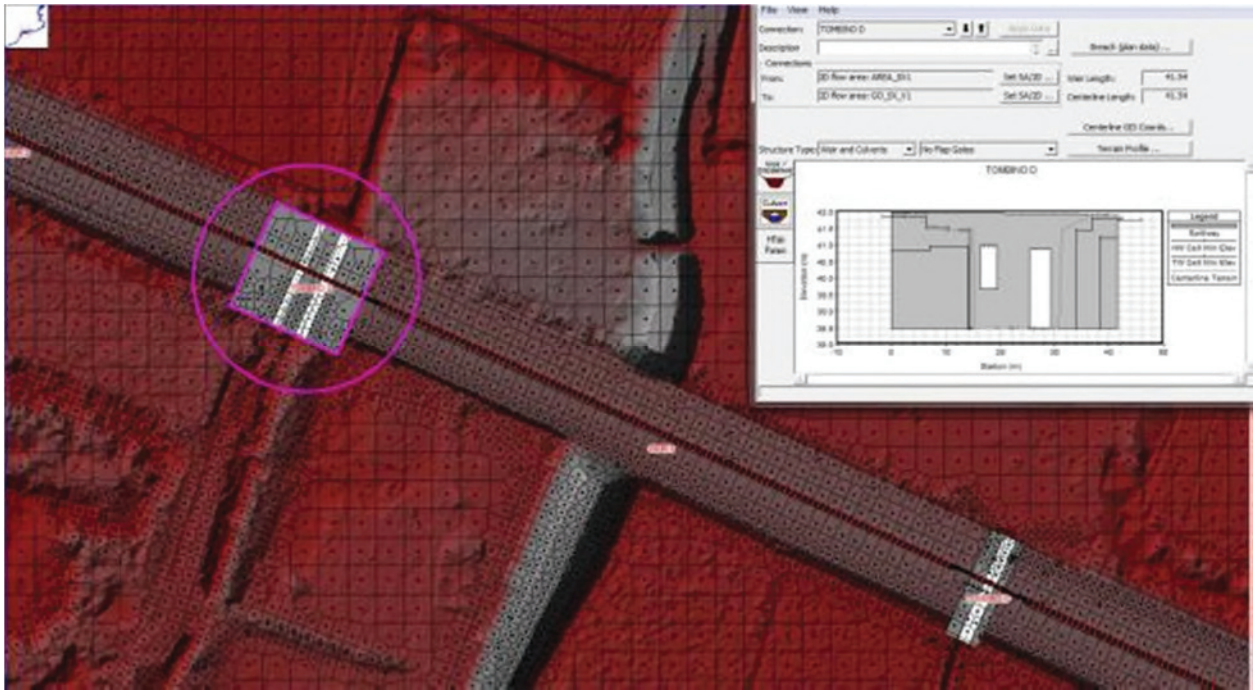



**Fig. 25 Implementazione del tombino D**

Il sottopasso C costituisce un sottopasso dell'autostrada A1 con dimensioni 4x4,15 e lunghezza 40 m.

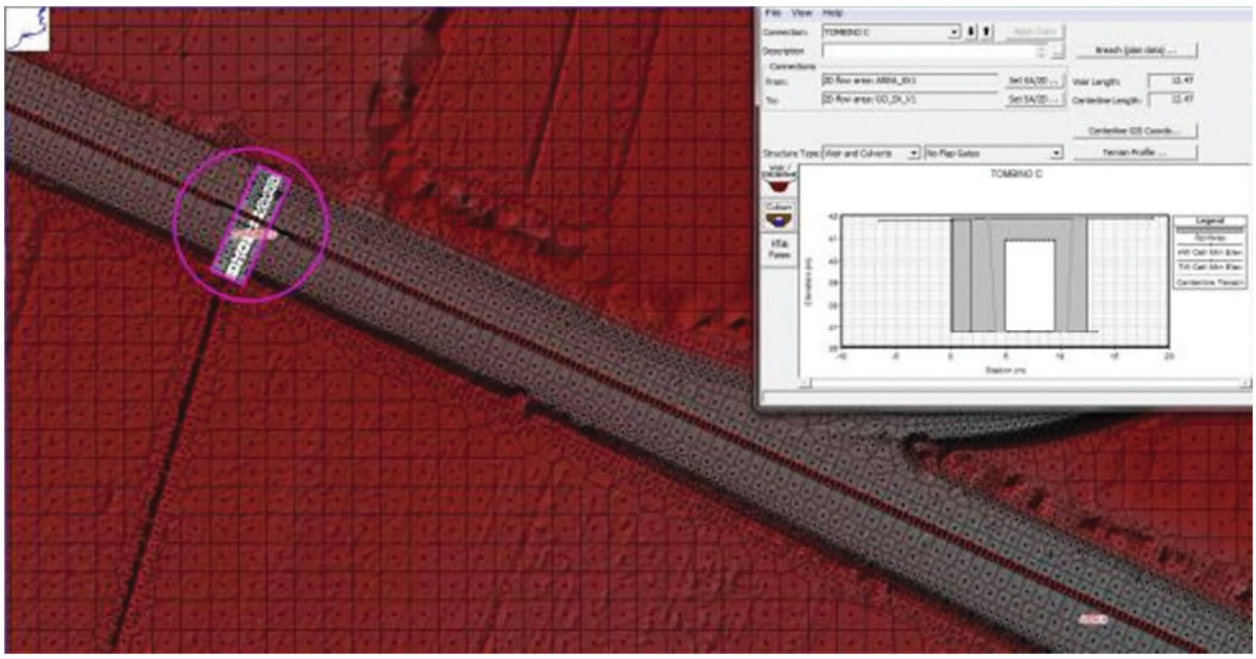


**Fig. 26 Implementazione del sottopasso C**

Il sottopasso A costituisce un sottopasso della rampa di svincolo di Campogalliano. Le dimensioni del sottopasso 4,5x4,15 m con lunghezza pari a circa 20 m.

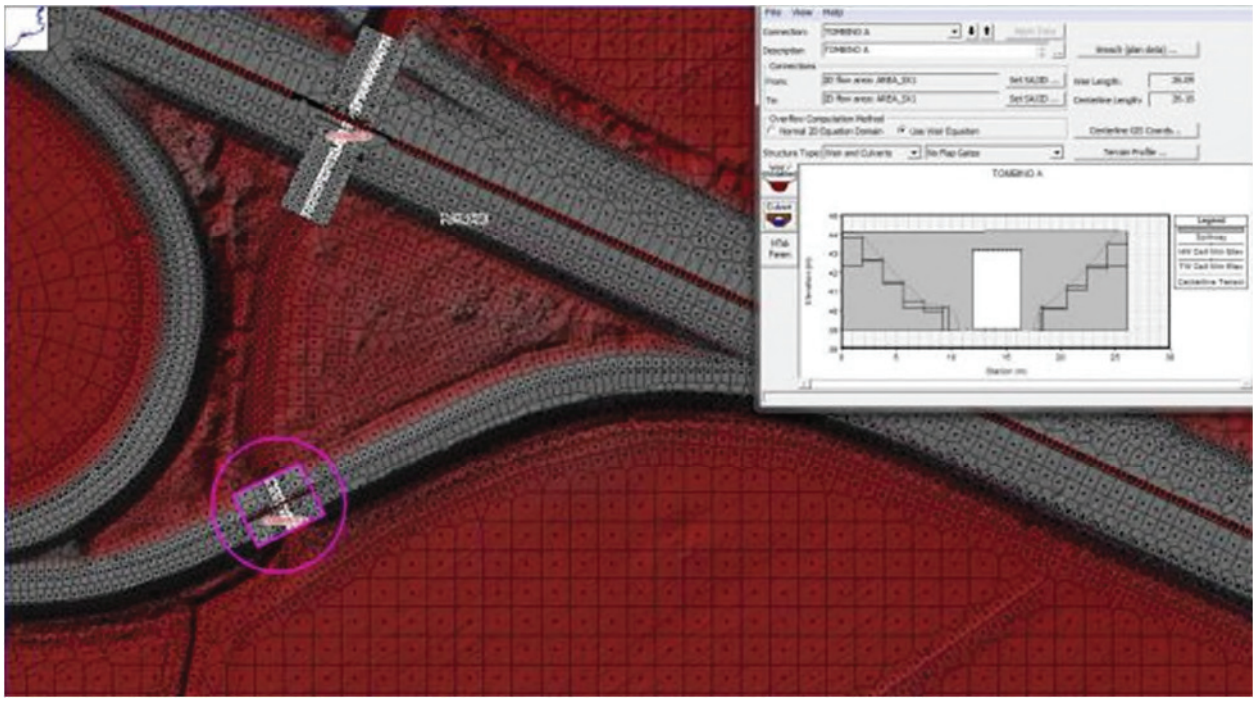


**Fig. 27 Implementazione del sottopasso A**

Con il sottopasso B si completa la schematizzazione dei sottopassi nel tratto in esame dell'autostrada A1. Le dimensioni sono 4,5x4,15 m per una lunghezza complessiva di circa 70 m.

Infine lungo il tratto della A22 è stato rappresentato il sottopasso E, di dimensioni 4x4,15 m e lunghezza 60 m, e il tombino idraulico del canale Calvetro, tombino F, di dimensioni 4x4,15 m e lunghezza 100 m circa.

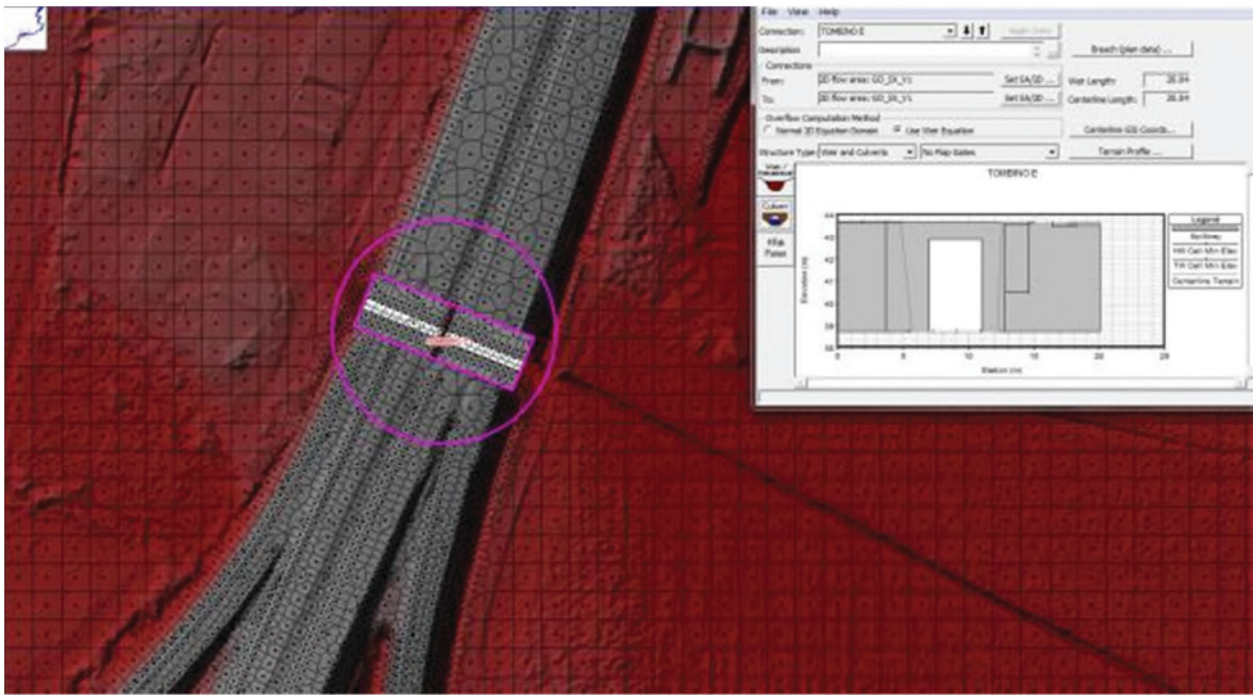


**Fig. 28 Implementazione del sottopasso E**

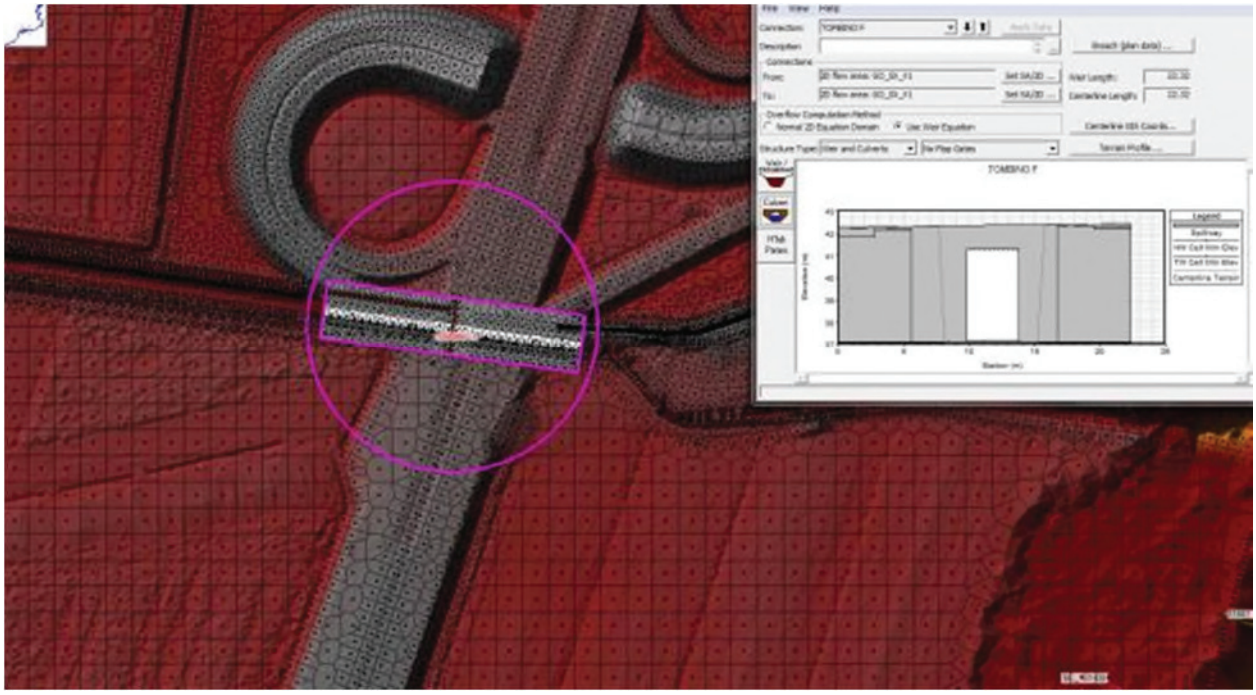


**Fig. 29 Implementazione del tombino F**

### *5.1.1.4. Tratto arginato*

Il tratto arginato con continuità inizia, come detto in precedenza, poco a valle della cassa di laminazione e si sviluppa per una lunghezza di circa 60 km in territorio emiliano e di altri 28 km in quello lombardo.

Il modello geometrico del tratto è stato costruito mediante le sezioni trasversali dell'alveo del rilievo 2015 per la descrizione dell'alveo attivo e con i dati del DTM laser-scanner prima citato per la descrizione 2D di tutte le aree golenali.

In alcuni casi la descrizione dell'alveo inciso fornita dalle sezioni topografiche è stata integrata con ulteriori sezioni derivate direttamente dal DTM 2015 per le motivazioni già descritte. L'estensione del modello arriva a comprendere l'intera asta del fiume fino al Po; la ricostruzione di dettaglio con l'implementazione bidimensionale delle aree golenali è stata effettuata solo per il tratto di intervento entro il confine regionale dell'Emilia Romagna.

**Fig. 30 Confini del limite regionale**

Di seguito nella Fig. 31 è rappresentato un esempio della posizione planimetrica delle sezioni mentre nelle Fig. 32, Fig. 33, Fig. 34, Fig. 35 e Fig. 36 si riportano gli stralci planimetrici con le schematizzazioni delle aree 2D del modello idraulico.

**Fig. 31 Esempio di schematizzazione delle sezioni trasversali inserite nel modello**

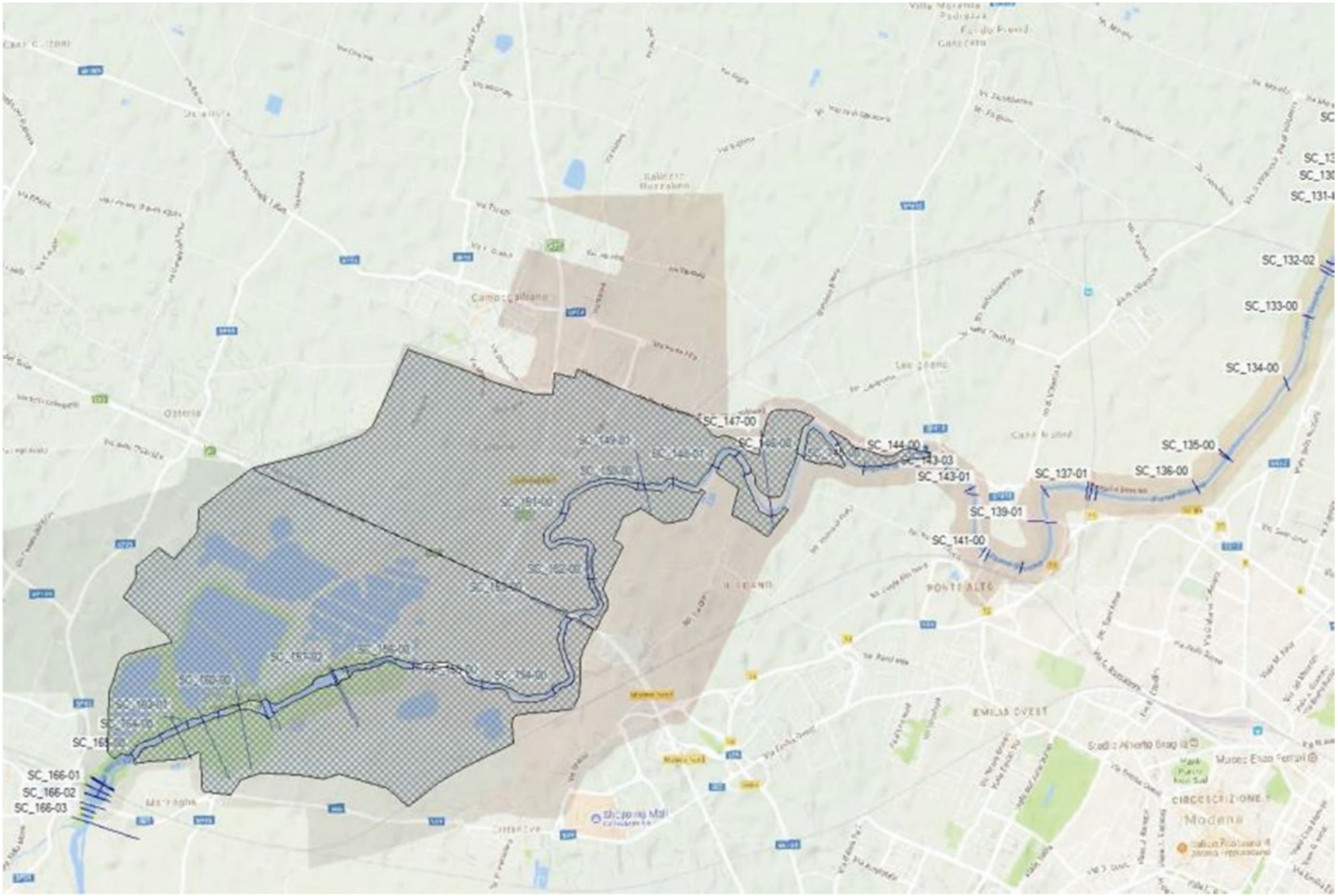



**Fig. 32 Schematizzazione aree 2D del modello idraulico**

**Fig. 33 Schematizzazione aree 2D del modello idraulico**

**Fig. 34 Schematizzazione aree 2D del modello idraulico**

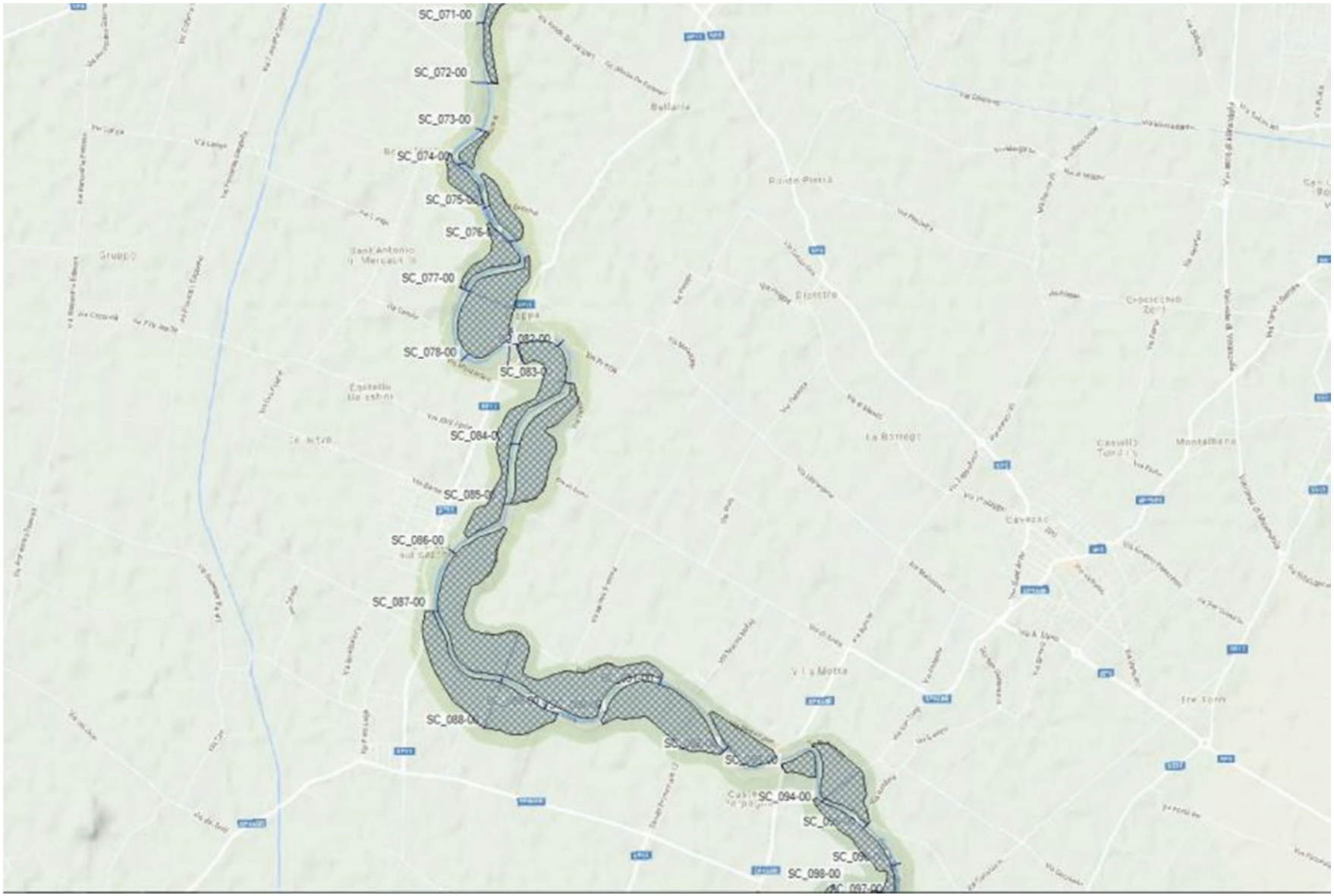



**Fig. 35 Schematizzazione aree 2D del modello idraulico**

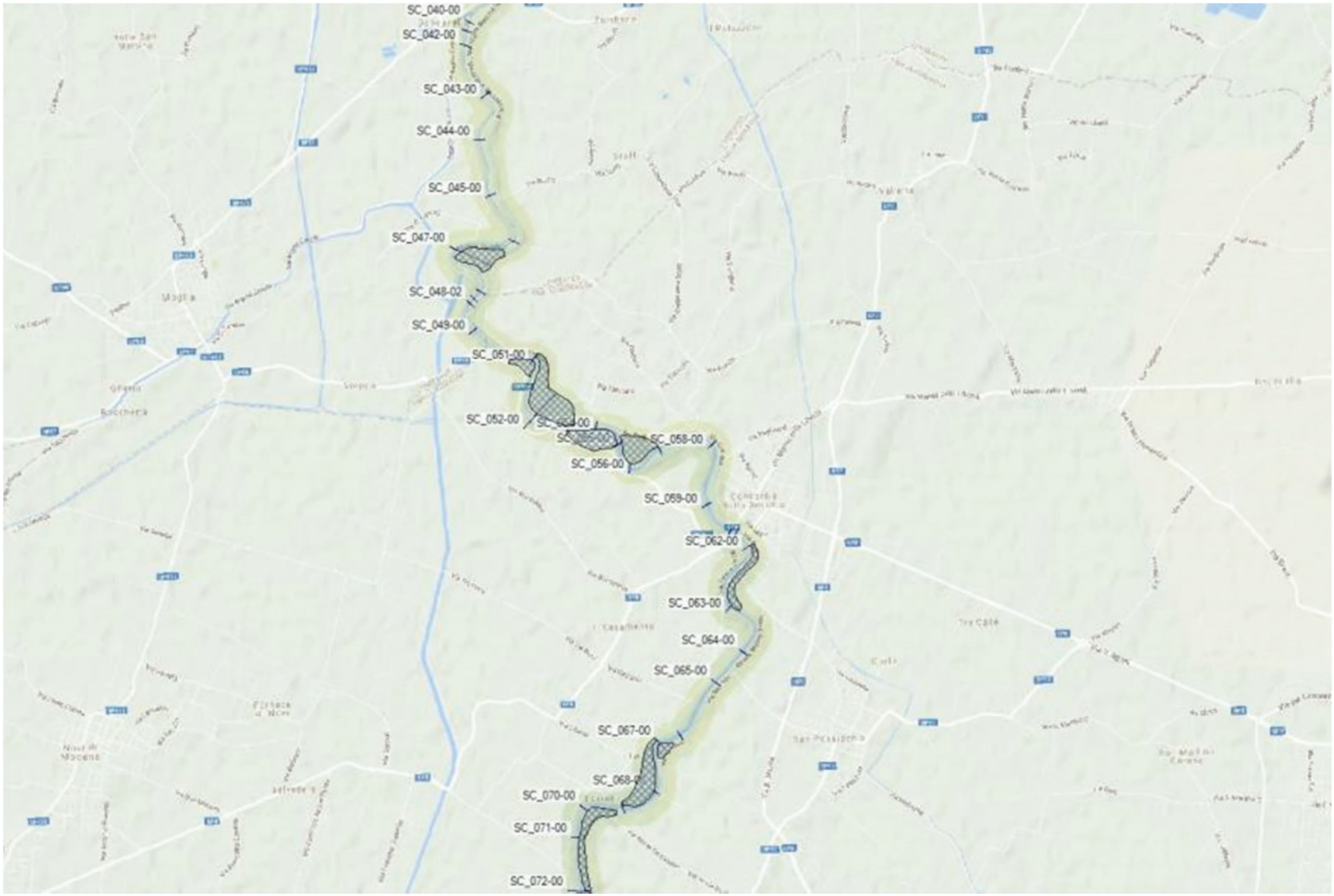



**Fig. 36 Schematizzazione aree 2D del modello idraulico**

### *5.1.1.5. Caratteristiche degli attraversamenti esistenti*

Tutti gli attraversamenti esistenti sono stati rappresentati nel modello geometrico utilizzando le informazioni disponibili derivanti dal rilievo topografico, adeguatamente controllate mediante sopralluoghi specifici. Essi sono: ponte dell'autostrada A1, ponte della Barchetta, ponte Alto, ponte SP413, ponte FF.SS (Modena – Mantova), ponte pedonale (valle FF.SS), ponte Bailey monte TAV, ponte TAV, ponte dell'Uccellino (ponte Basso), ponte Bacchello, ponte Motta, ponte Pioppa e il ponte di Concordia (Fig. 37).

Per il calcolo del profilo di corrente in corrispondenza delle strutture, tra le diverse opzioni offerte dal codice di calcolo, sono state selezionate le equazioni di bilancio dell'energia e quelle del metodo dei momenti, tra le quali il software seleziona in automatico la formulazione caratterizzata dalla maggiore dissipazione energetica, per il deflusso al di sotto dell'impalcato (*low flow)*; viene invece assunta la schematizzazione con deflusso in pressione e stramazzo al di sopra dell'impalcato (*pressure and weir*) per le situazioni con livello della corrente tale da interessare l'intradosso del ponte (*high flow*). Le condizioni limite per il deflusso in pressione sono definite dal programma in base al livello di corrente registrato a monte.

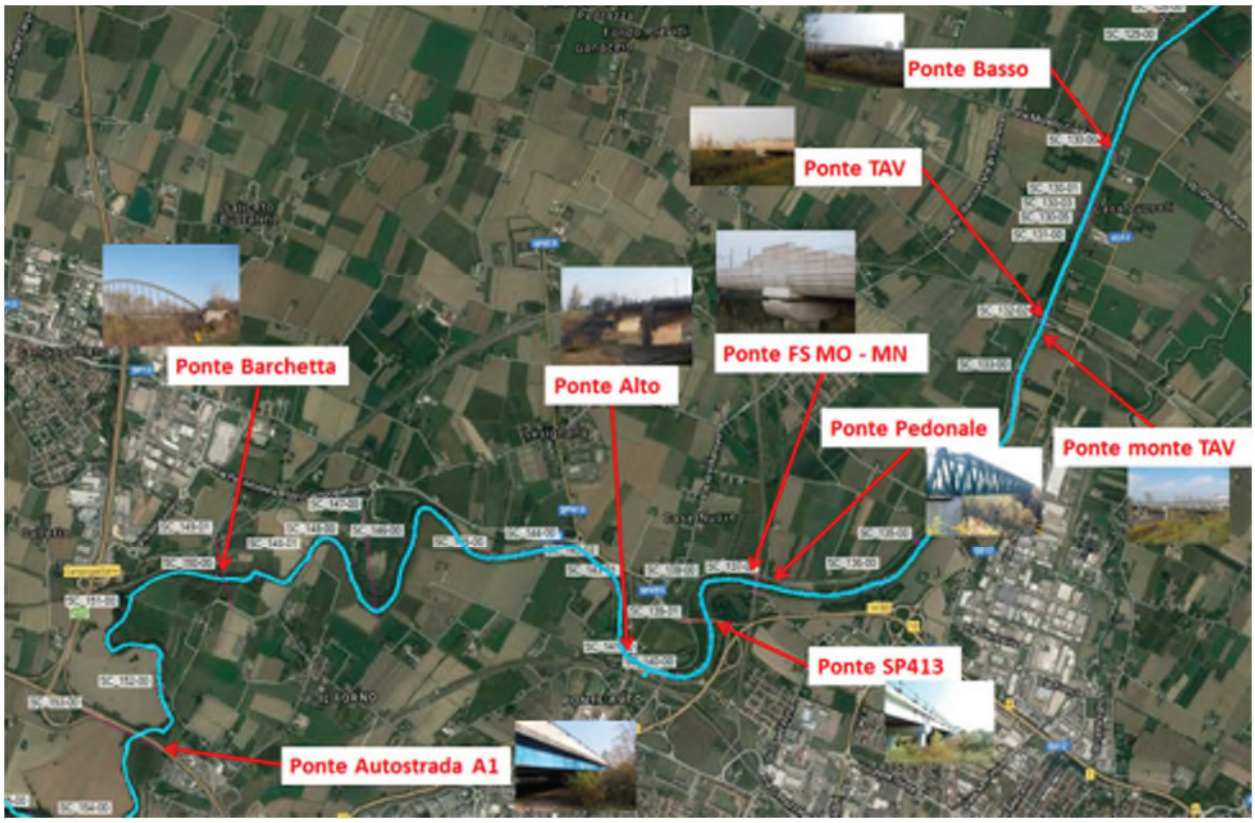



**Fig. 37 Ubicazione degli attraversamenti esistenti**

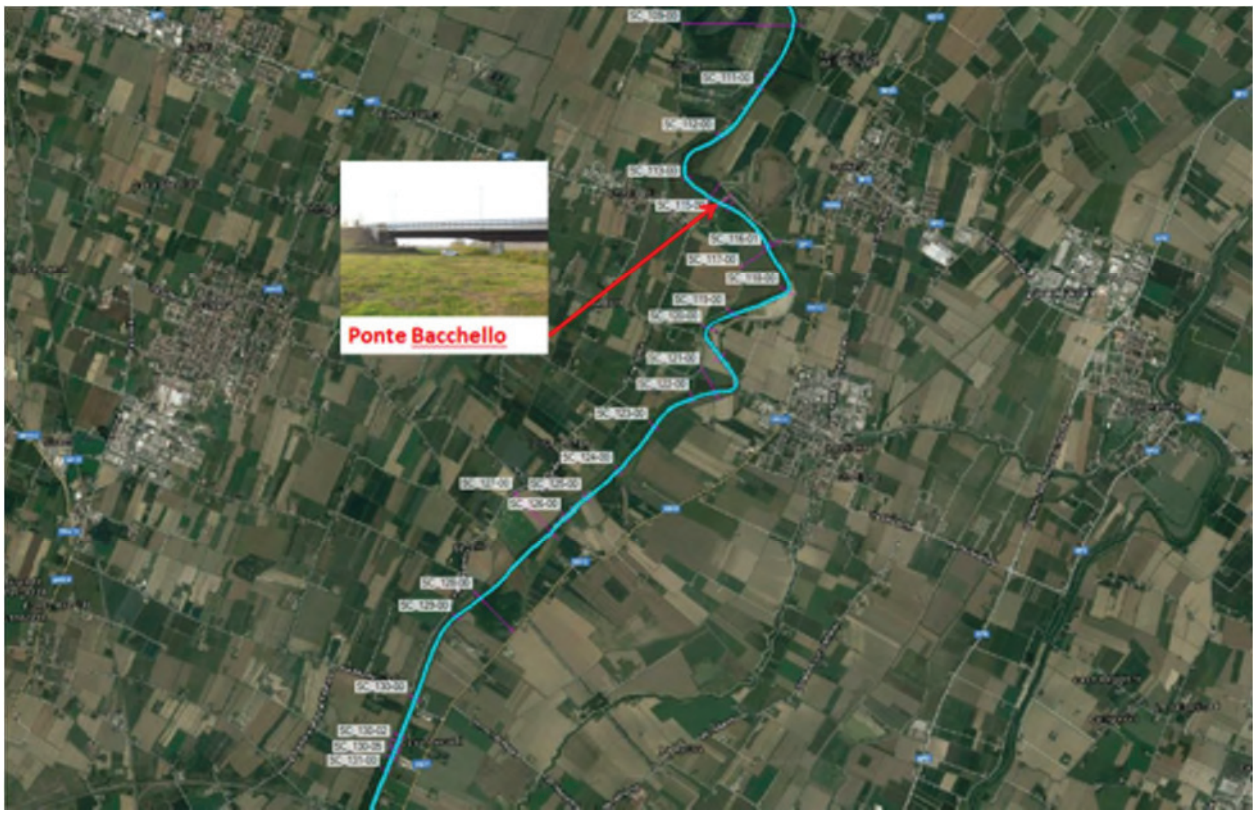



**Fig. 38 Ubicazione degli attraversamenti esistenti**

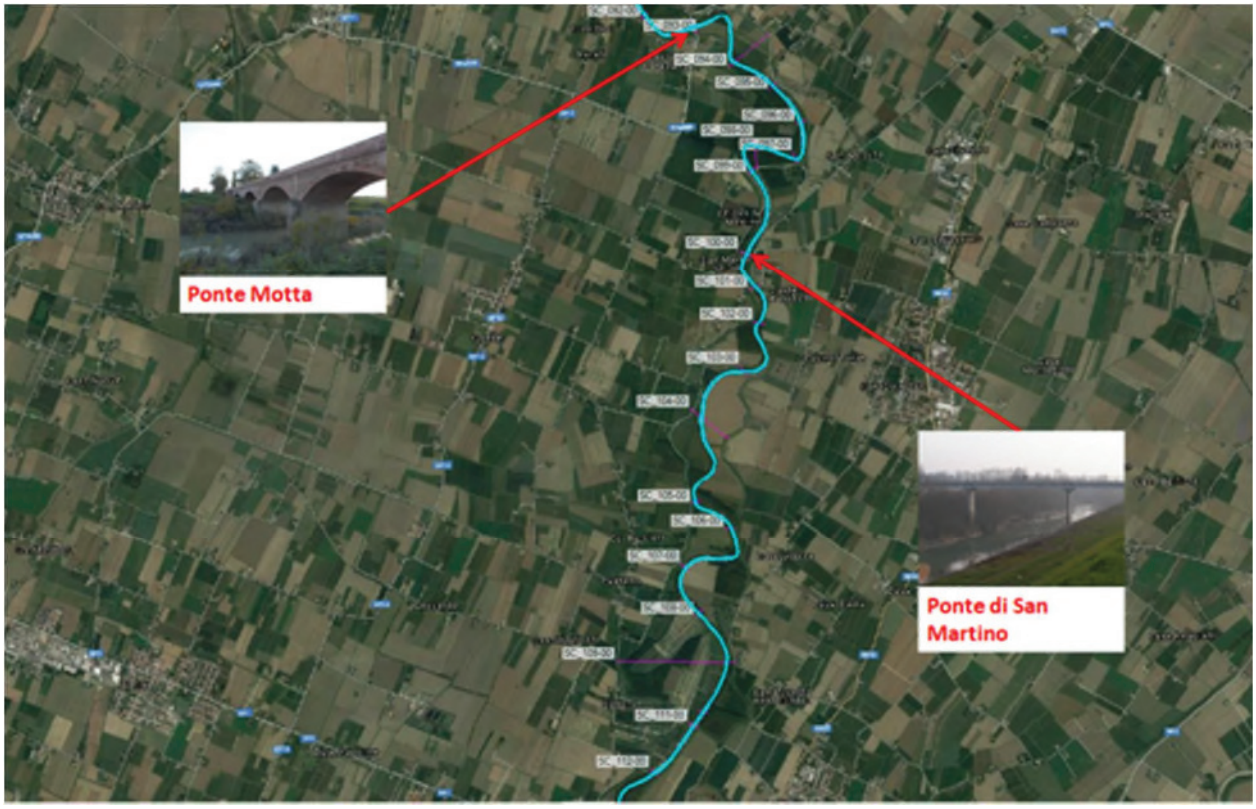



**Fig. 39 Ubicazione degli attraversamenti esistenti**

**Fig. 40 Ubicazione degli attraversamenti esistenti**

**Fig. 41 Ubicazione degli attraversamenti esistenti**

Il ponte dell'autostrada A1 è costituito da quattro campate di lunghezza pari a circa 30 m ciascuna. La quota minima di intradosso dell'impalcato è 42,17 m s.m. Sono presenti tre pile in alveo ciascuna con una larghezza di 2,36 m.

**Fig. 42 Vista da valle del ponte A1**

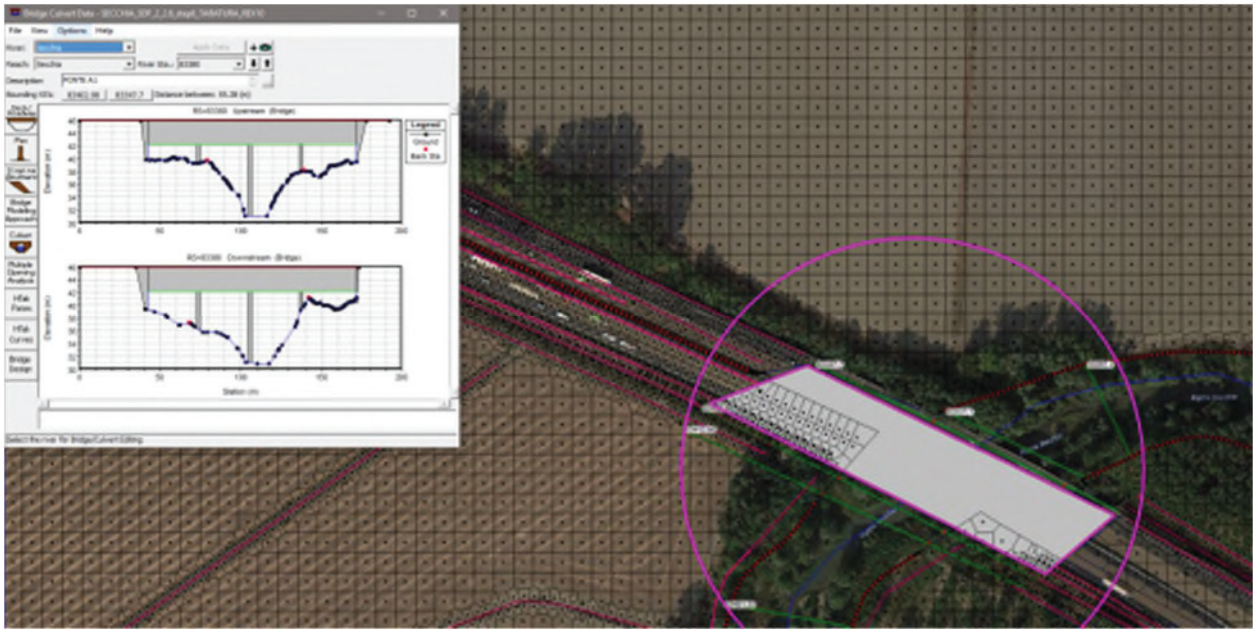


**Fig. 43 Implementazione della geometria del ponte dell'autostrada A1**

Proseguendo verso valle si incontra il ponte della Barchetta. Tale attraversamento è stato schematizzato implementando le strutture interferenti con l'alveo nella schematizzazione 2D del modello.

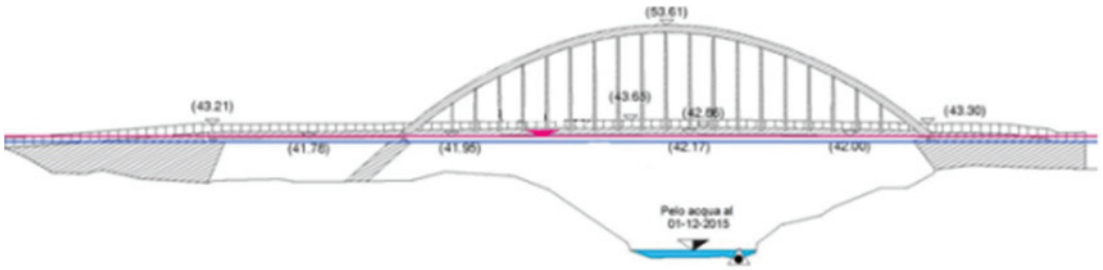



**Fig. 44 Profilo longitudinale del ponte della Barchetta**

**Fig. 45 Implementazione della geometria del ponte della Barchetta**

**Fig. 46 Vista da valle del ponte della Barchetta**

La struttura del ponte è costituita da una campata principale di lunghezza pari a circa 55 m mentre la campata secondaria in golena sinistra ha lunghezza pari a circa 20 m. La quota minima di intradosso del ponte è pari a 41,78 m s.m.

Proseguendo verso valle di circa 5 km si incontra ponte Alto. L'attraversamento è costituito da tre campate ad arco e due pile di 4 m di larghezza ciascuna. Le campate hanno una lunghezza di circa 20 m ognuna; nelle condizioni attuali le due luci esterne sono parzializzate da depositi di materiale d'alveo. Rispetto alla luce centrale la quota di intradosso in chiave è pari 39,16 m s.m. mentre in imposta è pari a 33,23 m s.m.

**Fig. 47 Vista da valle del Ponte Alto**

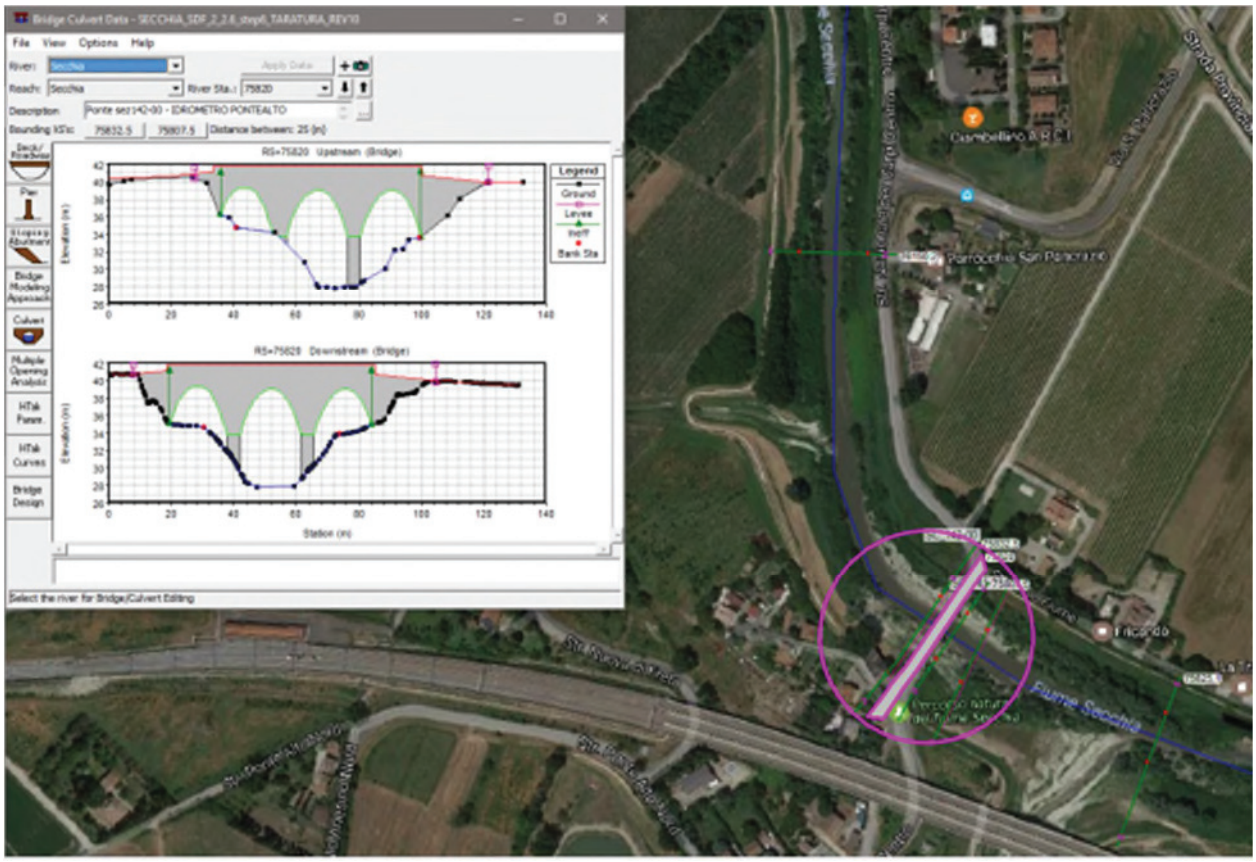



**Fig. 48 Implementazione della geometria di ponte Alto**

A una distanza di circa 1 km da ponte Alto c'è il ponte della SP 413 (Campogalliano – Carpi). Tale attraversamento è costituito da travi prefabbricate il calcestruzzo appoggiate su 7 pile aventi una larghezza ciascuna di 2,35 m. La lunghezza delle 8 campate è variabile; quelle interferenti con l'alveo di piena variano da 29,5 m a 32 m. La quota minima di intradosso è di 39,89 m s.m.

**Fig. 49 Vista da valle del ponte SP 413 (Campogalliano – Carpi)**

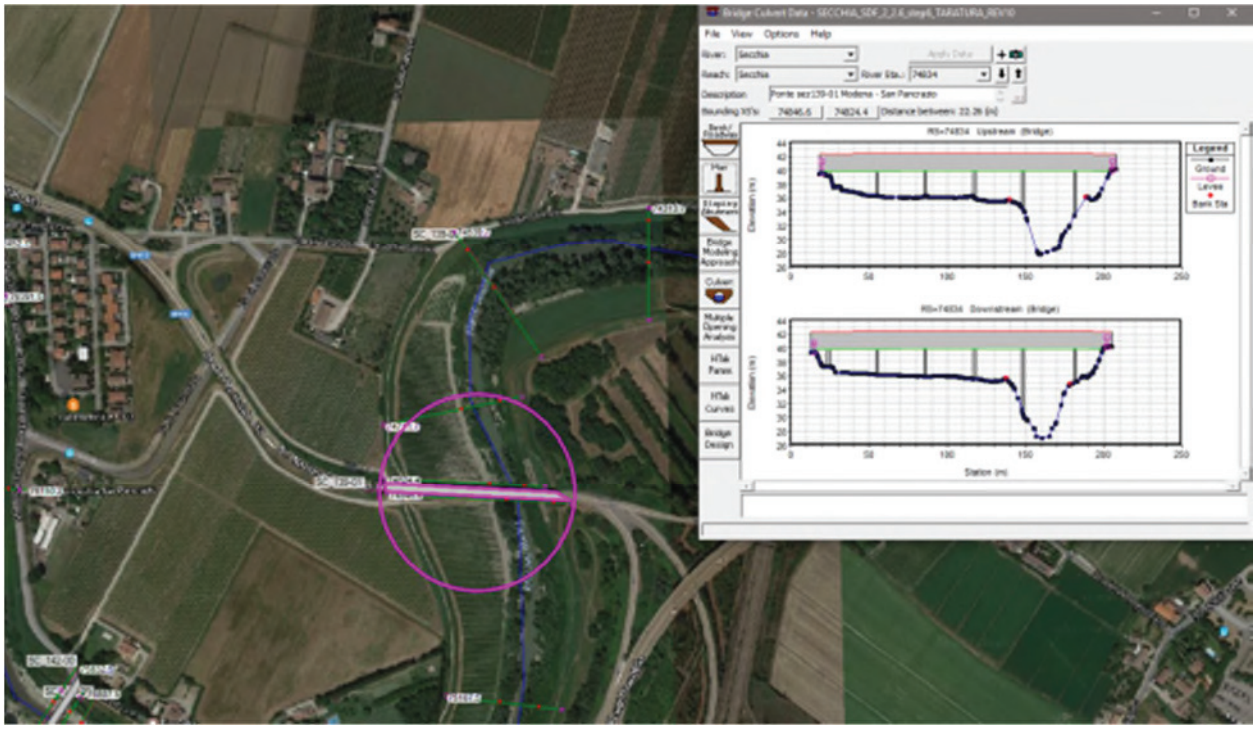


**Fig. 50 Implementazione della geometria del ponte della SP 413**

Proseguendo a valle di 1 km si incontra il ponte della FF.SS (Modena – Mantova). La struttura è formata da due pile in alveo di larghezza pari a circa 4,5 m ciascuna, e da tre campate, per una lunghezza complessiva dell'impalcato da spalla a spalla di circa 132 m. La quota minima di intradosso è di 40,05 m s.m.

**Fig. 51 Vista da valle del ponte FF.SS (Modena – Mantova)**

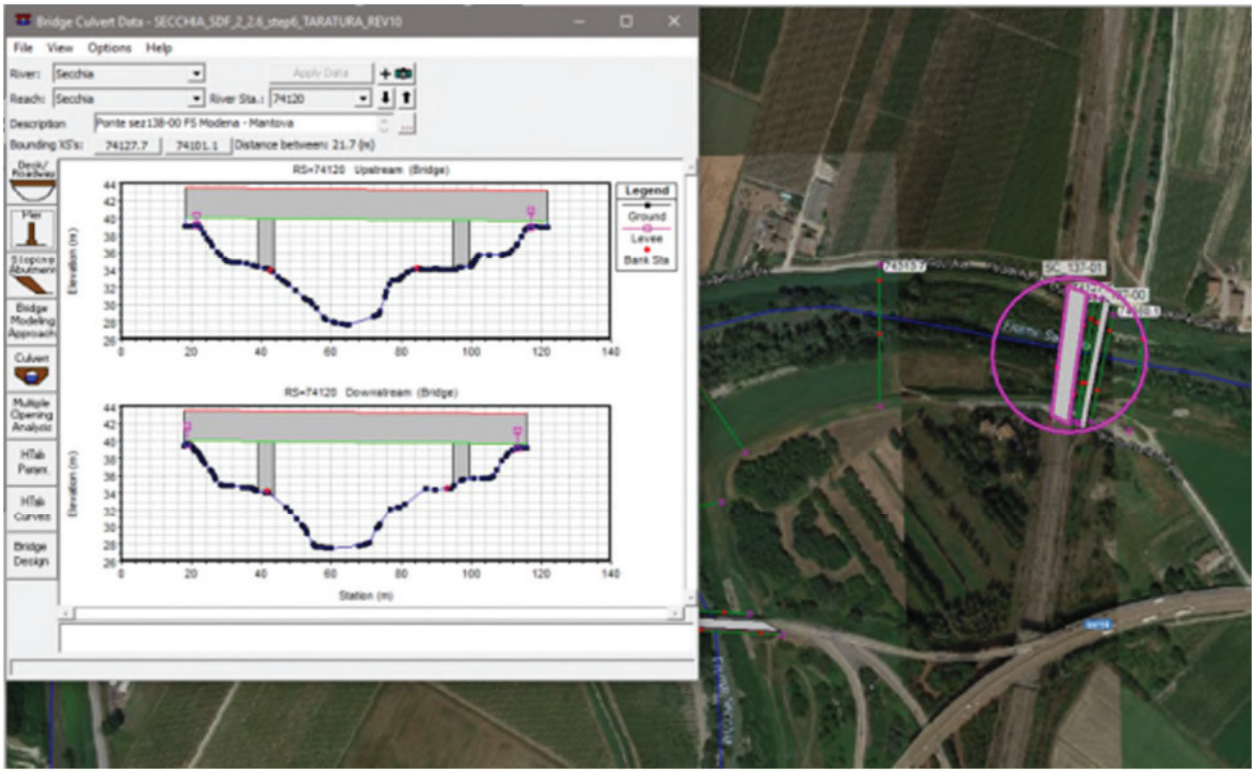



**Fig. 52 Implementazione della geometria del ponte della FF.SS (Modena – Mantova)**

Subito dopo il ponte della FF.SS. sopra descritto c'è un ponte tipo Bailey pedonale. Il ponte è costituito da due pile in alveo di larghezza pari a circa 3,5 m ciascuna. La lunghezza complessiva dell'impalcato è di circa 134 m e la campata centrale, con ampiezza maggiore, è lunga 51 m circa. La quota minima di intradosso dell'implacato è 40,41 m s.m.

**Fig. 53 Vista da valle del ponte pedonale tipo Bailey**

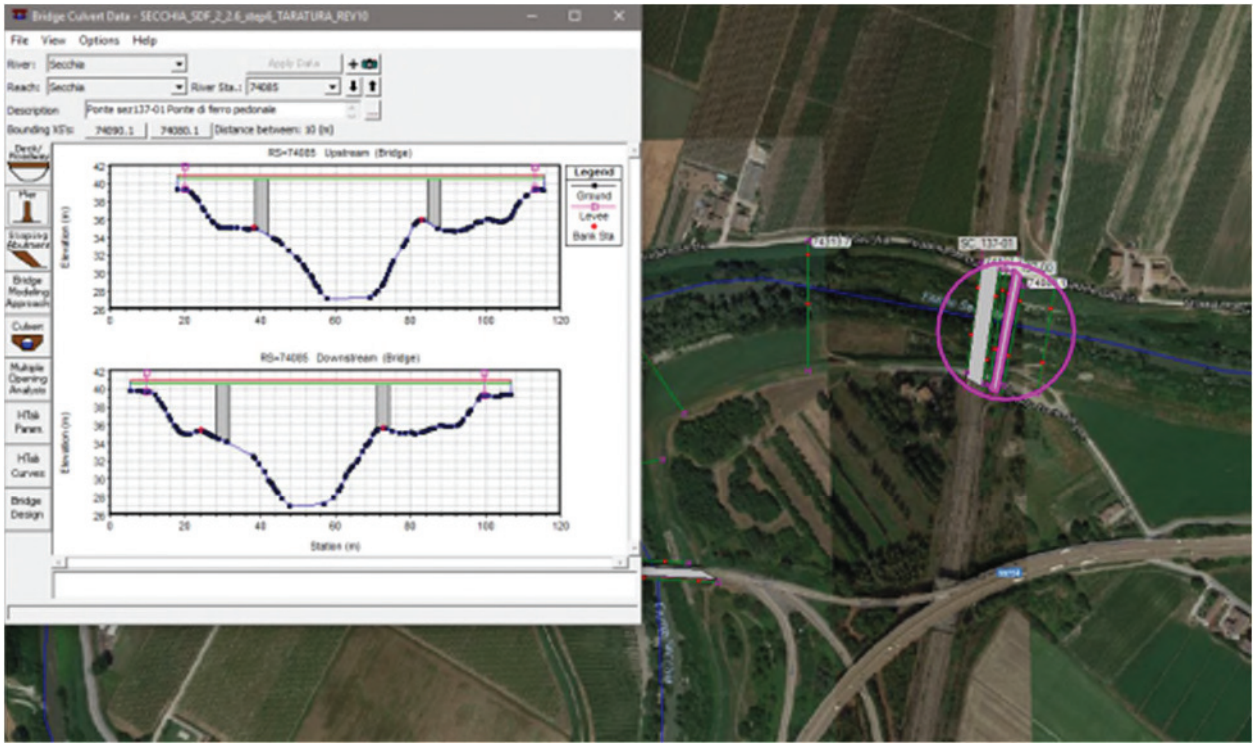



**Fig. 54 Implementazione della geometria del ponte pedonale**

Oltrepassata la città di Modena proseguendo verso valle lungo l'asta del fiume si susseguono il ponte della TAV e pochi metri più a monte un ponte in acciaio tipo Bailey (ponte monte TAV).

Il ponte a monte della TAV è composto da due pile in alveo di larghezza pari a 0,8 m ognuna, che determinano tre campate per una lunghezza complessiva dell'impalcato pari a circa 90 m. La campata centrale ha una lunghezza maggiore delle altre due, simmetriche, ed è di circa 33,3 m. La quota minima di intradosso dell'attraversamento è 38,55 m s.m.

**Fig. 55 Vista da valle del ponte monte TAV**

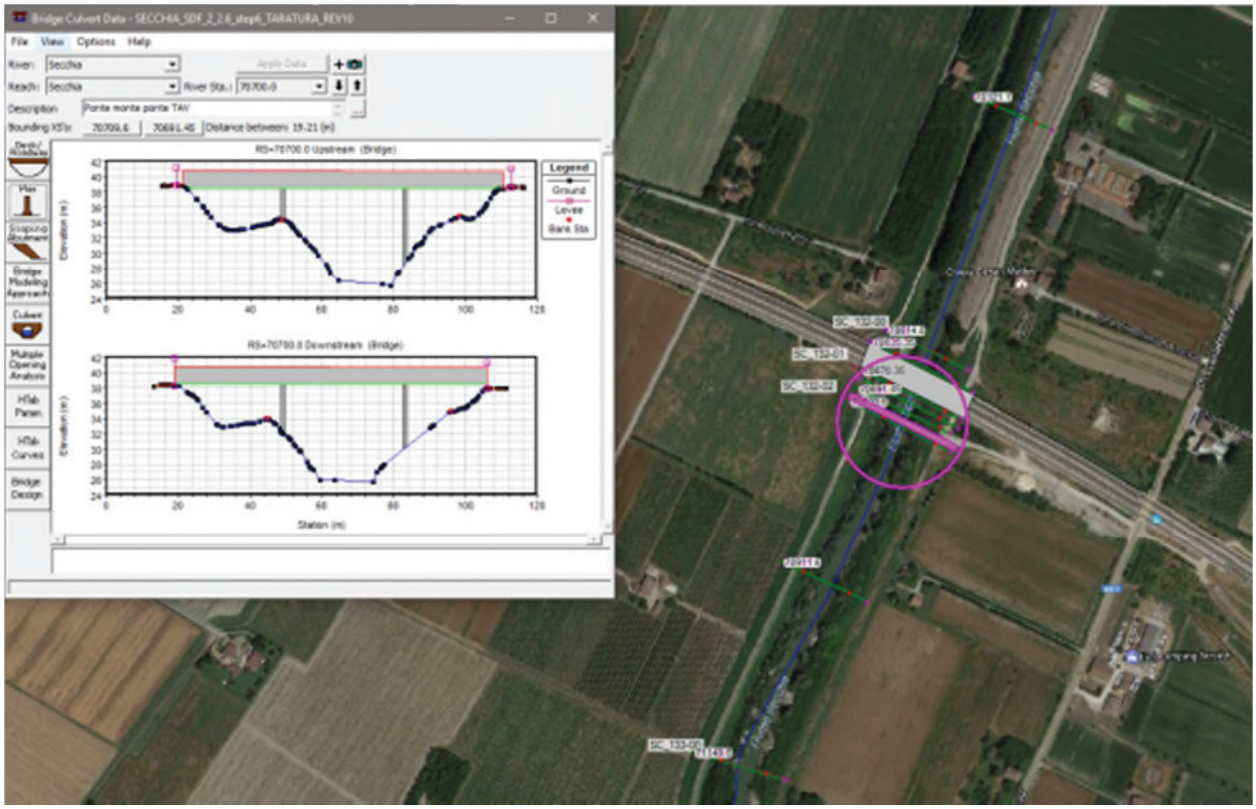



**Fig. 56 Implementazione della geometria del ponte a monte TAV**

Per quanto concerne il ponte TAV, la struttura è formata da due pile in alveo di larghezza pari a 4,5 m ciascuna. In corrispondenza dell'alveo il ponte ha una quota minima di intradosso dell'impalcato pari a 39,42 m s.m. e la luce della campata centrale di circa 51 m.

**Fig. 57 Vista da valle del ponte TAV**

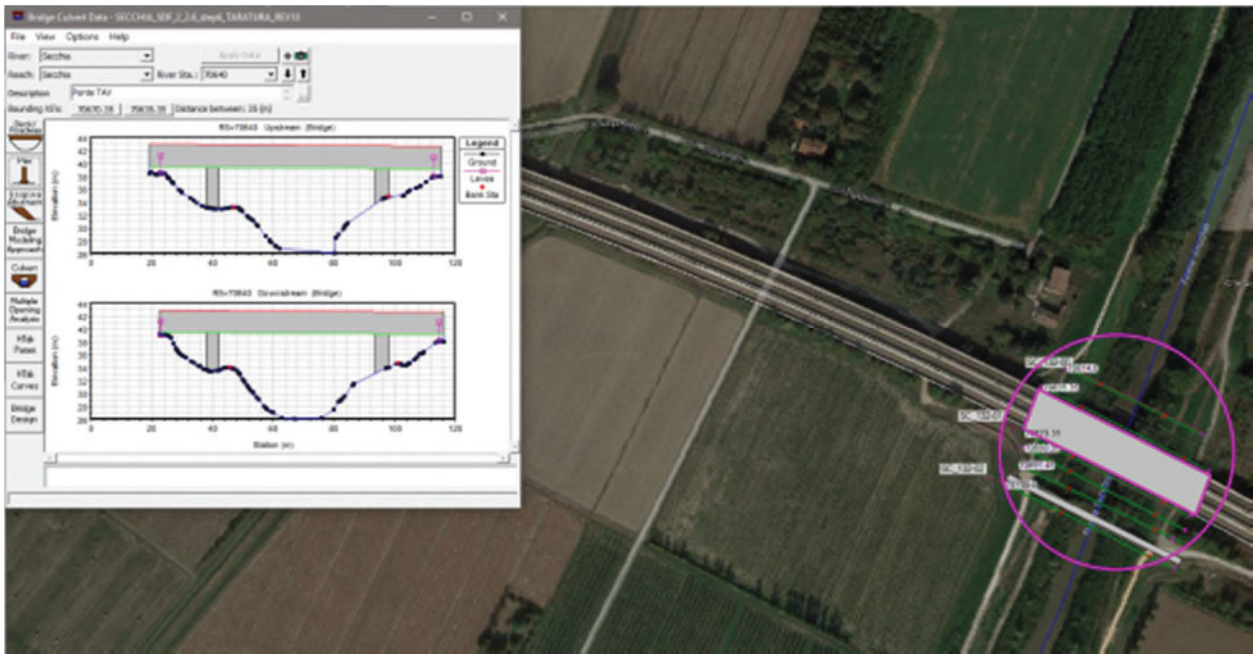


**Fig. 58 Implementazione della geometria del ponte TAV**

Il ponte dell'Uccellino o ponte Basso è costituito da una struttura metallica tipo Bailey, sostenuta da due pile in alveo di larghezza cadauna pari a 1,5 m. L'impalcato ha una leggera curvatura sul piano verticale, con una quota massima dell'intradosso in chiave a 37,74 m s.m. e in imposta a quota 37,46 m s.m.

**Fig. 59 Vista da valle del ponte dell'Uccellino (ponte Basso)**

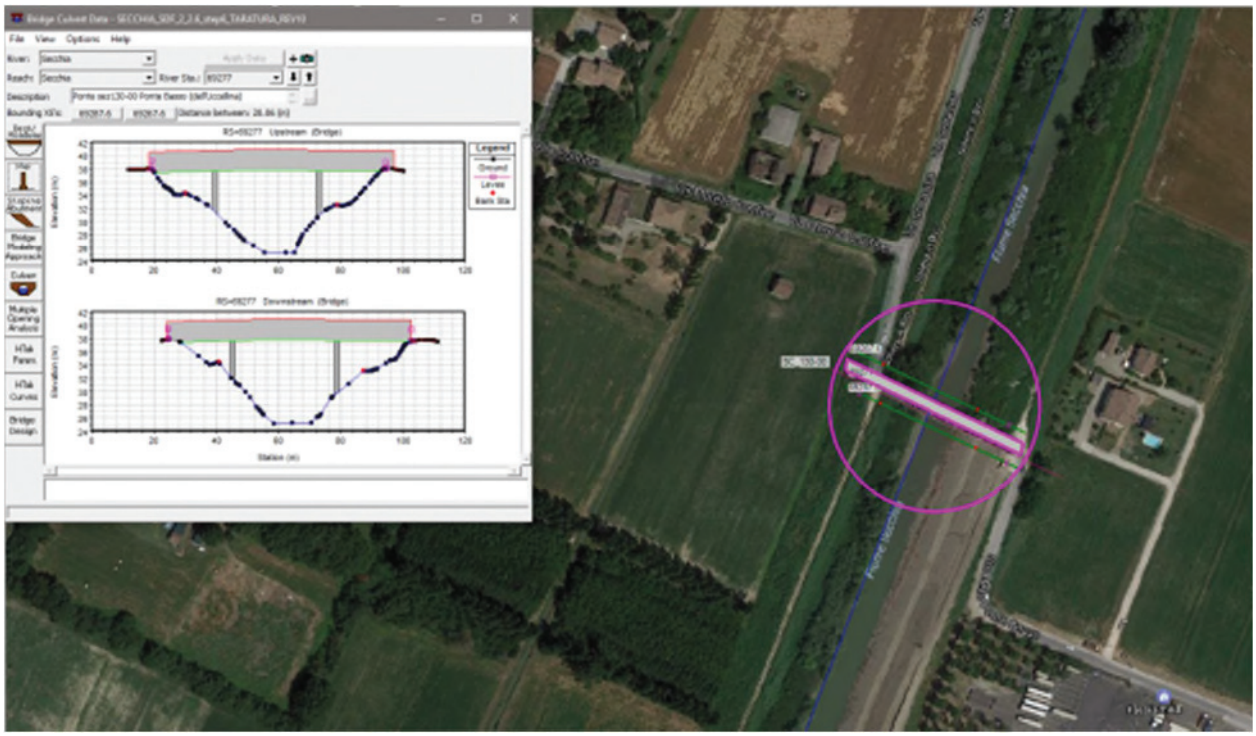


**Fig. 60 Implementazione della geometria del ponte dell'Uccellino**

Proseguendo verso valle, ponte Bacchello è costituito da due rilevati di approccio al ponte che entrano nell'area golenale e da struttura in con travi in acciaio sostenuta da due pile che costituiscono tre campate di cui quella centrale la più grande di circa 48 m. La quota di intradosso della struttura è a 34,92 m.

**Fig. 61 Vista di ponte Bacchello**

**Fig. 62 Implementazione della geometria di ponte Bacchello**

Il ponte San Martino ha 3 pile che sorreggono le quattro campate dell'intera struttura. L'alveo di magra si trova in corrispondenza della secondo campata in cui è localizzata anche la chiave di volta della struttura che è leggermente inarcuata, la cui quota di intradosso è pari a 33,54 m s.l.m.. Le due imposte localizzate in prossimità del collegamento con i rilevati arginali hanno quota una di circa 33,36 m s.l.m.. Le quattro campate hanno una lunghezza di circa 25 m ciascuna.

**Fig. 63 Vista di ponte San Martino**

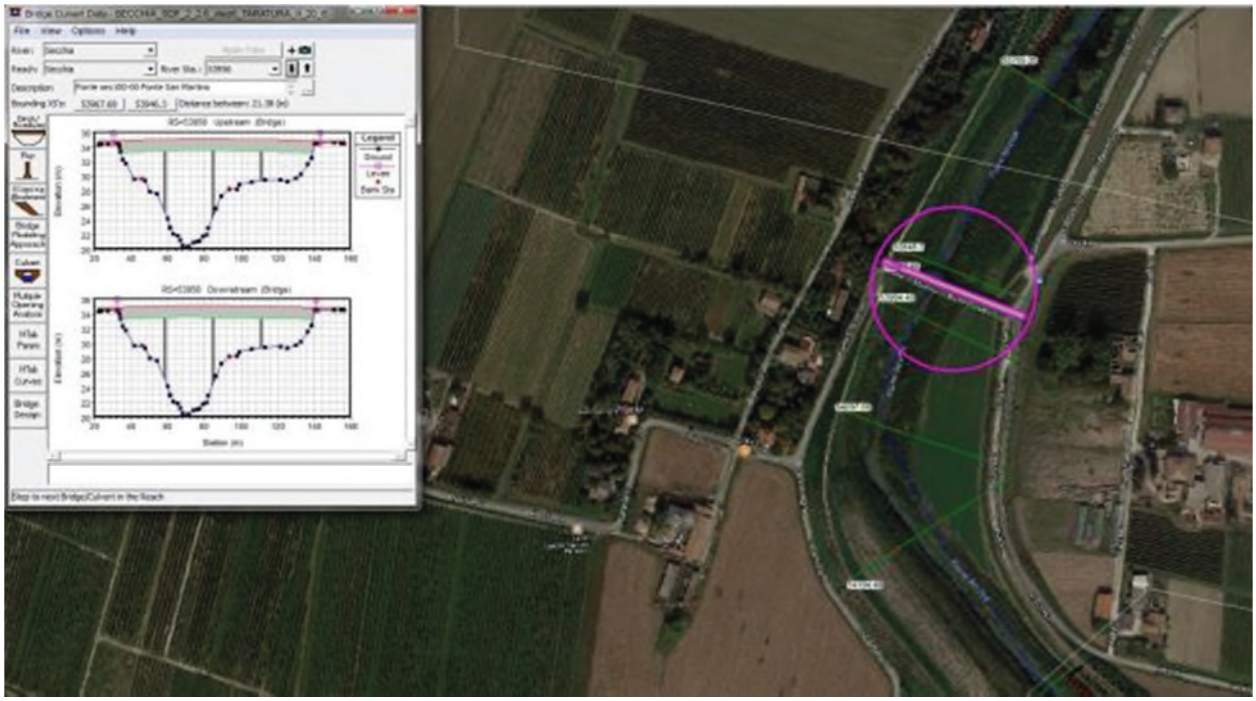


**Fig. 64 Implementazione della geometria di ponte San Martino**

Ponte Motta è composto da 5 campate e 4 pile di larghezza pari a circa 2,5 m ciascuna. La volta della campata centrale ha una quota di intradosso in chiave pari a 31,95 m s.l.m., mentre in imposta la quota è 28,76 m s.l.m.. Dai rilievi si evince come la struttura sia parzialmente occlusa, in particolare nelle campate più esterne all'alveo di magra.

**Fig. 65 Vista di ponte Motta**

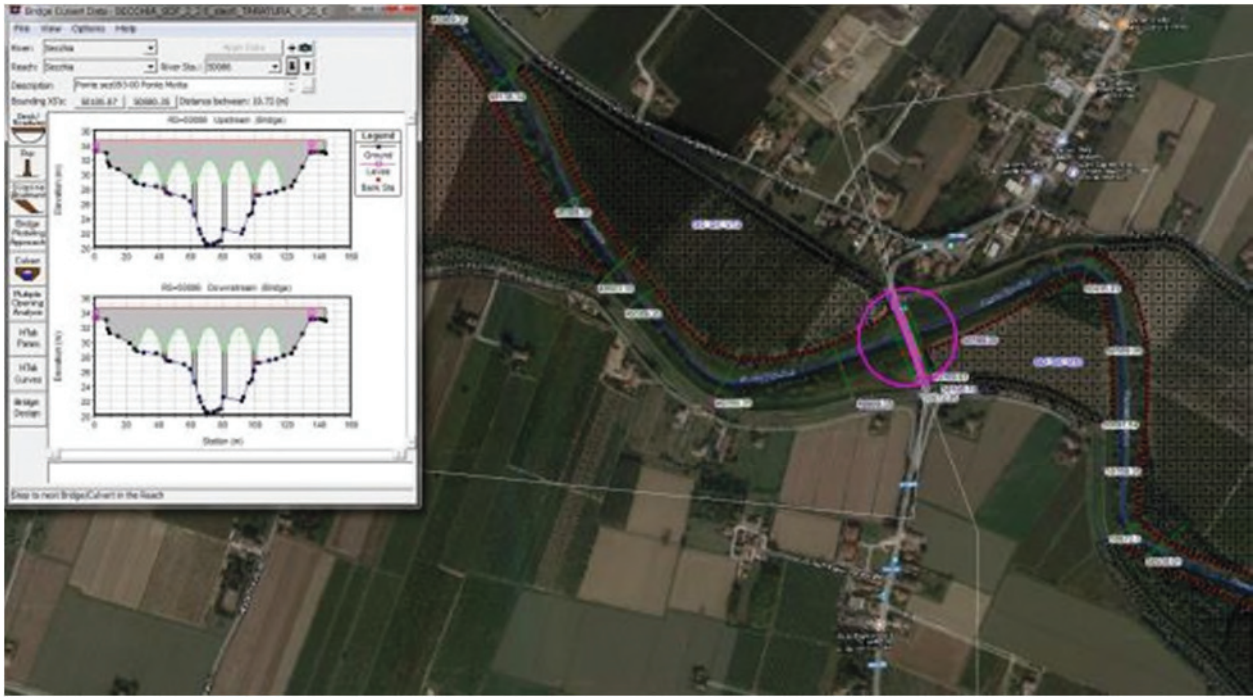


**Fig. 66 Implementazione della geometria di ponte Motta**

La struttura di ponte Pioppa è articolata come mostrato in Fig. 67, è costituita da una struttura in acciaio che costituisce la campata principale ad arco. La quota di intradosso in chiave è a 30,03 m sl.m. e la larghezza complessiva è di circa 50 m. Inoltre la struttura presenta due fornici a margine dell'arco di larghezza pari a 15 m ciascuno la cui quota di intradosso si trova a 29,20 m s.l.m..

**Fig. 67 Vista di ponte Pioppa**

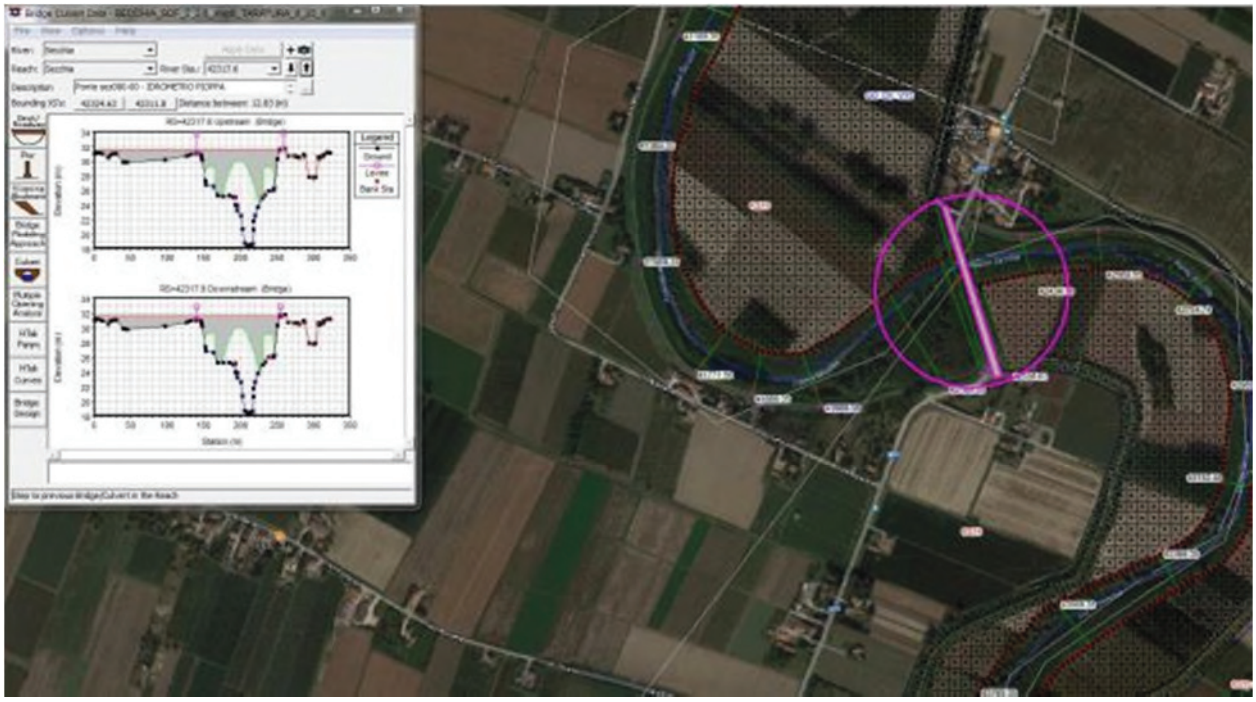


**Fig. 68 Implementazione della geometria di ponte Pioppa**

Infine a completamento della ricostruzione modellistica degli attraversamenti ricadenti all'interno del confine regionale è stato inserito il ponte di Concordia. L'attraversamento è formato da quattro campate ad arco di lunghezza pari a circa 15,5 m ciascuna. La larghezza delle tre pile è circa 2,5 m, la quota di intradosso in chiave delle arcate è a 28,05 m s.l.m. mentre in imposta è a 24,55 m s.l.m..

**Fig. 69 Vista di ponte Concordia**

**Fig. 70 Implementazione della geometria del ponte di Concordia**

### *5.1.2. Condizioni al contorno*

Come condizione al contorno di monte del modello, sono state considerate le onde di piena nella sezione SS9 (via Emilia) a monte della cassa di espansione.

Le onde di piena di progetto utilizzate per il seguente studio idraulico si riferiscono all'evento TR 20 anni con durata critica 12 e 24 ore. Si rimanda al capitolo specifico dell'analisi idrologica in cui sono dichiarati gli idrogrammi menzionati.

Per la taratura del modello invece sono state utilizzate le onde di piena relative agli eventi del dicembre 2009 e marzo 2015. Ai due eventi è possibile attribuire rispettivamente un tempo di ritorno di circa 5 anni per la piena del 2009 e di 3 anni circa per la piena del 2015. Si è preferito adottare tali eventi

rispetto ad altri precedenti, con tempo di ritorno eventualmente superiori, in quanto, essendo relativamente recenti sono maggiormente rappresentativi delle attuali condizioni morfologiche e di scabrezza dell'alveo.

Per l'evento 2009 è stato utilizzato l'idrogramma riportato nella relazione idraulica del progetto preliminare avente due picchi consecutivi con un valore massimo di colmo pari a 1030 $m^3/s$ (Fig. 71).

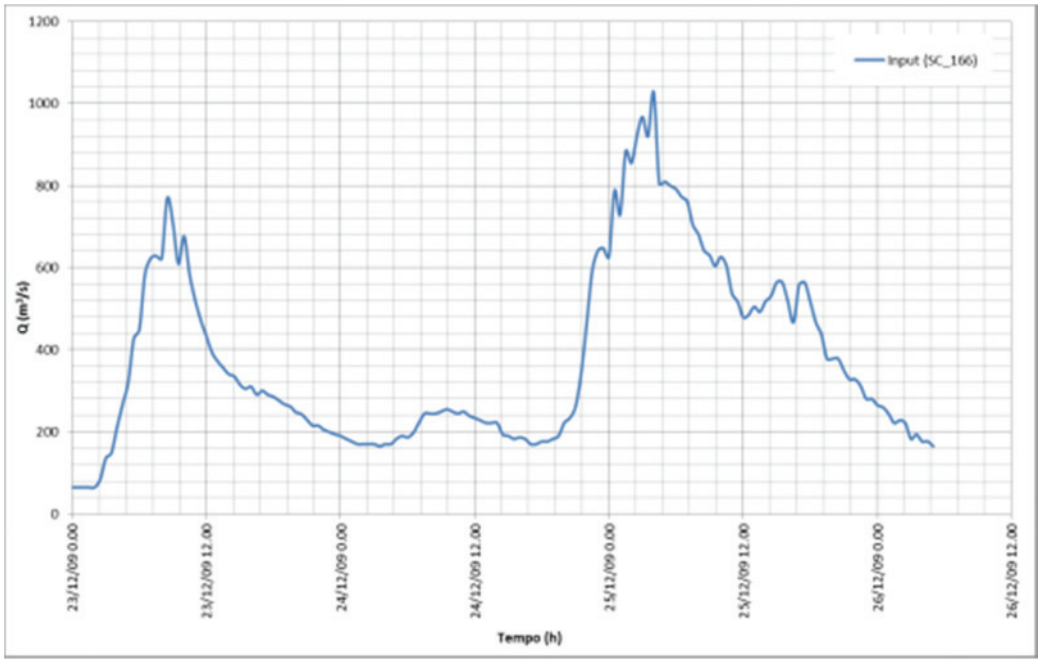



**Fig. 71 Idrogramma in portata dell'evento del dicembre 2009 registrato a monte della cassa di espansione**

Per l'evento 2015 l'idrogramma in portata è stato ricostruito sulla base dei dati forniti da AIPO, quali l'idrogramma di livello registrato nella sezione di misura della SS 9 (zero idrometrico 47,33 m s.m.) (Fig. 72) e relativa scala di deflusso aggiornata secondo i nuovi rilievi 2015 (Fig. 74).

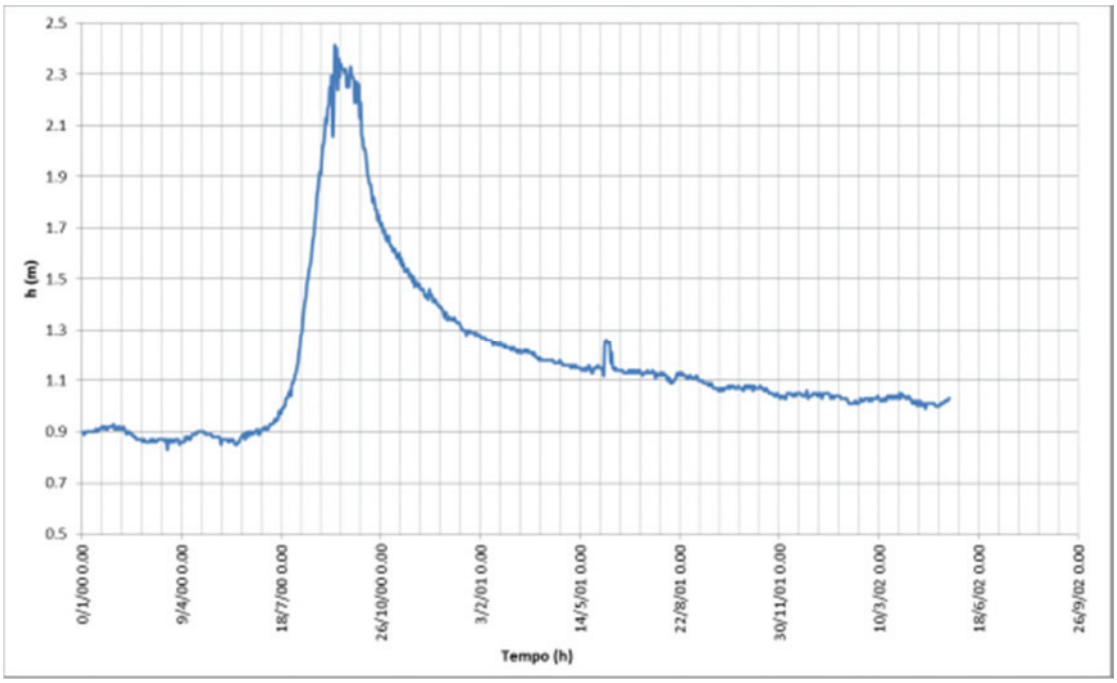



**Fig. 72 Idrogramma dell'evento di piena 2015 registrato nella stazione di misura di Rubiera SS 9 (quote idrometriche)**

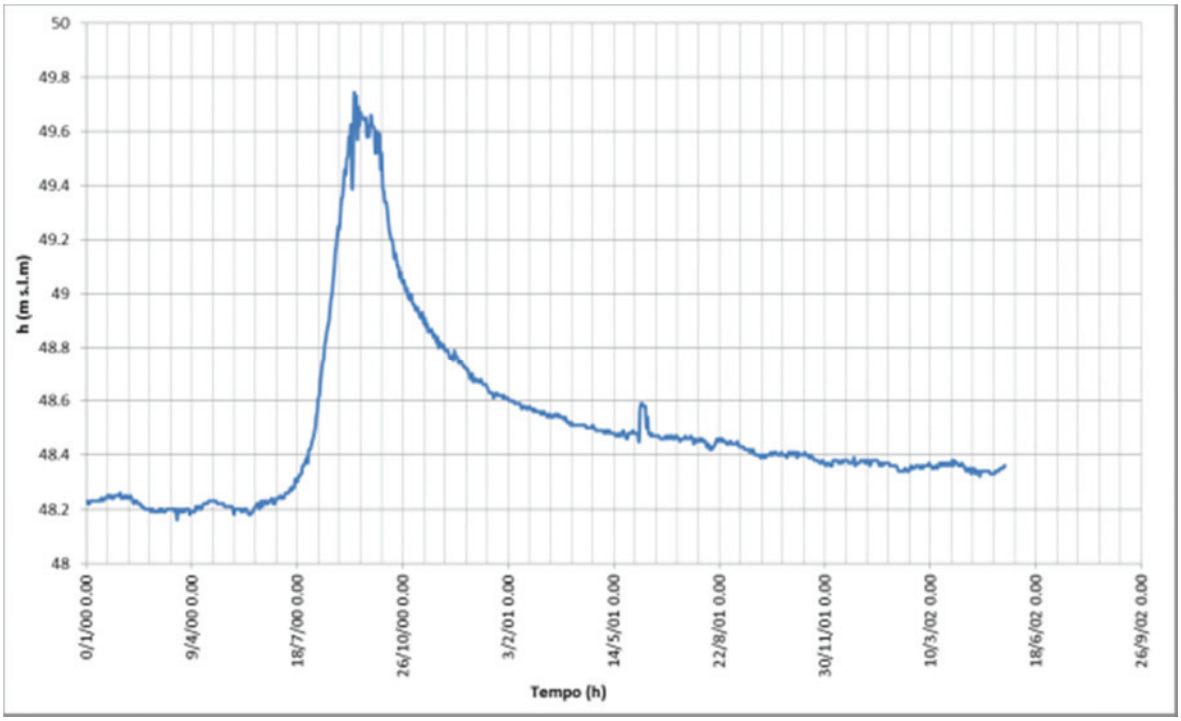



**Fig. 73 Idrogramma dell'evento di piena 2015 registrato nella stazione di misura di Rubiera SS9 (quote assolute)**

Per la scala di deflusso è stata verificata la corrispondenza dei valori riportati nell'annale 2015 con quelli aggiornati con i nuovi rilievi 2015 (linea blu e rossa Fig. 74). Quindi è stata ricostruita la scala di deflusso utilizzando i dati registrati dall'idrometro durante l'evento 2015 ed è stata effettuata una verifica di congruità con la scala di deflusso riportata negli annali riferita al medesimo evento. Successivamente è stata ricostruita la curva livelli-portata secondo la formulazione sotto riportata e i parametri (Tab. 4) definiti da AIPO (linea nera tratteggiata Fig. 74).

$$Q = c * (H + a)^b + q_0$$

**Tab. 4 Parametri della formula analitica per la ricostruzione della scala di deflusso**

| H1 | H2 | a | b | c | $q_o$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0,5 | 0,81 | -0,499 | 1,595124 | 61,00485 | 0 |
| 0,81 | 1,75 | -0,81 | 1,167196 | 352,2225 | 9,467911 |
| 1,75 | 2,5 | -1,75 | 1,158755 | 963,6073 | 337,1495 |

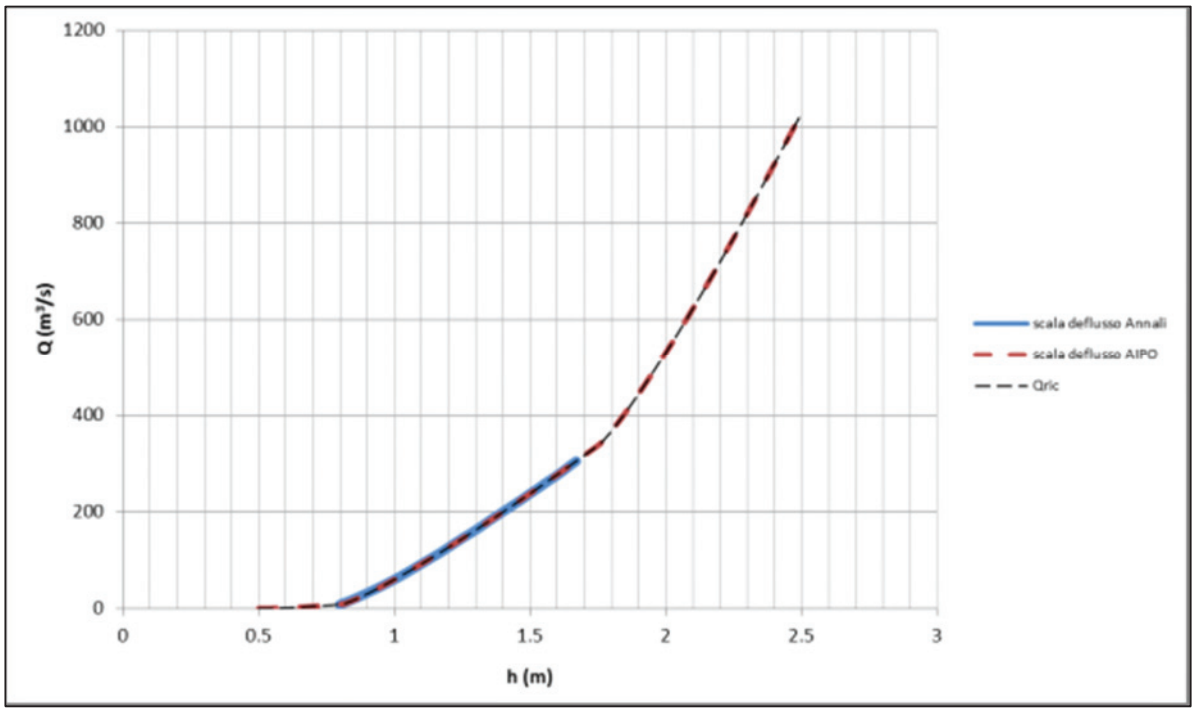



**Fig. 74 Scala di deflusso della sezione di misura di Rubiera SS 9**

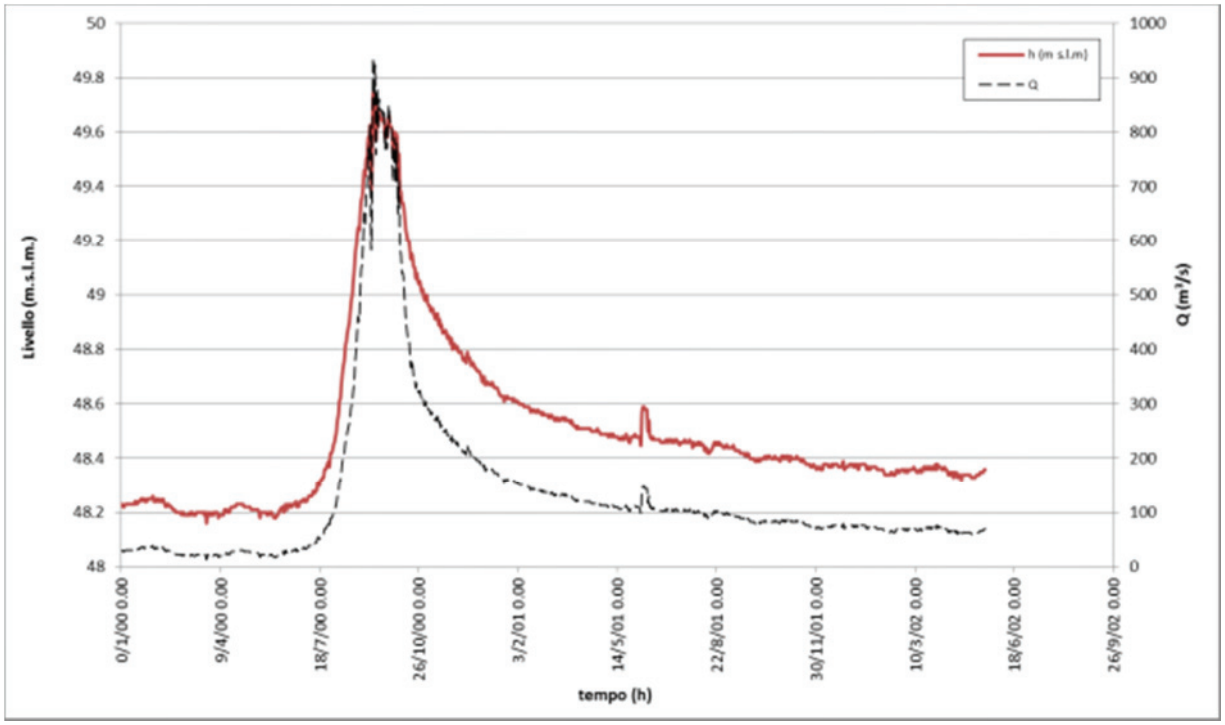



**Fig. 75 Idrogramma in portata calcolato e idrogramma registrato nella sezione di misura Rubiera SS 9**

La portata al colmo defluita nella sezione in esame è stata di 933 $m^3/s$, come indicato anche negli annali idrologici del 2015 (Fig. 75).

Come condizione al contorno di valle è stata imposta la condizione di livello a Po pari a 22 m s.l.m. che corrisponde al livello della piena duecentennale in Po nella sezione di confluenza con il Secchia.

### 5.1.3. Definizione della scabrezza

La valutazione dei coefficienti di scabrezza di primo tentativo da inserire nel modello è stata basata su dati di letteratura, sull'esperienza acquisita e sulle indicazioni rilevate durante i sopralluoghi lungo il tratto oggetto di studio. In particolare si è scelto di riferirsi alle tabelle di cui al paragrafo 4.8.4 della Direttiva "*Criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico all'interno delle fasce A e B*" emanata dall'Autorità di Bacino del fiume Po.

I valori di scabrezza sono stati ulteriormente affinati durante le simulazioni eseguite per la riproduzione dell'evento di piena del dicembre 2009 che ha rappresentato la taratura del modello.

I coefficienti di scabrezza, espressi secondo la formulazione di Strickler, sono risultati omogenei per tratti:

- tratto da monte cassa fino al manufatto regolatore:
  - alveo inciso 25 $m^{1/3}/s$
  - aree golenali 18 $m^{1/3}/s$
- tratto tra valle cassa e ponte dell'autostrada A1:
  - alveo inciso 28 $m^{1/3}/s$
  - aree golenali 18 $m^{1/3}/s$
- tratto da valle del ponte dell'autostrada A1 al ponte della TAV
  - alveo inciso 23 $m^{1/3}/s$
  - aree golenali 18 $m^{1/3}/s$
  - aree ripariali 12 $m^{1/3}/s$
- tratto dal ponte della TAV fino a ponte Pioppa:
  - alveo inciso 25 $m^{1/3}/s$
  - aree golenali 15 $m^{1/3}/s$
- tratto da ponte Pioppa fino al ponte di Concordia ed oltre:
  - alveo inciso 15 $m^{1/3}/s$
  - aree golenali 11 $m^{1/3}/s$

### 5.1.4. Taratura del modello

La messa a punto del modello è stata completata dalla fase di taratura dello stesso, consistente nella ricerca dei valori del coefficiente di scabrezza più opportuni al fine di ottenere un soddisfacente confronto calcolato/misurato nell'ambito della simulazione in moto non stazionario con riferimento alla piena del dicembre 2009. La piena del 2015 è stata ulteriormente simulata con lo scopo di verifica della calibrazione effettuata.

La configurazione geometrica per tutte le operazioni di taratura è naturalmente quella relativa all'assetto attuale del corso d'acqua (geometria 2015).

Particolare approfondimento nelle operazioni di taratura è stato dedicato alla simulazione del tratto interessato dalla cassa di laminazione e dell'area di espansione posta a valle, tenuto conto della complessità dei fenomeni idrodinamici che vi hanno sede.

In questo caso le operazioni di taratura hanno riguardato anche le modalità di implementazione degli elementi geometrici descrittivi della morfologia delle aree e delle caratteristiche dei manufatti idraulici (sfioratori e luci di deflusso) e le relative leggi idrauliche che governano le modalità di deflusso.

### *5.1.1.6. Taratura con l'evento di piena del dicembre 2009 - (scenario 1)*

La ricostruzione dell'evento di piena del dicembre 2009 è stata effettuata per mezzo dei dati osservati negli idrometri localizzati lungo l'asta e dii rilievi dei profili di piena eseguiti da AIPO lungo lo sviluppo arginale in destra e sinistra nel tratto da valle dell'attraversamento dell'autostrada A1 al ponte di Concordia sulla Secchia.

La simulazione eseguita ha mostrato una buona corrispondenza tra i livelli osservati; in particolare rispetto alla stazione di misura di ponte Alto (unica significativa per l'analisi del tratto di asta ricadente nel primo stralcio di progettazione), il livello massimo osservato è risultato di 10,28 (m) (fonte annale idrologico parte seconda 2009, stazione Secchia a p.te Alto (MIr)) (25 dic. 2009), che rispetto allo zero idrometrico di 28,71 m s.m., corrisponde a 38,99 m s.m.; il valore simulato è risultato di 38,94 m s.m con uno scostamento di 0,05 m.

Analizzando invece i dati in corrispondenza del manufatto di regolazione della cassa, il livello massimo registrato a monte dall'idrometro è di 46,55 m s.m. (considerando la quota dello zero idrometrico a 38,10 m s.m.), mentre il livello massimo misurato a valle della cassa è di 42,76 m s.m. (zero idrometrico 36,08 m s.m.). I dati ottenuti dalla simulazione portano a un livello in corrispondenza dell'idrometro a monte del manufatto della cassa è di 46,50 m s.m. (Fig. 84) e a valle del manufatto di 42,83 m s.m. (Fig. 85).

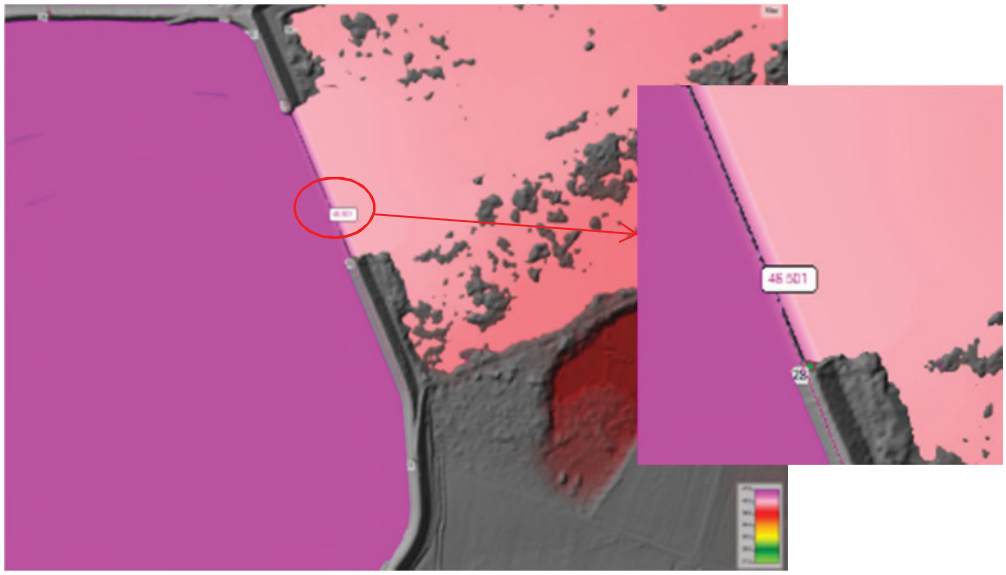


**Fig. 76 Livello massimo simulato a monte del manufatto regolatore della cassa (simulazione evento marzo 2009)**

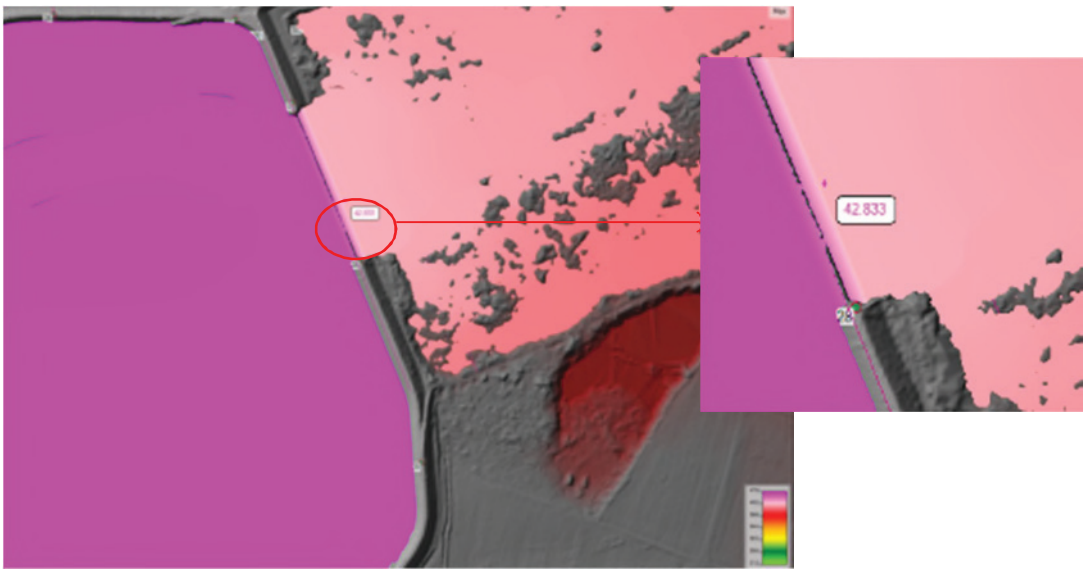



**Fig. 77 Livello massimo simulato a valle del manufatto regolatore della cassa (simulazione evento marzo 2009)**

Nel tratto oggetto di picchettatura della piena 2009 rilevato da AIPO lo scostamento medio risulta prossimo a 0,23 m rispetto alla picchettatura in sponda sinistra (Tab. 5) e 0,25 m in sponda destra (Tab. 6).

**Tab. 5 Confronto picchettatura evento 2009 e taratura modello (sponda sinistra)**

| STANTE | Piena dic. 2009 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 0 | 40,00 | 40,71 |
| 4 | 39,94 | 40,55 |
| 6 | 39,92 | 38,39 |
| 7 | 39,90 | 38,39 |
| 9 | 39,84 | 40,35 |
| 10 | 39,82 | 40,34 |
| 11 | 39,71 | 40,33 |
| 12 | 39,71 | 40,04 |
| 13 | 39,72 | 40,04 |
| 14 | 39,72 | 40,04 |
| 15 | 39,69 | 40,04 |
| 16 | 39,66 | 39,95 |
| 17 | 39,60 | 39,91 |
| 19 | 39,49 | 39,81 |
| 20 | 39,43 | 39,76 |
| 21 | 39,37 | 39,73 |
| 22 | 39,26 | 39,64 |
| 23 | 39,17 | 39,57 |
| 24 | 39,06 | 39,53 |
| 25 | 38,97 | 39,43 |

| STANTE | Piena dic. 2009 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 26 | 38,86 | 39,37 |
| 27 | 38,76 | 39,34 |
| 28 | 38,66 | 39,24 |
| 29 | 38,55 | 39,18 |
| 30 | 38,45 | 39,13 |
| 31 | 38,33 | 39,08 |
| 32 | 38,21 | 38,73 |
| 33 | 38,20 | 38,70 |
| 34 | 38,20 | 38,66 |
| 35 | 38,13 | 38,61 |
| 37 | 37,99 | 38,24 |
| 38 | 37,91 | 38,19 |
| 39 | 37,84 | 38,14 |
| 40 | 37,73 | 38,08 |
| 41 | 37,63 | 38,02 |
| 42 | 37,63 | 37,98 |
| 43 | 37,54 | 37,95 |
| 44 | 37,50 | 37,88 |
| 45 | 37,45 | 37,83 |
| 46 | 37,36 | 37,79 |
| 47 | 37,26 | 37,75 |
| 48 | 37,22 | 37,70 |
| 49 | 37,18 | 37,65 |
| 50 | 37,14 | 37,61 |
| 51 | 36,91 | 37,57 |
| 52 | 36,67 | 37,54 |
| 53 | 36,63 | 36,85 |
| 54 | 36,59 | 36,80 |
| 55 | 36,51 | 36,75 |
| 56 | 36,43 | 36,71 |
| 57 | 36,35 | 36,65 |
| 58 | 36,21 | 36,62 |
| 59 | 36,06 | 36,57 |
| 60 | 35,98 | 36,26 |
| 61 | 35,91 | 36,20 |
| 62 | 35,83 | 36,09 |
| 63 | 35,70 | 35,98 |
| 64 | 35,57 | 35,88 |
| 65 | 35,53 | 35,79 |
| 66 | 35,48 | 35,77 |
| 67 | 35,44 | 35,74 |
| 68 | 35,40 | 35,66 |
| 69 | 35,35 | 35,37 |

| STANTE | Piena dic. 2009 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 70 | 35,31 | 35,36 |
| 71 | 35,26 | 35,36 |
| 72 | 35,28 | 35,36 |
| 73 | 35,29 | 35,36 |
| 74 | 35,31 | 35,47 |
| 75 | 35,19 | 35,62 |
| 76 | 35,07 | 35,44 |
| 77 | 35,03 | 35,40 |
| 78 | 34,98 | 35,33 |
| 79 | 34,94 | 35,00 |
| 80 | 34,84 | 34,90 |
| 81 | 34,74 | 34,84 |
| 82 | 34,67 | 34,77 |
| 83 | 34,61 | 34,69 |
| 84 | 34,54 | 34,63 |
| 85 | 34,43 | 34,60 |
| 86 | 34,31 | 34,46 |
| 87 | 34,17 | 34,30 |
| 88 | 34,03 | 34,10 |
| 89 | 33,93 | 34,06 |
| 90 | 33,82 | 34,04 |
| 91 | 33,72 | 34,02 |
| 92 | 33,69 | 34,02 |
| 93 | 33,65 | 34,02 |
| 94 | 33,61 | 33,50 |
| 95 | 33,58 | 33,47 |
| 96 | 33,55 | 33,45 |
| 97 | 33,52 | 33,44 |
| 98 | 33,48 | 33,41 |
| 99 | 33,45 | 33,38 |
| 100 | 33,17 | 33,22 |
| 101 | 33,09 | 33,04 |
| 103 | 32,95 | 32,94 |
| 104 | 32,87 | 32,86 |
| 105 | 32,87 | 32,81 |
| 106 | 32,86 | 32,80 |
| 107 | 32,84 | 32,80 |
| 108 | 32,82 | 32,80 |
| 109 | 32,81 | 32,80 |
| 110 | 32,80 | 32,79 |
| 111 | 32,80 | 32,78 |
| 112 | 32,80 | 32,76 |
| 113 | 32,79 | 32,73 |

| STANTE | Piena dic. 2009 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 114 | 32,79 | 32,71 |
| 115 | 32,77 | 32,67 |
| 116 | 32,76 | 32,63 |
| 117 | 32,74 | 32,61 |
| 118 | 32,73 | 32,57 |
| 119 | 32,71 | 32,51 |
| 120 | 32,66 | 32,47 |
| 121 | 32,63 | 32,46 |
| 122 | 32,60 | 32,46 |
| 123 | 32,61 | 32,47 |
| 124 | 32,61 | 32,61 |
| 125 | 32,62 | 32,37 |
| 126 | 32,59 | 32,33 |
| 127 | 32,60 | 32,32 |
| 128 | 32,62 | 32,30 |
| 129 | 32,63 | 32,39 |
| 130 | 32,65 | 32,17 |
| 131 | 32,56 | 32,08 |
| 132 | 32,46 | 32,02 |
| 133 | 32,37 | 31,95 |
| 134 | 32,29 | 31,96 |
| 135 | 32,21 | 31,92 |
| 136 | 32,13 | 31,81 |
| 137 | 32,05 | 31,76 |
| 138 | 31,97 | 31,69 |
| 139 | 31,94 | 31,67 |
| 140 | 31,92 | 31,63 |
| 141 | 31,85 | 31,59 |
| 142 | 31,78 | 31,52 |
| 143 | 31,72 | 31,43 |
| 144 | 31,64 | 31,29 |
| 145 | 31,58 | 31,26 |
| 146 | 31,50 | 31,24 |
| 147 | 31,43 | 31,27 |
| 148 | 31,36 | 31,16 |
| 149 | 31,29 | 31,13 |
| 150 | 31,23 | 31,02 |
| 151 | 31,15 | 30,92 |
| 152 | 31,08 | 30,91 |
| 153 | 30,99 | 30,89 |
| 154 | 30,92 | 30,85 |
| 155 | 30,87 | 30,78 |
| 156 | 30,82 | 30,78 |

| STANTE | Piena dic. 2009 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 157 | 30,77 | 30,76 |
| 158 | 30,78 | 30,75 |
| 159 | 30,79 | 30,75 |
| 160 | 30,78 | 31,26 |
| 161 | 30,77 | 30,68 |
| 162 | 30,76 | 30,66 |
| 163 | 30,73 | 30,62 |
| 164 | 30,69 | 30,60 |
| 165 | 30,70 | 30,59 |
| 166 | 30,70 | 30,58 |
| 167 | 30,71 | 30,57 |
| 168 | 30,72 | 30,57 |
| 169 | 30,69 | 30,56 |
| 170 | 30,70 | 30,55 |
| 171 | 30,70 | 30,55 |
| 172 | 30,70 | 30,67 |
| 173 | 30,64 | 30,46 |
| 174 | 30,58 | 30,45 |
| 175 | 30,51 | 30,44 |
| 176 | 30,45 | 30,45 |
| 177 | 30,38 | 30,42 |
| 178 | 30,34 | 30,37 |
| 179 | 30,30 | 30,43 |
| 180 | 30,26 | 30,63 |
| 181 | 30,22 | 30,32 |
| 182 | 30,38 | 30,28 |
| 183 | 30,35 | 30,29 |
| 184 | 30,35 | 30,41 |
| 185 | 30,27 | 30,09 |
| 187 | 30,12 | 30,00 |
| 188 | 30,10 | 29,97 |
| 189 | 30,06 | 29,92 |
| 190 | 30,03 | 29,92 |
| 191 | 30,03 | 29,92 |
| 192 | 30,02 | 29,91 |
| 193 | 30,02 | 29,91 |
| 194 | 30,07 | 29,90 |
| 195 | 30,14 | 30,27 |
| 196 | 30,14 | 29,96 |
| 197 | 30,15 | 29,85 |
| 198 | 30,07 | 30,17 |
| 199 | 30,00 | 29,79 |
| 200 | 29,93 | 29,83 |

| STANTE | Piena dic. 2009 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 201 | 29,96 | 29,77 |
| 202 | 29,98 | 29,82 |
| 203 | 29,95 | 29,78 |
| 204 | 29,92 | 29,73 |
| 205 | 29,89 | 29,63 |
| 206 | 29,82 | 29,61 |
| 207 | 29,74 | 29,66 |
| 208 | 29,71 | 29,64 |
| 209 | 29,69 | 29,58 |
| 210 | 29,66 | 29,50 |
| 211 | 29,47 | 29,45 |
| 212 | 29,34 | 29,44 |
| 213 | 29,37 | 29,47 |
| 214 | 29,40 | 29,31 |
| 215 | 29,43 | 29,29 |
| 216 | 29,34 | 29,43 |
| 217 | 29,23 | 29,38 |
| 218 | 29,13 | 29,26 |
| 219 | 29,03 | 29,12 |
| 220 | 28,93 | 29,04 |
| 221 | 28,85 | 28,97 |
| 222 | 28,78 | 28,90 |
| 223 | 28,79 | 28,84 |
| 224 | 28,80 | 28,76 |
| 225 | 28,81 | 28,66 |
| 226 | 28,70 | 28,64 |
| 227 | 28,60 | 28,63 |
| 228 | 28,54 | 28,58 |
| 229 | 28,48 | 28,45 |
| 230 | 28,41 | 28,42 |
| 231 | 28,37 | 28,32 |

**Tab. 6 Confronto picchettatura evento 2009 e taratura modello (sponda destra)**

| STANTE | Piena dic. 2009 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 0 | 40,61 | 41,28 |
| 1 | 40,60 | 41,27 |
| 2 | 40,59 | 41,26 |
| 3 | 40,58 | 41,24 |
| 5 | 40,37 | 41,15 |

| STANTE | Piena dic. 2009 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 6 | 40,27 | 41,14 |
| 7 | 40,32 | 41,13 |
| 8 | 40,31 | 41,07 |
| 9 | 40,31 | 41,03 |
| 10 | 40,30 | 40,87 |
| 11 | 40,13 | 40,88 |
| 12 | 40,16 | 40,78 |
| 14 | 40,21 | 40,69 |
| 15 | 40,11 | 40,64 |
| 16 | 40,02 | 40,57 |
| 17 | 39,93 | 40,47 |
| 18 | 39,84 | 40,43 |
| 20 | 39,65 | 40,42 |
| 21 | 39,56 | 40,37 |
| 22 | 39,47 | 40,28 |
| 23 | 39,49 | 40,17 |
| 24 | 39,52 | 40,16 |
| 26 | 39,62 | 40,15 |
| 27 | 39,66 | 40,21 |
| 28 | 39,71 | 40,05 |
| 29 | 39,65 | 40,00 |
| 30 | 39,58 | 39,94 |
| 31 | 39,57 | 39,92 |
| 32 | 39,57 | 39,82 |
| 33 | 39,56 | 39,79 |
| 34 | 39,48 | 39,75 |
| 35 | 39,42 | 39,73 |
| 36 | 39,22 | 39,58 |
| 37 | 39,05 | 39,54 |
| 38 | 38,89 | 39,41 |
| 39 | 38,86 | 39,36 |
| 40 | 38,84 | 39,35 |
| 41 | 38,81 | 39,33 |
| 42 | 38,79 | 39,23 |
| 43 | 38,76 | 39,20 |
| 44 | 38,74 | 39,18 |
| 45 | 38,62 | 39,14 |
| 46 | 38,51 | 39,11 |
| 47 | 38,40 | 39,08 |
| 48 | 38,30 | 38,73 |
| 49 | 38,20 | 38,66 |
| 50 | 38,11 | 38,60 |
| 51 | 38,02 | 38,26 |

| STANTE | Piena dic. 2009 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 52 | 37,92 | 38,22 |
| 53 | 37,83 | 38,17 |
| 54 | 37,79 | 38,12 |
| 55 | 37,76 | 38,07 |
| 56 | 37,72 | 38,03 |
| 57 | 37,66 | 37,98 |
| 58 | 37,60 | 37,96 |
| 59 | 37,50 | 37,90 |
| 60 | 37,40 | 37,84 |
| 61 | 37,31 | 37,80 |
| 62 | 37,23 | 37,76 |
| 63 | 37,14 | 37,72 |
| 64 | 37,06 | 37,68 |
| 65 | 36,98 | 37,63 |
| 66 | 36,89 | 37,59 |
| 67 | 36,80 | 37,55 |
| 68 | 36,73 | 37,16 |
| 69 | 36,64 | 36,82 |
| 70 | 36,55 | 36,77 |
| 71 | 36,44 | 36,72 |
| 72 | 36,32 | 36,67 |
| 73 | 36,20 | 36,63 |
| 74 | 36,09 | 36,59 |
| 75 | 35,97 | 36,29 |
| 76 | 35,85 | 36,23 |
| 77 | 35,78 | 36,14 |
| 78 | 35,72 | 36,02 |
| 79 | 35,65 | 35,90 |
| 80 | 35,62 | 35,76 |
| 81 | 35,60 | 35,73 |
| 82 | 35,57 | 35,73 |
| 83 | 35,55 | 35,72 |
| 84 | 35,52 | 35,72 |
| 85 | 35,46 | 35,69 |
| 86 | 35,40 | 35,65 |
| 87 | 35,34 | 35,60 |
| 88 | 35,28 | 35,56 |
| 89 | 35,22 | 35,43 |
| 90 | 35,20 | 35,37 |
| 91 | 35,17 | 35,34 |
| 92 | 35,15 | 35,34 |
| 93 | 35,13 | 35,29 |
| 94 | 35,11 | 35,22 |

| STANTE | Piena dic. 2009 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 95 | 35,03 | 35,02 |
| 96 | 34,94 | 34,92 |
| 97 | 34,85 | 34,84 |
| 98 | 34,76 | 34,76 |
| 99 | 34,68 | 34,70 |
| 100 | 34,59 | 34,69 |
| 101 | 34,52 | 34,68 |
| 102 | 34,46 | 34,64 |
| 103 | 34,39 | 34,58 |
| 104 | 34,32 | 34,32 |
| 105 | 34,26 | 34,20 |
| 106 | 34,19 | 34,11 |
| 107 | 34,16 | 34,09 |
| 108 | 34,12 | 34,08 |
| 109 | 34,01 | 34,24 |
| 110 | 33,90 | 34,04 |
| 111 | 33,83 | 33,99 |
| 112 | 33,76 | 33,91 |
| 113 | 33,68 | 33,73 |
| 114 | 33,60 | 33,67 |
| 115 | 33,53 | 33,50 |
| 116 | 33,46 | 33,48 |
| 117 | 33,38 | 33,36 |
| 118 | 33,26 | 33,19 |
| 119 | 33,14 | 33,05 |
| 120 | 33,07 | 33,00 |
| 121 | 33,01 | 32,93 |
| 122 | 32,94 | 32,88 |
| 123 | 32,92 | 32,87 |
| 124 | 32,91 | 32,87 |
| 125 | 32,89 | 32,86 |
| 126 | 32,86 | 32,86 |
| 127 | 32,84 | 32,85 |
| 128 | 32,83 | 32,82 |
| 129 | 32,82 | 32,80 |
| 130 | 32,81 | 32,77 |
| 131 | 32,81 | 32,72 |
| 132 | 32,80 | 32,69 |
| 133 | 32,79 | 32,68 |
| 134 | 32,80 | 32,68 |
| 135 | 32,80 | 32,65 |
| 136 | 32,80 | 32,63 |
| 137 | 32,81 | 32,57 |

| STANTE | Piena dic. 2009 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 138 | 32,78 | 32,55 |
| 139 | 32,79 | 32,54 |
| 140 | 32,80 | 32,50 |
| 141 | 32,75 | 32,44 |
| 142 | 32,70 | 32,41 |
| 143 | 32,65 | 32,40 |
| 144 | 32,68 | 32,40 |
| 145 | 32,72 | 32,44 |
| 146 | 32,75 | 32,48 |
| 147 | 32,69 | 32,53 |
| 148 | 32,66 | 32,20 |
| 149 | 32,65 | 32,19 |
| 150 | 32,64 | 32,18 |
| 151 | 32,41 | 32,14 |
| 152 | 32,33 | 32,06 |
| 153 | 32,26 | 31,96 |
| 154 | 32,17 | 31,96 |
| 155 | 32,09 | 31,85 |
| 156 | 32,02 | 31,82 |
| 157 | 31,94 | 31,77 |
| 158 | 31,86 | 31,67 |
| 159 | 31,65 | 31,56 |
| 160 | 31,70 | 31,82 |
| 161 | 31,64 | 31,44 |
| 162 | 31,59 | 31,38 |
| 163 | 31,46 | 31,32 |
| 164 | 31,34 | 31,28 |
| 165 | 31,31 | 31,39 |
| 166 | 31,28 | 31,16 |
| 167 | 31,25 | 31,14 |
| 168 | 31,22 | 31,13 |
| 169 | 31,19 | 31,14 |
| 170 | 31,16 | 31,12 |
| 171 | 31,10 | 31,00 |
| 172 | 31,04 | 30,91 |
| 173 | 30,98 | 30,88 |
| 174 | 30,92 | 30,87 |
| 175 | 30,86 | 30,99 |
| 176 | 30,80 | 30,79 |
| 177 | 30,77 | 30,77 |
| 178 | 30,76 | 31,33 |
| 179 | 30,75 | 30,79 |
| 180 | 30,77 | 30,74 |

| STANTE | Piena dic. 2009 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 181 | 30,77 | 30,70 |
| 182 | 30,73 | 30,67 |
| 183 | 30,70 | 30,66 |
| 184 | 30,66 | 30,67 |
| 185 | 30,65 | 30,62 |
| 186 | 30,64 | 30,56 |
| 187 | 30,63 | 30,55 |
| 188 | 30,69 | 30,55 |
| 189 | 30,70 | 30,54 |
| 190 | 30,66 | 30,51 |
| 191 | 30,61 | 30,46 |
| 192 | 30,61 | 30,44 |
| 193 | 30,60 | 30,44 |
| 194 | 30,51 | 30,45 |
| 195 | 30,43 | 30,71 |
| 196 | 30,43 | 30,37 |
| 197 | 30,42 | 30,29 |
| 198 | 30,42 | 30,28 |
| 199 | 30,37 | 30,26 |
| 200 | 30,33 | 30,25 |
| 201 | 30,31 | 30,25 |
| 202 | 30,30 | 30,21 |
| 203 | 30,27 | 30,17 |
| 204 | 30,24 | 30,07 |
| 205 | 30,21 | 30,03 |
| 206 | 30,19 | 30,03 |
| 207 | 30,16 | 30,00 |
| 208 | 30,13 | 29,98 |
| 209 | 30,12 | 29,91 |
| 210 | 30,09 | 29,89 |
| 211 | 30,10 | 29,88 |
| 212 | 30,10 | 29,94 |
| 213 | 30,11 | 29,94 |
| 214 | 30,06 | 29,85 |
| 215 | 30,02 | 29,82 |
| 216 | 30,00 | 29,83 |
| 217 | 29,99 | 30,40 |
| 218 | 29,97 | 29,87 |
| 219 | 29,94 | 29,84 |
| 220 | 29,91 | 29,64 |
| 221 | 29,88 | 29,62 |
| 222 | 29,85 | 29,62 |
| 223 | 29,81 | 29,74 |

| STANTE | Piena dic. 2009 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 224 | 29,76 | 29,76 |
| 225 | 29,71 | 29,61 |
| 226 | 29,59 | 29,48 |
| 227 | 29,47 | 29,45 |
| 228 | 29,44 | 29,40 |
| 229 | 29,41 | 29,39 |
| 230 | 29,38 | 29,38 |
| 231 | 29,36 | 29,37 |
| 232 | 29,33 | 29,64 |
| 233 | 29,16 | 29,25 |
| 234 | 28,99 | 29,13 |
| 235 | 28,96 | 29,04 |
| 236 | 28,94 | 28,98 |
| 237 | 28,92 | 28,91 |
| 238 | 28,81 | 28,85 |
| 239 | 28,69 | 28,78 |
| 240 | 28,65 | 28,72 |
| 241 | 28,61 | 28,65 |
| 242 | 28,56 | 28,60 |
| 243 | 28,52 | 28,76 |
| 244 | 28,48 | 28,94 |
| 245 | 28,44 | 28,93 |
| 246 | 28,40 | 28,35 |

Il colmo dell'idrogramma di piena dell'evento del dicembre del 2009 è stato laminato dalla cassa di espansione per circa il 37%, da circa 1027 a 643 $m^3/s$. Di seguito si riportano in forma numerica e grafica, gli inviluppi dei colmi di piena generati dalla propagazione lungo il tratto simulato.

**Tab. 7 Valori al colmo in portata dell'idrogramma di piena del dicembre del 2009 dalla SS 9 al ponte di Concordia**

| Sezione | Portata al colmo ($m^3/s$) |
|---|---|
| SS9 SC_166-00 | 1027 |
| Manufatto regolatore SC_159-00 | 643 |
| Sfioro laterale SC_163-00 | 371 |
| Ponte autostrada A1 SC_153-00 | 542 |
| Ponte Alto SC_142-00 | 521 |
| Ponte dell'Uccellina SC_130-00 | 513 |
| Ponte Bacchello SC_115-00 | 497 |
| Ponte Motta SC_093-00 | 466 |
| Ponte Pioppa SC_080-00 | 423 |
| Ponte Concordia SC_061-00 | 395 |

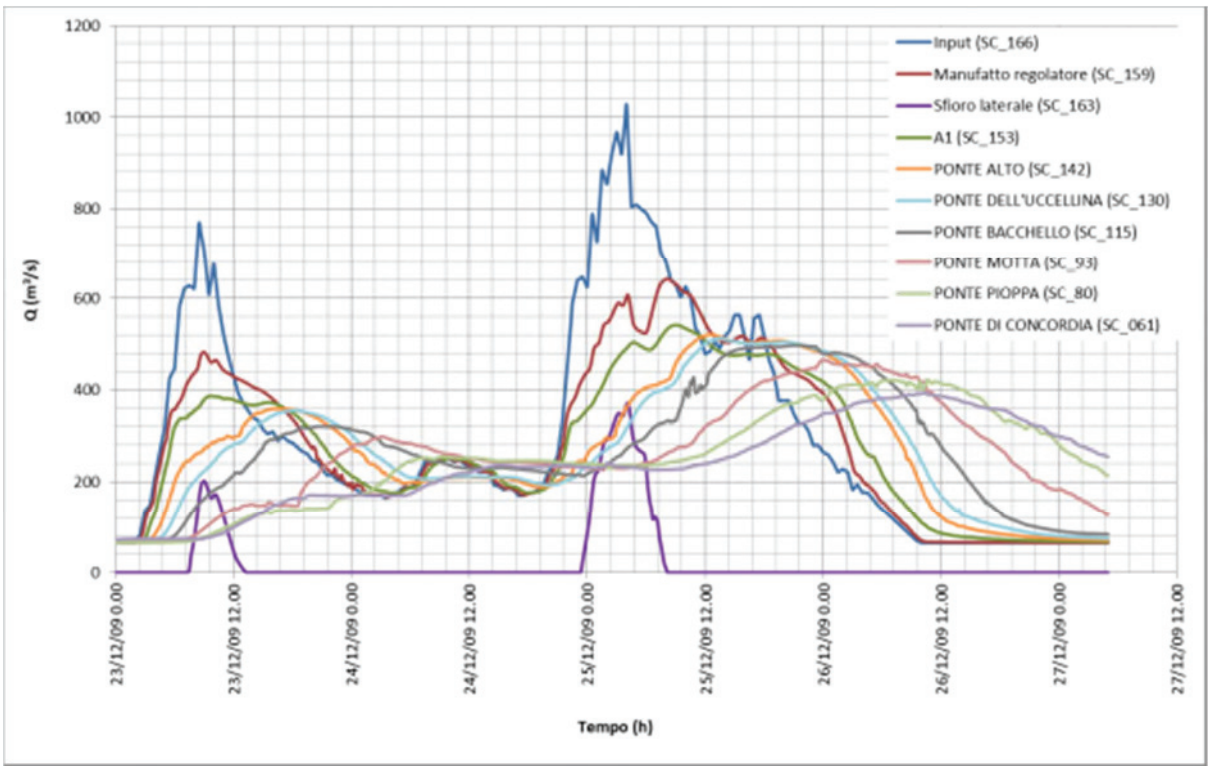



**Fig. 78 Valori al colmo in portata dell'idrogramma di piena del dicembre del 2009 dalla SS 9 a ponte Alto**

**Fig. 79 Aree inondate e massime altezze idriche della piena del dicembre del 2009**

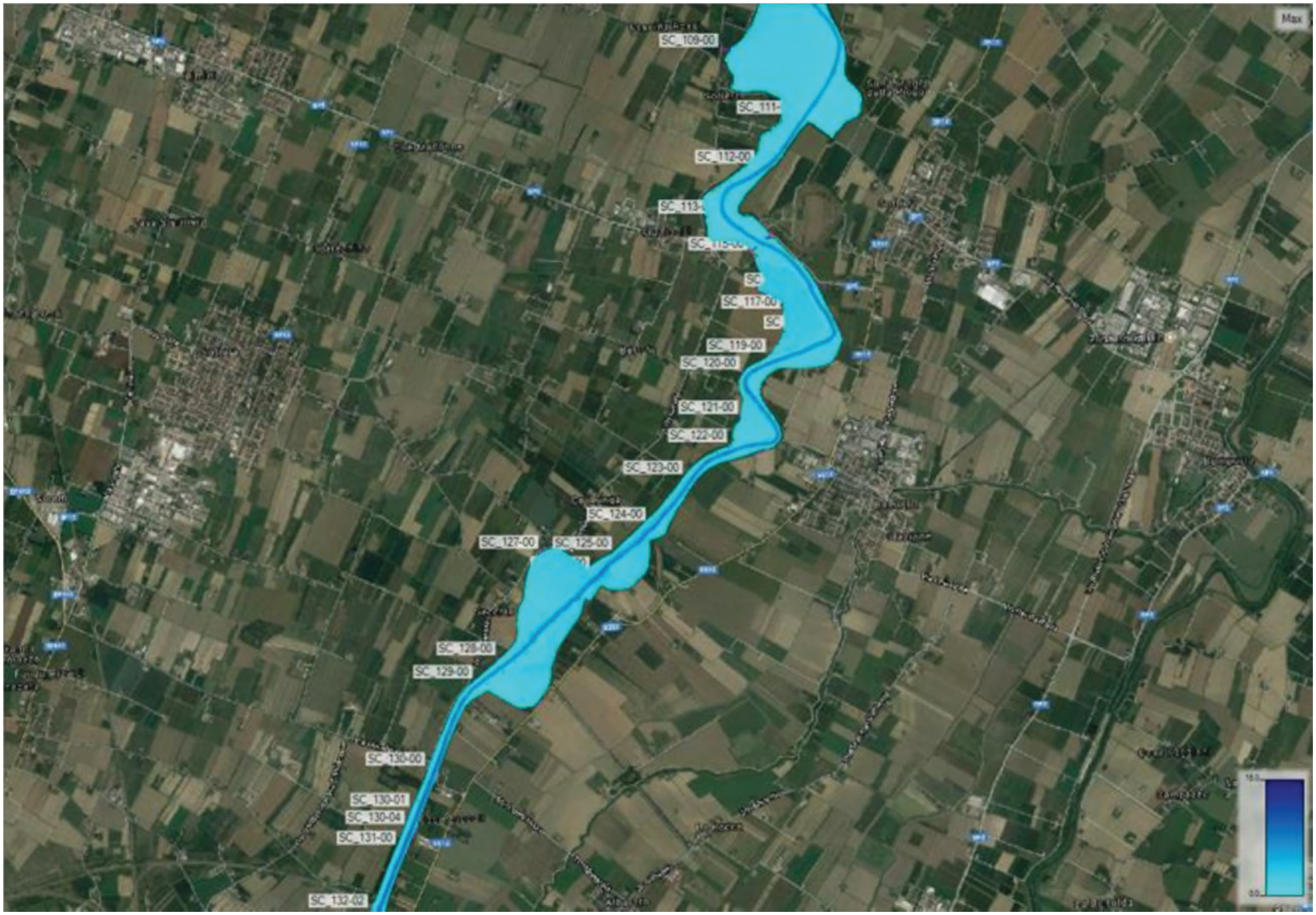



**Fig. 80 Aree inondate e massime altezze idriche della piena del dicembre del 2009**

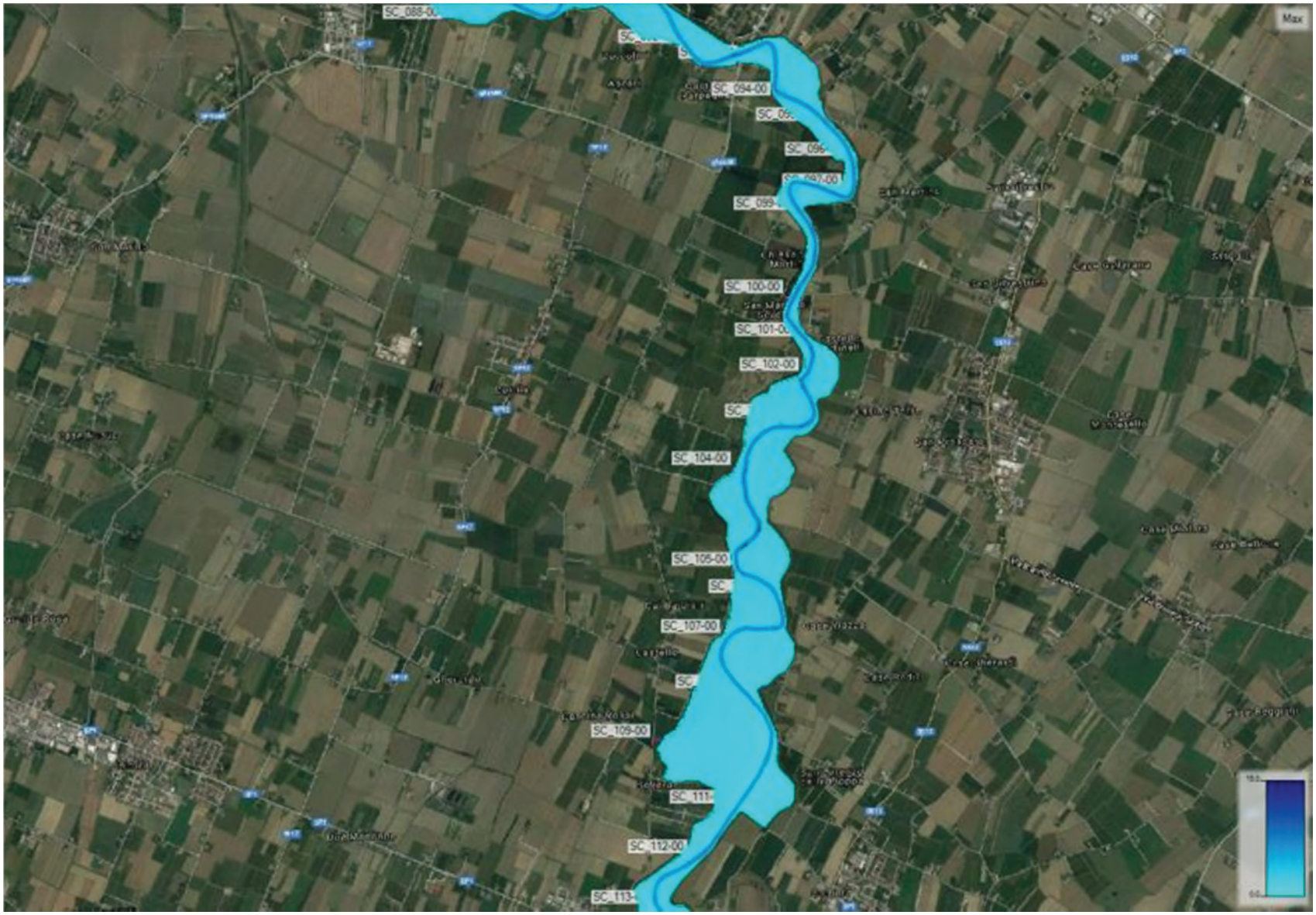



**Fig. 81 Aree inondate e massime altezze idriche della piena del dicembre del 2009**

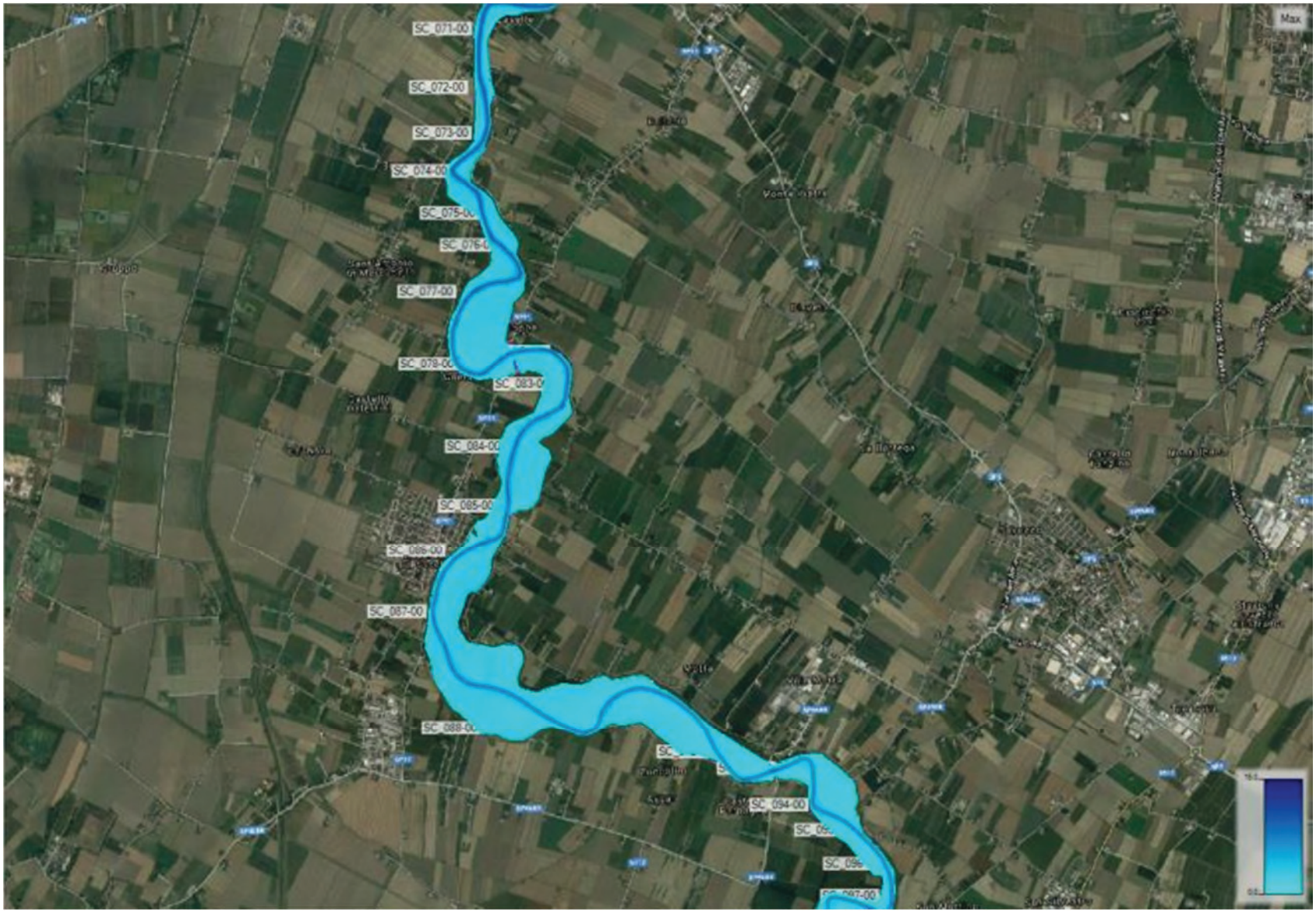



**Fig. 82 Aree inondate e massime altezze idriche della piena del dicembre del 2009**

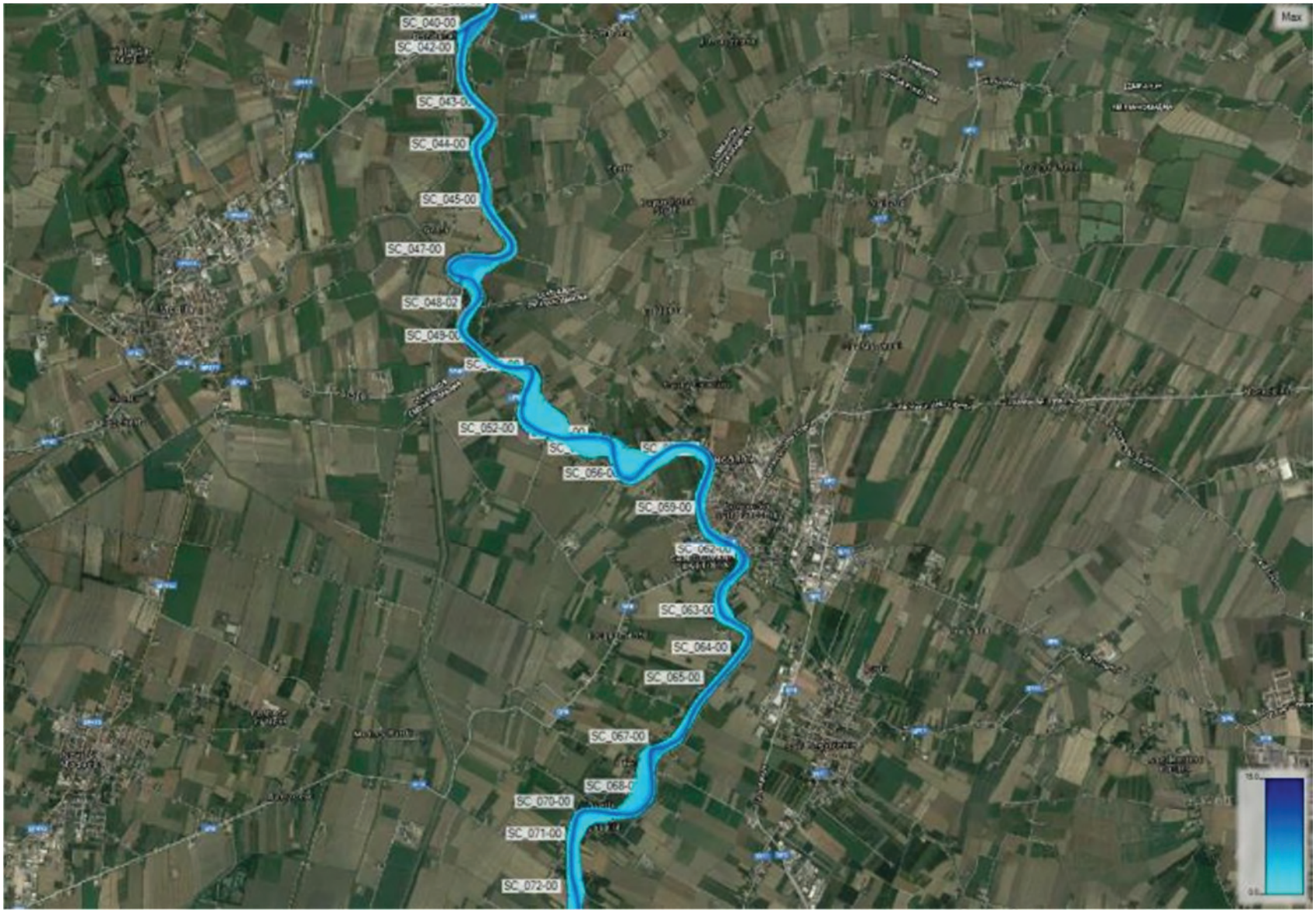



**Fig. 83 Aree inondate e massime altezze idriche della piena del dicembre del 2009**

### *5.1.1.7. Taratura con evento di piena 2015 - (scenario 2)*

La ricostruzione dell'evento di piena di fine marzo 2015 è stata utilizzata come verifica della taratura del modello. Anche per tale scenario è stato effettuato un confronto con i dati osservati durante il corso dell'evento dagli idrometri lungo l'asta e con la picchettatura eseguita da AIPO lungo lo sviluppo arginale in destra e sinistra nel tratto da valle dell'attraversamento dell'autostrada A1 al ponte di Concordia sulla Secchia.

Rispetto alla stazione di misura di ponte Alto, il livello massimo osservato è risultato di circa 38,69 m s.m. (fonte AIPO), mentre la simulazione ha fornito 38,40 m s.m, con una differenza 0,27 m.

I dati in corrispondenza del manufatto di regolazione della cassa, forniscono un livello idrometrico massimo a monte di 46,73 m s.m. (zero idrometrico a 38,10 m s.m., come indicato da AIPO) e a valle di 43,09 m s.m. (zero idrometrico a 36,08 m s.m., come indicato da AIPO). I valori di simulazione risultano invece rispettivamente di  46,74 m s.m. e di 43,08 m s.m.

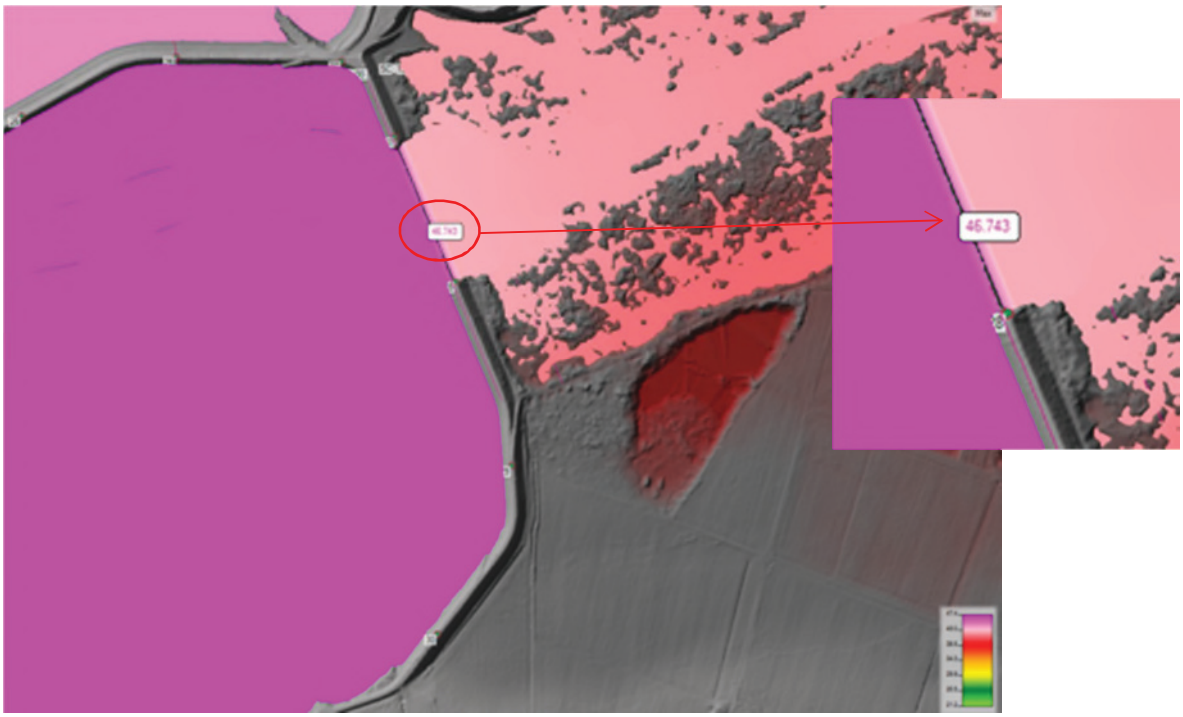



**Fig. 84 Livelli massimi simulati a monte del manufatto regolatore della cassa (simulazione evento marzo 2015)**

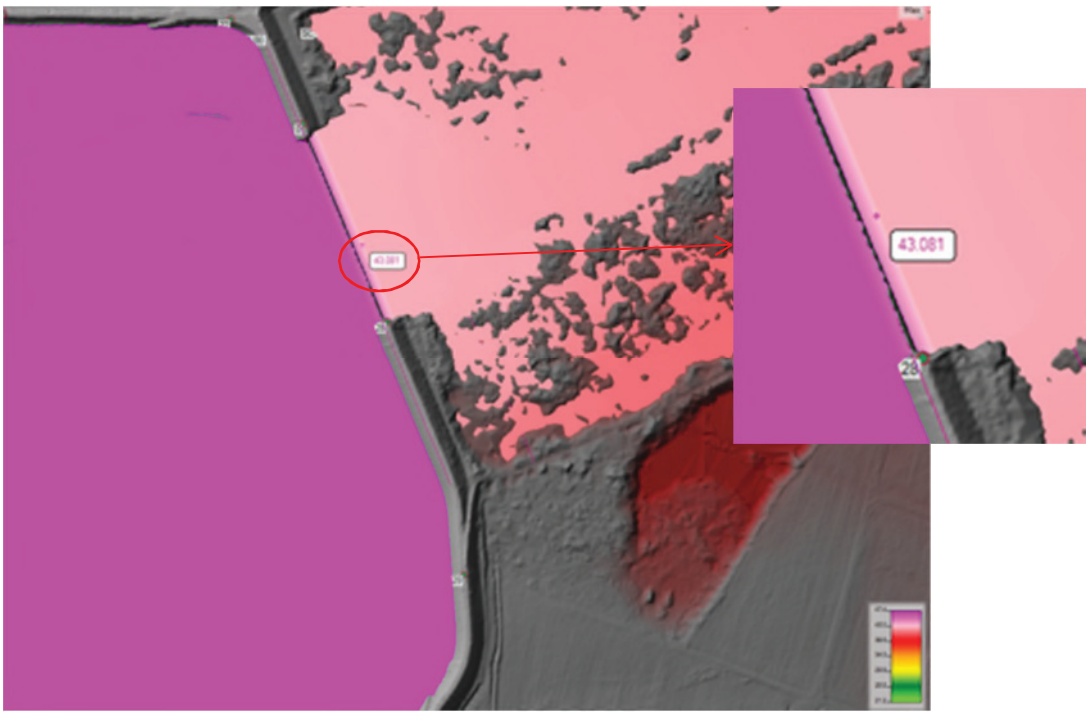



**Fig. 85 Livelli massimi simulati a monte del manufatto regolatore della cassa (simulazione evento marzo 2015)**

Nel tratto oggetto di picchettatura della piena 2015 rilevato da AIPO lo scostamento medio risulta prossimo a 0,20 m rispetto alla picchettatura in sponda sinistra (Tab. 8) e 0,20 m in sponda destra (Tab. 9).

**Tab. 8 Confronto picchettatura evento 2015 e taratura modello (sponda sinistra)**

| STANTE | Piena marzo 2015 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 0 | 40,06 | 40,04 |
| 4 | 40,05 | 39,82 |
| 6 | 39,90 | 39,73 |
| 7 | 39,81 | 39,67 |
| 9 | 39,64 | 39,56 |
| 10 | 39,35 | 39,53 |
| 11 | 39,52 | 39,50 |
| 12 | 39,31 | 38,42 |
| 13 | 39,10 | 38,42 |
| 14 | 39,10 | 38,42 |
| 15 | 39,09 | 38,42 |
| 16 | 39,09 | 38,92 |
| 17 | 38,94 | 38,89 |
| 19 | 38,84 | 38,79 |
| 20 | 38,85 | 38,74 |
| 21 | 38,59 | 38,70 |
| 22 | 38,54 | 38,66 |

| STANTE | Piena marzo 2015 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 23 | 38,58 | 38,60 |
| 24 | 38,72 | 38,57 |
| 25 | 38,54 | 38,48 |
| 26 | 38,34 | 38,44 |
| 27 | 38,15 | 38,42 |
| 28 | 37,97 | 38,34 |
| 29 | 37,78 | 38,29 |
| 30 | 38,19 | 38,25 |
| 31 | 37,91 | 38,21 |
| 32 | 37,89 | 37,84 |
| 33 | 37,84 | 37,80 |
| 34 | 37,82 | 37,77 |
| 35 | 37,79 | 37,73 |
| 37 | 37,58 | 37,36 |
| 38 | 37,47 | 37,31 |
| 39 | 37,20 | 37,25 |
| 40 | 37,34 | 37,21 |
| 41 | 37,15 | 37,15 |
| 42 | 37,11 | 37,12 |
| 43 | 37,07 | 37,09 |
| 44 | 37,00 | 37,04 |
| 45 | 36,61 | 37,00 |
| 46 | 36,78 | 36,96 |
| 47 | 36,55 | 36,93 |
| 48 | 36,57 | 36,89 |
| 49 | 36,46 | 36,86 |
| 50 | 36,34 | 36,82 |
| 51 | 36,30 | 36,80 |
| 52 | 36,27 | 36,77 |
| 53 | 36,25 | 36,07 |
| 54 | 36,22 | 36,03 |
| 55 | 36,21 | 35,99 |
| 56 | 36,20 | 35,96 |
| 57 | 35,85 | 35,91 |
| 58 | 36,09 | 35,88 |
| 59 | 36,04 | 35,85 |
| 60 | 35,95 | 35,54 |
| 61 | 35,87 | 35,50 |
| 62 | 35,79 | 35,41 |
| 63 | 35,69 | 35,32 |
| 64 | 35,35 | 35,22 |

| STANTE | Piena marzo 2015 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 65 | 35,32 | 35,12 |
| 66 | 35,29 | 35,06 |
| 67 | 35,26 | 35,03 |
| 68 | 35,20 | 34,98 |
| 69 | 35,11 | 34,71 |
| 70 | 35,02 | 34,71 |
| 71 | 34,96 | 34,71 |
| 72 | 34,89 | 34,71 |
| 73 | 34,91 | 34,71 |
| 74 | 34,94 | 34,70 |
| 75 | 34,96 | 34,83 |
| 76 | 34,97 | 34,67 |
| 77 | 34,84 | 34,64 |
| 78 | 34,76 | 34,58 |
| 79 | 34,68 | 34,35 |
| 80 | 34,51 | 34,27 |
| 81 | 34,38 | 34,23 |
| 82 | 34,46 | 34,17 |
| 83 | 34,35 | 34,08 |
| 84 | 34,24 | 33,99 |
| 85 | 34,15 | 33,92 |
| 86 | 34,06 | 33,86 |
| 87 | 33,70 | 33,74 |
| 88 | 33,33 | 33,47 |
| 89 | 32,97 | 33,47 |
| 90 | 32,60 | 33,46 |
| 91 | 32,87 | 33,46 |
| 92 | 32,79 | 33,47 |
| 93 | 32,71 | 33,46 |
| 94 | 32,90 | 32,80 |
| 95 | 32,88 | 32,75 |
| 96 | 32,86 | 32,72 |
| 97 | 32,76 | 32,70 |
| 98 | 32,64 | 32,67 |
| 99 | 32,55 | 32,61 |
| 100 | 32,38 | 32,47 |
| 101 | 32,31 | 32,27 |
| 103 | 32,19 | 32,19 |
| 104 | 32,12 | 32,09 |
| 105 | 32,08 | 32,00 |
| 106 | 32,03 | 31,98 |

| STANTE | Piena marzo 2015 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 107 | 31,98 | 31,98 |
| 108 | 31,93 | 31,97 |
| 109 | 31,88 | 31,97 |
| 110 | 31,98 | 31,96 |
| 111 | 32,08 | 31,93 |
| 112 | 31,95 | 31,90 |
| 113 | 31,82 | 31,85 |
| 114 | 31,69 | 31,82 |
| 115 | 31,74 | 31,77 |
| 116 | 31,79 | 31,70 |
| 117 | 31,84 | 31,66 |
| 118 | 31,78 | 31,59 |
| 119 | 31,72 | 31,54 |
| 120 | 31,64 | 31,48 |
| 121 | 31,64 | 31,46 |
| 122 | 31,65 | 31,45 |
| 123 | 31,54 | 31,44 |
| 124 | 31,62 | 31,53 |
| 125 | 31,52 | 31,32 |
| 126 | 31,37 | 31,29 |
| 127 | 31,43 | 31,27 |
| 128 | 31,47 | 31,24 |
| 129 | 31,52 | 31,28 |
| 130 | 31,56 | 31,11 |
| 131 | 31,55 | 31,01 |
| 132 | 31,41 | 30,95 |
| 133 | 31,25 | 30,88 |
| 134 | 31,12 | 30,85 |
| 135 | 31,00 | 30,82 |
| 136 | 30,87 | 30,73 |
| 137 | 30,95 | 30,66 |
| 138 | 31,04 | 30,60 |
| 139 | 31,03 | 30,58 |
| 140 | 30,75 | 30,55 |
| 141 | 30,88 | 30,48 |
| 142 | 30,74 | 30,38 |
| 143 | 30,60 | 30,32 |
| 144 | 30,45 | 30,20 |
| 145 | 30,35 | 30,15 |
| 146 | 30,24 | 30,11 |
| 147 | 30,20 | 30,09 |

| STANTE | Piena marzo 2015 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 148 | 30,16 | 30,07 |
| 149 | 30,04 | 29,97 |
| 150 | 29,95 | 29,85 |
| 151 | 29,68 | 29,79 |
| 152 | 29,87 | 29,77 |
| 153 | 29,77 | 29,69 |
| 154 | 29,62 | 29,61 |
| 155 | 29,50 | 29,50 |
| 156 | 29,39 | 29,48 |
| 157 | 29,27 | 29,46 |
| 158 | 29,47 | 29,43 |
| 159 | 29,37 | 29,39 |
| 160 | 29,38 | 29,84 |
| 161 | 29,34 | 29,34 |
| 162 | 29,32 | 29,30 |
| 163 | 29,23 | 29,20 |
| 164 | 29,21 | 29,17 |
| 165 | 29,17 | 29,15 |
| 166 | 29,18 | 29,13 |
| 167 | 29,19 | 29,12 |
| 168 | 29,17 | 29,11 |
| 169 | 28,99 | 29,04 |
| 170 | 28,95 | 29,02 |
| 171 | 28,90 | 29,01 |
| 172 | 29,32 | 29,11 |
| 173 | 29,00 | 28,95 |
| 174 | 28,96 | 28,92 |
| 175 | 28,81 | 28,89 |
| 176 | 28,67 | 28,87 |
| 177 | 28,80 | 28,82 |
| 178 | 28,92 | 28,77 |
| 179 | 28,59 | 28,76 |
| 180 | 28,64 | 28,91 |
| 181 | 28,60 | 28,67 |
| 182 | 28,56 | 28,65 |
| 183 | 28,36 | 28,64 |
| 184 | 28,32 | 28,64 |
| 185 | 28,28 | 28,45 |
| 187 | 28,21 | 28,35 |
| 188 | 28,24 | 28,31 |
| 189 | 28,27 | 28,26 |

| STANTE | Piena marzo 2015 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 190 | 28,15 | 28,24 |
| 191 | 28,12 | 28,22 |
| 192 | 28,09 | 28,19 |
| 193 | 28,10 | 28,17 |
| 194 | 27,93 | 28,15 |
| 195 | 27,96 | 28,29 |
| 196 | 27,98 | 28,12 |
| 197 | 28,00 | 28,07 |
| 198 | 27,93 | 27,95 |
| 199 | 27,99 | 28,02 |
| 200 | 27,93 | 27,96 |
| 201 | 27,86 | 27,93 |
| 202 | 27,79 | 27,96 |
| 203 | 27,74 | 27,92 |
| 204 | 27,47 | 27,90 |
| 205 | 27,71 | 27,84 |
| 206 | 27,60 | 27,81 |
| 207 | 27,50 | 27,82 |
| 208 | 27,54 | 27,73 |
| 209 | 27,44 | 27,69 |
| 210 | 27,45 | 27,67 |
| 211 | 27,35 | 27,64 |
| 212 | 27,18 | 27,60 |
| 213 | 27,33 | 27,72 |
| 214 | 27,21 | 27,51 |
| 215 | 27,10 | 27,49 |
| 216 | 27,13 | 27,51 |
| 217 | 27,11 | 27,56 |
| 218 | 27,04 | 27,41 |
| 219 | 27,04 | 27,32 |
| 220 | 26,82 | 27,24 |
| 221 | 26,85 | 27,18 |
| 222 | 26,86 | 27,13 |
| 223 | 26,82 | 27,08 |
| 224 | 26,79 | 27,02 |
| 225 | 26,76 | 26,92 |
| 226 | 26,74 | 26,87 |
| 227 | 26,72 | 26,86 |
| 228 | 26,52 | 26,82 |
| 229 | 26,33 | 26,71 |
| 230 | 26,34 | 26,67 |

| STANTE | Piena marzo 2015 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 231 | 26,35 | 26,61 |
| 232 | 26,36 | 26,54 |
| 233 | 26,44 | 26,50 |
| 234 | 26,39 | 26,47 |
| 235 | 26,24 | 26,43 |
| 236 | 26,21 | 26,38 |
| 237 | 26,13 | 26,30 |
| 238 | 25,98 | 26,22 |
| 239 | 25,95 | 26,15 |
| 240 | 25,92 | 26,07 |
| 241 | 25,88 | 26,02 |
| 242 | 25,93 | 25,98 |
| 243 | 25,65 | 25,92 |
| 244 | 25,77 | 25,88 |
| 245 | 25,91 | 25,83 |
| 246 | 25,61 | 25,78 |
| 247 | 25,55 | 25,75 |
| 248 | 25,48 | 25,71 |
| 249 | 25,41 | 25,67 |
| 250 | 25,34 | 25,61 |
| 251 | 25,29 | 25,55 |
| 252 | 25,23 | 25,50 |
| 253 | 25,16 | 25,44 |

**Tab. 9 Confronto picchettatura evento 2015 e taratura modello (sponda destra)**

| STANTE | Piena marzo 2015 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 0 | 40,80 | 40,90 |
| 1 | 40,79 | 40,89 |
| 2 | 40,79 | 40,88 |
| 3 | 40,78 | 40,85 |
| 5 | 40,81 | 40,71 |
| 6 | 40,54 | 40,69 |
| 7 | 40,58 | 40,68 |
| 8 | 40,62 | 40,58 |
| 9 | 40,65 | 40,49 |
| 10 | 40,45 | 40,34 |
| 11 | 40,23 | 40,32 |
| 12 | 40,27 | 40,23 |

| STANTE | Piena marzo 2015 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 14 | 39,98 | 40,08 |
| 15 | 39,69 | 39,99 |
| 16 | 39,72 | 39,85 |
| 17 | 39,75 | 39,71 |
| 18 | 39,78 | 39,67 |
| 20 | 39,84 | 39,64 |
| 21 | 39,85 | 39,58 |
| 22 | 39,65 | 39,48 |
| 23 | 39,28 | 39,35 |
| 24 | 39,29 | 39,31 |
| 26 | 39,30 | 39,25 |
| 27 | 39,31 | 39,38 |
| 28 | 39,28 | 39,10 |
| 29 | 39,13 | 39,01 |
| 30 | 39,11 | 38,92 |
| 31 | 38,63 | 38,87 |
| 32 | 39,00 | 38,80 |
| 33 | 38,84 | 38,77 |
| 34 | 38,72 | 38,73 |
| 35 | 38,71 | 38,71 |
| 36 | 38,66 | 38,61 |
| 37 | 38,46 | 38,58 |
| 38 | 38,26 | 38,47 |
| 39 | 38,37 | 38,43 |
| 40 | 37,86 | 38,42 |
| 41 | 37,92 | 38,41 |
| 42 | 38,03 | 38,33 |
| 43 | 37,78 | 38,31 |
| 44 | 38,16 | 38,29 |
| 45 | 38,13 | 38,26 |
| 46 | 37,97 | 38,23 |
| 47 | 38,02 | 38,21 |
| 48 | 37,50 | 37,83 |
| 49 | 37,97 | 37,77 |
| 50 | 37,85 | 37,72 |
| 51 | 37,84 | 37,38 |
| 52 | 37,84 | 37,33 |
| 53 | 37,40 | 37,29 |
| 54 | 37,29 | 37,24 |
| 55 | 37,19 | 37,20 |
| 56 | 37,22 | 37,16 |

| STANTE | Piena marzo 2015 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 57 | 37,14 | 37,12 |
| 58 | 37,19 | 37,10 |
| 59 | 36,80 | 37,05 |
| 60 | 36,57 | 37,01 |
| 61 | 36,41 | 36,97 |
| 62 | 36,34 | 36,94 |
| 63 | 36,26 | 36,91 |
| 64 | 36,19 | 36,87 |
| 65 | 36,11 | 36,84 |
| 66 | 36,03 | 36,81 |
| 67 | 36,03 | 36,78 |
| 68 | 36,03 | 36,38 |
| 69 | 36,02 | 36,05 |
| 70 | 36,02 | 36,01 |
| 71 | 36,14 | 35,97 |
| 72 | 36,13 | 35,93 |
| 73 | 36,13 | 35,90 |
| 74 | 36,12 | 35,87 |
| 75 | 35,97 | 35,56 |
| 76 | 35,82 | 35,52 |
| 77 | 35,67 | 35,45 |
| 78 | 35,52 | 35,36 |
| 79 | 35,37 | 35,25 |
| 80 | 35,02 | 35,02 |
| 81 | 35,24 | 35,01 |
| 82 | 35,15 | 35,00 |
| 83 | 35,05 | 35,00 |
| 84 | 34,95 | 35,00 |
| 85 | 34,85 | 34,96 |
| 86 | 34,76 | 34,91 |
| 87 | 34,67 | 34,86 |
| 88 | 34,57 | 34,78 |
| 89 | 35,20 | 34,70 |
| 90 | 35,11 | 34,65 |
| 91 | 35,16 | 34,62 |
| 92 | 35,08 | 34,61 |
| 93 | 35,04 | 34,56 |
| 94 | 35,00 | 34,49 |
| 95 | 34,90 | 34,37 |
| 96 | 34,79 | 34,29 |
| 97 | 34,68 | 34,23 |

| STANTE | Piena marzo 2015 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 98 | 34,57 | 34,16 |
| 99 | 34,46 | 34,09 |
| 100 | 34,32 | 34,07 |
| 101 | 34,46 | 34,05 |
| 102 | 34,34 | 34,00 |
| 103 | 34,23 | 33,92 |
| 104 | 34,12 | 33,74 |
| 105 | 34,01 | 33,66 |
| 106 | 33,90 | 33,54 |
| 107 | 33,80 | 33,49 |
| 108 | 33,69 | 33,46 |
| 109 | 33,58 | 33,45 |
| 110 | 33,47 | 33,29 |
| 111 | 33,37 | 33,19 |
| 112 | 33,27 | 33,15 |
| 113 | 33,16 | 33,05 |
| 114 | 33,04 | 32,95 |
| 115 | 32,92 | 32,79 |
| 116 | 32,81 | 32,76 |
| 117 | 32,69 | 32,60 |
| 118 | 32,58 | 32,43 |
| 119 | 32,46 | 32,32 |
| 120 | 32,26 | 32,26 |
| 121 | 32,19 | 32,19 |
| 122 | 32,14 | 32,14 |
| 123 | 32,13 | 32,11 |
| 124 | 32,13 | 32,11 |
| 125 | 32,10 | 32,10 |
| 126 | 32,06 | 32,09 |
| 127 | 32,03 | 32,06 |
| 128 | 32,01 | 32,01 |
| 129 | 31,98 | 31,97 |
| 130 | 31,96 | 31,94 |
| 131 | 31,94 | 31,84 |
| 132 | 31,92 | 31,79 |
| 133 | 31,90 | 31,78 |
| 134 | 31,68 | 31,77 |
| 135 | 31,69 | 31,72 |
| 136 | 31,70 | 31,69 |
| 137 | 31,71 | 31,62 |
| 138 | 31,72 | 31,58 |

| STANTE | Piena marzo 2015 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 139 | 31,73 | 31,56 |
| 140 | 31,68 | 31,52 |
| 141 | 31,63 | 31,43 |
| 142 | 31,62 | 31,39 |
| 143 | 31,60 | 31,38 |
| 144 | 31,57 | 31,36 |
| 145 | 31,53 | 31,34 |
| 146 | 31,50 | 31,34 |
| 147 | 31,52 | 31,32 |
| 148 | 31,54 | 31,15 |
| 149 | 31,45 | 31,13 |
| 150 | 31,36 | 31,12 |
| 151 | 31,28 | 31,08 |
| 152 | 31,26 | 30,99 |
| 153 | 31,24 | 30,90 |
| 154 | 31,21 | 30,85 |
| 155 | 31,11 | 30,82 |
| 156 | 31,03 | 30,74 |
| 157 | 30,93 | 30,68 |
| 158 | 30,84 | 30,59 |
| 159 | 30,65 | 30,44 |
| 160 | 30,68 | 30,67 |
| 161 | 30,42 | 30,33 |
| 162 | 30,52 | 30,28 |
| 163 | 30,36 | 30,25 |
| 164 | 30,21 | 30,20 |
| 165 | 30,09 | 30,23 |
| 166 | 29,98 | 30,03 |
| 167 | 29,93 | 30,01 |
| 168 | 29,89 | 30,00 |
| 169 | 29,85 | 29,99 |
| 170 | 29,81 | 29,97 |
| 171 | 29,82 | 29,85 |
| 172 | 29,82 | 29,76 |
| 173 | 29,59 | 29,68 |
| 174 | 29,58 | 29,63 |
| 175 | 29,44 | 29,64 |
| 176 | 29,43 | 29,51 |
| 177 | 29,42 | 29,50 |
| 178 | 29,31 | 29,77 |
| 179 | 29,38 | 29,42 |

| STANTE | Piena marzo 2015 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 180 | 29,36 | 29,39 |
| 181 | 29,20 | 29,35 |
| 182 | 29,20 | 29,31 |
| 183 | 29,16 | 29,28 |
| 184 | 29,08 | 29,25 |
| 185 | 29,11 | 29,16 |
| 186 | 29,08 | 29,12 |
| 187 | 28,96 | 29,11 |
| 188 | 29,05 | 29,11 |
| 189 | 29,02 | 29,07 |
| 190 | 28,92 | 29,01 |
| 191 | 28,92 | 28,94 |
| 192 | 28,93 | 28,90 |
| 193 | 28,97 | 28,88 |
| 194 | 28,86 | 28,86 |
| 195 | 28,83 | 29,00 |
| 196 | 28,69 | 28,76 |
| 197 | 28,68 | 28,69 |
| 198 | 28,67 | 28,68 |
| 199 | 28,54 | 28,67 |
| 200 | 28,65 | 28,66 |
| 201 | 28,55 | 28,63 |
| 202 | 28,55 | 28,55 |
| 203 | 28,46 | 28,50 |
| 204 | 28,44 | 28,43 |
| 205 | 28,41 | 28,41 |
| 206 | 28,09 | 28,38 |
| 207 | 28,34 | 28,34 |
| 208 | 28,23 | 28,30 |
| 209 | 28,19 | 28,21 |
| 210 | 28,11 | 28,13 |
| 211 | 28,03 | 28,11 |
| 212 | 27,92 | 28,09 |
| 213 | 27,98 | 28,15 |
| 214 | 27,99 | 28,02 |
| 215 | 27,89 | 28,01 |
| 216 | 27,90 | 27,98 |
| 217 | 27,85 | 28,29 |
| 218 | 27,85 | 27,88 |
| 219 | 27,65 | 27,89 |
| 220 | 27,64 | 27,86 |

| STANTE | Piena marzo 2015 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 221 | 27,62 | 27,83 |
| 222 | 27,60 | 27,81 |
| 223 | 27,59 | 27,81 |
| 224 | 27,50 | 27,74 |
| 225 | 27,41 | 27,70 |
| 226 | 27,37 | 27,62 |
| 227 | 27,30 | 27,60 |
| 228 | 27,34 | 27,55 |
| 229 | 27,29 | 27,54 |
| 230 | 27,22 | 27,54 |
| 231 | 27,19 | 27,49 |
| 232 | 27,12 | 27,66 |
| 233 | 27,17 | 27,41 |
| 234 | 27,03 | 27,33 |
| 235 | 26,97 | 27,25 |
| 236 | 26,96 | 27,19 |
| 237 | 26,95 | 27,14 |
| 238 | 26,85 | 27,09 |
| 239 | 26,77 | 27,03 |
| 240 | 26,73 | 26,98 |
| 241 | 26,75 | 26,91 |
| 242 | 26,66 | 26,84 |
| 243 | 26,59 | 26,97 |
| 244 | 26,66 | 27,01 |
| 245 | 26,49 | 27,03 |
| 246 | 26,42 | 26,63 |
| 247 | 26,36 | 26,56 |
| 248 | 26,31 | 26,52 |
| 249 | 26,25 | 26,48 |
| 250 | 26,19 | 26,43 |
| 251 | 26,13 | 26,40 |
| 252 | 26,07 | 26,35 |
| 253 | 25,91 | 26,29 |
| 254 | 25,80 | 26,24 |
| 255 | 25,69 | 26,19 |
| 256 | 25,81 | 26,14 |
| 257 | 25,73 | 25,96 |
| 258 | 25,65 | 25,92 |
| 259 | 25,57 | 25,87 |
| 260 | 25,42 | 25,84 |
| 261 | 25,43 | 25,79 |
| 262 | 25,41 | 25,69 |

| STANTE | Piena marzo 2015 | |
|---|---|---|
| | RILEVATO | SIMULATO |
| | Livello (m s.m.) | Livello (m s.m.) |
| 263 | 25,33 | 25,63 |
| 264 | 25,23 | 25,61 |
| 265 | 25,13 | 25,56 |
| 266 | 25,09 | 25,50 |
| 267 | 25,03 | 25,42 |
| 268 | 24,96 | 25,33 |

Il colmo dell'idrogramma di piena dell'evento del marzo del 2015 è stato laminato dalla cassa di espansione per circa il 42%, da circa 933 a 544 $m^3/s$. Di seguito si riportano in forma numerica e grafica, gli inviluppi dei colmi di piena generati dalla propagazione lungo il tratto simulato.

**Tab. 10 Andamento dei valori al colmo dell'idrogramma dell'evento di piena del marzo del 2015 dalla SS 9 al ponte di Concordia**

| Sezione | Portata al colmo ($m^3/s$) |
|---|---|
| SS9 SC_166-00 | 933 |
| Manufatto regolatore SC_159-00 | 544 |
| Sfioro larerale SC_163-00 | 308 |
| Ponte autostrada A1 SC_153-00 | 442 |
| Ponte Alto SC_142-00 | 390 |
| Ponte dell'Uccellina SC_130-00 | 376 |
| Ponte Bacchello SC_115-00 | 366 |
| Ponte Motta SC_093-00 | 307 |
| Ponte Pioppa SC_080-00 | 284 |
| Ponte Concordia SC_061-00 | 247 |

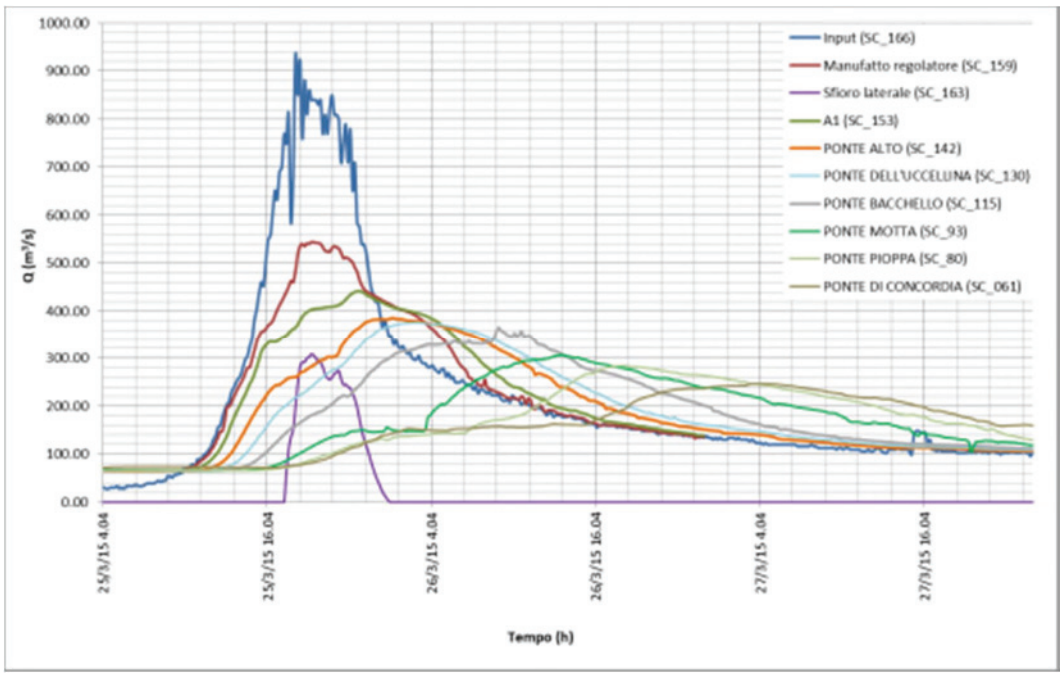



**Fig. 86 Variazione dell'idrogramma in portata dell'evento di piena del marzo del 2015 dalla SS 9 a ponte Alto**

**Fig. 87 Aree inondate e massime altezze idriche della piena del marzo 2015**

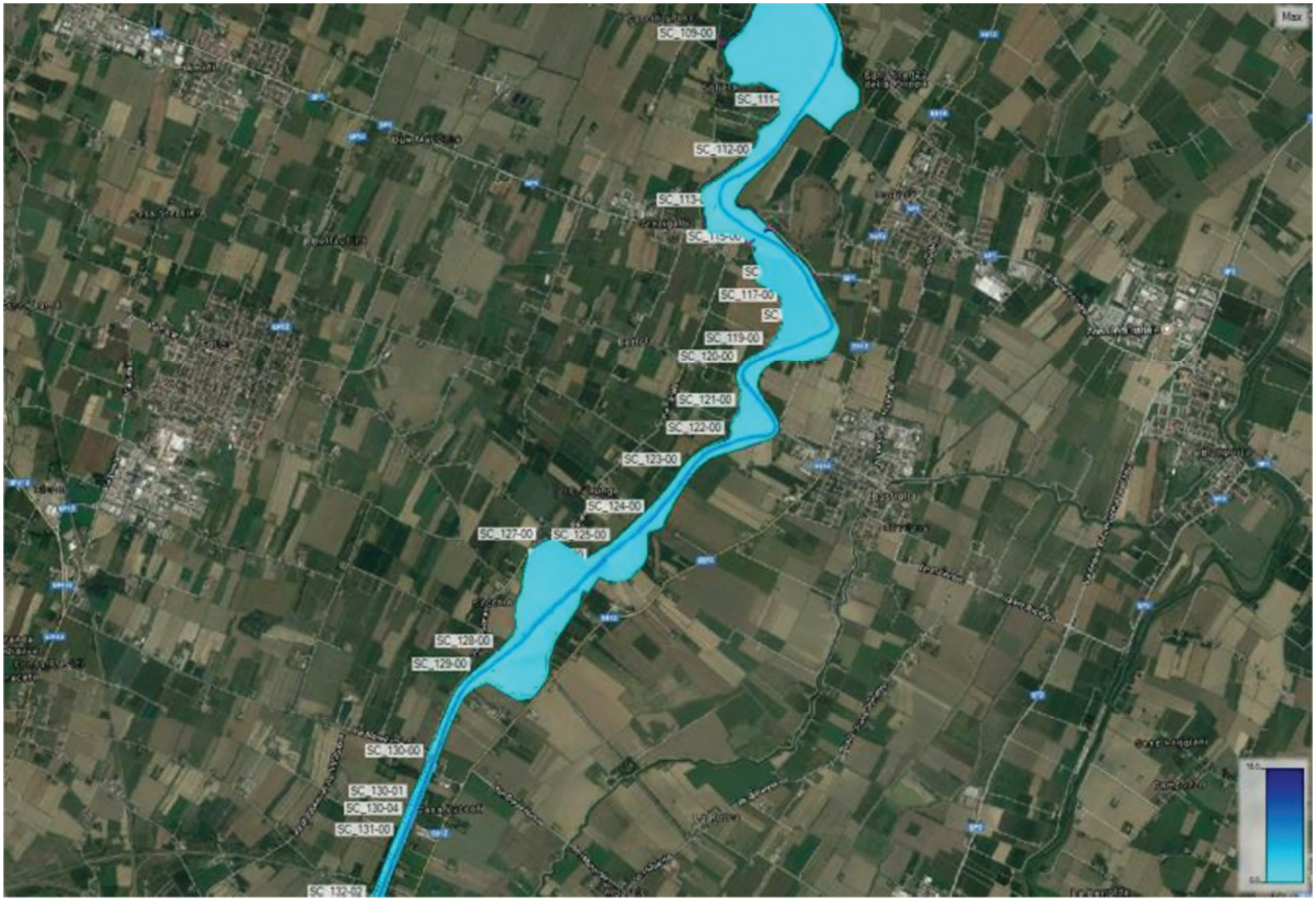



**Fig. 88 Aree inondate e massime altezze idriche della piena del marzo 2015**

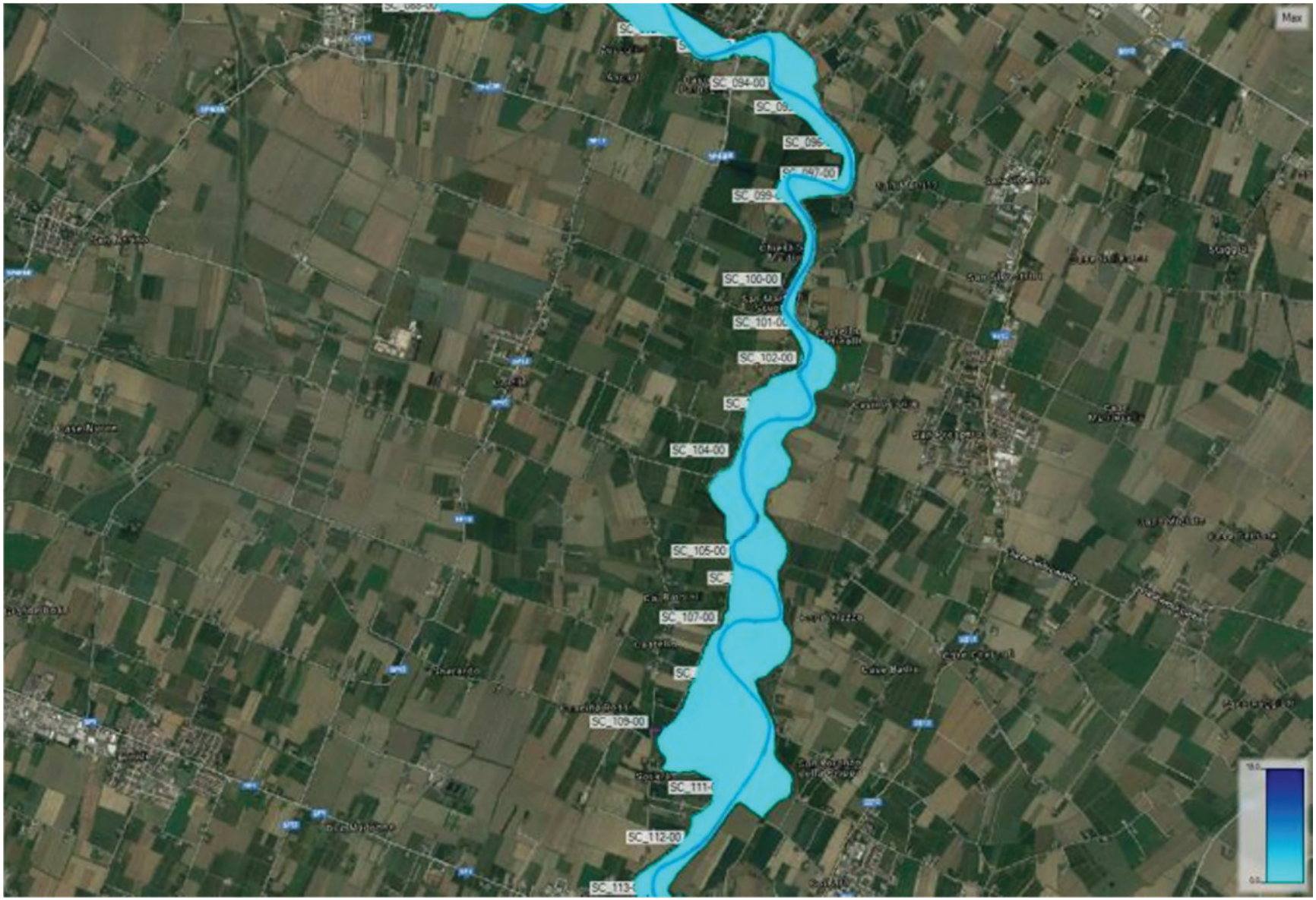



**Fig. 89 Aree inondate e massime altezze idriche della piena del marzo 2015**

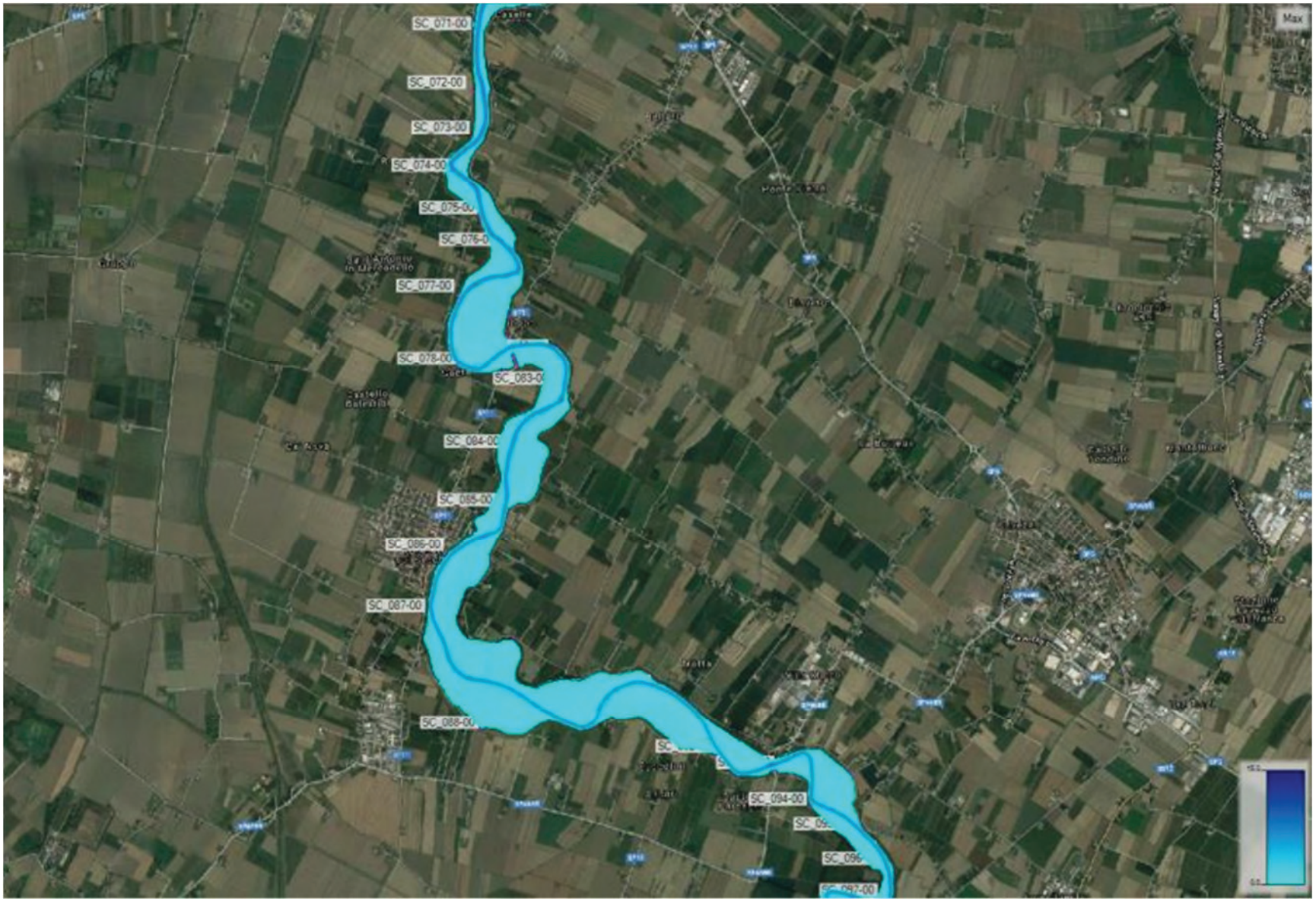



**Fig. 90 Aree inondate e massime altezze idriche della piena del marzo 2015**

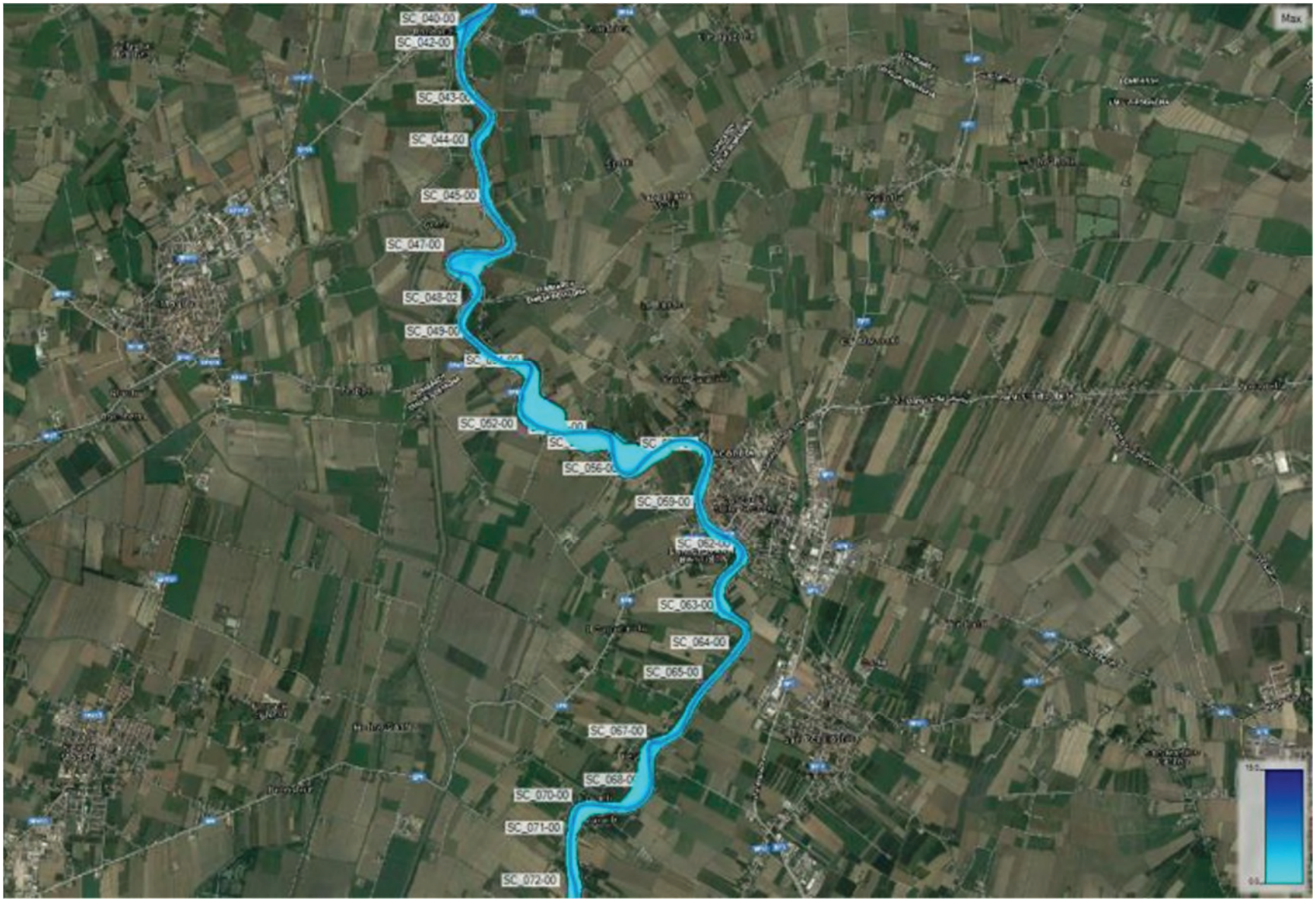



**Fig. 91 Aree inondate e massime altezze idriche della piena del marzo 2015**

## 5.2 Simulazioni idrodinamiche

Oltre ai due scenari di taratura già descritti (scenario 1 e scenario 2) sono state effettuate le seguenti simulazioni:

1) SCENARIO 3: configurazione di stato di fatto con evento di piena TR 20 anni e durata critica 12 ore;
2) SCENARIO 4: configurazione di stato di fatto con evento di piena TR 20 anni e durata critica 24 ore;
3) SCENARIO 5: configurazione di progetto con evento di piena TR 20 anni e durata critica 12 ore. Nel tratto di interesse tale scenario prevede la ricalibratura dell'alveo nei punti in cui dall'analisi morfologica è stato individuato un importante deposito di materiale oppure la necessità di rimuovere criticità presenti con l'obiettivo di migliorare la capacità di deflusso (vedi gli elaborati specifici in merito all'analisi geomorfologica e gli elaborati grafici in cui sono evidenziate le zone di disalveo). Inoltre in tale scenario è previsto un intervento di riprofilatura a monte di ponte Alto come descritto nel dettaglio nel progetto di I stralcio. Infine questa analisi prevede l'adeguamento in quota dell'argine sinistro del canale Calvetro a partire dal tombino sotto lo svincolo di Campogalliano proseguendo verso ovest per circa 600 m.

   L'adozione di quest'ultimo intervento discende dal fatto che l'argine del canale Calvetro risulta, dalla simulazione condotta, al limite del sormonto per l'evento di progetto TR 20 anni (durata 12 ore), con conseguente inondazione del piano campagna retrostante fino ad interessare la periferia sud di Campogalliano, seppur con modeste altezze d'acqua (massimo 0,2 m) e velocità (Fig. 93).

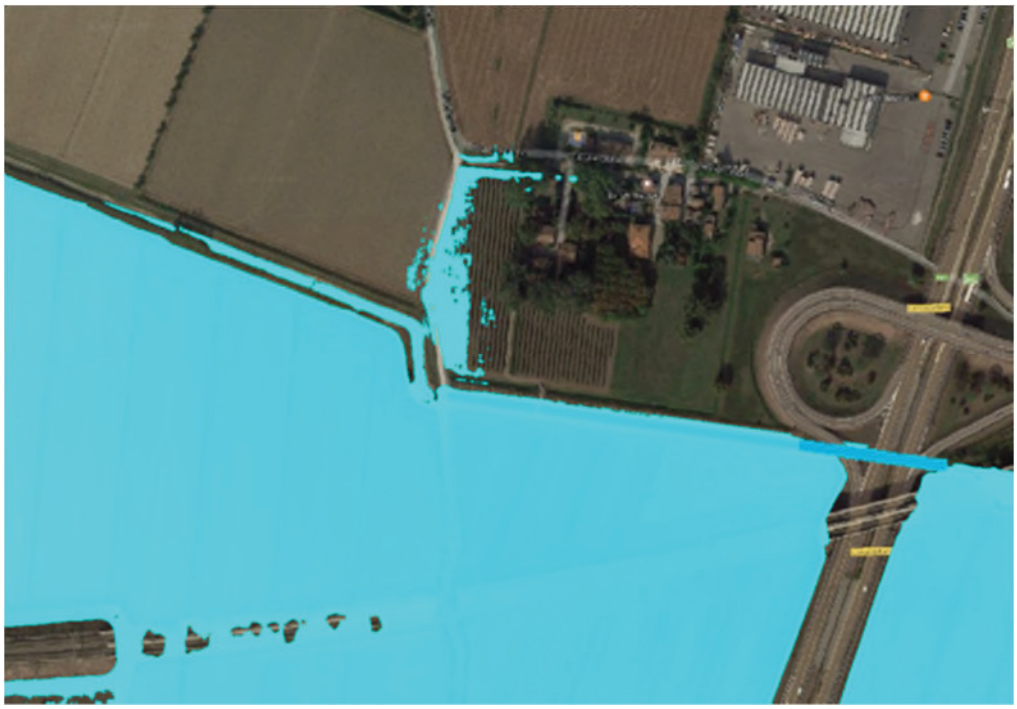


**Fig. 92 Sormonto puntuale dell'argine del canale Calvetro nella configurazione di stato di fatto per la piena di progetto TR 20 anni (durata 12 ore)**

**Fig. 93 Campo delle velocità nella zona allagata per sormonto dell'argine del canale Calvetro – configurazione di stato di fatto, piena di progetto TR 20 anni (durata 12 ore)**

4) SCENARIO 6: configurazione di progetto con evento di piena TR 20 anni e durata critica 12 ore. Tale scenario prevede l'ottimizzazione di due golene chiuse con l'obbiettivo di migliorare la capacità di invaso per l'evento in progetto e quindi diminuire la portata al colmo a valle dei due invasi. La prima golena chiusa si trova nella zona est di Soliera tra gli stanti sull'argine sinistro 68 – 74. La seconda area golenale invece si trova a monte di ponte Bacchello in sinistra idraulica nella zona di Sorbara. L'area di interesse si trova tra gli stanti dell'argine sinistro 88 e 93.

5) SCENARIO 7: configurazione di progetto (scenario 6) con evento di piena TR 20 anni e durata critica 24 ore.

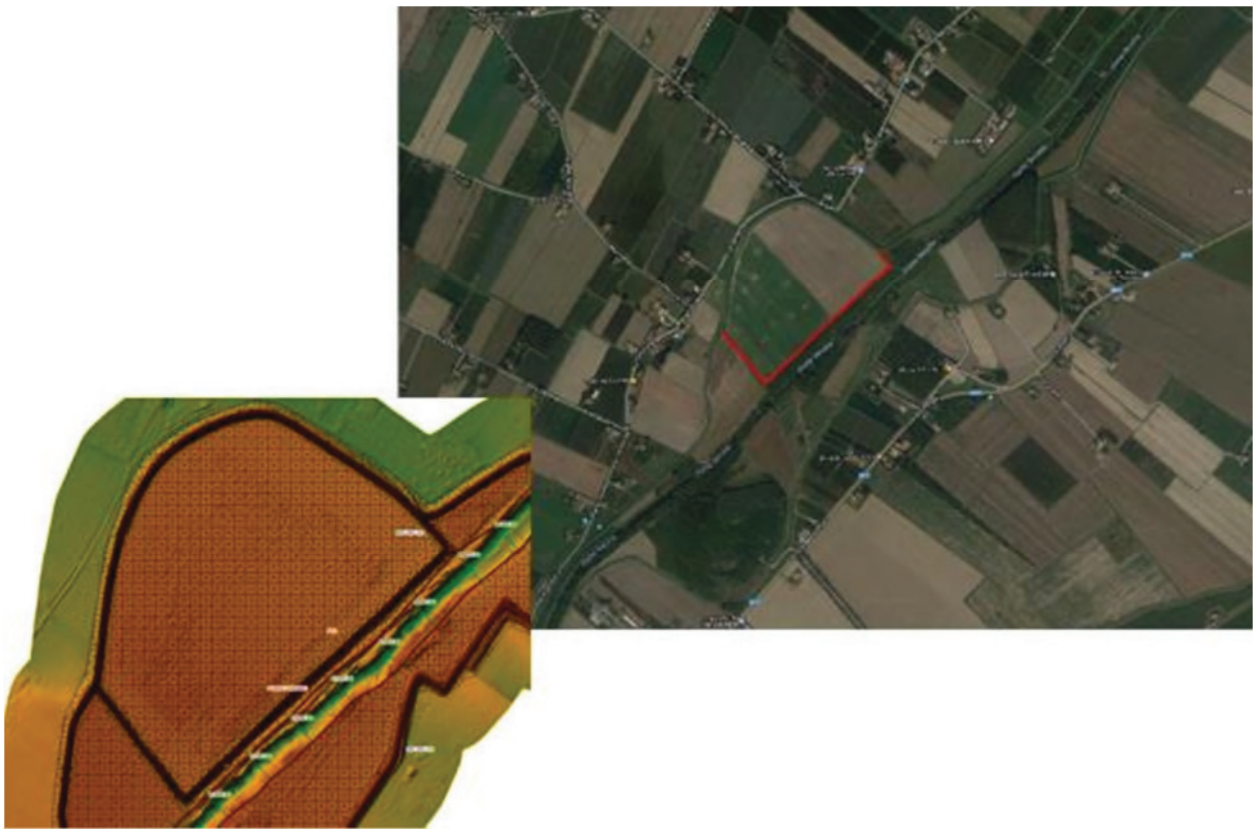


**Fig. 94 Golena chiusa oggetto di studio in prossimità di Soliera**

**Fig. 95 Golena chiusa oggetto di studio in prossimità di Sorbara**

### 5.2.1. Configurazione di stato di fatto

Sono stati simulati gli eventi di piena di progetto con tempo di ritorno 20 anni e con durata critica 12 e 24 ore. L'analisi dei due eventi ha permesso di valutare i profili di piena lungo l'asta, in particolare per gli interventi di secondo stralcio confermando i risultati ottenuti per lo studio del primo, e le specifiche criticità da affrontare negli interventi di progetto per l'adeguamento del sistema arginale del Secchia.

#### 5.1.1.8. Piena di progetto TR 20 anni (durata pioggia 12h) - (scenario 3)

L'analisi di dettaglio, con approfondimento bidimensionale del tratto di fiume a partire dalla cassa fino al ponte di Concordia, delle modalità di deflusso della piena di progetto (tempo di ritorno 20 anni e durata critica 12 ore) ha evidenziato un effetto di laminazione ad opera della cassa di espansione esistente pari al 19% del colmo (da di circa 1350 a 1096 $m^3/s$). Nel tratto compreso tra la cassa e l'autostrada A1, non arginato, il colmo subisce un'ulteriore laminazione di circa il 33%, passando da 1096 a 730 $m^3/s$. Nel tratto arginato da valle dell'A1 fino al ponte di Concordia si ha un'ulteriore laminazione pari al 38%, corrispondente a un colmo di circa 454 $m^3/s$ (Fig. 96).

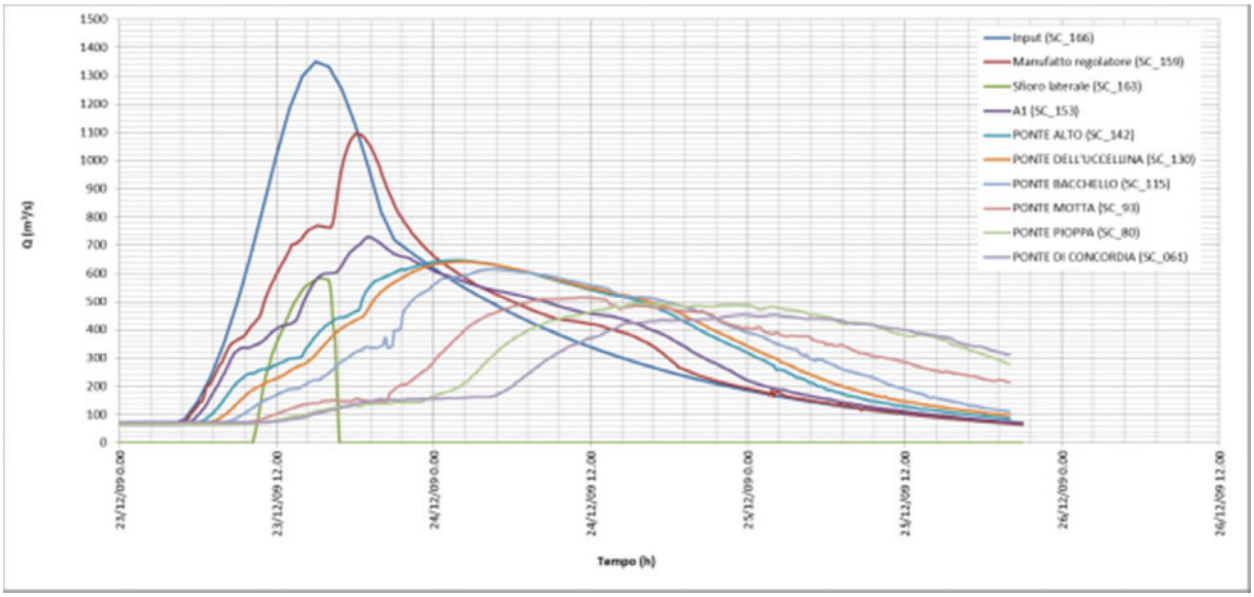



**Fig. 96 Variazione dell'idrogramma di piena per tempo di ritorno 20 anni (durata critica 12 ore) nel tratto compreso tra la SS 9 e il ponte di Concordia**

**Tab. 11 Valori al colmo dell'idrogramma per tempo di ritorno 20 anni (durata critica 12 ore) nel tratto compreso tra la SS 9 e il ponte di Concordia**

| Sezione | Portata al colmo ($m^3/s$) |
|---|---|
| SS9 SC_166-00 | 1350 |
| Manufatto regolatore SC_159-00 | 1096 |
| Sfioro larerale SC_163-00 | 583 |
| Ponte autostrada A1 SC_153-00 | 730 |
| Ponte Alto SC_142-00 | 647 |
| Ponte dell'Uccellina SC_130-00 | 643 |
| Ponte Bacchello SC_115-00 | 616 |
| Ponte Motta SC_093-00 | 515 |
| Ponte Pioppa SC_080-00 | 493 |
| Ponte Concordia SC_061-00 | 454 |

L'aggiornamento modellistico rispetto a quanto effettuato per il progetto di primo stralcio ha definito valori diversi in termini di portate al colmo nel tratto terminale tra ponte Alto e dell'Uccellina. Questa differenza è dovuta alla modifica delle condizioni di valle dovuta all'introduzione dello schema di simulazione 2D; i risultati in termini di profilo di piena sono leggermente diversi rispetto a quelli del progetto di primo stralcio. Tali differenze confermano ulteriormente le scelte progettuali effettuate anche per la progettazione di primo stralcio.

Si rimanda agli elaborati D2.05.05 (profilo di sponda SX) e D2.05.06 (profilo di sponda DX) in cui sono riportati i profili idrici simulati, anche in formato numerico, confrontati con le quote della sommità arginale rilevata.

In particolare si osservano alcune criticità puntuali come il sormonto dell'argine del canale Calvetro già descritto (Fig. 92), l'inadeguatezza dell'argine sinistro tra lo stante 1 e 4 e - proseguendo verso valle dalla sezione SC_143-05 fino a ponte Alto - l'argine sinistro risulta sormontato in prossimità del ponte della FF.SS. Modena – Mantova, tra gli stanti 46 e 47, 70 e 71, 72 e 74, 210 e 211 e 216 e 217. In sponda destra l'arginatura viene sormontata tra gli stanti 37 e 51, 60 e 69 e appena a monte di ponte Pioppa.

Un'ulteriore criticità riguarda il possibile sormonto dell'autostrada A1 prima dello svincolo con l'autostrada del Brennero in località Campogalliano. Nel tratto in cui è presente l'ultimo cavalcavia prima dello svincolo, il profilo della carreggiata autostradale forma una corda molle e i livelli idrici che si instaurano in corrispondenza al rilevato sono tali da determinare un sormonto con un'altezza d'acqua massima di 15 cm (Fig. 97).

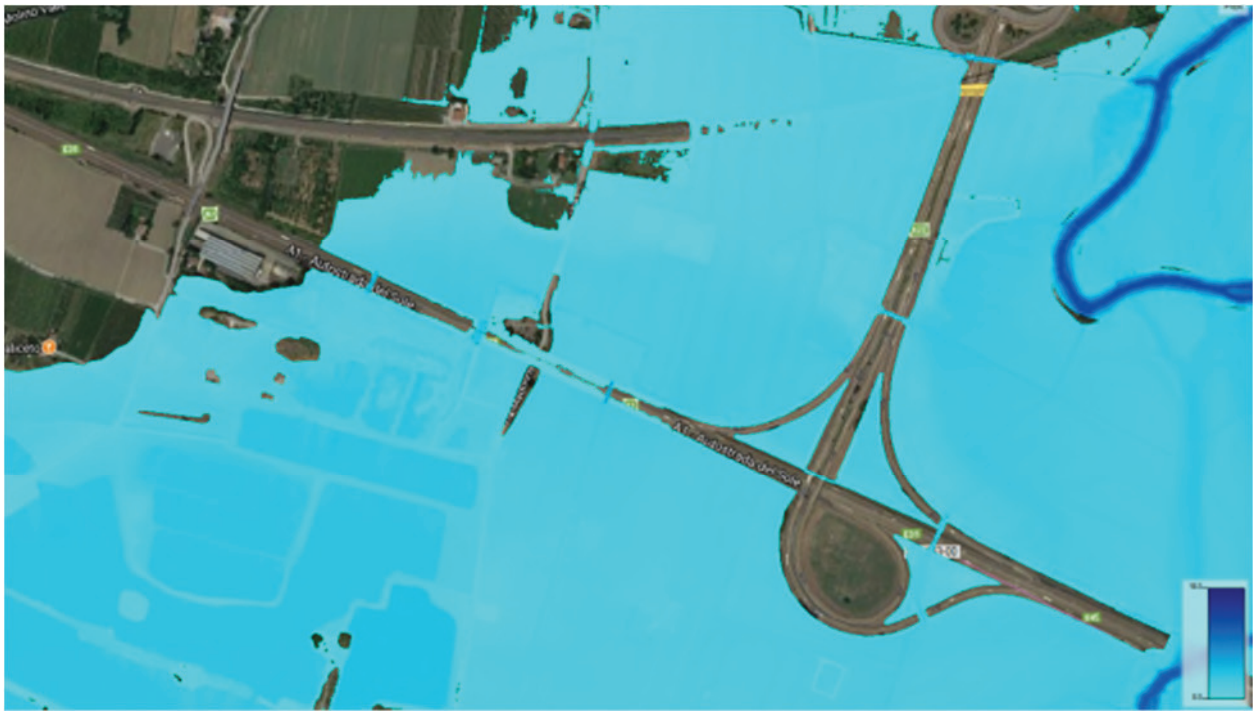


**Fig. 97 Sormonto dell'autostrada A1nel tratto ad ovest dello svincolo di Campogalliano**

Analizzando i vari attraversamenti presenti lungo il tratto di corso d'acqua oggetto di intervento risultano numerose criticità riconducibili alla mancanza del franco idraulico per la piena di progetto assunta (tempo di ritorno di 20 anni, Tab. 12).

**Tab. 12 Franchi idraulici attraversamenti per la piena di progetto (TR 20 – 12 h)**

| Attraversamento | Quota intradosso | Livello idrico Tr 20 – 12 h | Franco (m) |
|---|---|---|---|

| | (m s.m.) | (m s.m.) | |
|---|---|---|---|
| PONTE A1 | 42,17 | 41,58 | 0,59 |
| PONTE DELLA BARCHETTA | 41,78 | 41,29 | 0,49 |
| PONTE ALTO | 36,87 | 40,13 | -3,26 |
| PONTE SP413 | 39,89 | 39,67 | 0,22 |
| PONTE FF.SS MO-MN | 40,05 | 39,16 | 0,89 |
| PONTE PEDONALE | 40,41 | 38,90 | 1,51 |
| PONTE MONTE TAV | 38,55 | 37,92 | 0,63 |
| PONTE TAV | 39,42 | 37,81 | 1,61 |
| PONTE DELL'UCCELLINO | 37,46 | 37,14 | 0,32 |
| PONTE BACCHELLO | 34,90 | 34,00 | 0,90 |
| PONTE SAN MARTINO | 33,23 | 32,48 | 0,75 |
| PONTE MOTTA | 31,95 | 31,54 | 0,41 |
| PONTE PIOPPA | 30,04 | 30,68 | -0,64 |
| PONTE DI CONCORDIA | 28,04 | 29,00 | -0,96 |

Dai dati riportati in Tab. 12 si osserva che ponte Alto, ponte Pioppa e ponte di Concordia sono gli attraversamenti con maggior criticità. La piena di progetto determina il coinvolgimento dell'impalcato, provocando un innalzamento dei livelli nel tratto immediatamente a monte per effetto di rigurgito. Per tutti gli altri attraversamenti si hanno franchi sensibilmente inferiori al metro che determinano condizioni di sicurezza complessive ridotte. Rappresentano un'eccezione il ponte d TAV e quello pedonale immediatamente a valle del ponte ferroviario MN – MO.

**Fig. 98 Aree inondate dell'evento di piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di stato di fatto**

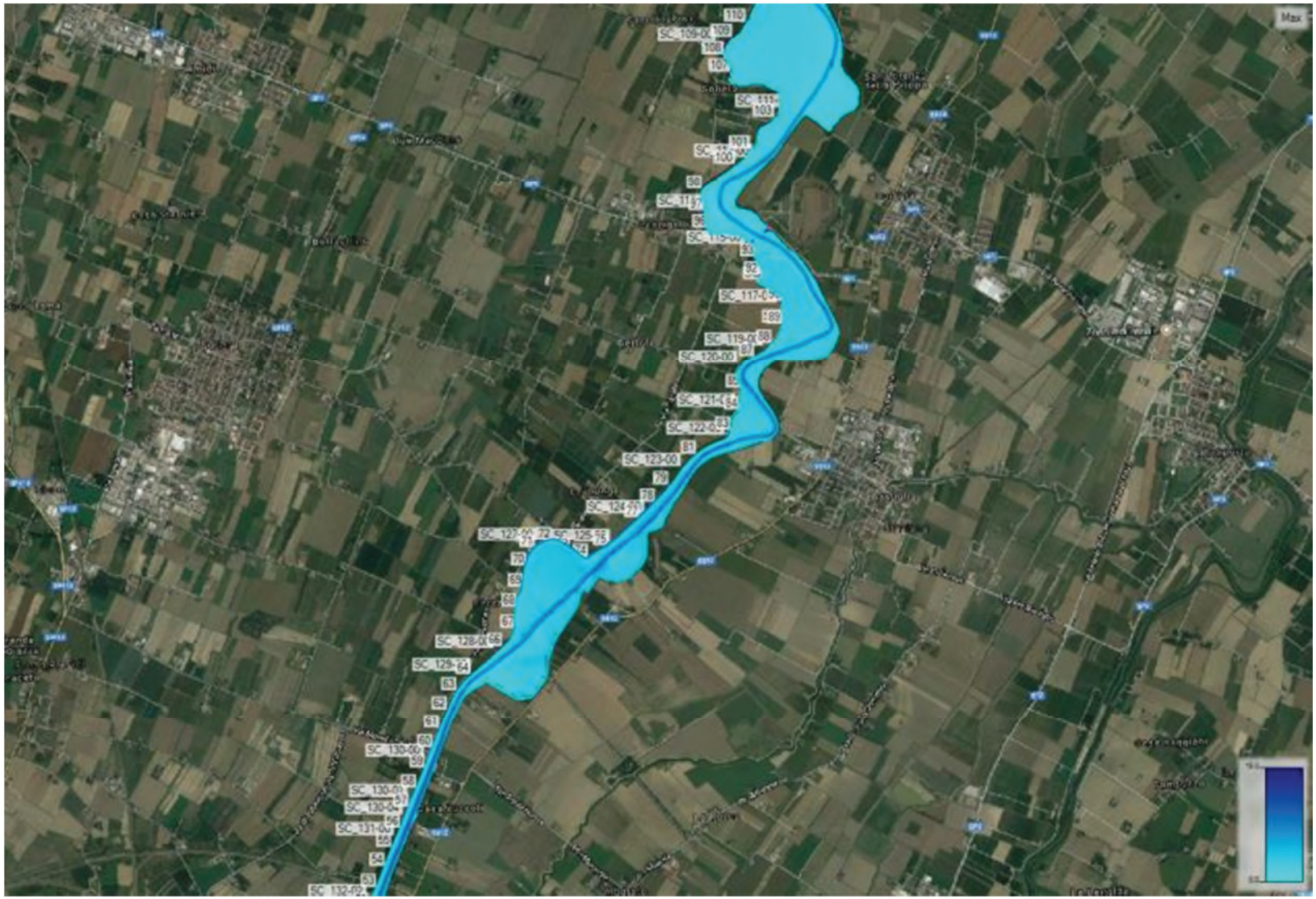



**Fig. 99 Aree inondate dell'evento di piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di stato di fatto**

**Fig. 100 Aree inondate dell'evento di piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di stato di fatto**

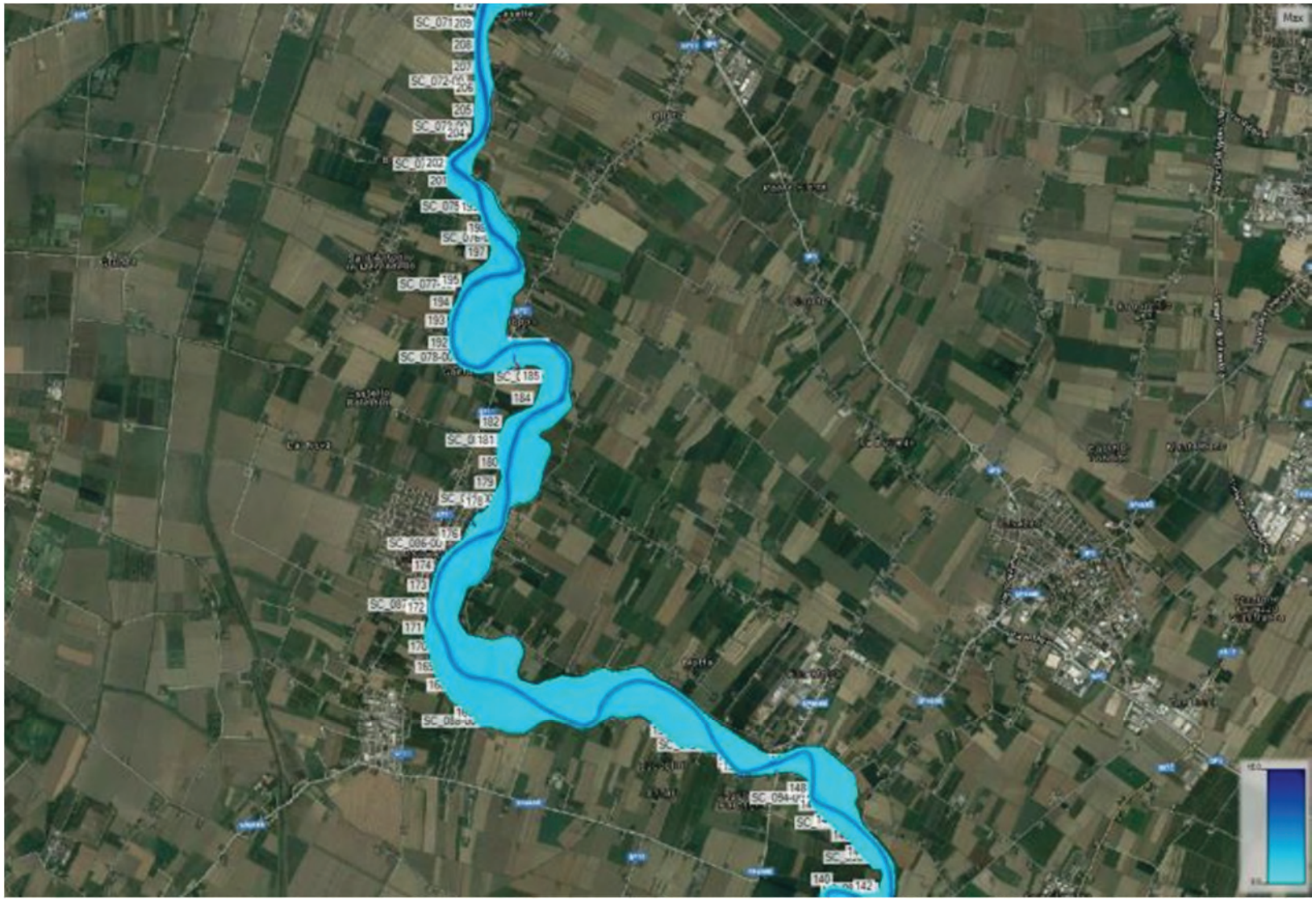


**Fig. 101 Aree inondate dell'evento di piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di stato di fatto**

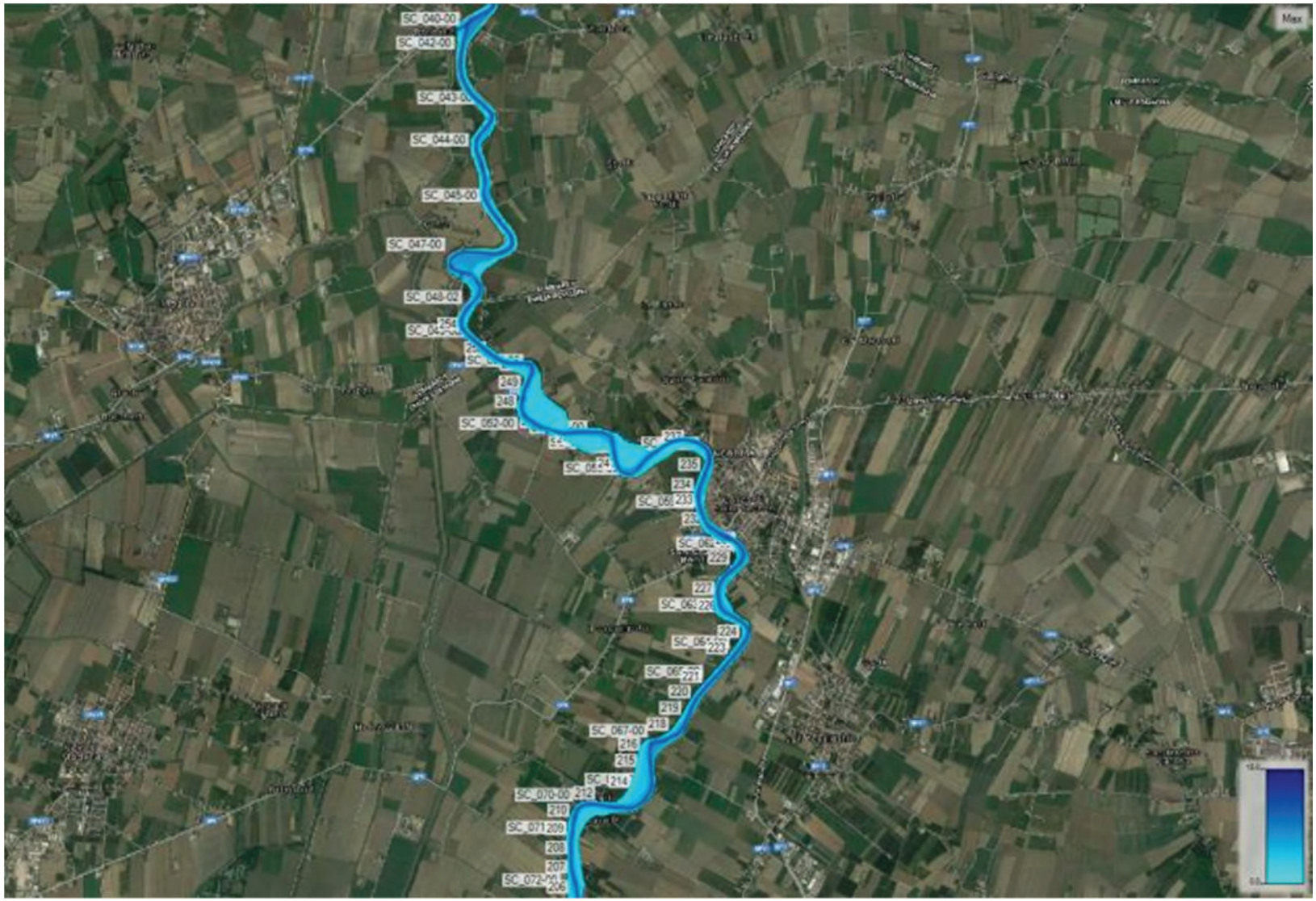



**Fig. 102 Aree inondate dell'evento di piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di stato di fatto**

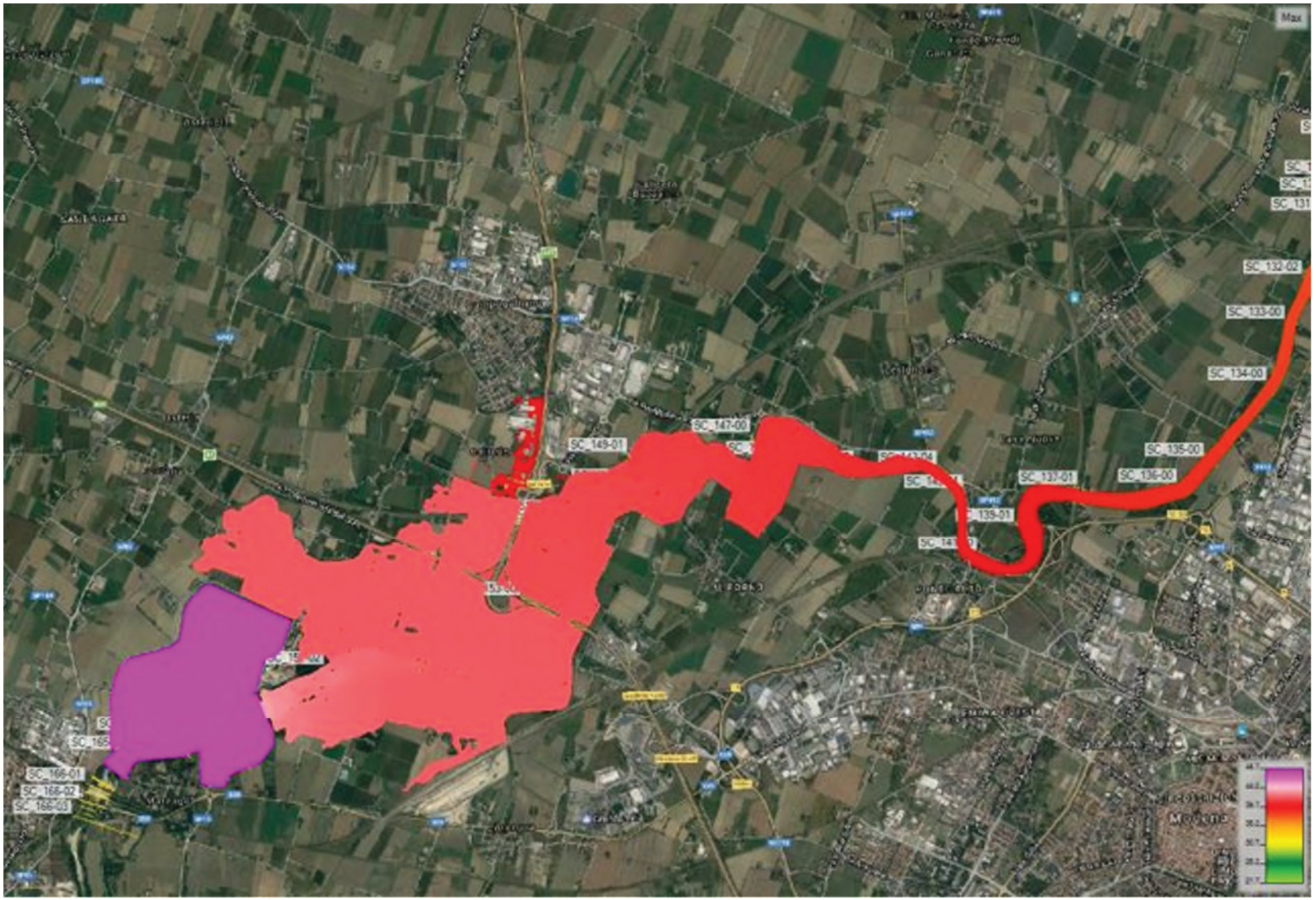



**Fig. 103 Massimi livelli dell'evento di piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di stato di fatto**

**Fig. 104 Massimi livelli dell'evento di piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di stato di fatto**

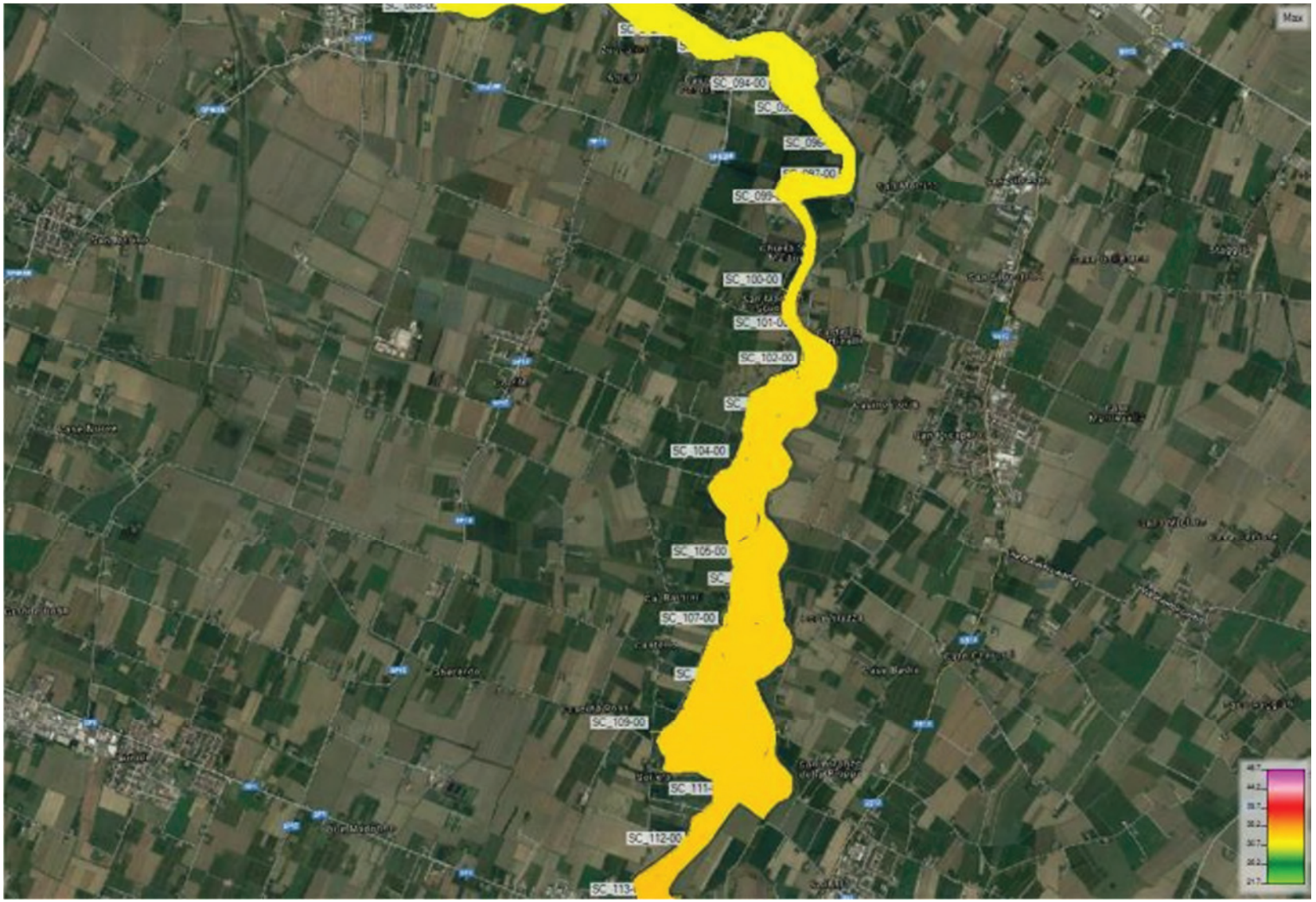



**Fig. 105 Massimi livelli dell'evento di piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di stato di fatto**

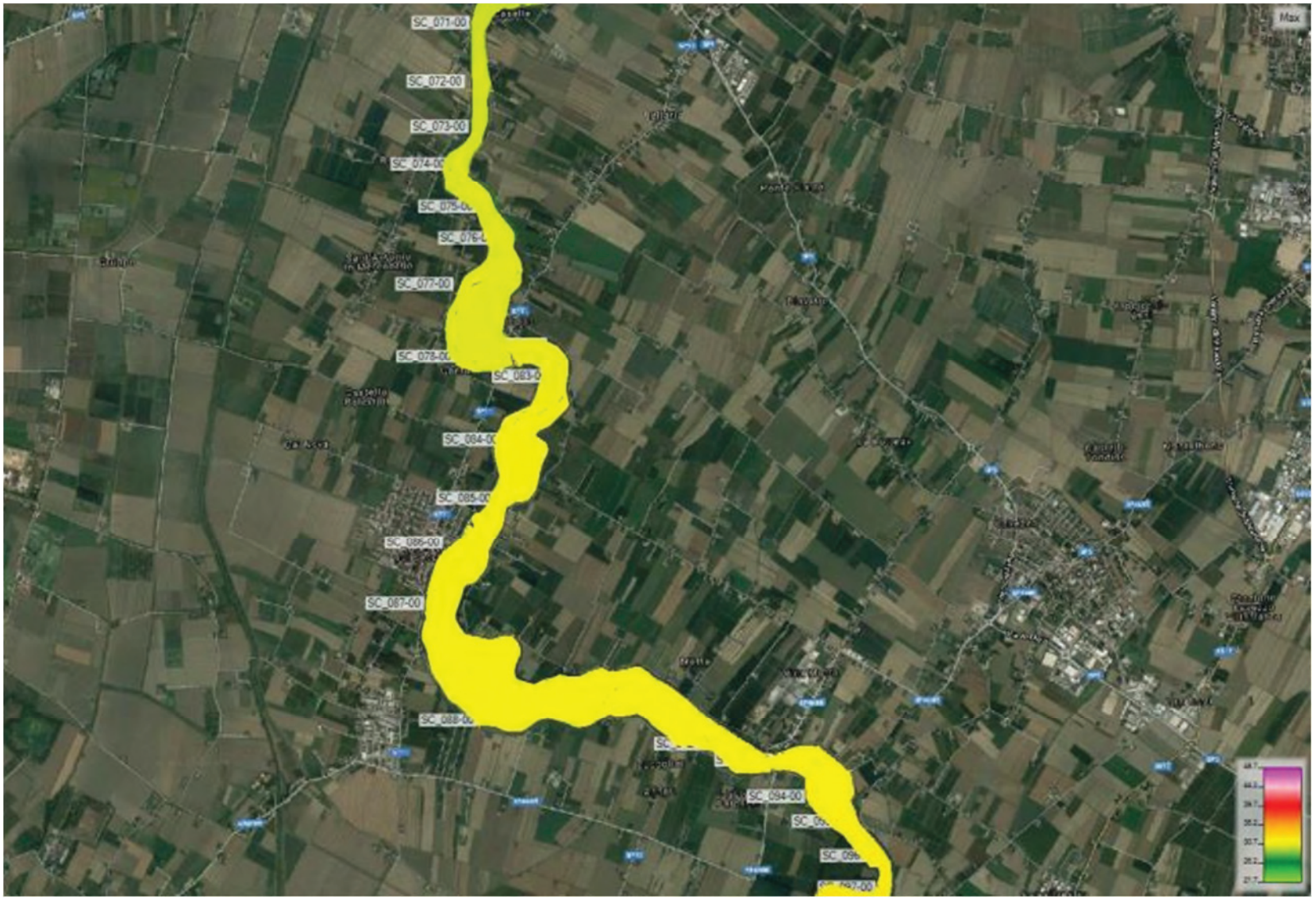



**Fig. 106 Massimi livelli dell'evento di piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di stato di fatto**

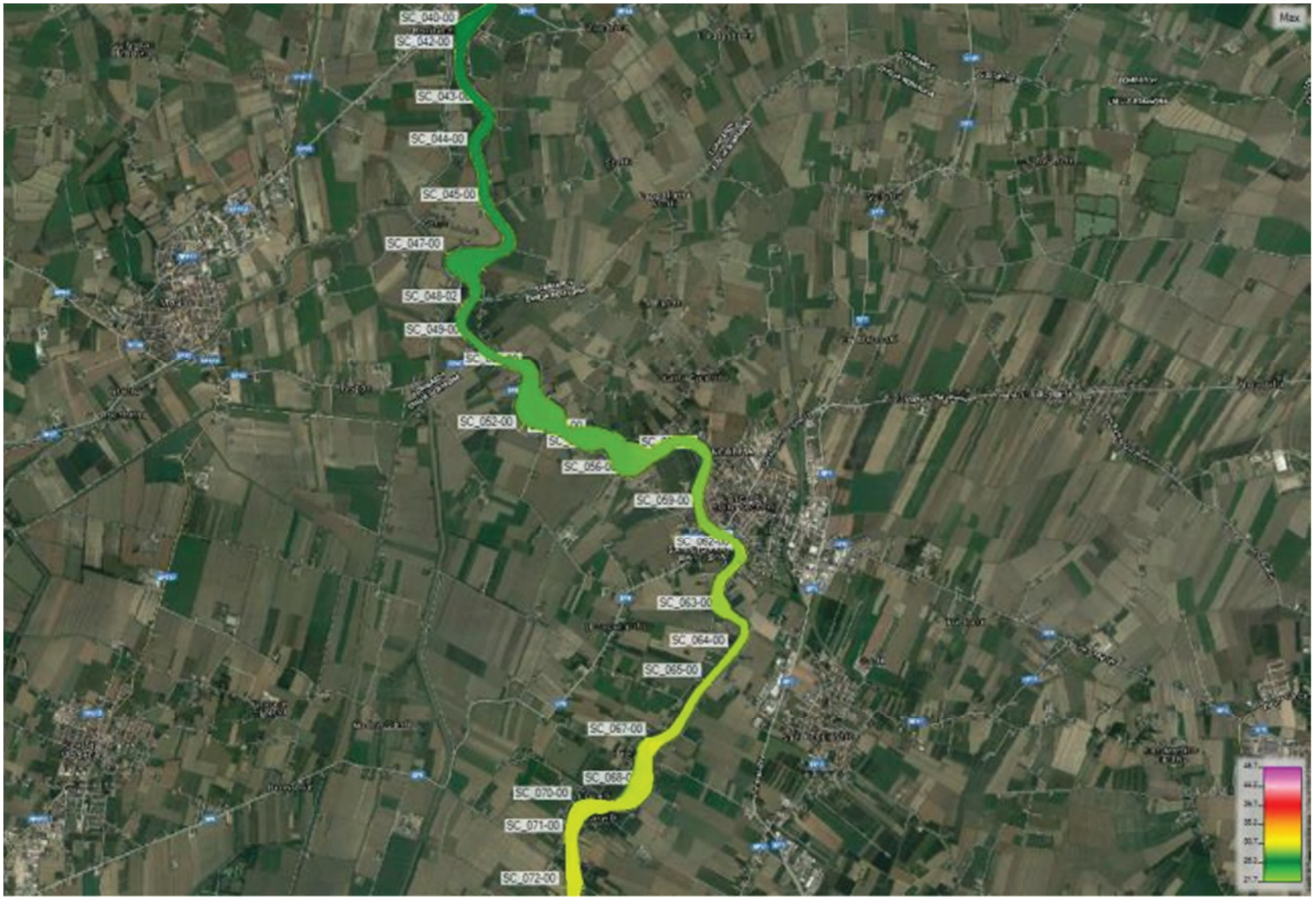



**Fig. 107 Massimi livelli dell'evento di piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di stato di fatto**

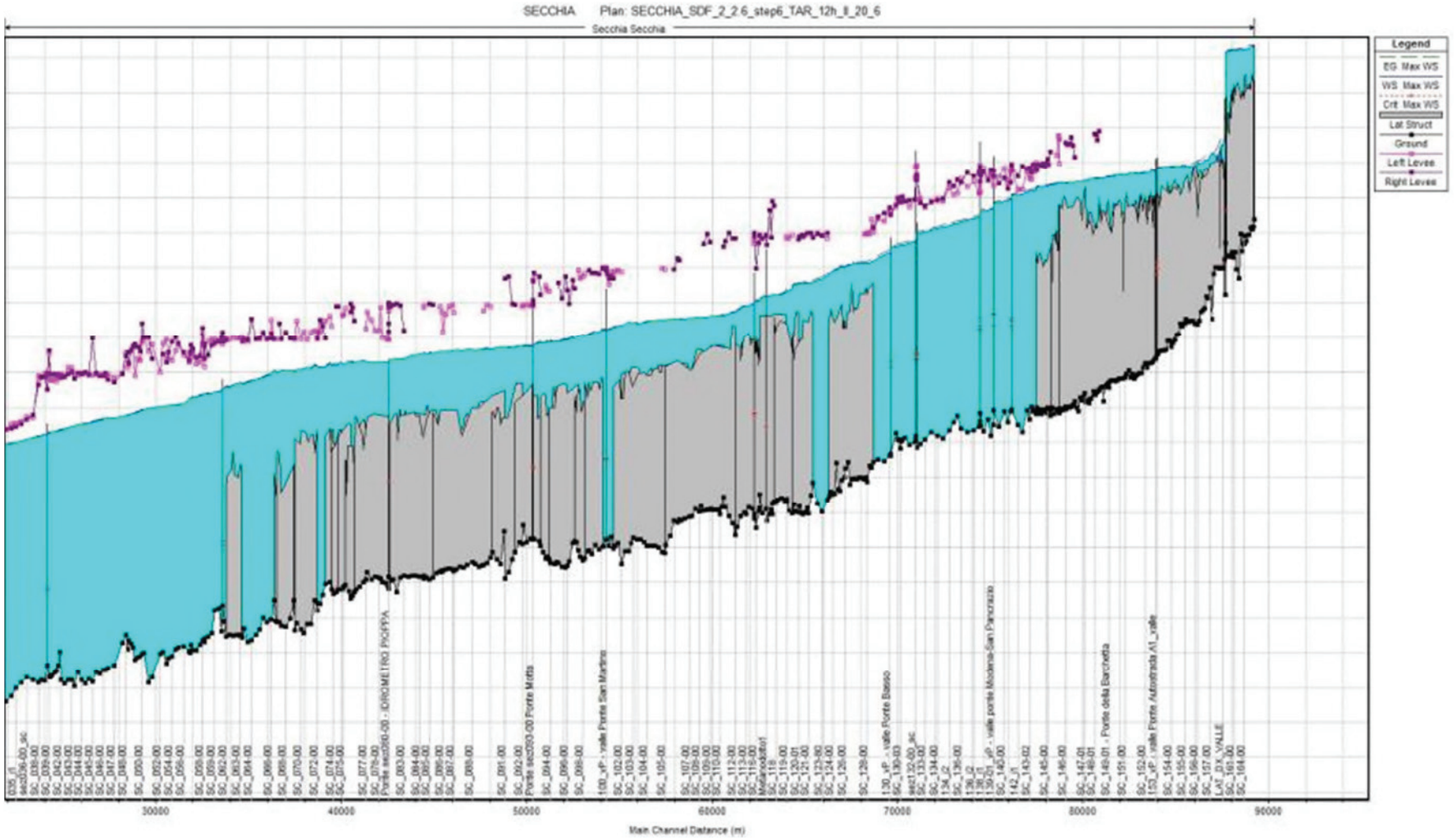



**Fig. 108 Profilo inviluppo dei massimi livelli idrometrici della piena con tempo di ritorno 20 anni (durata critica 12 ore)**

### *5.1.1.9. Piena di progetto TR 20 anni (durata pioggia 24h) - (scenario 4)*

La simulazione idraulica della piena con tempo di ritorno 20 anni e durata critica 24 ore ha evidenziato come il maggior volume e il minor colmo dell'onda di piena renda meno efficiente la cassa, determinando un minor effetto di laminazione a valle rispetto allo scenario idrologico precedente.

La portata al colmo in questo caso viene laminata di circa il 4% ( da 1.274 a 1225 $m^3/s$) per effetto della cassa, e del 33,5 %, (da 1.225 a 814 $m^3/s$) nel tratto tra la cassa e l'autostrada A1. Nel tratto arginato da valle dell'A1 fino al ponte di Concordia si ha un'ulteriore laminazione del 41% e il colmo si riduce a circa 477 $m^3/s$ (Fig. 109).

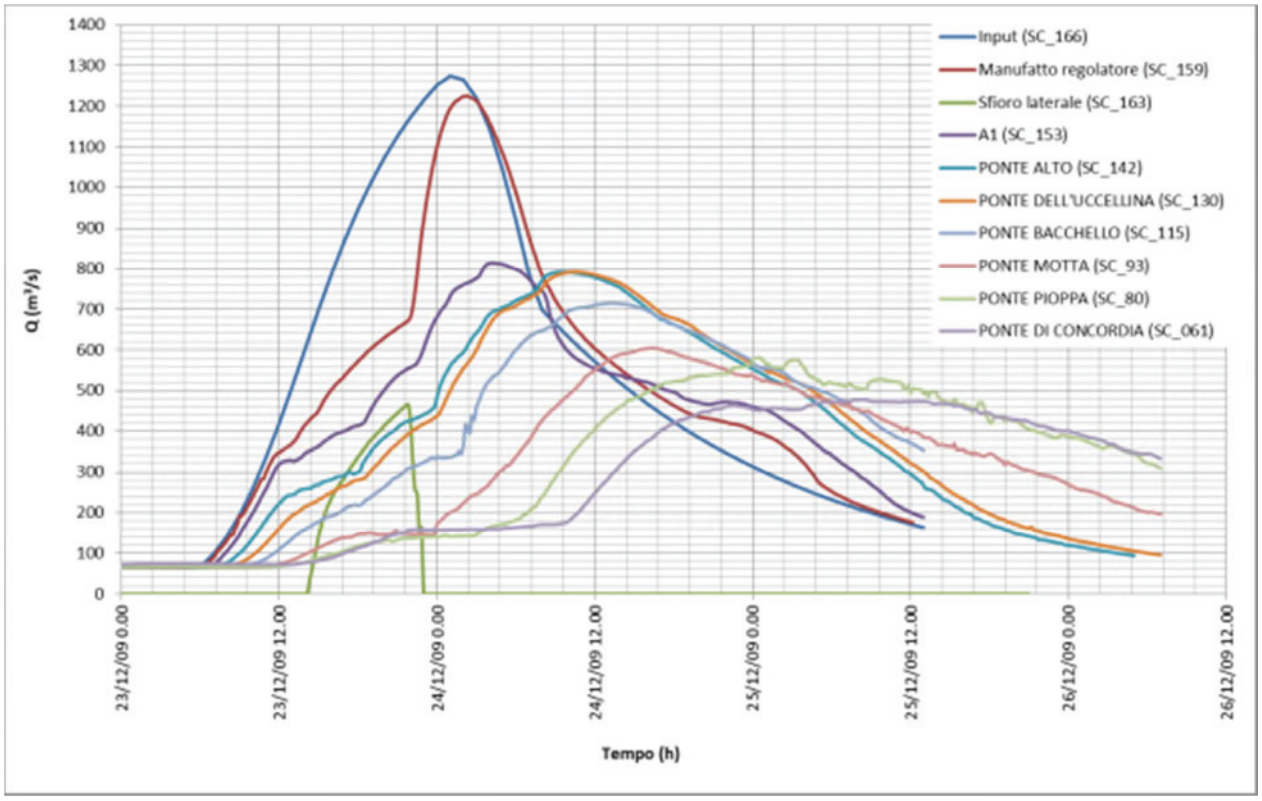



**Fig. 109 Variazione dell'idrogramma in portata per tempo di ritorno 20 anni (durata critica 24 ore) nel tratto compreso tra la SS 9 e il ponte di Concordia**

**Tab. 13 Andamento dei valori al colmo dell'idrogramma per tempo di ritorno 20 anni (durata critica 24 ore) nel tratto compreso tra la SS9 e il ponte di Concordia**

| Sezione | Portata al colmo ($m^3/s$) |
|---|---|
| SS9 SC_166-00 | 1350 |
| Manufatto regolatore SC_159-00 | 1225 |
| Sfioro larerale SC_163-00 | 465 |
| Ponte autostrada A1 SC_153-00 | 814 |
| Ponte Alto SC_142-00 | 792 |
| Ponte dell'Uccellina SC_130-00 | 791 |
| Ponte Bacchello SC_115-00 | 715 |
| Ponte Motta SC_093-00 | 605 |
| Ponte Pioppa SC_080-00 | 580 |
| Ponte Concordia SC_061-00 | 477 |

La laminazione sensibilmente minore determina nel tratto arginato un cospicuo aumento delle altezze idriche del profilo di piena, il cui valore medio si attesta su circa 40 cm rispetto alla piena TR 20 anni e durata critica 12 ore.

Questo scenario idrologico, oltre a sollecitare maggiormente il tratto arginato, superando in molti punti la quota attuale della sommità arginale, provoca una maggiore estensione del tratto di sormonto dell'autostrada A1 ad ovest dello svincolo con l'autostrada A22, con altezze d'acqua sul piano stradale che raggiungono i 60 cm.

L'arginatura del canale Calvetro viene ampiamente sormontata, con allagamento che si estende a comprendere tutta la periferia sud di Campogalliano.

Anche l'autostrada A22 viene sormontata in un tratto, anche se il risultato locale potrebbe essere influenzato, almeno in parte, dalle condizioni al contorno del modello 2D legate al confinamento della geometria del piano campagna in prossimità dell'abitato di Campogalliano e per la zona in destra della A22 per mancanza di dati.

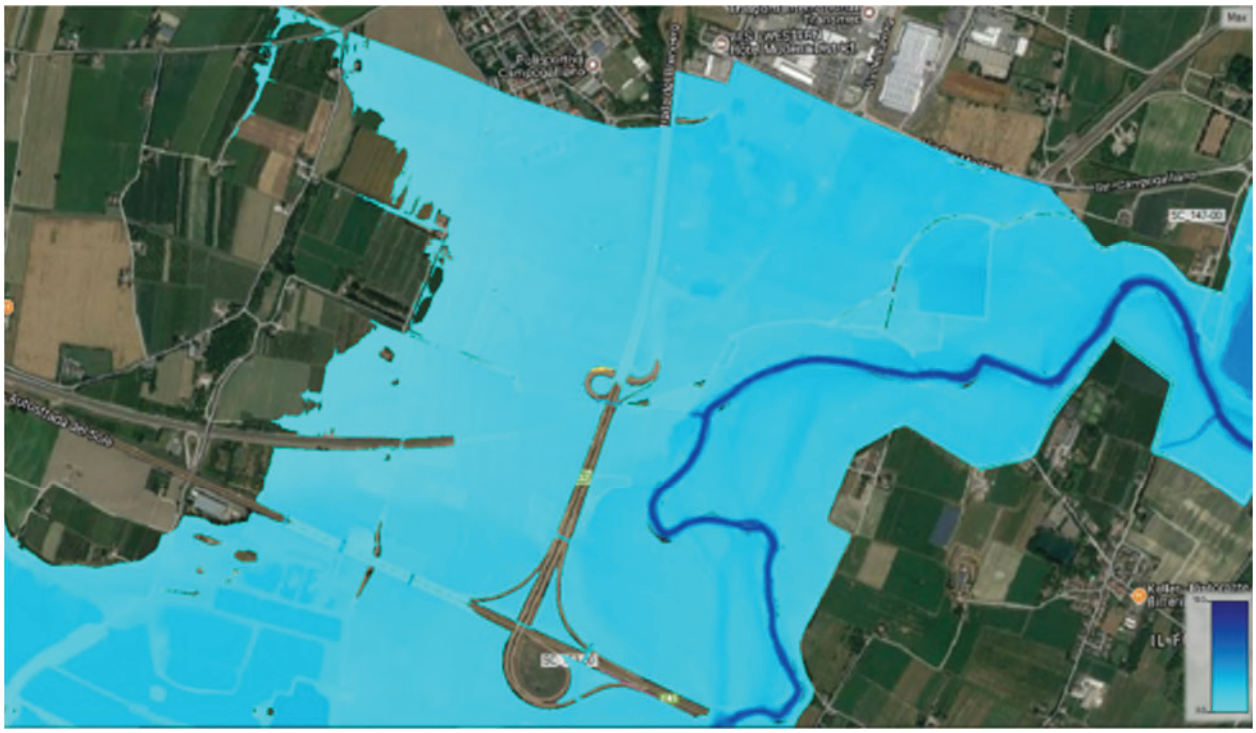


**Fig. 110 Sormonto dell'autostrada A1 e del canale Calvetro (piena TR 20 anni e durata critica 24 ore)**

L'innalzamento del profilo di piena amplifica lo stato di inadeguatezza dei ponti già evidenziato per l'evento precedentemente descritto (Tab. 14).

**Tab. 14 Franchi idraulici attraversamenti per la piena (TR 20 – 24 h)**

| Attraversamento | Quota intradosso (m s.m.) | Livello idrico Tr 20 – 12 h (m s.m.) | Franco (m) |
|---|---|---|---|
| PONTE A1 | 42,17 | 42,00 | 0,17 |
| PONTE DELLA BARCHETTA | 41,78 | 41,80 | -0,02 |
| PONTE ALTO | 36,87 | 40,60 | -3,73 |
| PONTE SP413 | 39,89 | 39,96 | -0,07 |
| PONTE FF.SS MO-MN | 40,05 | 39,72 | 0,33 |

| Attraversamento | Quota intradosso (m s.m.) | Livello idrico Tr 20 – 12 h (m s.m.) | Franco (m) |
|---|---|---|---|
| PONTE PEDONALE | 40,41 | 39,48 | 0,93 |
| PONTE MONTE TAV | 38,55 | 38,30 | 0,25 |
| PONTE TAV | 39,42 | 38,29 | 1,13 |
| PONTE DELL'UCCELLINO | 37,46 | 37,50 | -0,04 |
| PONTE BACCHELLO | 34,90 | 34,48 | 0,42 |
| PONTE SAN MARTINO | 33,23 | 32,94 | 0,29 |
| PONTE MOTTA | 31,95 | 31,85 | 0,1 |
| PONTE PIOPPA | 30,04 | 30,96 | -0,92 |
| PONTE DI CONCORDIA | 28,04 | 29,30 | -1,26 |

**Fig. 111 Aree inondate e massime altezze d'acqua dell'evento di piena TR 20 anni (durata critica 24 ore) nella configurazione di stato di fatto**

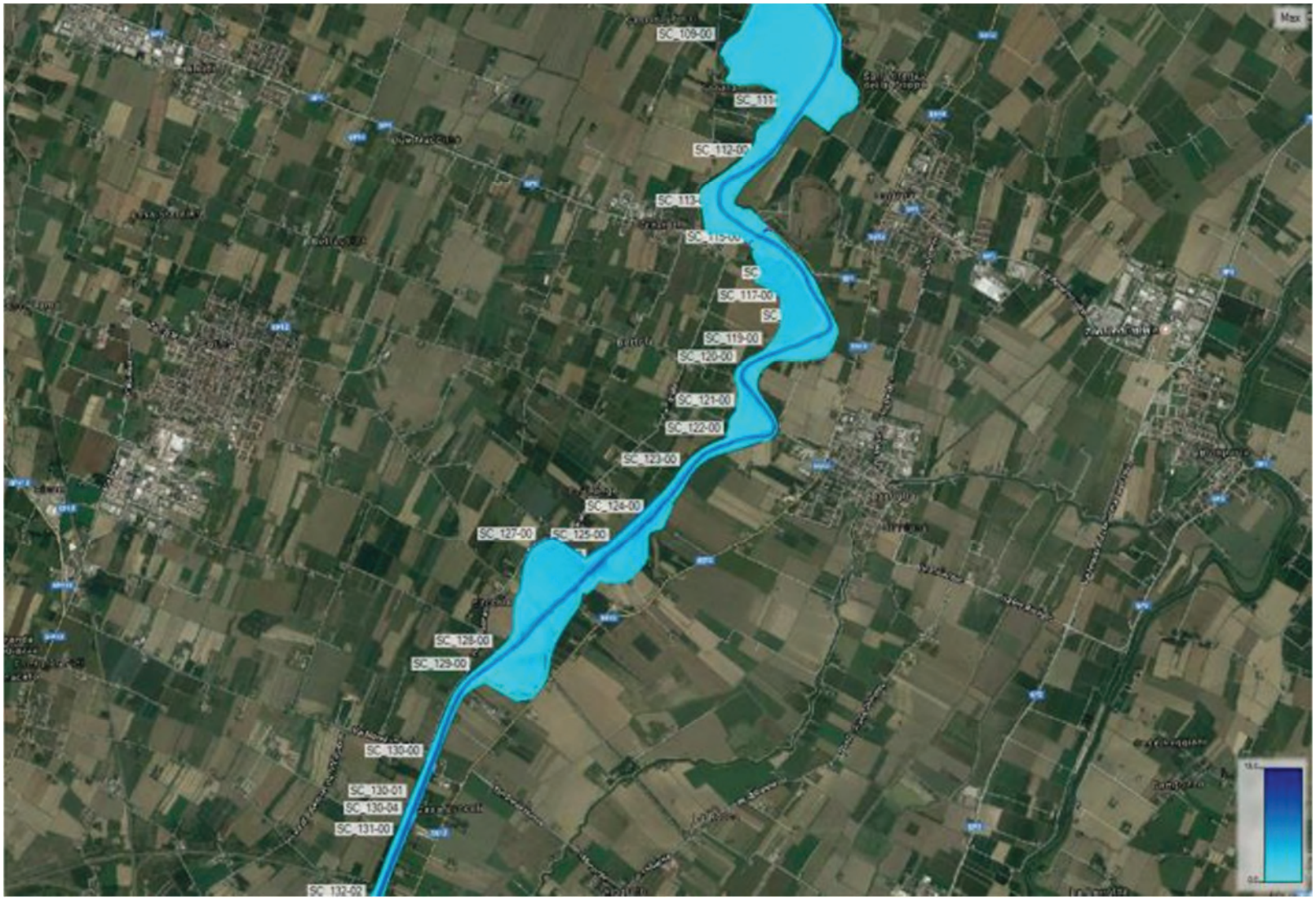



**Fig. 112 Aree inondate e massime altezze d'acqua dell'evento di piena TR 20 anni (durata critica 24 ore) nella configurazione di stato di fatto**

**Fig. 113 Aree inondate e massime altezze d'acqua dell'evento di piena TR 20 anni (durata critica 24 ore) nella configurazione di stato di fatto**

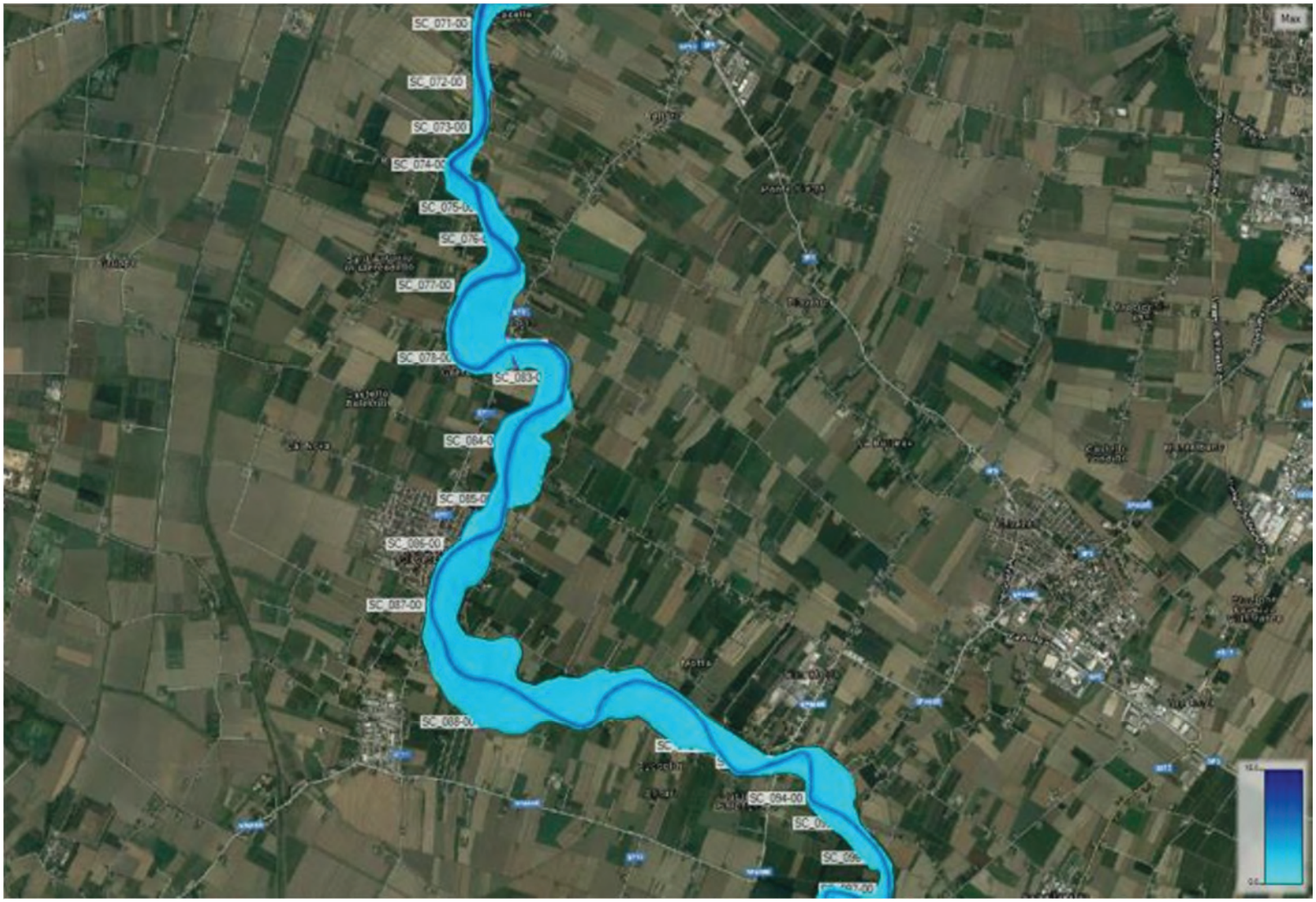



**Fig. 114 Aree inondate e massime altezze d'acqua dell'evento di piena TR 20 anni (durata critica 24 ore) nella configurazione di stato di fatto**

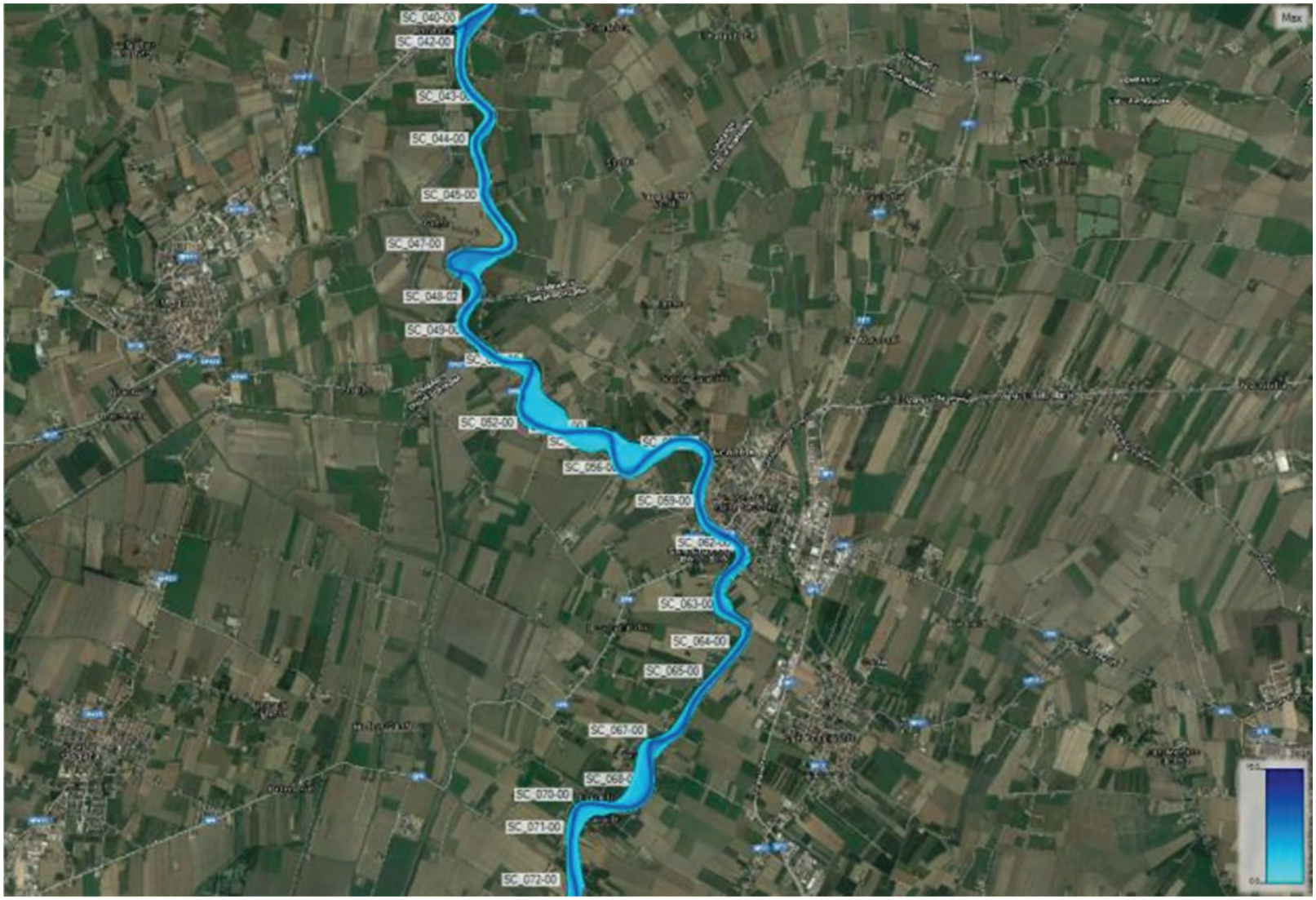



**Fig. 115 Aree inondate e massime altezze d'acqua dell'evento di piena TR 20 anni (durata critica 24 ore) nella configurazione di stato di fatto**

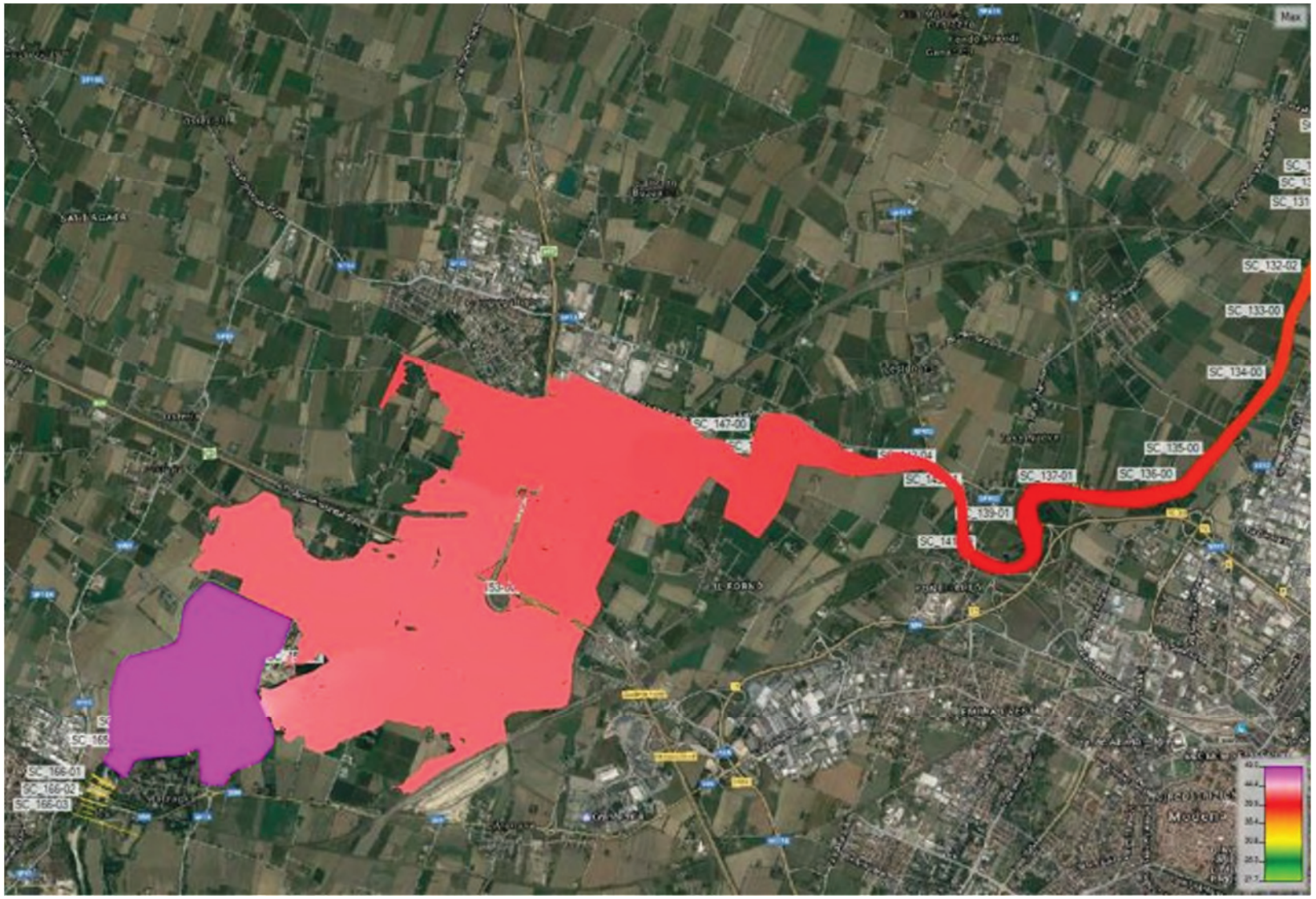



**Fig. 116 Massimi livelli dell'evento di piena TR 20 anni (durata critica 24 ore) nella configurazione di stato di fatto**

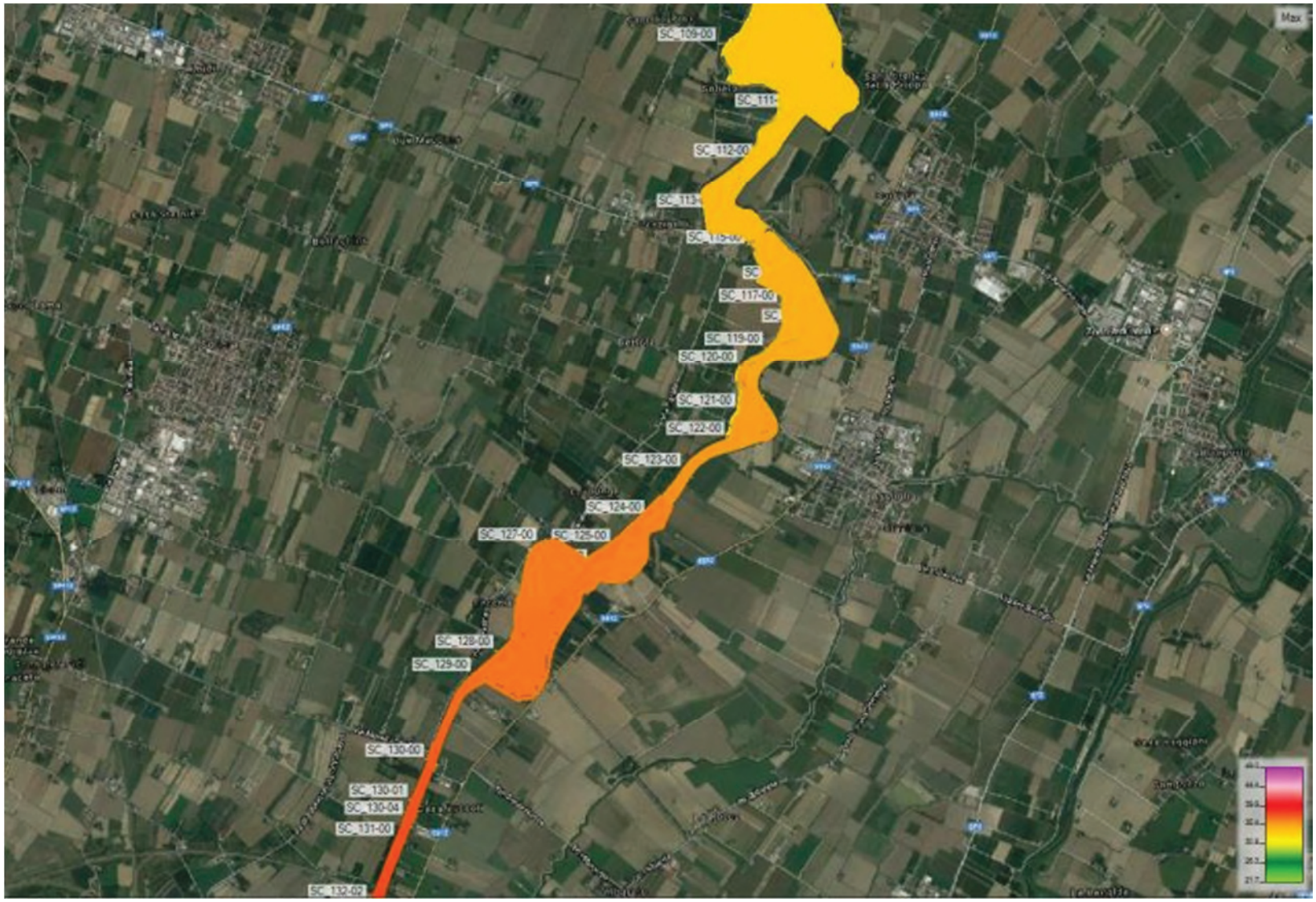



**Fig. 117 Massimi livelli dell'evento di piena TR 20 anni (durata critica 24 ore) nella configurazione di stato di fatto**

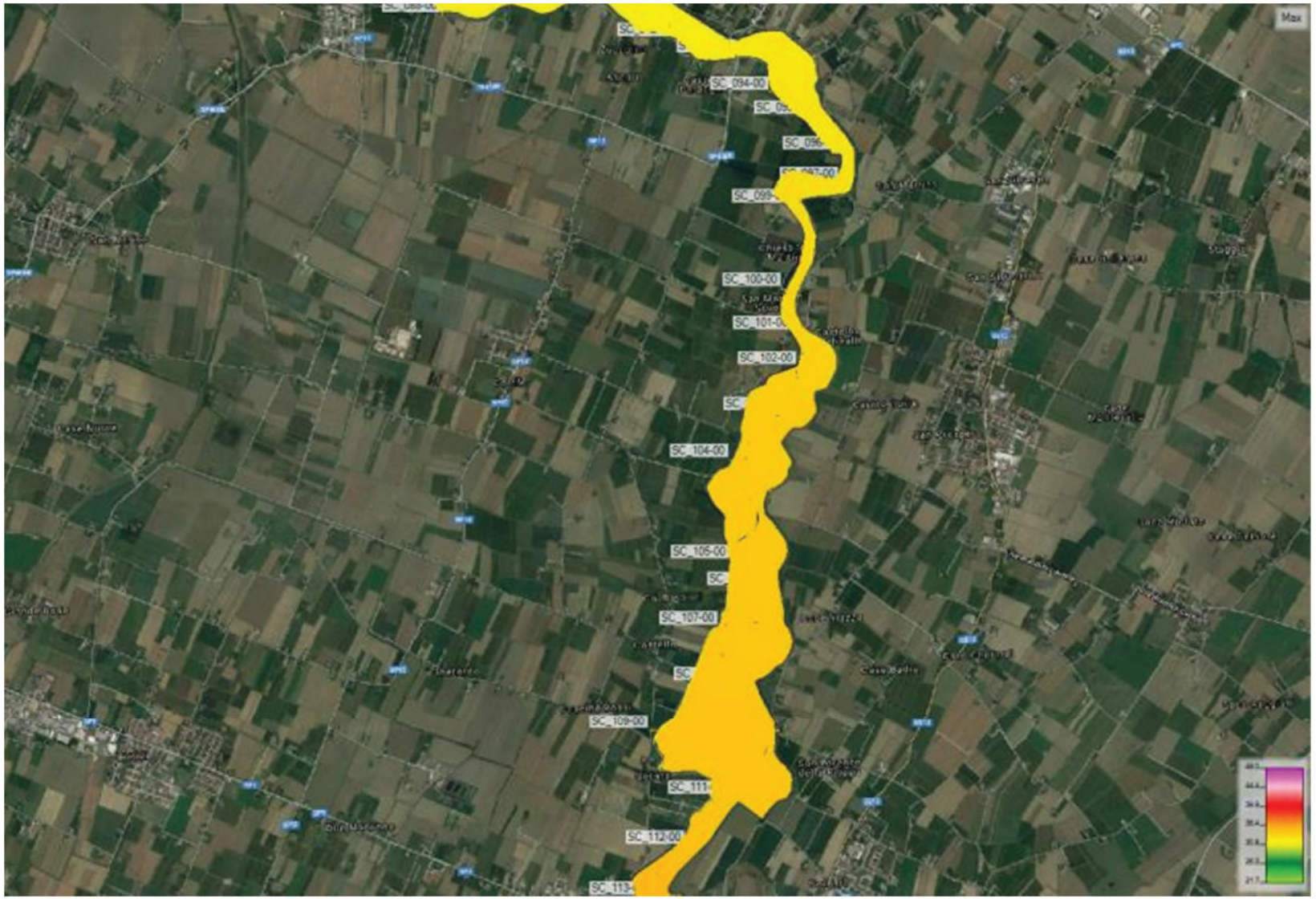



**Fig. 118 Massimi livelli dell'evento di piena TR 20 anni (durata critica 24 ore) nella configurazione di stato di fatto**

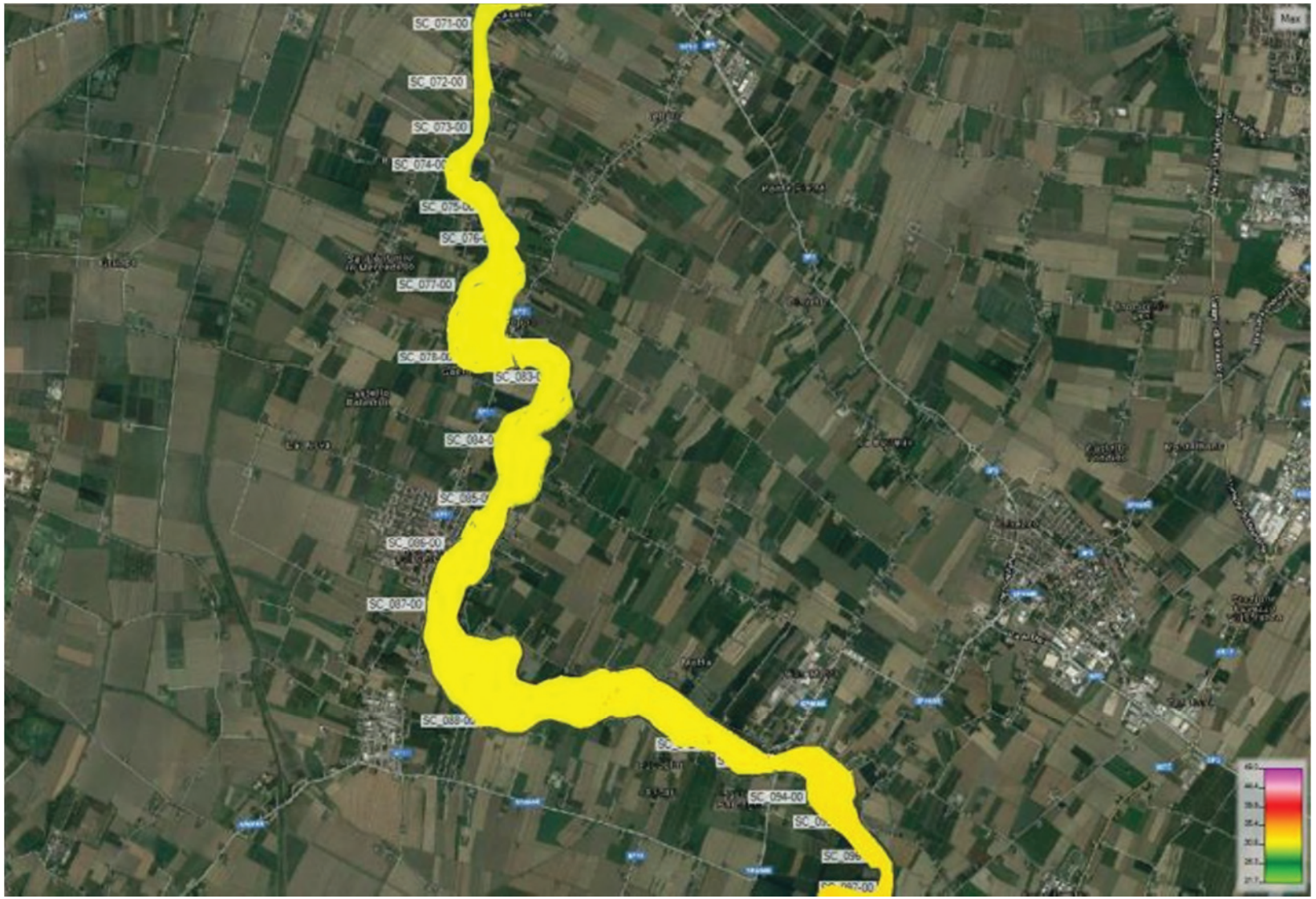



**Fig. 119 Massimi livelli dell'evento di piena TR 20 anni (durata critica 24 ore) nella configurazione di stato di fatto**

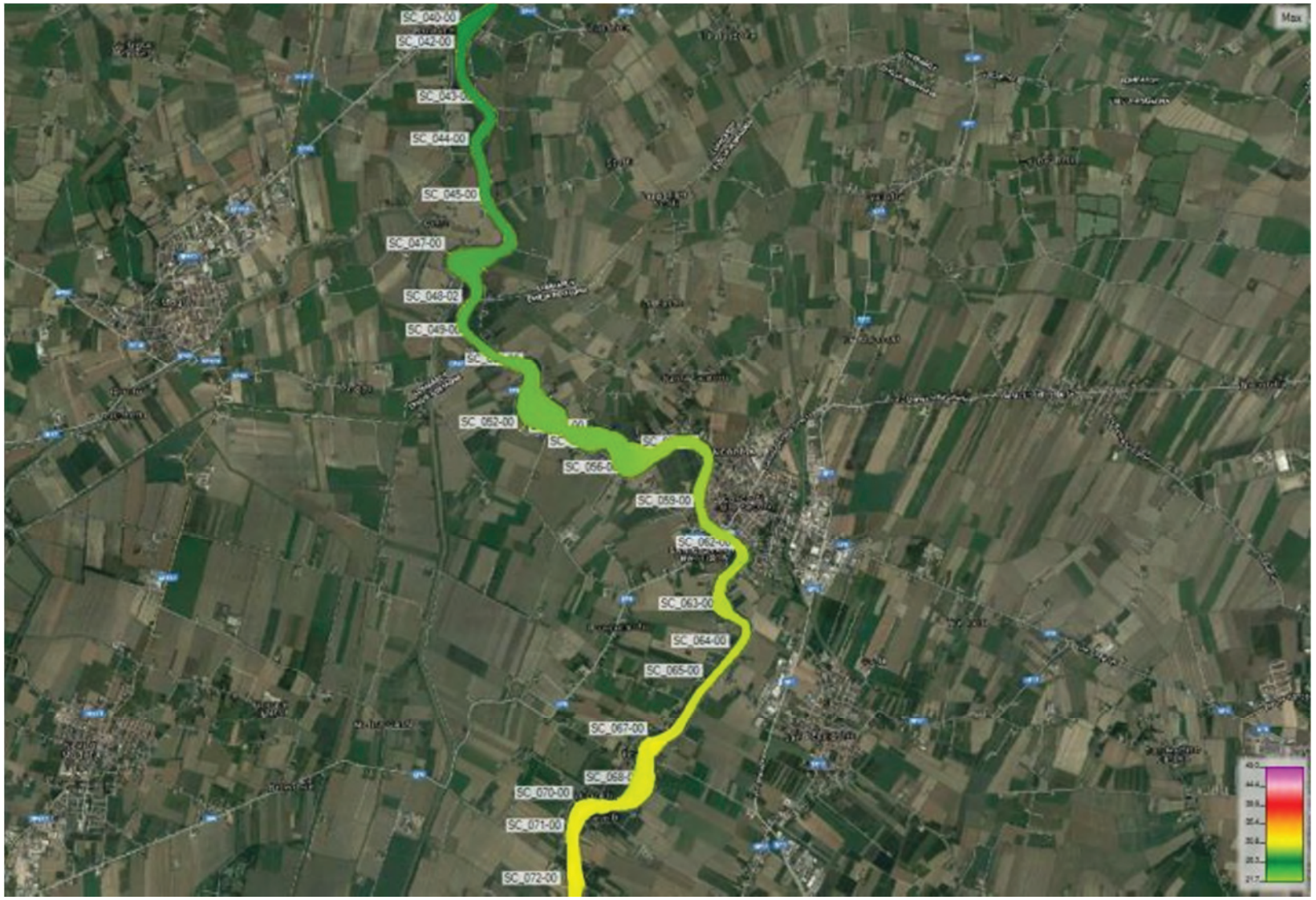



**Fig. 120 Massimi livelli dell'evento di piena TR 20 anni (durata critica 24 ore) nella configurazione di stato di fatto**

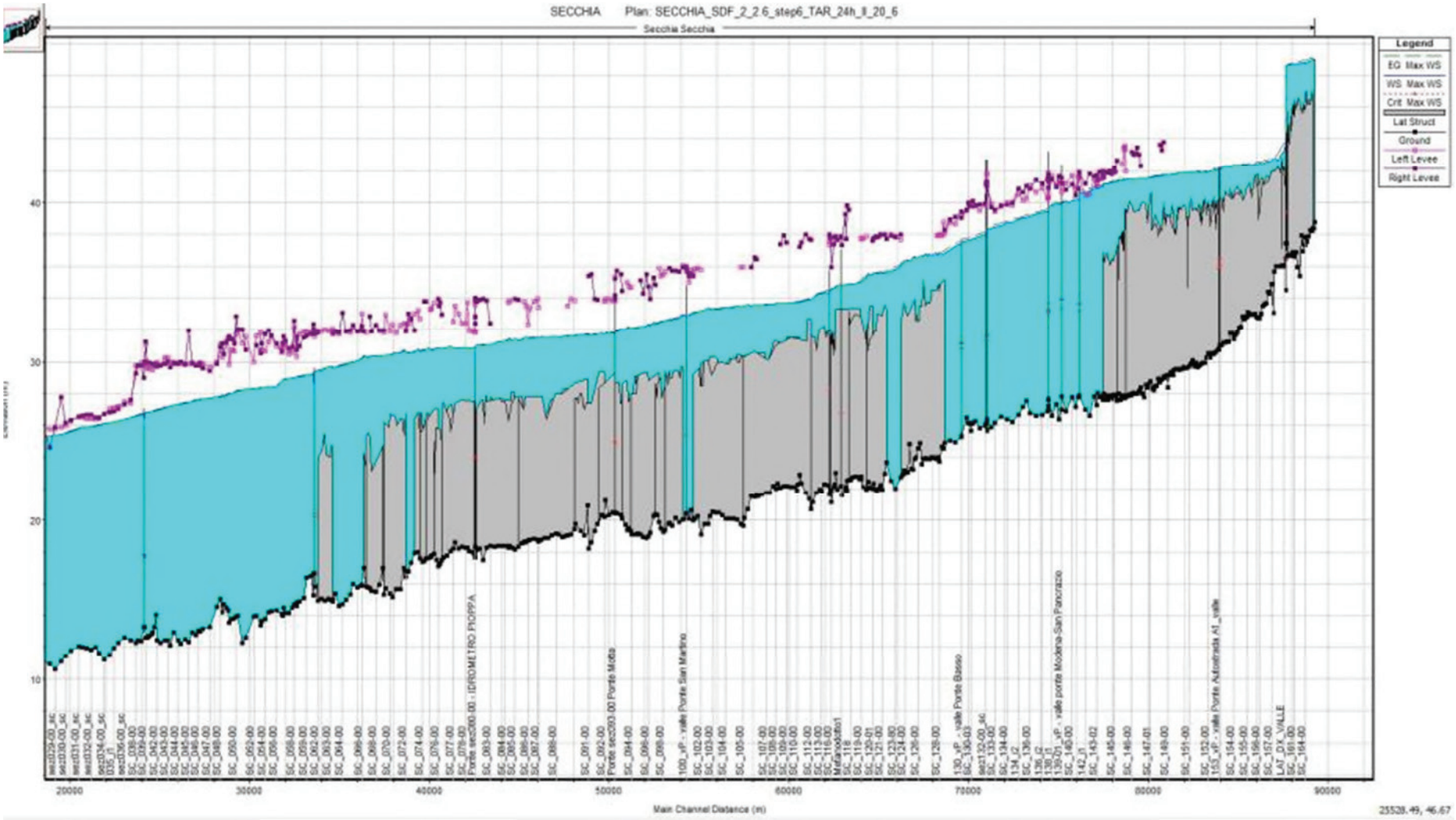



**Fig. 121 Profili dei massimi livelli idrometrici delle piene con tempo di ritorno 20 anni (durata critica 12 ore) e (durata critica 24 ore) nella configurazione di stato di fatto**

## 5.2.2. Configurazione di progetto

### 5.1.1.10. Piena di progetto TR 20 anni (durata pioggia 12h) - (scenario 5)

Dall'analisi dei risultati ottenuti nello studio di dettaglio delle piene di progetto con tempo di ritorno 20 anni e durata 12 e 24 ore è apparso come l'entità dei due eventi incida in maniera cospicua sugli effetti nel tratto di asta in esame.

In ragione delle analisi effettuate si è deciso di assumere come piena di progetto quella rappresentata dall'evento con tempo di ritorno di 20 anni e durata critica di 12 ore. Rispetto a tale scenario sono stati dimensionati gli interventi di adeguamento in quota delle arginature, di adeguamento in sagoma rispetto ai fenomeni di stabilità e sifonamento, di miglioramento morfologico delle aree golenali, di adeguamento dei manufatti interferenti e, in particolare, di miglioramento delle condizioni di officiosità in corrispondenza dei ponti.

Rispetto alla piena con TR 20 e durata 24 ore, la configurazione di progetto sopra indicata consente comunque il contenimento del profilo di piena relativo, seppur con un franco inferiore al metro, con le condizioni conseguenti rispetto agli aspetti di stabilità strutturale e geotecnica degli argini.

La configurazione di progetto è stata implementata geometricamente nel modello andando a schematizzare i vari interventi di ricalibratura e risezionamento dell'alveo modificando le geometrie delle sezioni specificatamente interessate dall'intervento.

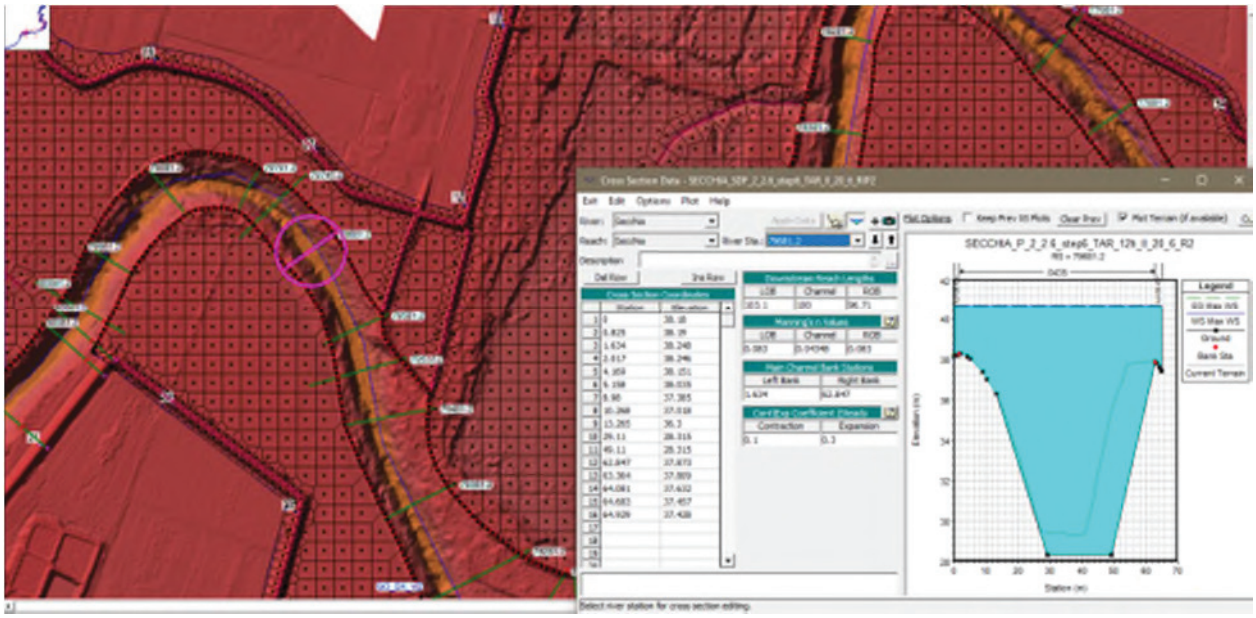


**Fig. 122 Esempio di risezionamento dell'alveo (tra stante SX 10 e 11 circa)**

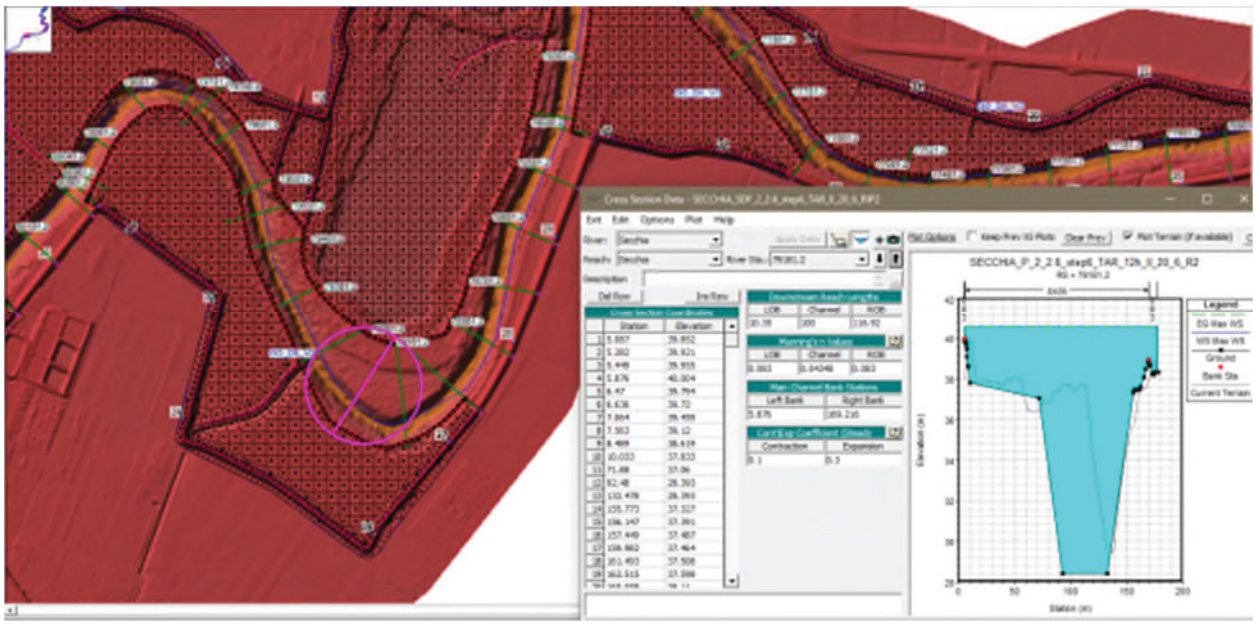


**Fig. 123 Esempio di risezionamento dell'alveo (tra stante DX 23 e 28 circa)**

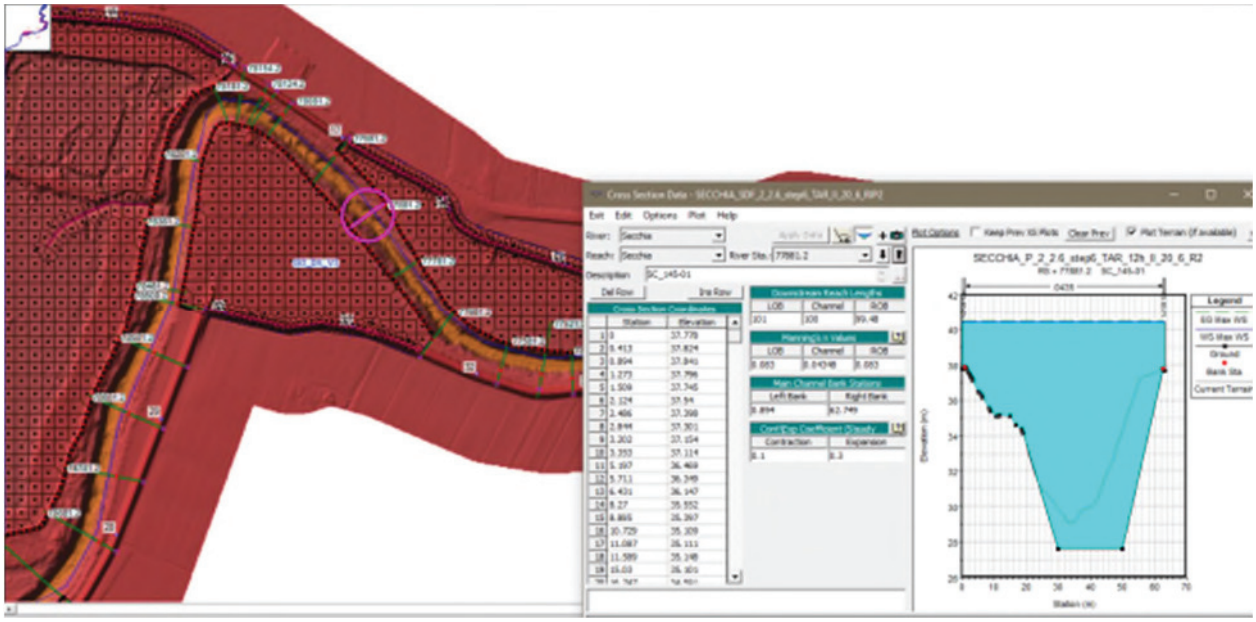


**Fig. 124 Esempio di risezionamento dell'alveo (tra stante SX 16 e stante DX 33 circa)**

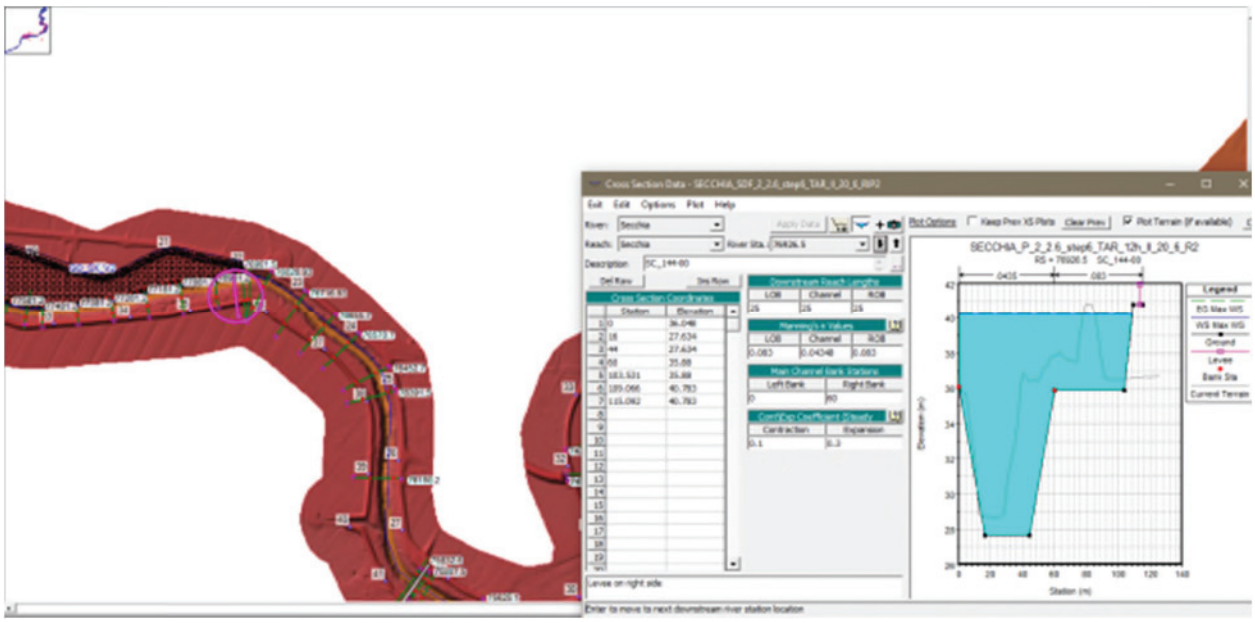


**Fig. 125 Esempio di risezionamento dell'alveo (tra stante SX 22 e 27 circa)**

**Fig. 126 Esempio di risezionamento dell'alveo (tra stante DX 45 e 47 circa)**

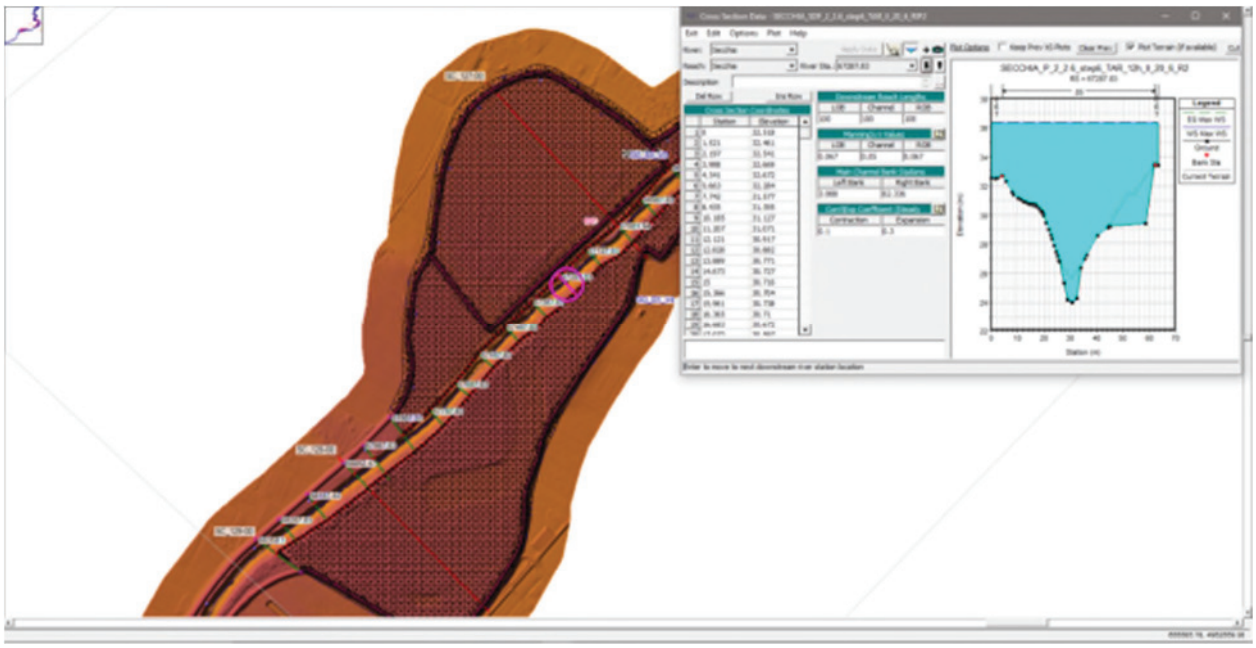


**Fig. 127 Esempio di risezionamento dell'alveo (tra stante SX 65 e 74 circa)**

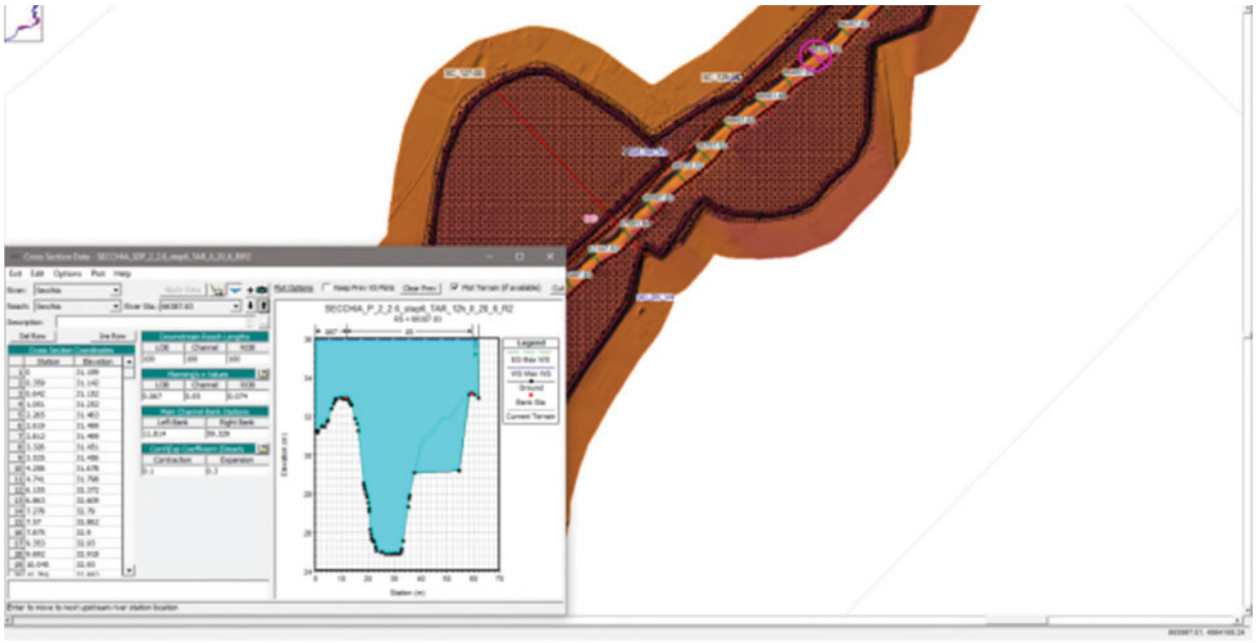


**Fig. 128 Esempio di risezionamento dell'alveo (tra stante SX 75 e 77 circa)**

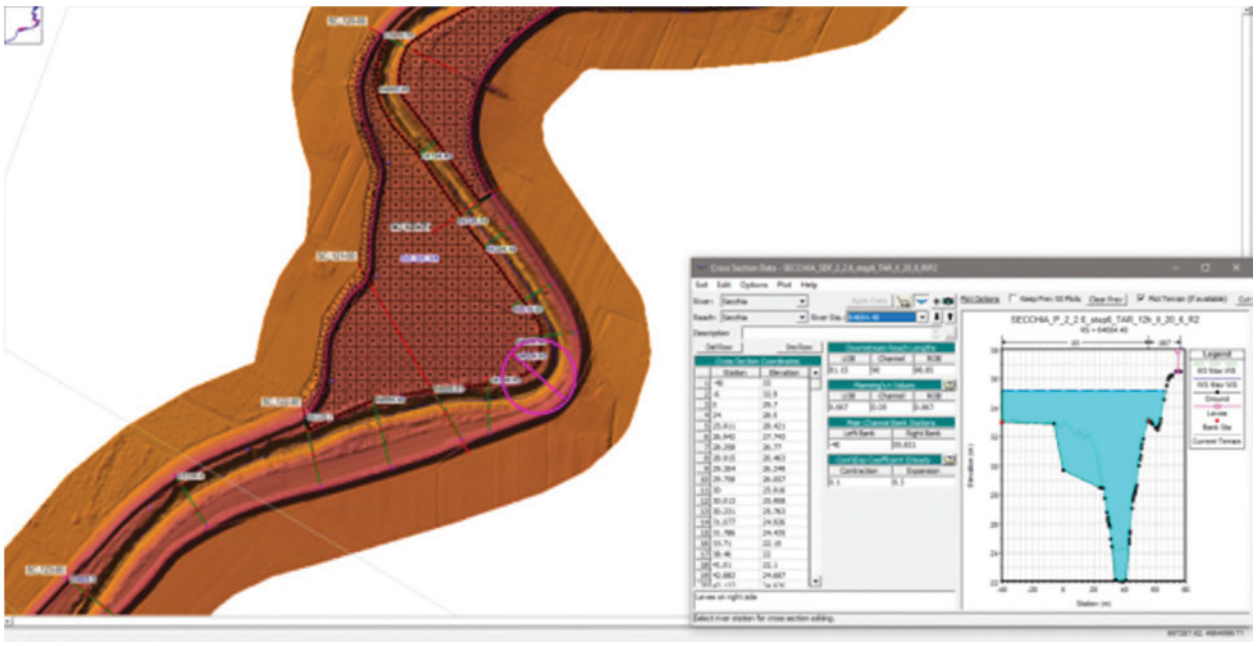


**Fig. 129 Esempio di risezionamento dell'alveo (tra stante DX 100 e 102 circa)**

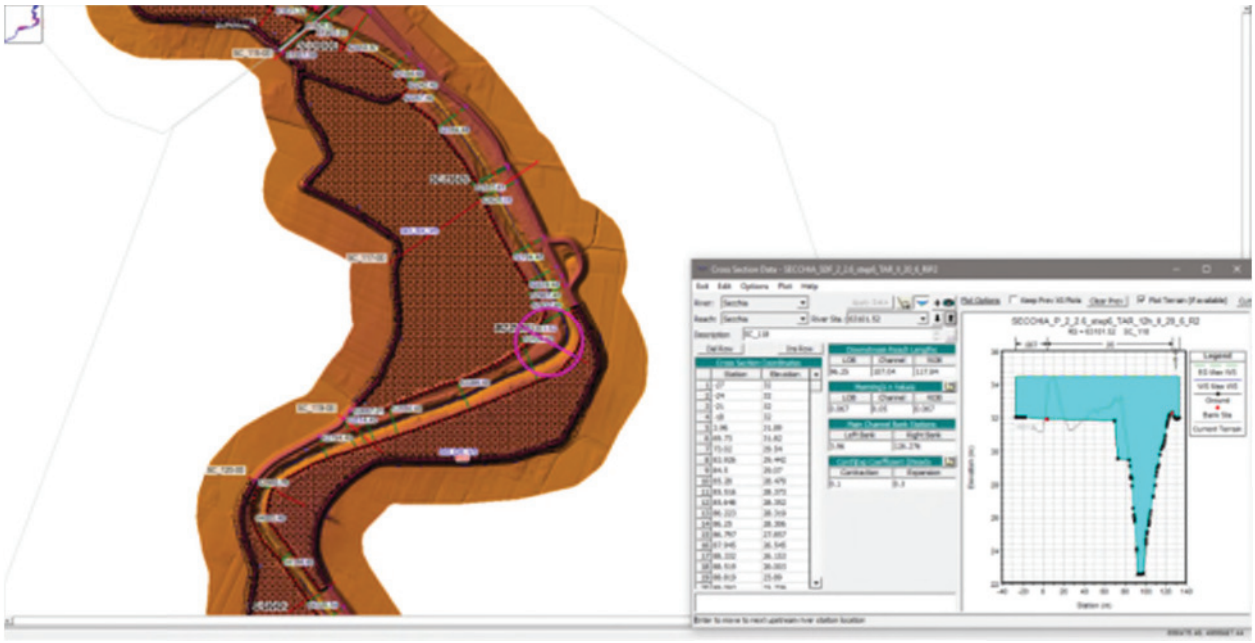


**Fig. 130 Esempio di risezionamento dell'alveo (tra stante DX 108 e 110 circa)**

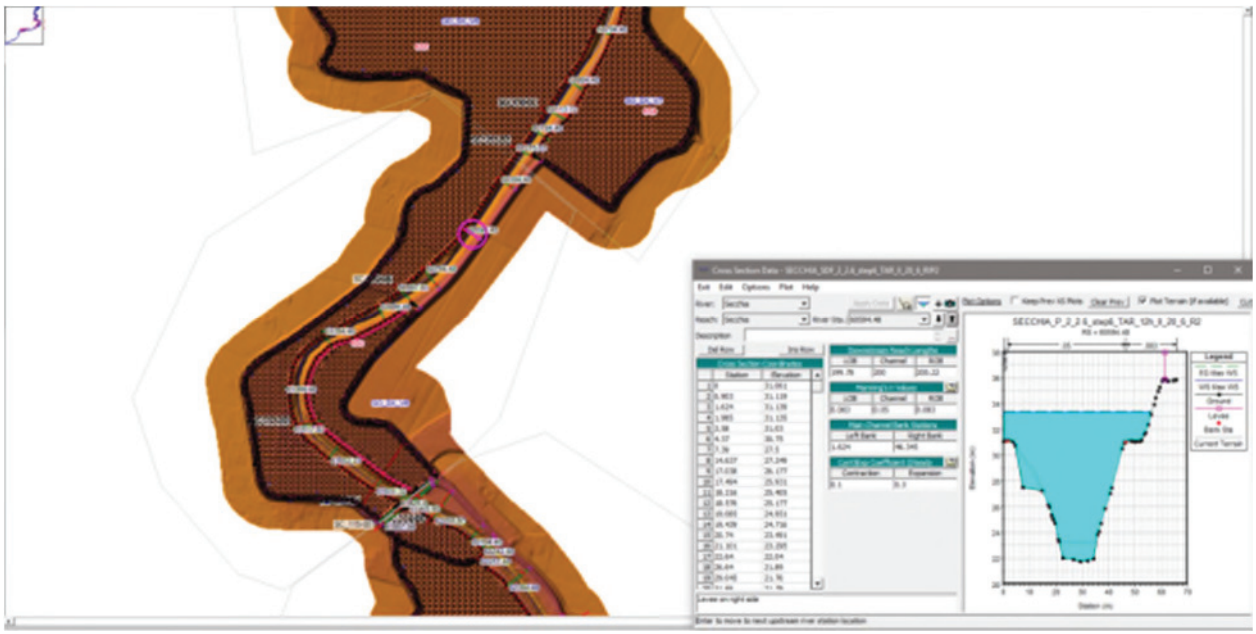


**Fig. 131 Esempio di risezionamento dell'alveo (tra stante DX 118 e 122 circa)**

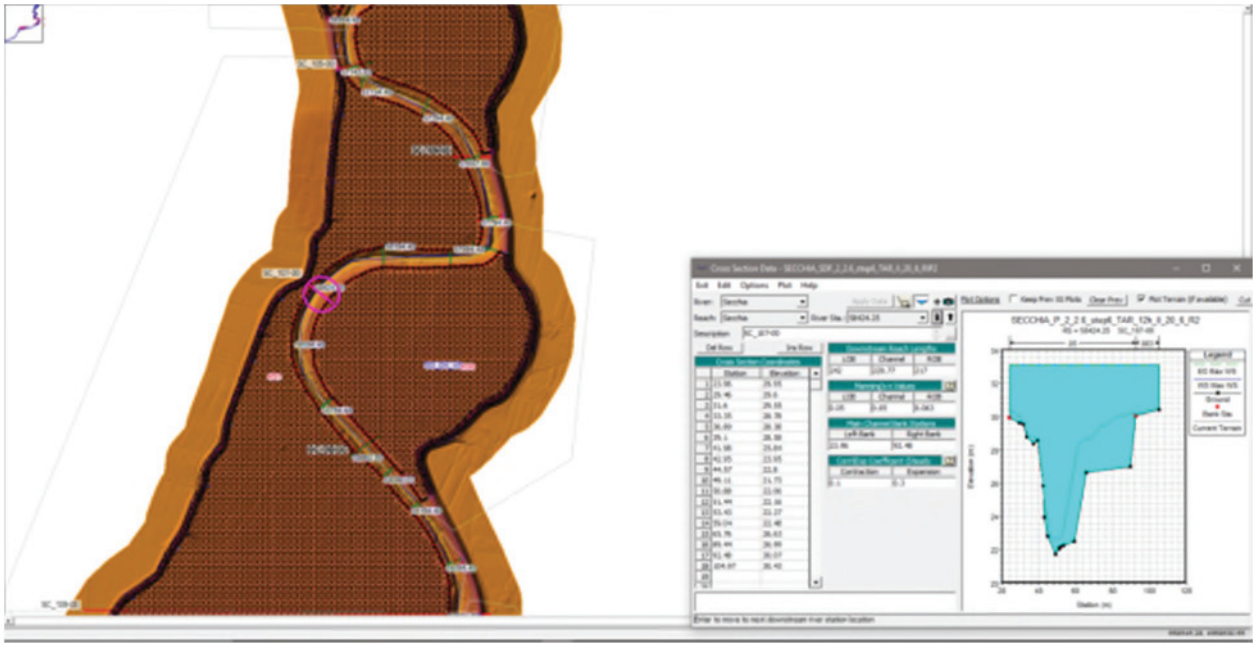


**Fig. 132 Esempio di risezionamento dell'alveo (tra stante SX 112 e 116 circa)**

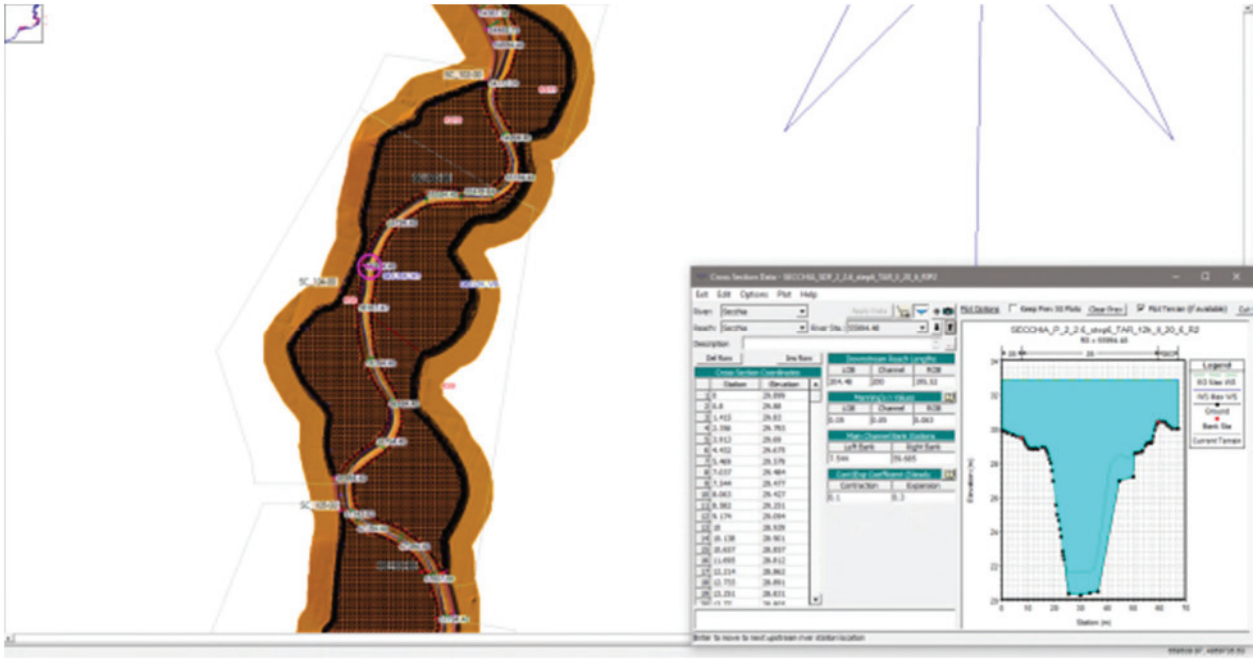


**Fig. 133 Esempio di risezionamento dell'alveo (tra stante SX 123 e 125 circa)**

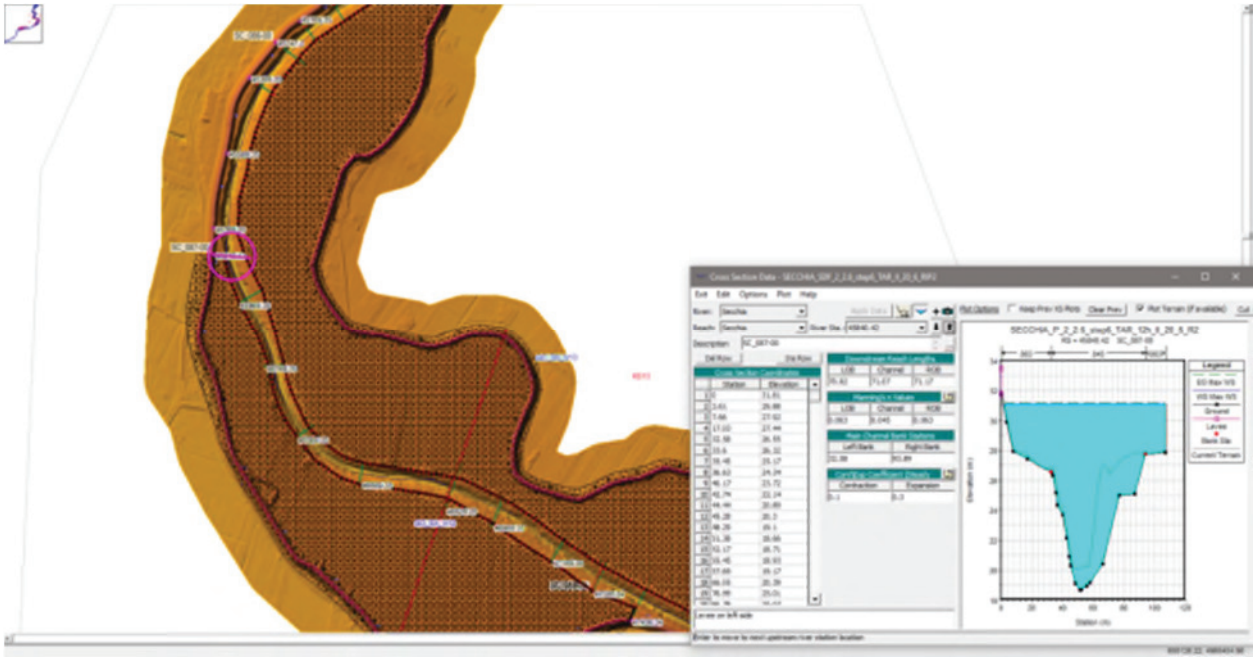


**Fig. 134 Esempio di risezionamento dell'alveo (tra stante SX 170 e 176 circa)**

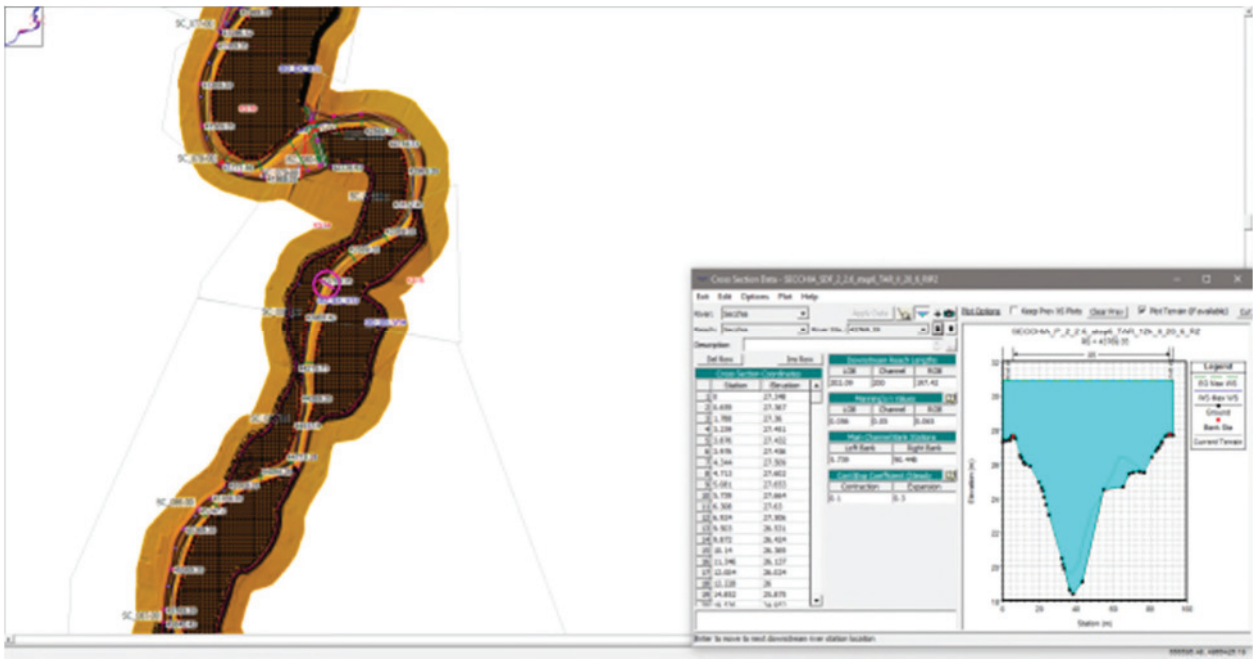


**Fig. 135 Esempio di risezionamento dell'alveo (tra stante SX 182 e 185 circa)**

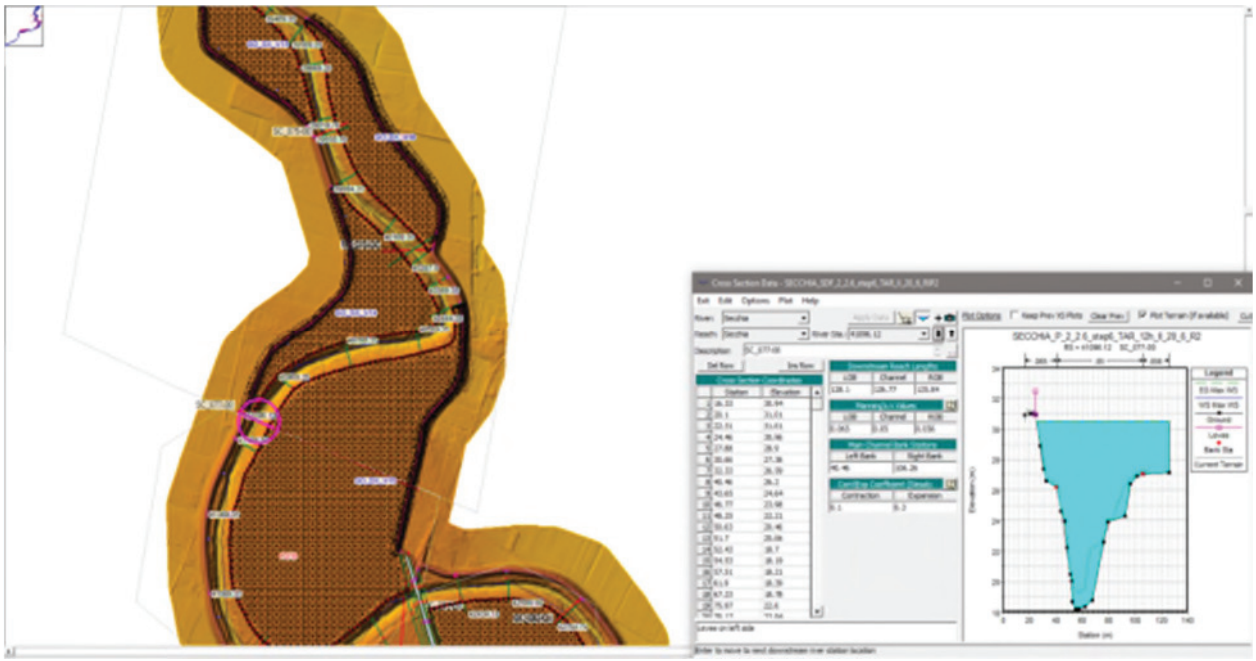


**Fig. 136 Esempio di risezionamento dell'alveo (tra stante SX 190 e 194 circa)**

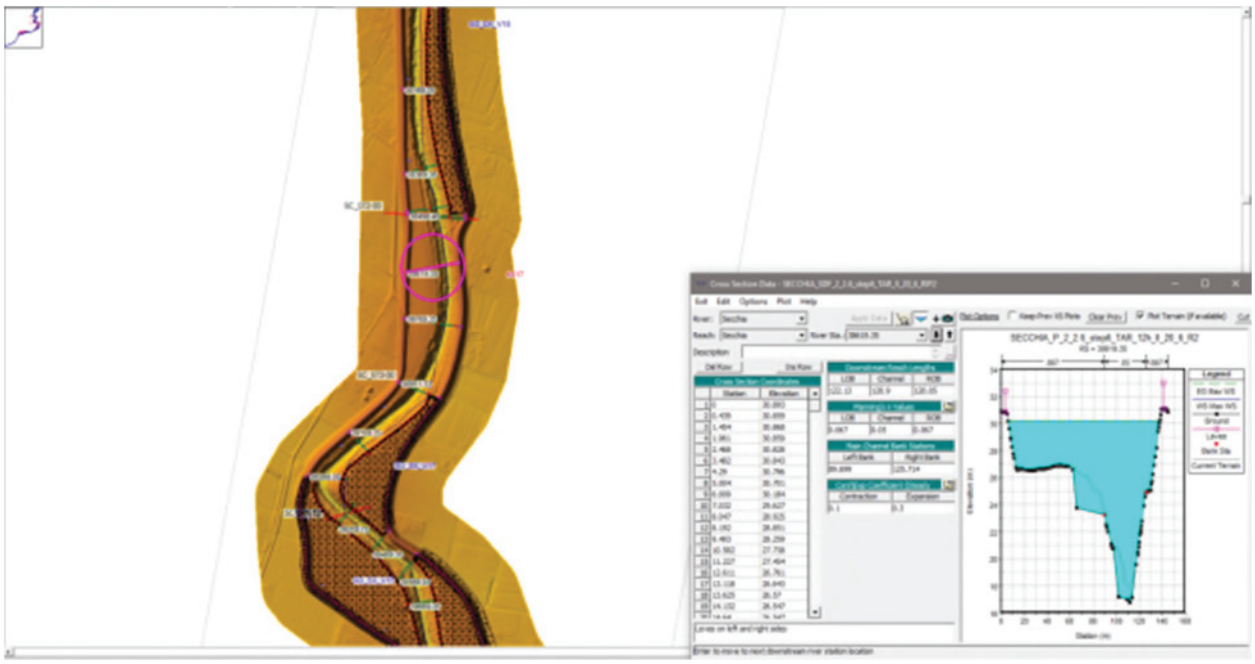


**Fig. 137 Esempio di risezionamento dell'alveo (tra stante SX 203 e 206 circa)**

La configurazione di progetto, già descritta nel dettaglio a inizio capitolo, ha evidenziato che la piena defluente a valle della via Emilia viene laminata dalla cassa di espansione esistente, in termini di valore al colmo, di circa il 19%, passando da 1.350 a 1.096 $m^3/s$, come per la configurazione di stato di fatto; nel tratto compreso tra la cassa e l'autostrada A1, non arginato, il colmo subisce un'ulteriore laminazione di circa il 32%, passando da circa 1.096 a 742 $m^3/s$.

Nel tratto arginato da valle dell'A1 fino al ponte di Concordia la laminazione derivante dalla configurazione di progetto si attesta all'incirca su quella di stato di fatto (Fig. 138). Rispetto quindi allo stato di fatto, gli interventi in progetto influiscono, seppur in misura modesta, ad abbassare i colmi di piena nei tratti in cui le aree di espansione sono maggiori e dove sono stati previsti maggiori interventi di ricalibratura; inoltre come già evidenziato più volte, gli effetti degli interventi in un corso d'acqua a debole pendenza (corrente lenta) si manifestano oltre che localizzati nella zona di intervento anche nei tratti a monte come si evince nei nell'analisi di profili idrici.

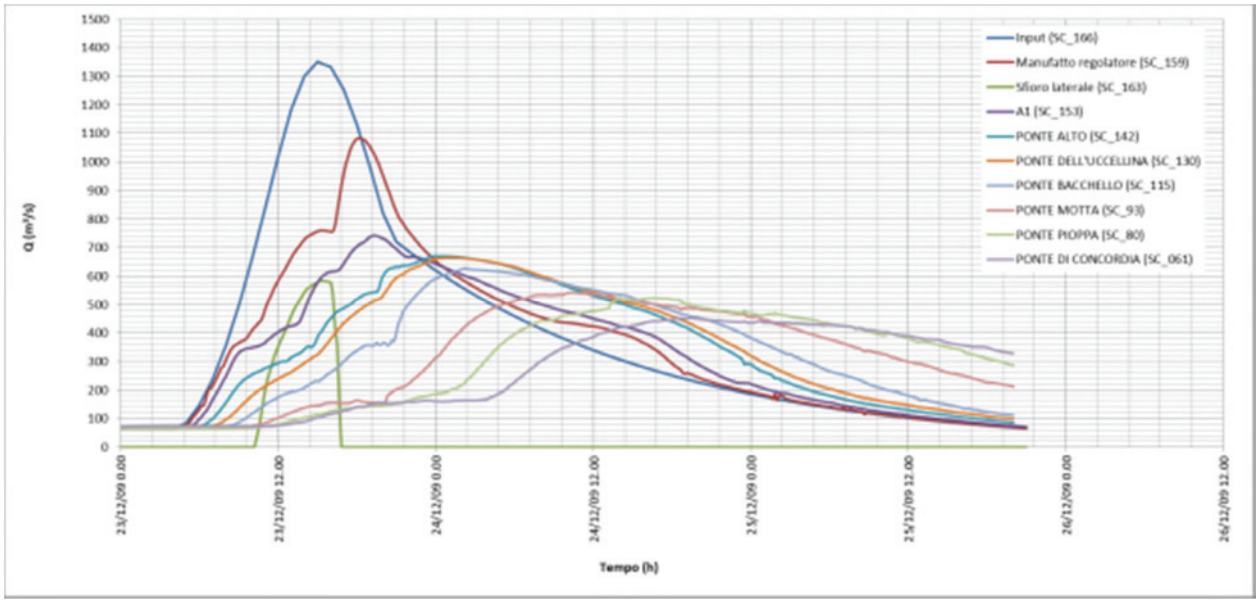


**Fig. 138 Variazione dell'idrogramma in portata per tempo di ritorno 20 anni (durata critica 12 ore) nel tratto compreso tra la SS 9 e il ponte di Concordia nella configurazione di progetto**

**Tab. 15 Valori al colmo dell'idrogramma per tempo di ritorno 20 anni (durata critica 12 ore) nel tratto compreso tra la SS 9 e il ponte di Concordia nella configurazione di progetto**

| Sezione | Portata al colmo ($m^3/s$) |
|---|---|
| SS9 SC_166-00 | 1350 |
| Manufatto regolatore SC_159-00 | 1096 |
| Sfioro larerale SC_163-00 | 583 |
| Ponte autostrada A1 SC_153-00 | 742 |
| Ponte Alto SC_142-00 | 670 |
| Ponte dell'Uccellina SC_130-00 | 664 |
| Ponte Bacchello SC_115-00 | 627 |
| Ponte Motta SC_093-00 | 541 |
| Ponte Pioppa SC_080-00 | 524 |
| Ponte Concordia SC_061-00 | 454 |

Gli interventi previsti hanno definito un abbassamento del profilo di piena di circa 20 cm nel tratto in cui sono stati previsti gli interventi.

Analizzando gli effetti degli interventi su gli idrogrammi di portata risulta che la configurazione di progetto garantisce una maggior capacità di deflusso fino a ponte Pioppa. Proseguendo verso valle, dove iniziano a diminuire gli interventi, si riscontra una attenuazione dei benefici sulla diminuzione dei colmi di piena, fino ad arrivare al ponte di Concordia in cui la portata transitante è pressoché uguale a quella della configurazione di stato di fatto.

L'entità degli interventi, meglio descritta negli elaborati specifici di progetto, permette di ottenere, dal punto di vista idraulico, sia una miglior capacità di deflusso della piena sia soprattutto una maggior sicurezza idraulica dei sistemi arginali.

Il progetto di rimodellamento parziale dell'alveo è stato studiato, sulla base di un'attenta analisi morfologica dell'alveo, con l'obiettivo di non alterare in maniera drastica e quindi non efficace la morfologia del fiume. La combinazione di interventi puntuali con il consistente rimodellamento della porzione d'alveo a monte di ponte Alto definisce un equo equilibrio tra la messa in sicurezza dei rilevati arginali, il miglioramento della capacità di deflusso del corso d'acqua e la necessità di reperire materiale consono per il ringrosso delle arginature.

La configurazione di progetto non è sicuramente risolutiva per l'adeguamento dei ponti alla piena in esame ma comunque determina minori interferenze tra manufatti e condizioni di deflusso (Tab. 16).

**Tab. 16 Franchi idraulici degli attraversamenti nella configurazione attuale (SDF) e di progetto (PRI)**

| Attraversamento | Quota intradosso (m s.m.) | Livello idrico SDF (m s.m.) | Franco (m) | Livello idrico PRJ (m s.m.) | Franco (m) |
|---|---|---|---|---|---|
| PONTE A1 | 42,17 | 41,58 | 0,59 | 41,36 | 0,81 |
| PONTE DELLA BARCHETTA | 41,78 | 41,29 | 0,49 | 40,87 | 0,91 |
| PONTE ALTO | 36,87 | 40,13 | -3,26 | 39,90 | -3,03 |
| PONTE SP413 | 39,89 | 39,67 | 0,22 | 39,50 | 0,39 |
| PONTE FF.SS MO-MN | 40,05 | 39,16 | 0,89 | 39,00 | 1,05 |

| Attraversamento | Quota intradosso (m s.m.) | Livello idrico SDF (m s.m.) | Franco (m) | Livello idrico PRJ (m s.m.) | Franco (m) |
|---|---|---|---|---|---|
| PONTE PEDONALE | 40,41 | 38,90 | 1,51 | 38,75 | 1,66 |
| PONTE MONTE TAV | 38,55 | 37,92 | 0,63 | 37,93 | 0,62 |
| PONTE TAV | 39,42 | 37,81 | 1,61 | 37,85 | 1,57 |
| PONTE DELL'UCCELLINO | 37,46 | 37,14 | 0,32 | 37,15 | 0,31 |
| PONTE BACCHELLO | 34,90 | 34,00 | 0,90 | 33,97 | 0,93 |
| PONTE SAN MARTINO | 33,23 | 32,48 | 0,75 | 32,50 | 0,73 |
| PONTE MOTTA | 31,95 | 31,54 | 0,41 | 31,57 | 0,38 |
| PONTE PIOPPA | 30,04 | 30,68 | -0,64 | 30,60 | -0,56 |
| PONTE DI CONCORDIA | 28,04 | 29,00 | -0,96 | 28,87 | -0,83 |

Come già descritto ad inizio capitolo, in tale configurazione è stato previsto cautelativamente anche l'intervento (da realizzare a cura del soggetto competente) di rialzo dell'argine sinistro del canale Calvetro. Per il problema del sormonto dell'autostrada A1 si demanda a valutazioni più approfondite anche in funzione dei nuovi interventi di adeguamento della cassa di laminazione che sono in fase di studio .

**Fig. 139 Aree inondate e massime altezze d'acqua della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di progetto**

**Fig. 140 Aree inondate e massime altezze d'acqua della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di progetto**

**Fig. 141 Aree inondate e massime altezze d'acqua della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di progetto**

**Fig. 142 Aree inondate e massime altezze d'acqua della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di progetto**

**Fig. 143 Aree inondate e massime altezze d'acqua della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di progetto**

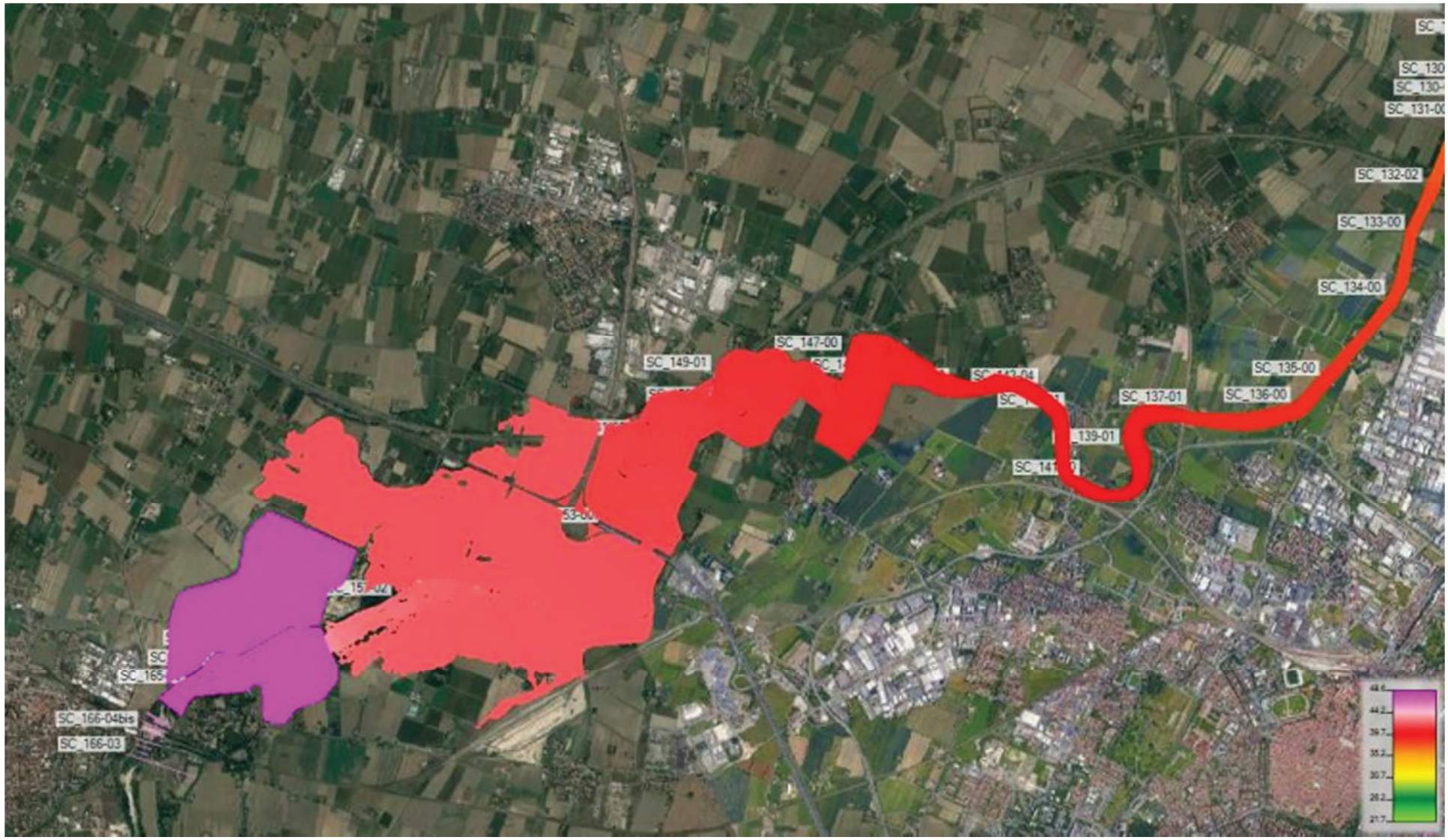



**Fig. 144 Massimi livelli della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di progetto**

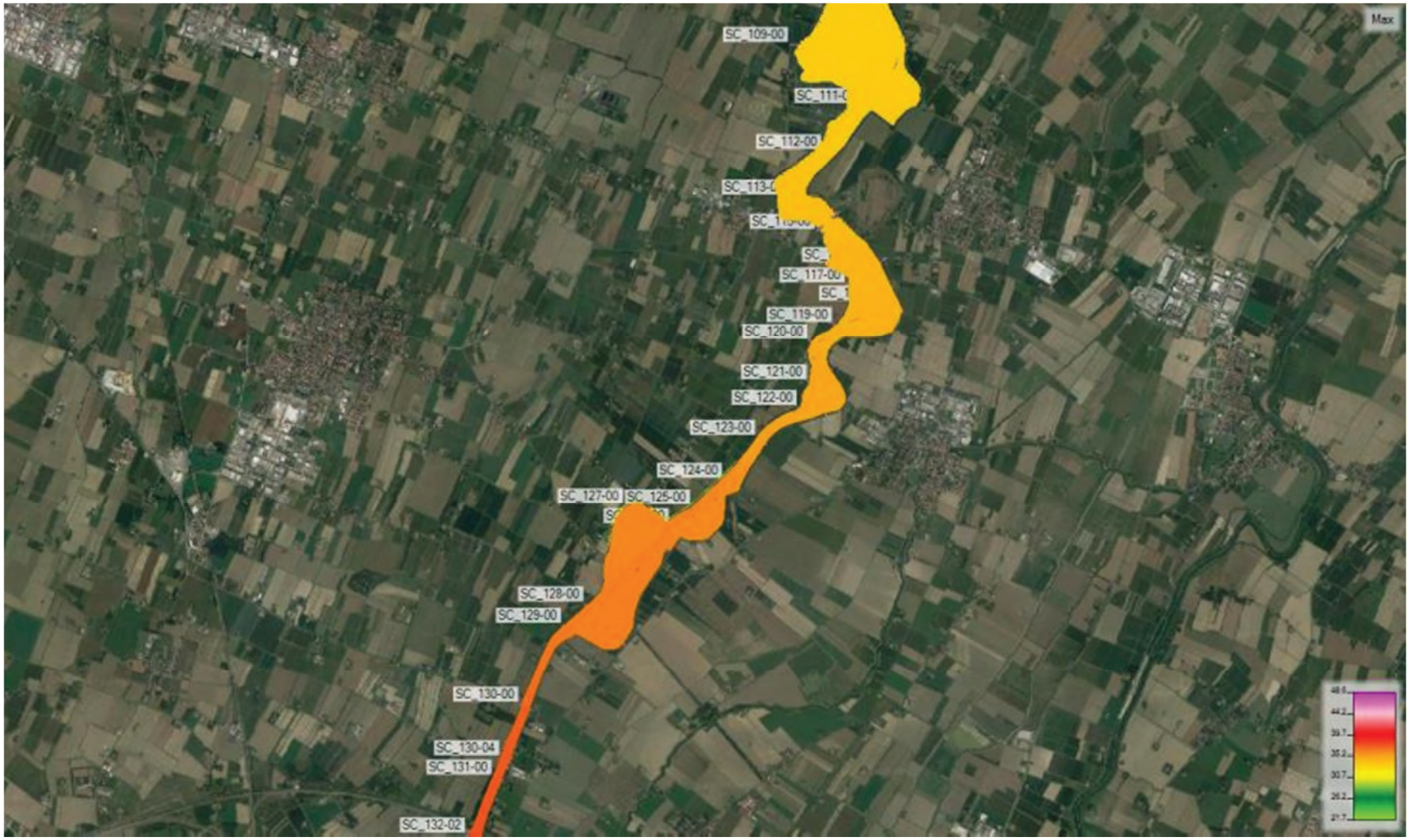



**Fig. 145 Massimi livelli della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di progetto**

**Fig. 146 Massimi livelli della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di progetto**

**Fig. 147 Massimi livelli della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di progetto**

**Fig. 148 Massimi livelli della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di progetto**

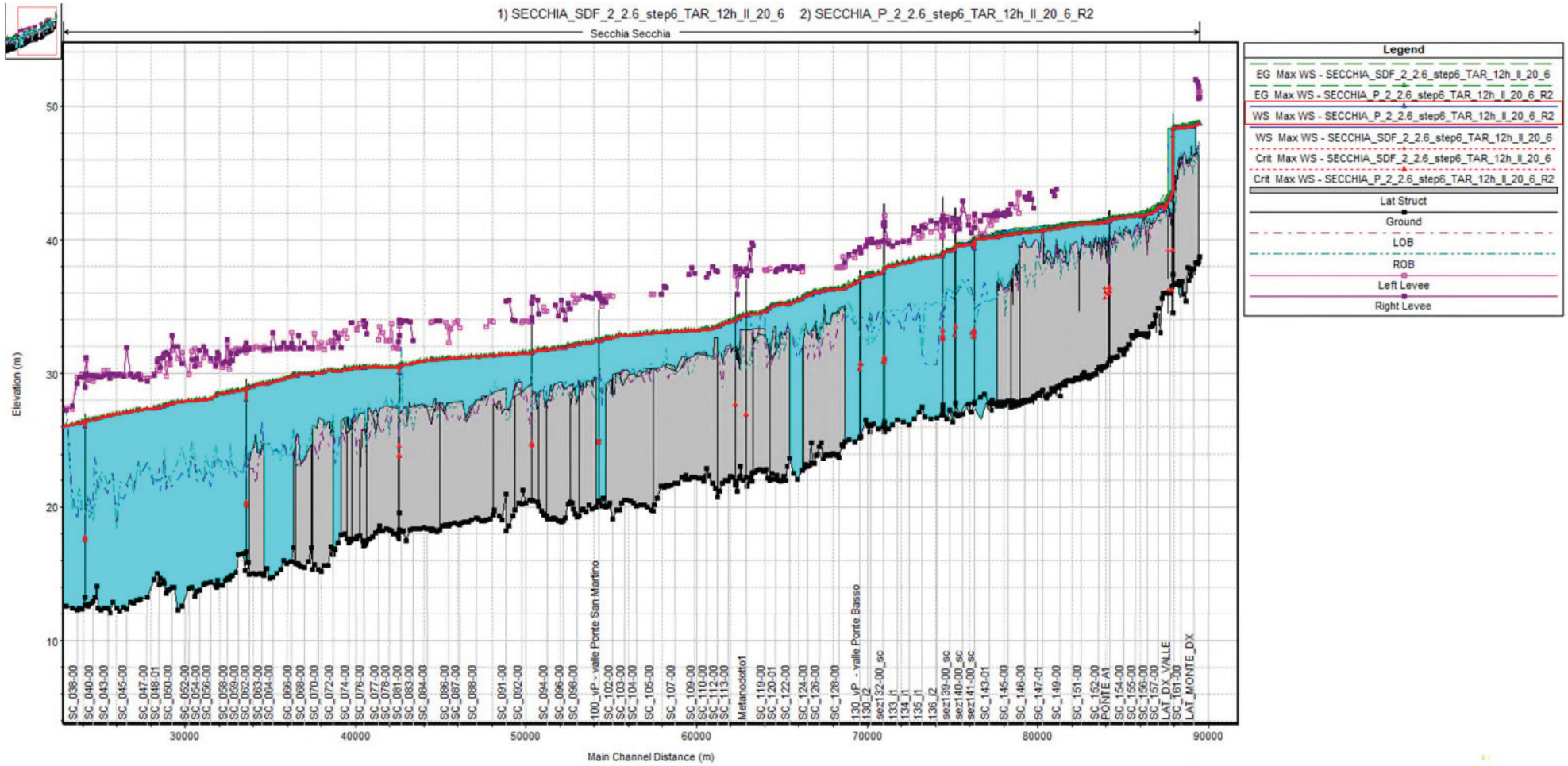



**Fig. 149 Profilo inviluppo dei massimi livelli idrometrici per la piena con tempo di ritorno 20 anni (durata critica 12 ore) nelle configurazioni relative rispettivamente allo stato di fatto e di progetto**

### *5.1.1.11. Piena di progetto TR 20 anni (durata pioggia 12h) - (scenario 6)*

La configurazione di assetto individuata è rappresentata dall'adeguamento di due golene chiuse per migliorare la loro efficienza di laminazione della piena in esame.

Partendo dalla prima golena di monte individuata, quella nella zona est di Soliera, l'intervento previsto consiste nell'adeguamento in quota dell'argine golenale e nella realizzazione di una soglia sfiorante progettata in modo che l'invaso inizi a partire da valle, con una migliore efficienza di funzionamento.

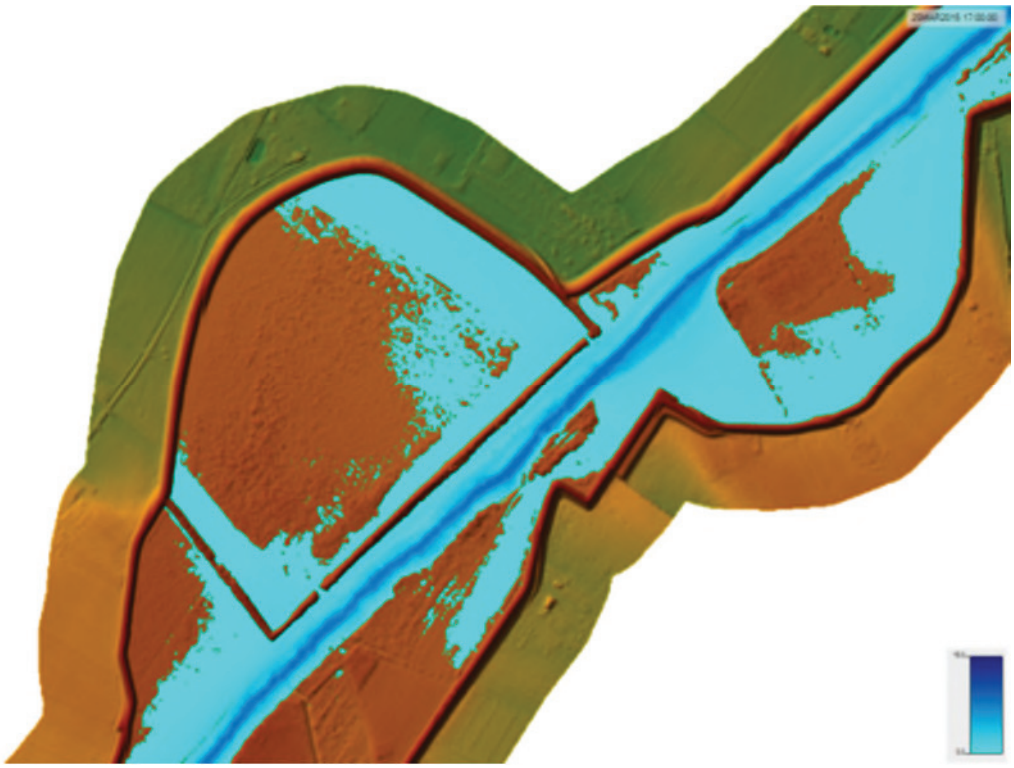


**Fig. 150 Dinamica di invaso della golena nella zona di Soliera nella configurazione di stato di fatto**

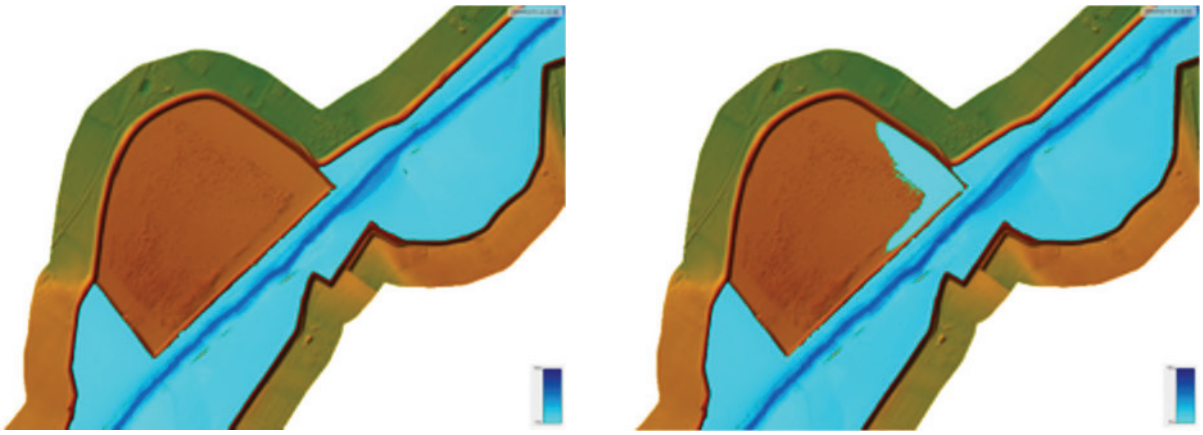


**Fig. 151 Dinamica di invaso della golena nella zona di Soliera nella configurazione di progetto**

Per simulare la configurazione di progetto è stata impostata una "*lateral structure*" impostando la quota dell'argine golenale a 36,10 m s.l.m, e creando una soglia sfiorante larga 3 m e lunga 50 m nella zona di valle dello sviluppo dell'argine a una quota di 35,60 m s.l.m..

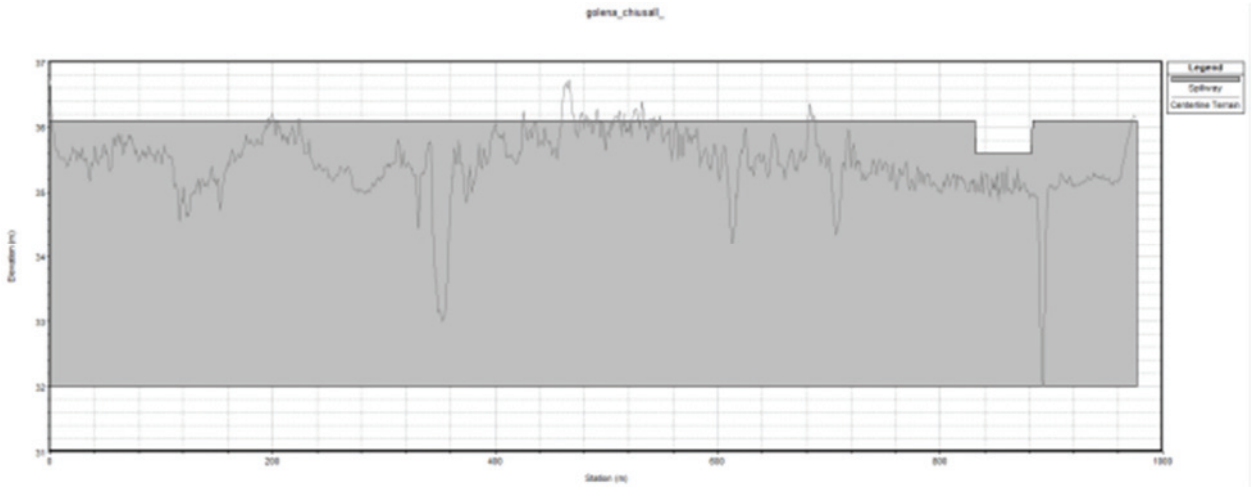


**Fig. 152 Profilo di progetto dell'argine golenale**

Gli effetti dell'intervento comportano una riduzione del colmo della piena di circa 24 $m^3/s$ nel tratto immediatamente a valle, con un volume invasato di circa 1.874 $m^3$.

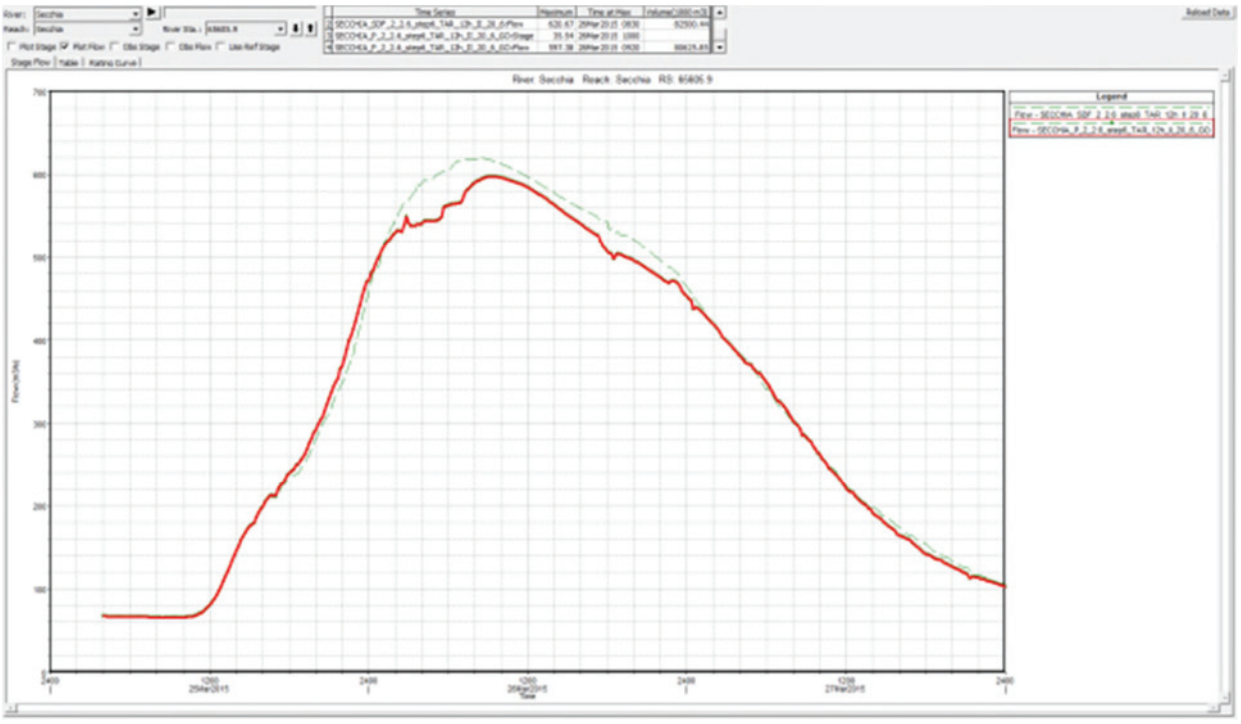


**Fig. 153 Idrogrammi di piena a confronto tra configurazione di progetto e di stato di fatto**

Per la golena della zona di Sorbara, a monte di ponte Bacchello, gli interventi previsti consistono nell'adeguamento della quota dell'argine golenale, nella realizzazione di una soglia sfiorante nella parte più a valle dello sviluppo arginale e nello spostamento planimetrico di una porzione di argine golenale per migliorare la capacità di deflusso della piena (Fig. 154).

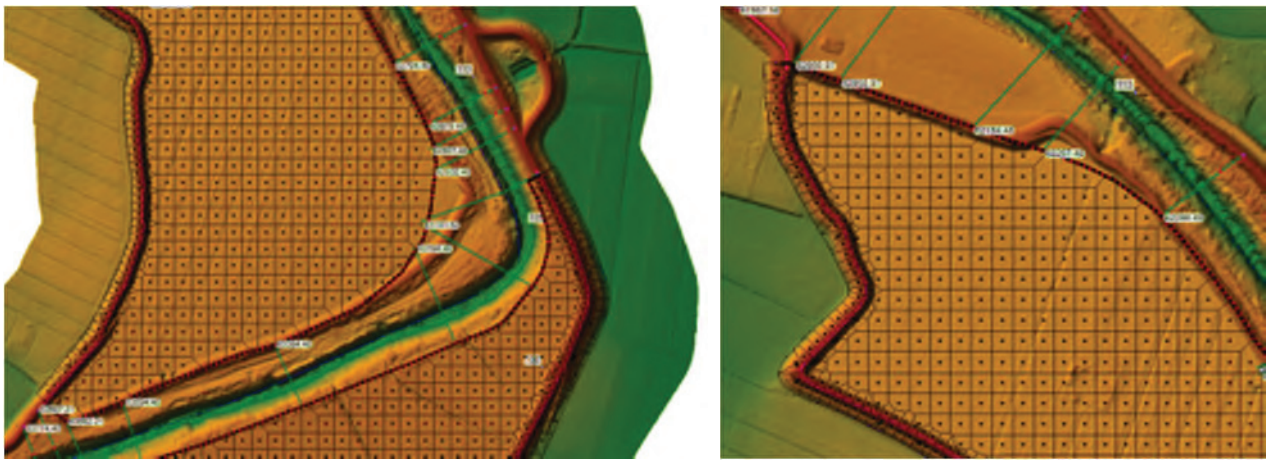


**Fig. 154 Spostamento dell'argine golenale**

La "*lateral weir*" inserita prevede una quota dell'argine golenale a 34,76 m s.l.m, mentre la soglia di sfioro progettata è lunga 50 m larga 3m ed è stata posta ad quota di 33,6 m s.l.m..

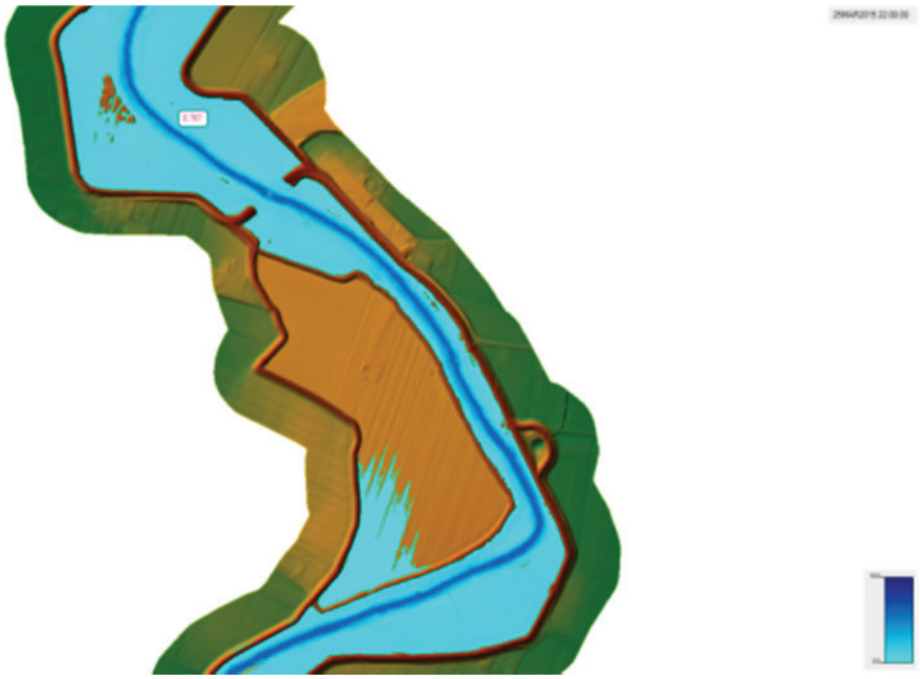


**Fig. 155 Dinamica di invaso della golena nella zona di Sorbara nella configurazione di stato di fatto**

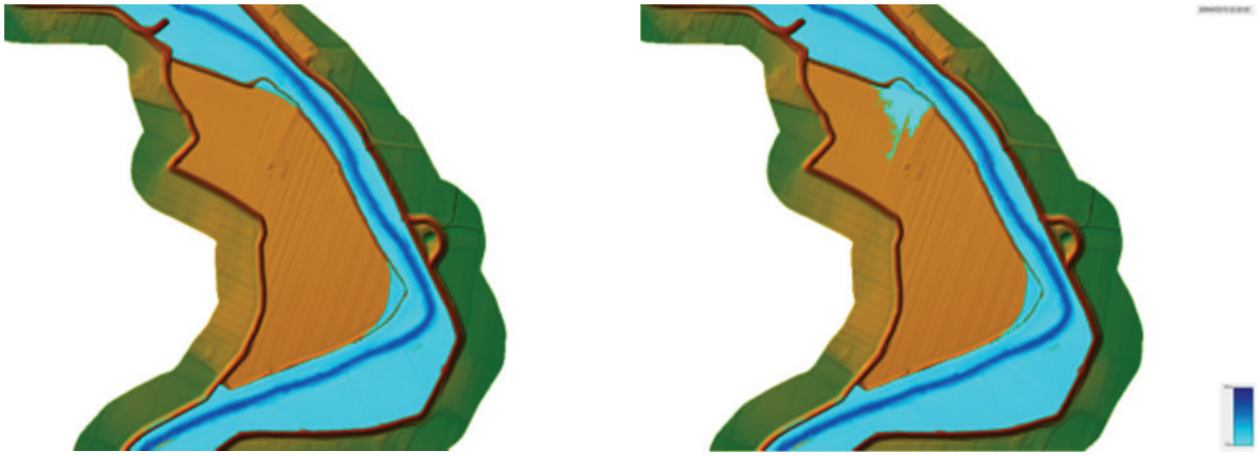


**Fig. 156 Dinamica di invaso della golena nella zona di Sorbara nella configurazione di stato di fatto**

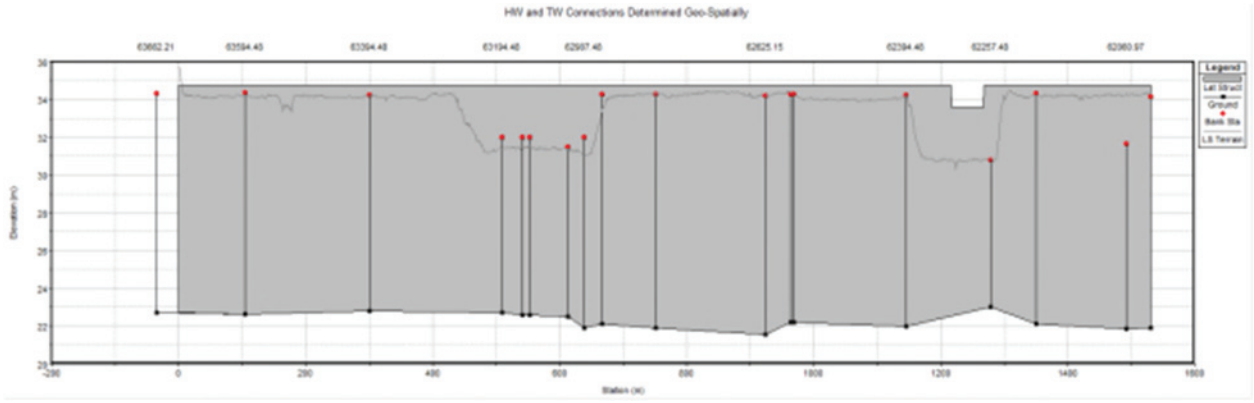



**Fig. 157 Profilo di progetto dell'argine golenale**

I risultati ottenuti subito a valle dell'intervento consistono in una riduzione del colmo di piena di circa 45 $m^3/s$, con un volume massimo invasato di circa 1.755 $m^3$.

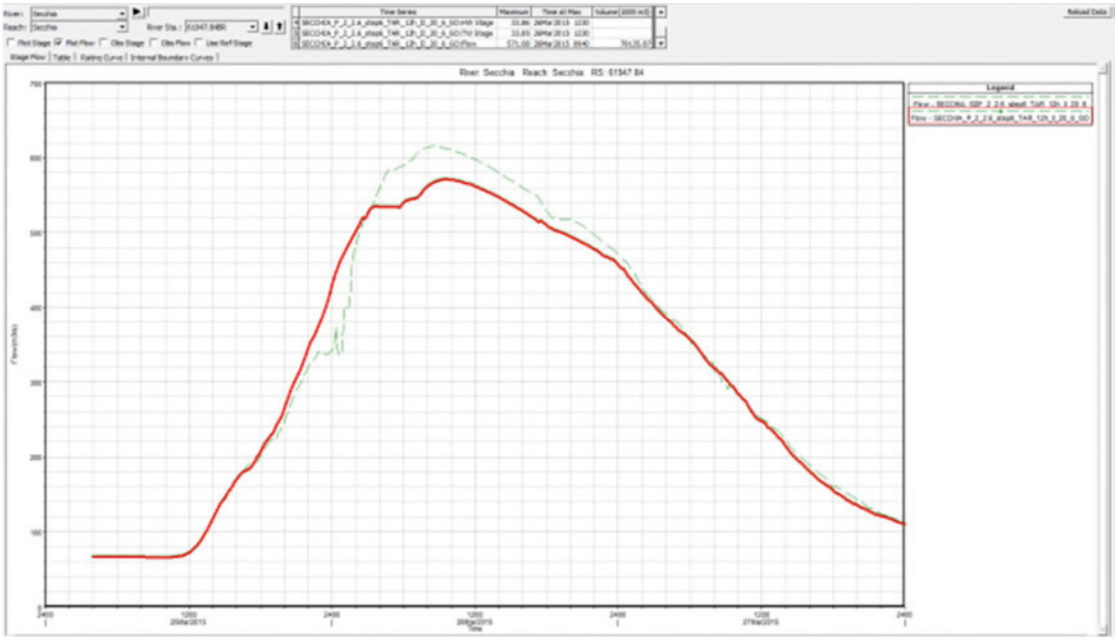


**Fig. 158 Idrogrammi di piena a confronto tra configurazione di progetto e di stato di fatto**

Gli effetti complessivi della configurazione di progetto sulle condizioni di deflusso della piena di riferimento, confrontati con la configurazione attuale sono riassumibili nei seguenti punti:

- maggior capacità di deflusso nel tratto tra ponte Bacchello e il ponte di Concordia;
- modesto innalzamento del profilo di piena nel tratto a monte fino al ponte TAV circa, dovuto alla modifica della configurazione delle golene chiuse e delle quote di inizio invaso delle stesse; l'innalzamento massimo si ha in corrispondenza del ponte dell'Uccellina (circa 7 cm) e non influenza di fatto le condizioni di pericolosità idraulica correlate;
- diminuzione del volume della piena nel tratto specifico degli interventi di secondo stralcio;
- riduzione della quota del profilo di piena nel tratto di secondo stralcio di circa 20 cm.

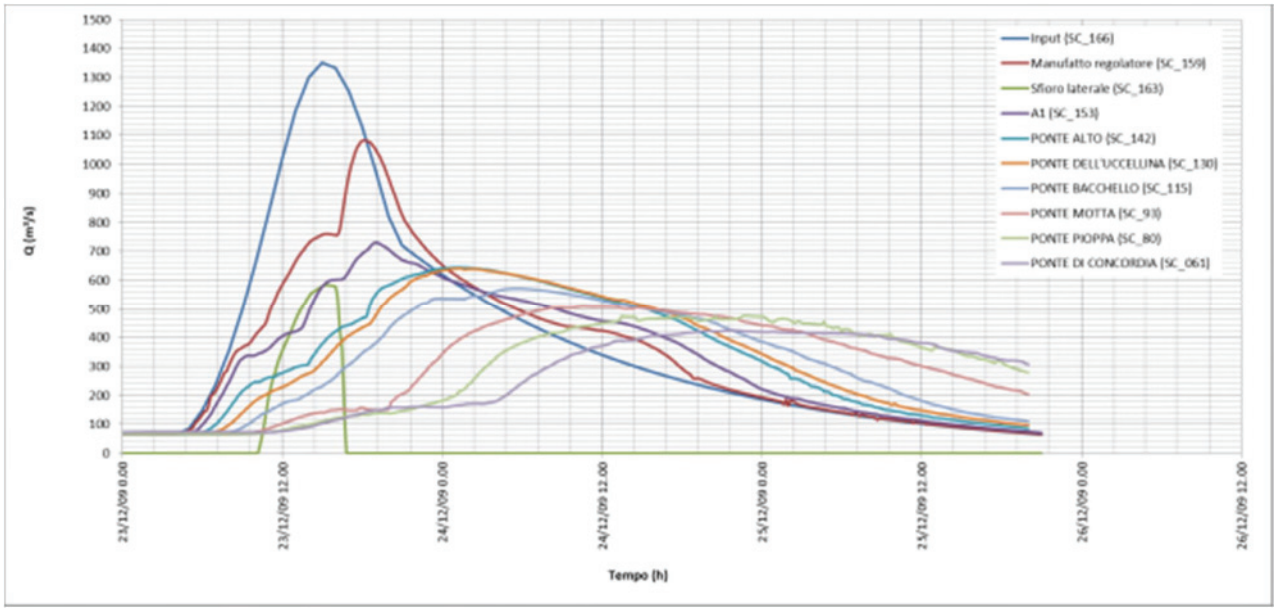



**Fig. 159 Variazione dell'idrogramma in portata per tempo di ritorno 20 anni (durata critica 12 ore) nel tratto compreso tra la SS 9 e il ponte di Concordia nella configurazione di progetto**

**Tab. 17 Valori al colmo dell'idrogramma per tempo di ritorno 20 anni (durata critica 12 ore) nel tratto compreso tra la SS 9 e il ponte di Concordia nella configurazione di progetto**

| Sezione | Portata al colmo ($m^3/s$) |
|---|---|
| SS9 SC_166-00 | 1350 |
| Manufatto regolatore SC_159-00 | 1096 |
| Sfioro larerale SC_163-00 | 583 |
| Ponte autostrada A1 SC_153-00 | 730 |
| Ponte Alto SC_142-00 | 647 |
| Ponte dell'Uccellina SC_130-00 | 641 |
| Ponte Bacchello SC_115-00 | 571 |
| Ponte Motta SC_093-00 | 508 |
| Ponte Pioppa SC_080-00 | 475 |
| Ponte Concordia SC_061-00 | 424 |

Il progetto di rimodellamento parziale dell'alveo studiato per il progetto di primo stralcio e l'adeguamento della capacità di invaso delle golene descritte si presentano come la miglior configurazione attuabile per la riduzione dei livelli idrici e quindi l'adeguamento delle arginature.

Tale configurazione di progetto non è sicuramente risolutiva per l'adeguamento dei ponti alla piena in esame ma comunque determina minori interferenze tra manufatti e condizioni di deflusso (Tab. 16).

Sono state studiate delle specifiche soluzioni per ogni attraversamento e si rimanda agli elaborati di dettaglio in cui vengono descritti puntualmente i vari interventi di progetto sulle singole opere.

**Tab. 18 Franchi idraulici degli attraversamenti nella configurazione attuale (SDF) e di progetto (PRI)**

| Attraversamento | Quota intradosso (m s.m.) | Livello idrico SDF (m s.m.) | Franco (m) | Livello idrico PRJ (m s.m.) | Franco (m) |
|---|---|---|---|---|---|
| PONTE A1 | 42,17 | 41,58 | 0,59 | 41,58 | 0,59 |
| PONTE DELLA BARCHETTA | 41,78 | 41,29 | 0,49 | 41,29 | 0,49 |
| PONTE ALTO | 36,87 | 40,13 | -3,26 | 40,11 | -3,24 |
| PONTE SP413 | 39,89 | 39,67 | 0,22 | 39,66 | 0,23 |
| PONTE FF.SS MO-MN | 40,05 | 39,16 | 0,89 | 39,15 | 0,90 |
| PONTE PEDONALE | 40,41 | 38,90 | 1,51 | 38,89 | 1,52 |
| PONTE MONTE TAV | 38,55 | 37,92 | 0,63 | 37,93 | 0,62 |
| PONTE TAV | 39,42 | 37,81 | 1,61 | 37,85 | 1,57 |
| PONTE DELL'UCCELLINO | 37,46 | 37,14 | 0,32 | 37,21 | 0,25 |
| PONTE BACCHELLO | 34,90 | 34,00 | 0,90 | 33,86 | 1,04 |
| PONTE SAN MARTINO | 33,23 | 32,48 | 0,75 | 32,26 | 0,97 |
| PONTE MOTTA | 31,95 | 31,54 | 0,41 | 31,34 | 0,61 |
| PONTE PIOPPA | 30,04 | 30,68 | -0,64 | 30,35 | -0,31 |
| PONTE DI CONCORDIA | 28,04 | 29,00 | -0,96 | 28,67 | -0,63 |

Anche in questa configurazione, come già descritto ad inizio capitolo, è stato previsto cautelativamente anche l'intervento (a carico dei soggetti competenti) di rialzo dell'argine sinistro del canale Calvetro. Per il problema del sormonto dell'autostrada A1 si demanda a valutazioni più approfondite anche in funzione dei nuovi interventi in progetto della cassa.

**Fig. 160 Aree inondate e massime altezze d'acqua della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di progetto**

**Fig. 161 Aree inondate e massime altezze d'acqua della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di progetto**

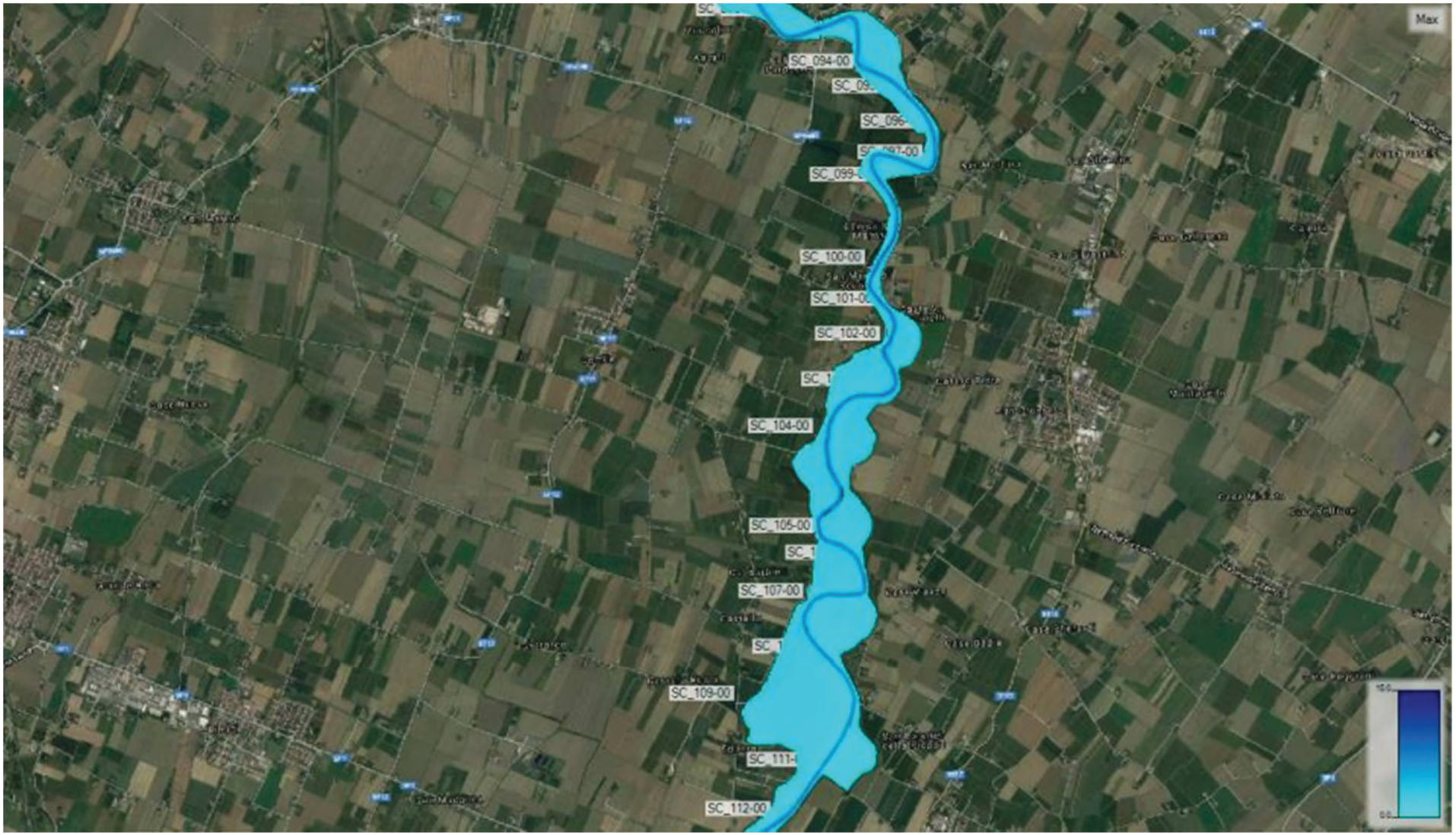



**Fig. 162 Aree inondate e massime altezze d'acqua della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di progetto**

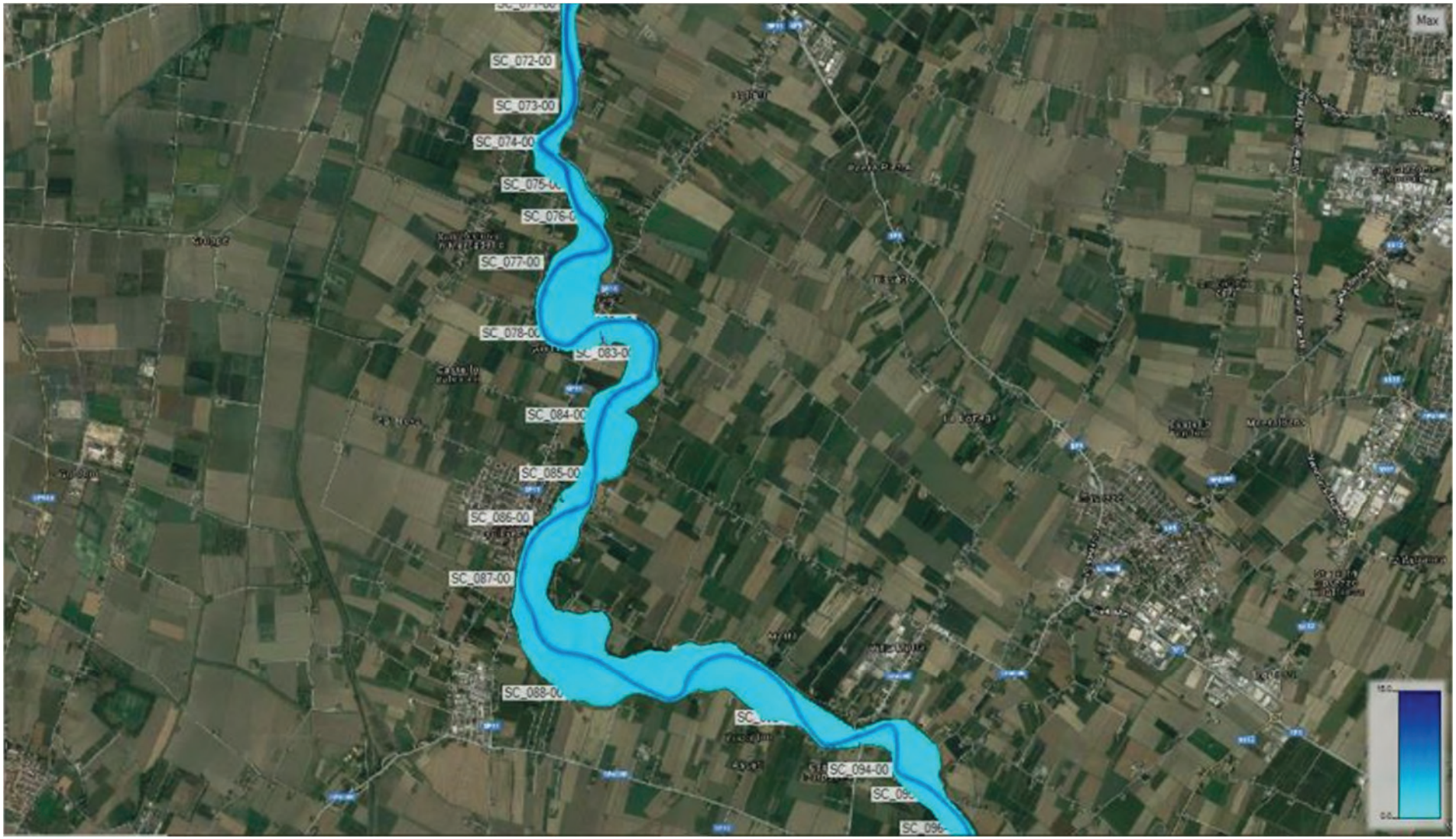



**Fig. 163 Aree inondate e massime altezze d'acqua della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di progetto**

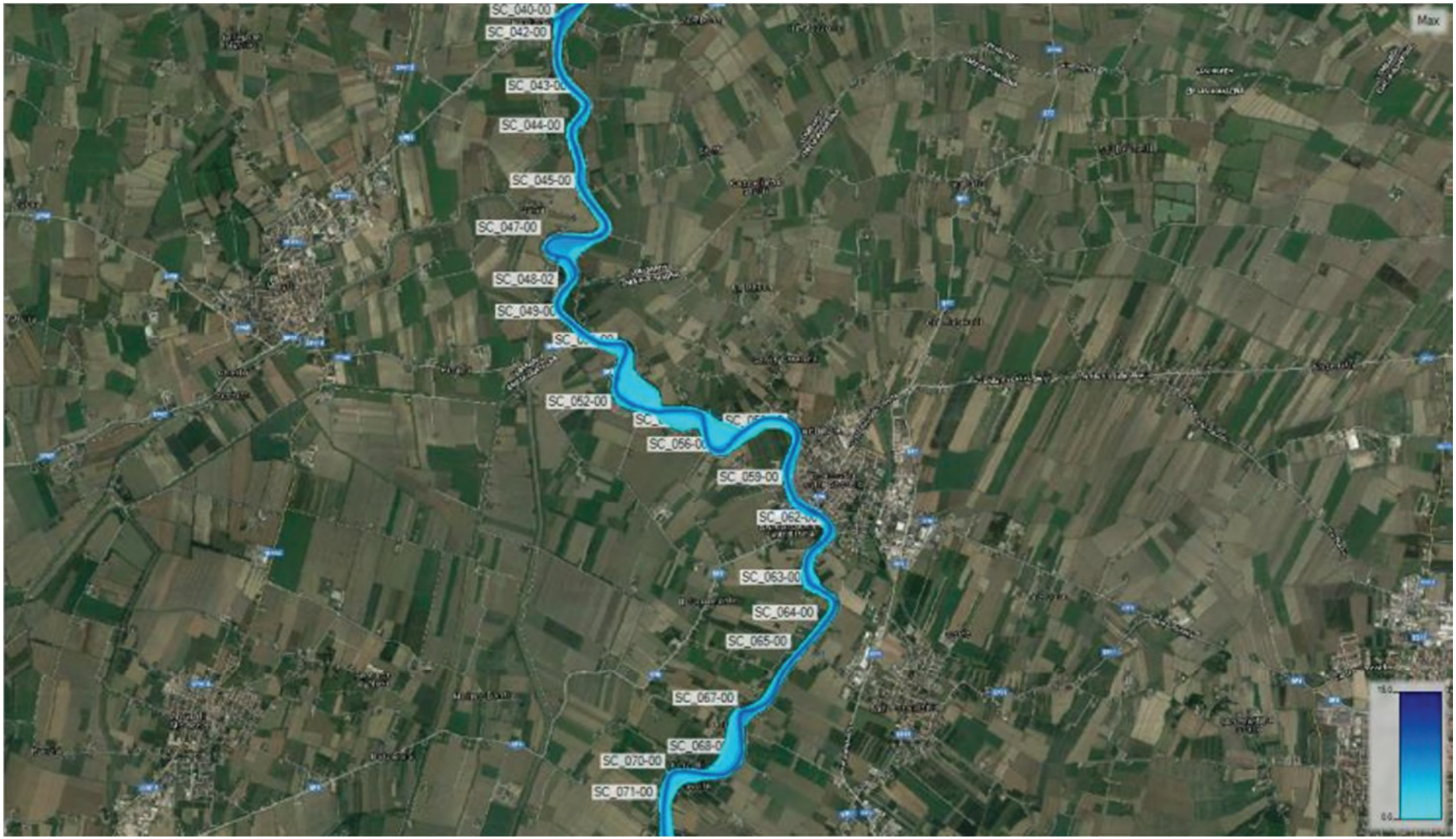



**Fig. 164 Aree inondate e massime altezze d'acqua della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di progetto**

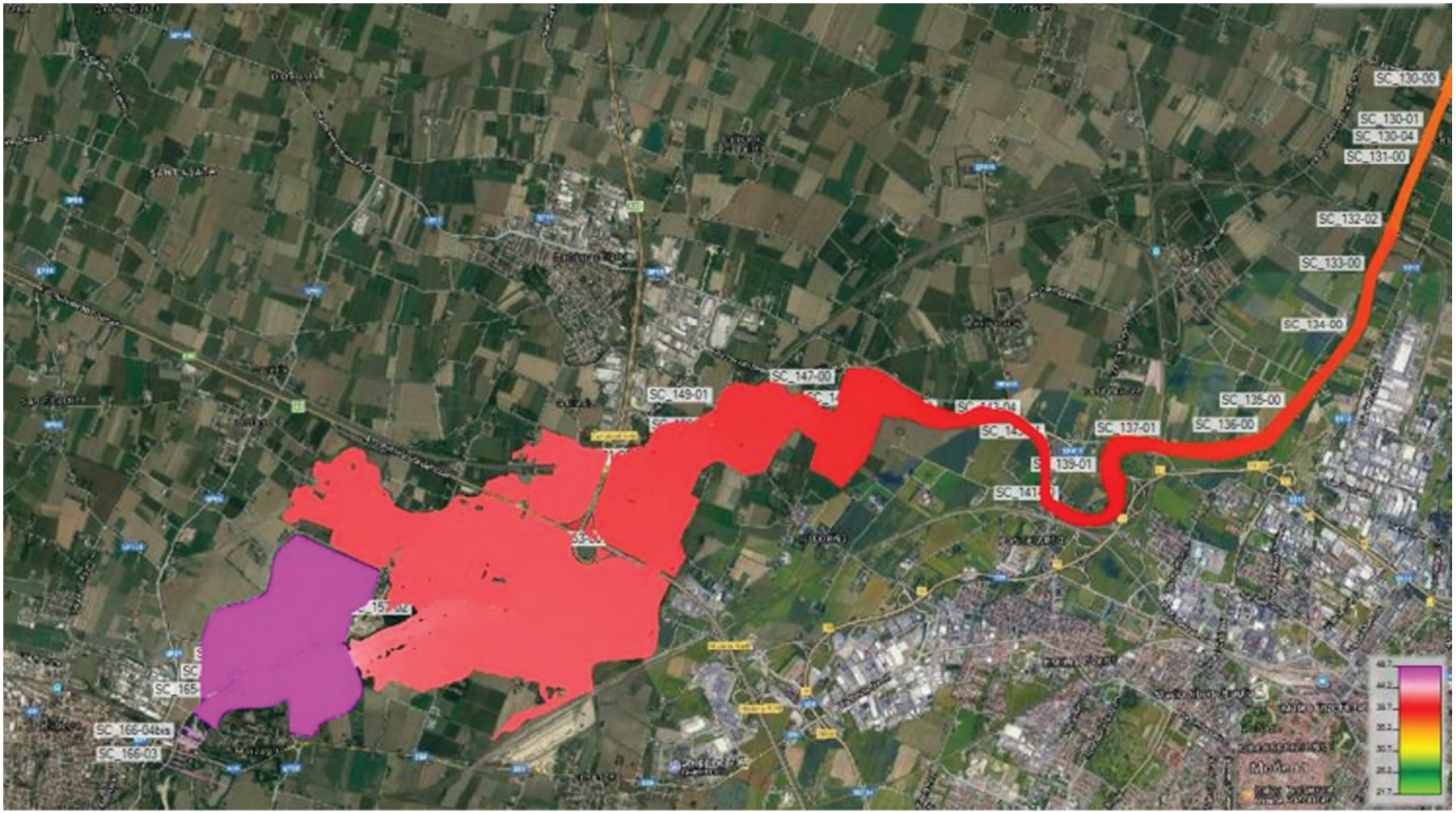



**Fig. 165 Massimi livelli idrici della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di progetto**

**Fig. 166 Massimi livelli idrici della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di progetto**

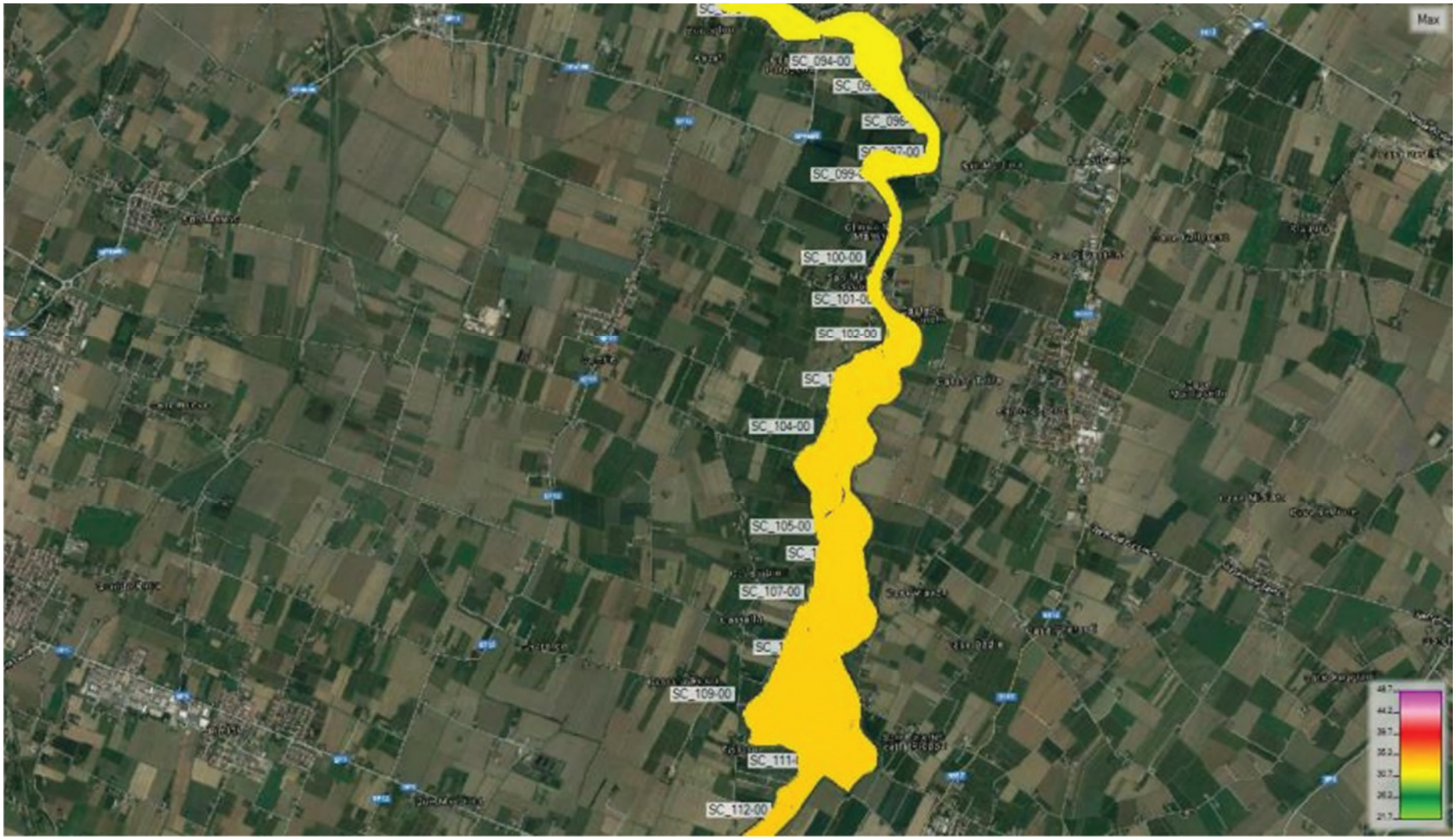



**Fig. 167 Massimi livelli idrici della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di progetto**

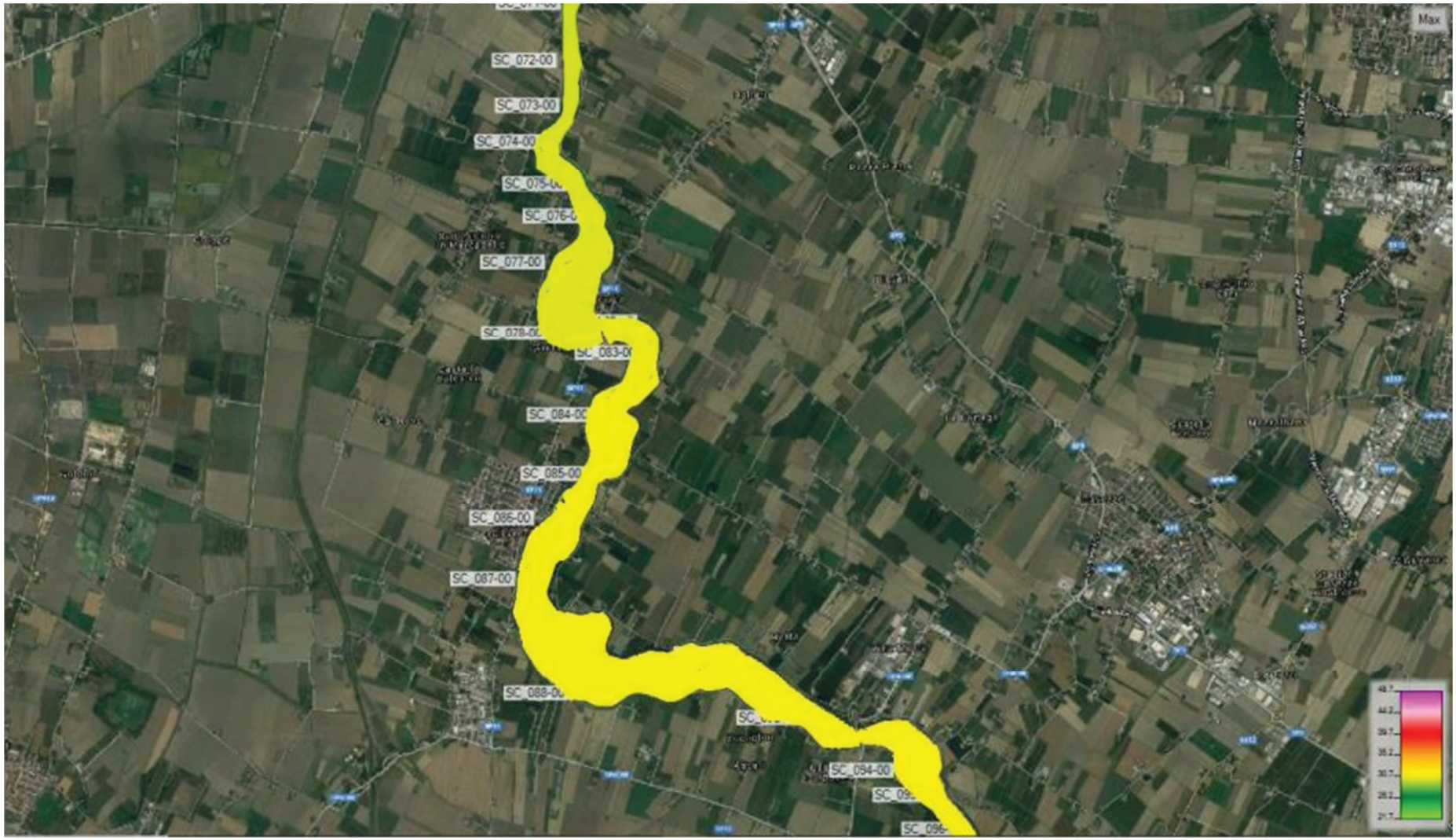



**Fig. 168 Massimi livelli idrici della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di progetto**

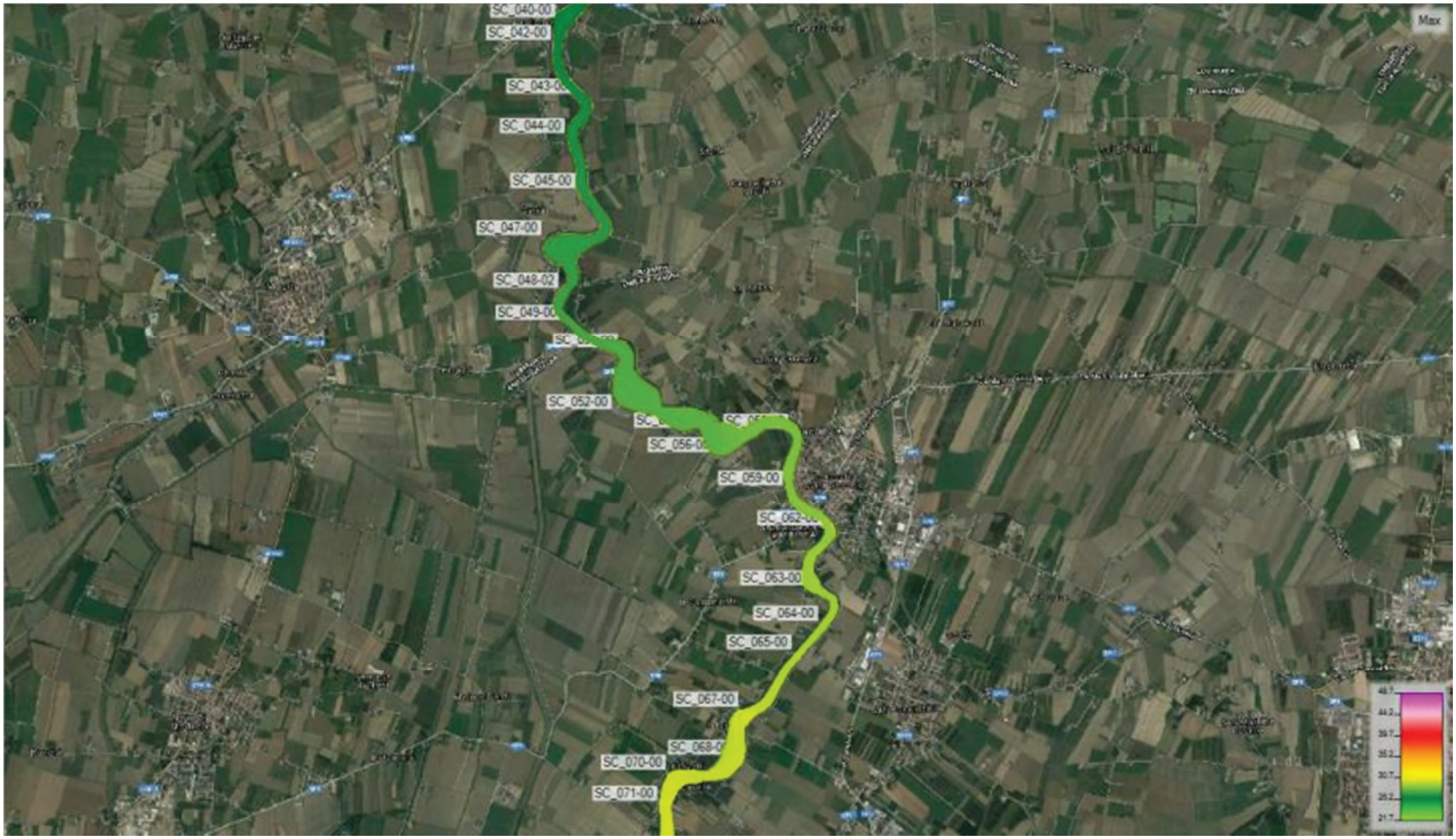



**Fig. 169 Massimi livelli idrici della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 12 ore) nella configurazione di progetto**

### *5.1.1.12. Piena di progetto TR 20 anni (durata pioggia 12h) - (scenario7)*

Dalla modellazione dello scenario ventennale con la durata di pioggia di 24 ore nella configurazione di progetto sono stati misurati i valori riportati in Fig. 170 e Tab. 19.

Gli effetti complessivi della configurazione di progetto sulle condizioni di deflusso della piena con durata della pioggia24 ore, confrontati con la configurazione medesima ma con durata della pioggia di 12 ore sono riassumibili nei seguenti punti:

- L'aumento del volume della piena determina un incremento delle portate defluenti;
- modesto innalzamento del profilo di piena medio pari a 63 cm rispetto allo scenario 6, con puntualmente valori che raggiungono 1 m nel tratto terminale di intervento a valle di Concordia.

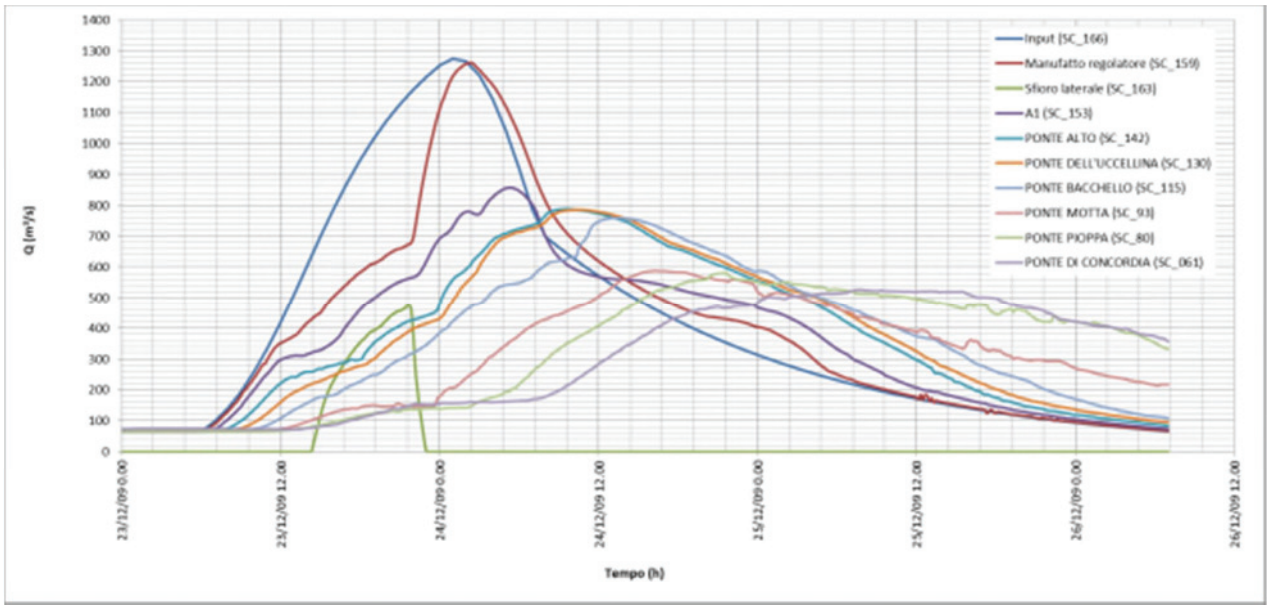



**Fig. 170 Variazione dell'idrogramma in portata per tempo di ritorno 20 anni (durata critica 24 ore) nel tratto compreso tra la SS 9 e il ponte di Concordia nella configurazione di progetto**

**Tab. 19 Valori al colmo dell'idrogramma per tempo di ritorno 20 anni (durata critica 24 ore) nel tratto compreso tra la SS 9 e il ponte di Concordia nella configurazione di progetto**

| Sezione | Portata al colmo ($m^3/s$) |
|---|---|
| SS9 SC_166-00 | 1274 |
| Manufatto regolatore SC_159-00 | 1261 |
| Sfioro larerale SC_163-00 | 474 |
| Ponte autostrada A1 SC_153-00 | 857 |
| Ponte Alto SC_142-00 | 787 |
| Ponte dell'Uccellina SC_130-00 | 786 |
| Ponte Bacchello SC_115-00 | 758 |
| Ponte Motta SC_093-00 | 588 |
| Ponte Pioppa SC_080-00 | 581 |
| Ponte Concordia SC_061-00 | 526 |

Rispetto ai ponti si riportano i risultati dei livelli ottenuti con lo scenario di progetto con la piena ventennale e durata della pioggia critica di 24 ore in confronto con la medesima configurazione ma con la piena ventenalle e durata critica di 12 ore.

**Tab. 20 Franchi idraulici degli attraversamenti nella configurazione di progetto (PRJ) evento TR 20 anni, durata pioggia 12 e 24 ore**

| Attraversamento | Quota intradosso (m s.m.) | Livello idrico PRJ – TR 20 (12h) (m s.m.) | Franco (m) | Livello idrico PRJ – TR 20 (24h) (m s.m.) | Franco (m) |
|---|---|---|---|---|---|
| PONTE A1 | 42,17 | 41,58 | 0,59 | 41,58 | 0,59 |
| PONTE DELLA BARCHETTA | 41,78 | 41,29 | 0,49 | 41,76 | 0,02 |
| PONTE ALTO | 36,87 | 40,11 | -3,24 | 40,60 | -3,73 |
| PONTE SP413 | 39,89 | 39,66 | 0,23 | 39,96 | -0,07 |
| PONTE FF.SS MO-MN | 40,05 | 39,15 | 0,90 | 39,73 | 0,32 |
| PONTE PEDONALE | 40,41 | 38,89 | 1,52 | 39,49 | 0,92 |
| PONTE MONTE TAV | 38,55 | 37,93 | 0,62 | 38,35 | 0,20 |
| PONTE TAV | 39,42 | 37,85 | 1,57 | 38,34 | 1,08 |
| PONTE DELL'UCCELLINO | 37,46 | 37,21 | 0,25 | 37,56 | -0,10 |
| PONTE BACCHELLO | 34,90 | 33,86 | 1,04 | 34,60 | 0,30 |
| PONTE SAN MARTINO | 33,23 | 32,26 | 0,97 | 32,89 | 0,34 |
| PONTE MOTTA | 31,95 | 31,34 | 0,61 | 32,13 | -0,18 |
| PONTE PIOPPA | 30,04 | 30,35 | -0,31 | 31,37 | -1,33 |
| PONTE DI CONCORDIA | 28,04 | 28,67 | -0,63 | 29,78 | -1,74 |

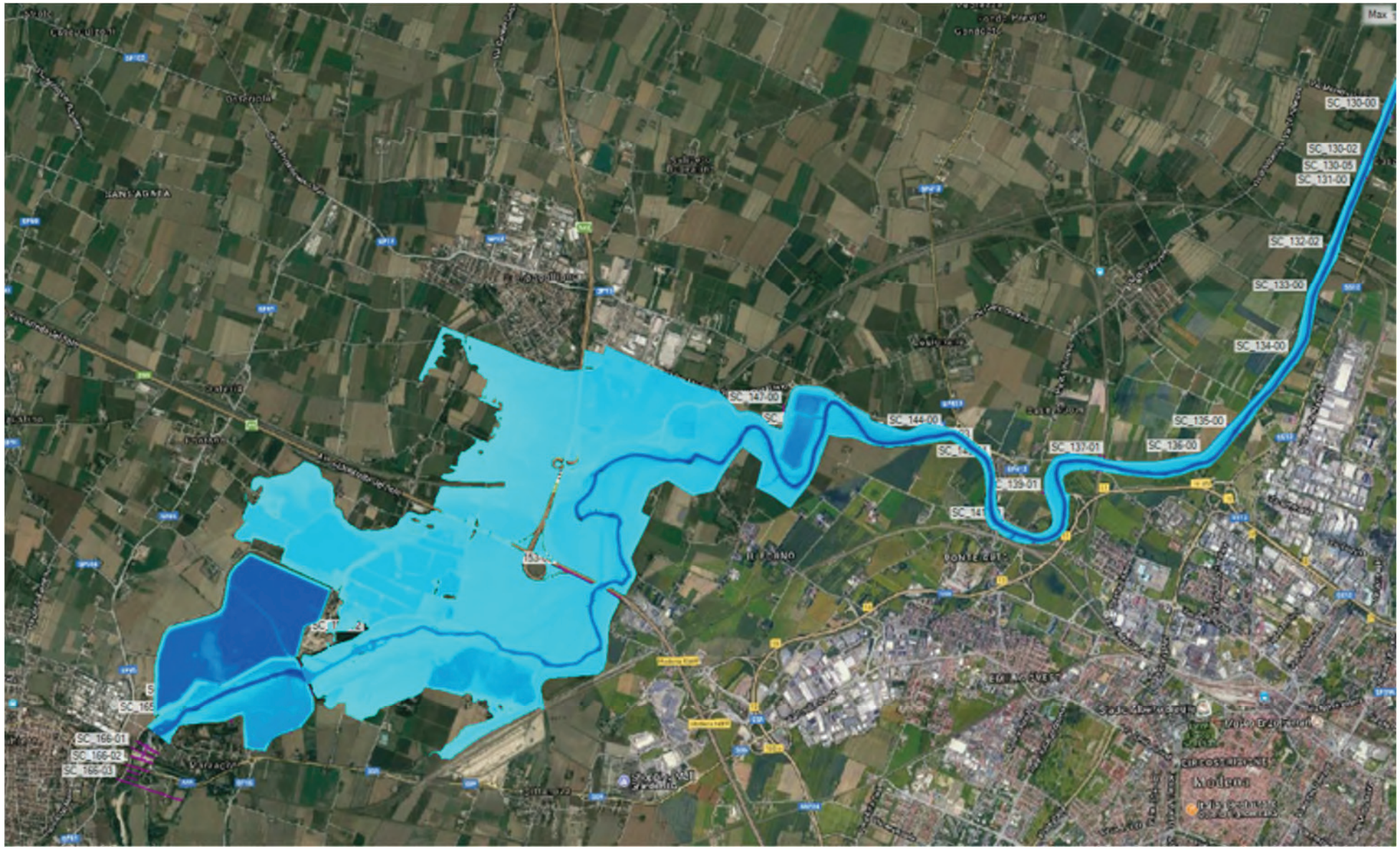



**Fig. 171 Aree inondate e massime altezze d'acqua della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 24 ore) nella configurazione di progetto**

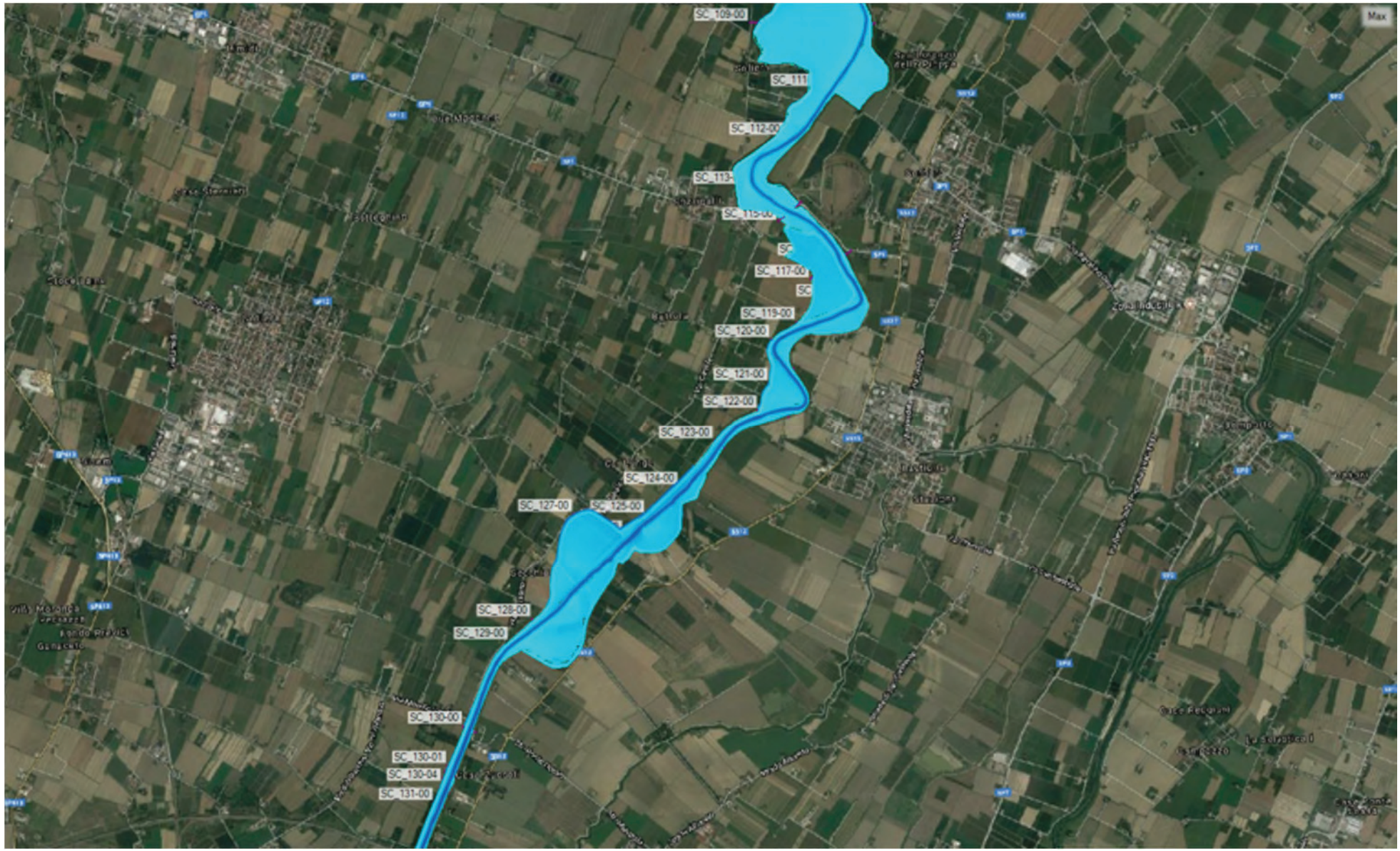



**Fig. 172 Aree inondate e massime altezze d'acqua della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 24 ore) nella configurazione di progetto**

**Fig. 173 Aree inondate e massime altezze d'acqua della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 24 ore) nella configurazione di progetto**

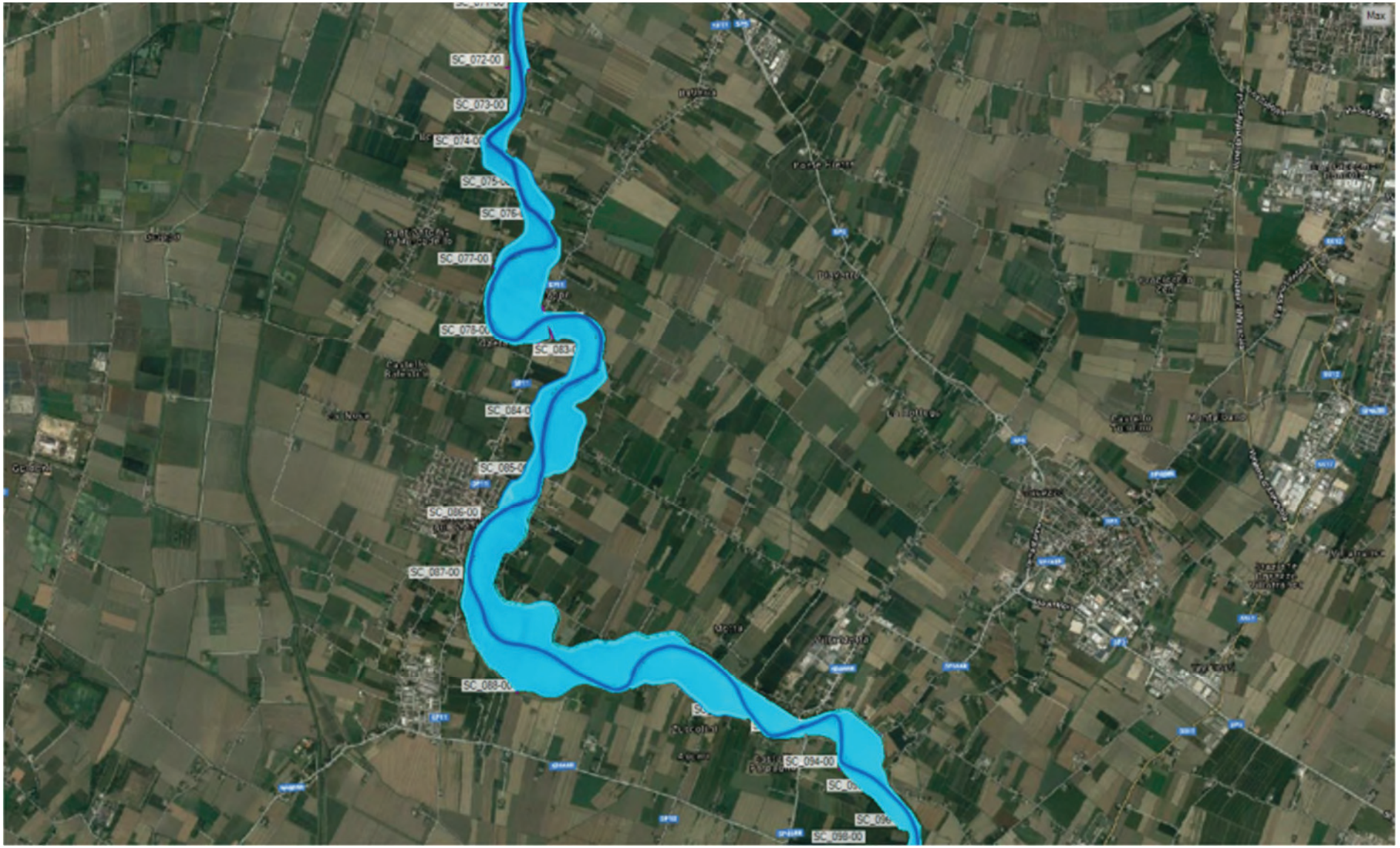



**Fig. 174 Aree inondate e massime altezze d'acqua della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 24 ore) nella configurazione di progetto**

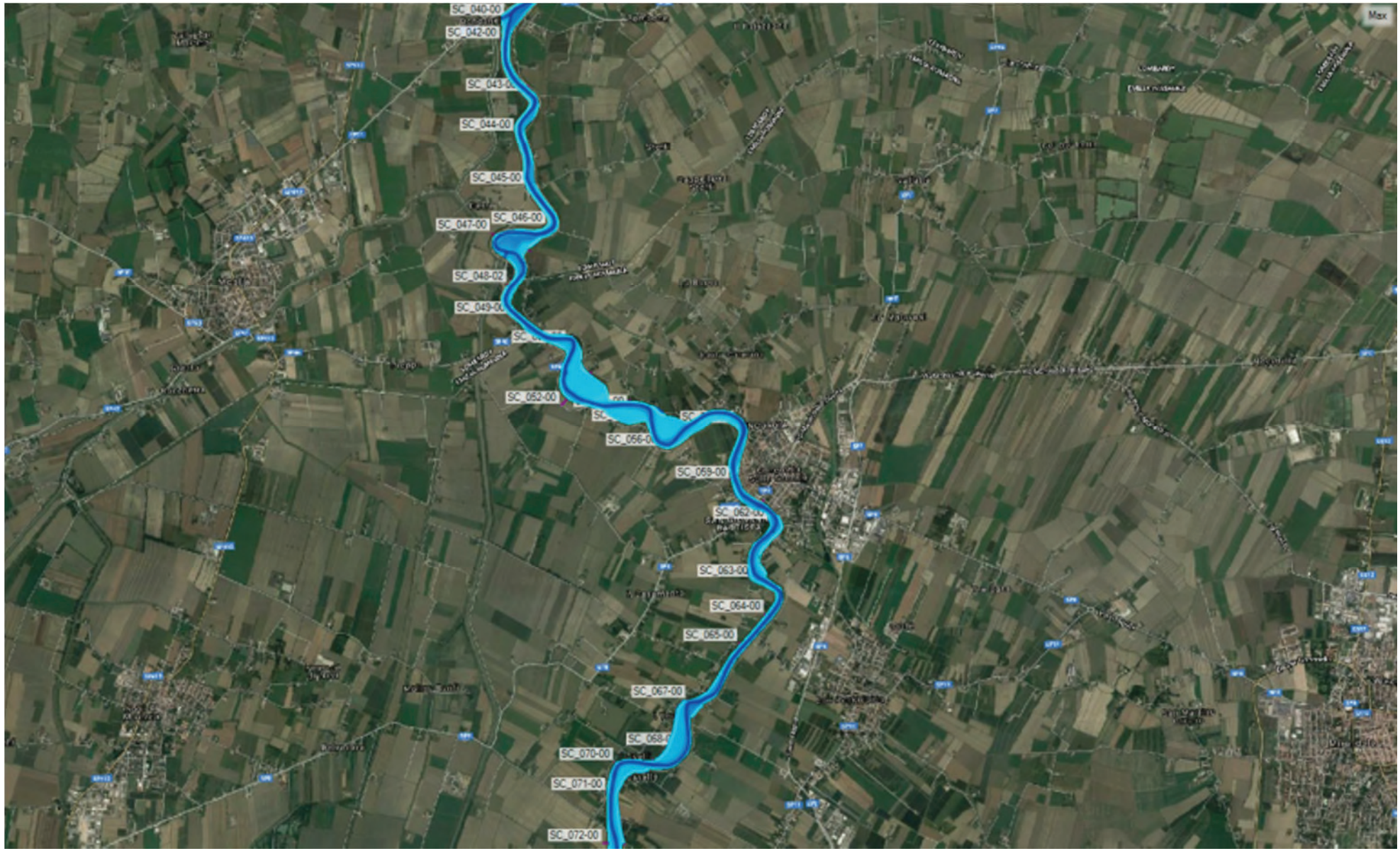



**Fig. 175 Aree inondate e massime altezze d'acqua della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 24 ore) nella configurazione di progetto**

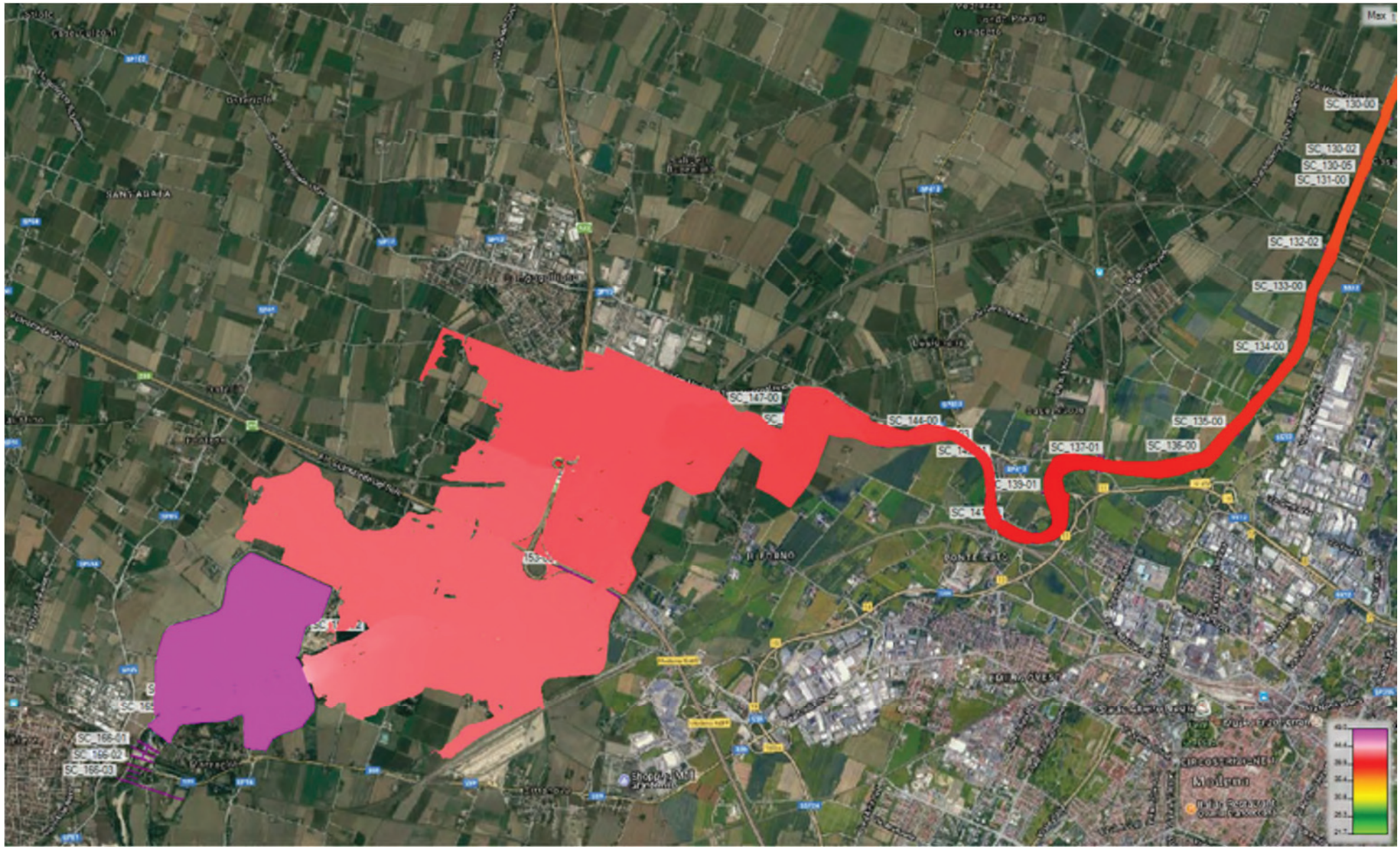



**Fig. 176 Massimi livelli idrici della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 24 ore) nella configurazione di progetto**

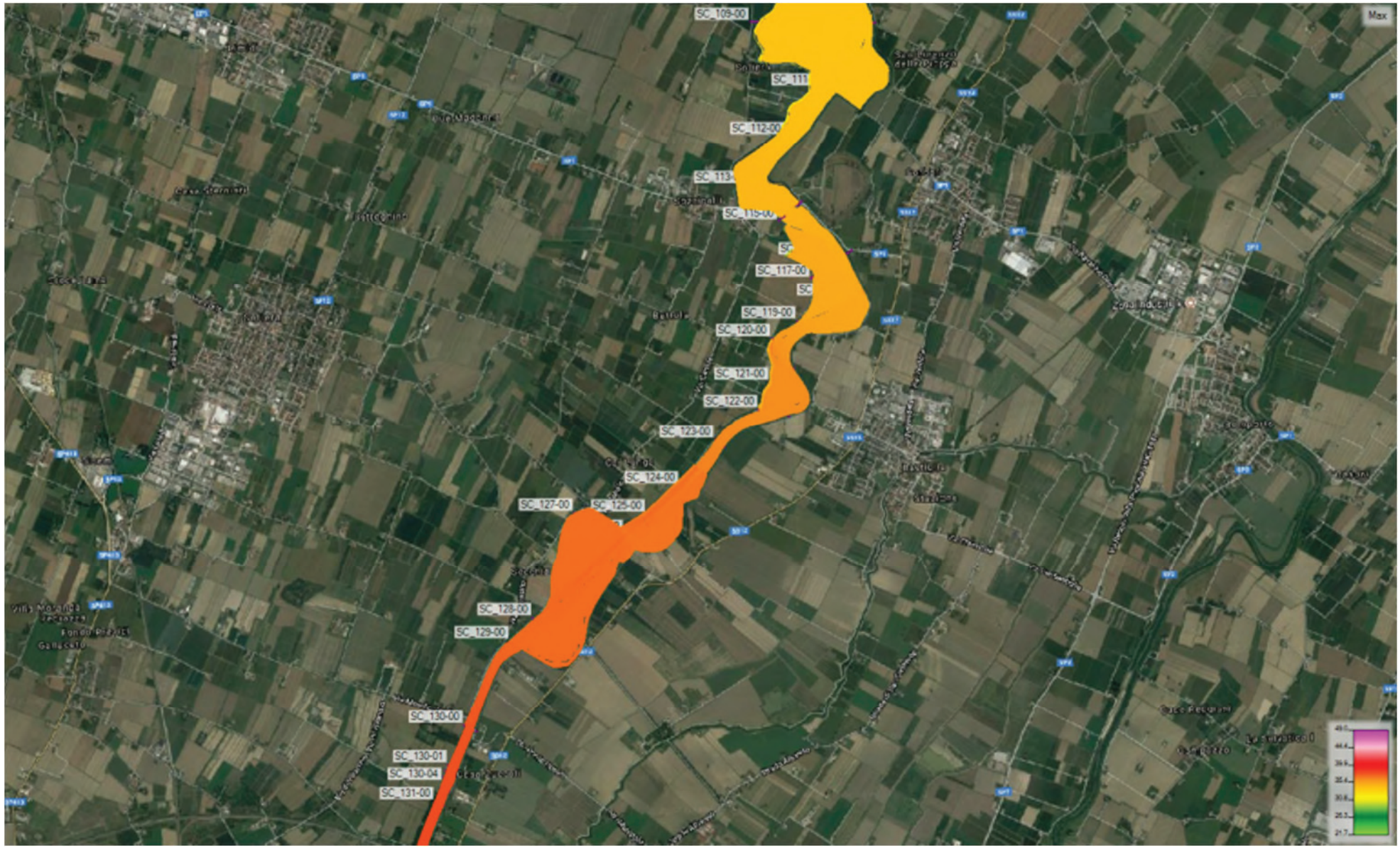



**Fig. 177 Massimi livelli idrici della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 24 ore) nella configurazione di progetto**

**Fig. 178 Massimi livelli idrici della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 24 ore) nella configurazione di progetto**

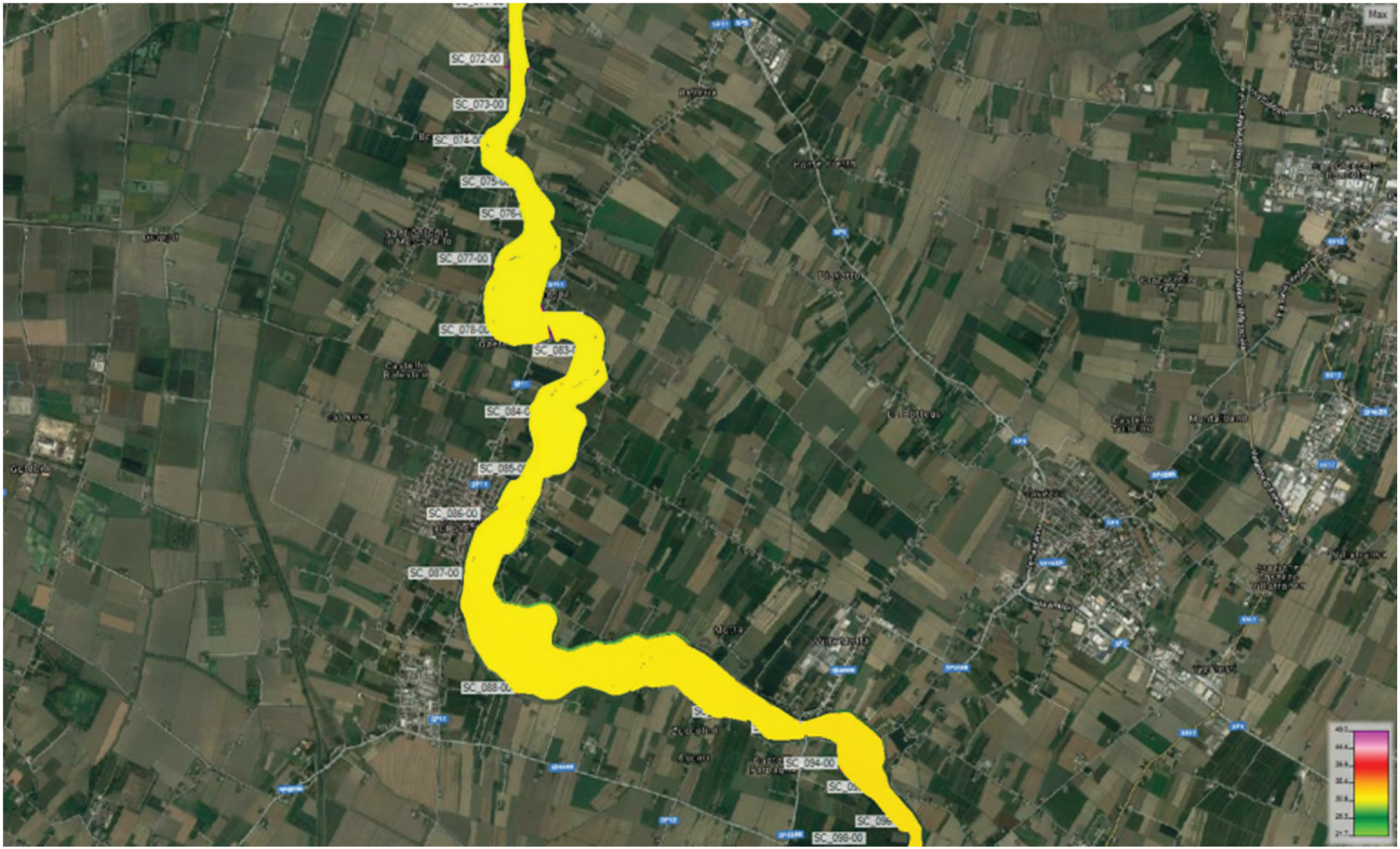



**Fig. 179 Massimi livelli idrici della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 24 ore) nella configurazione di progetto**

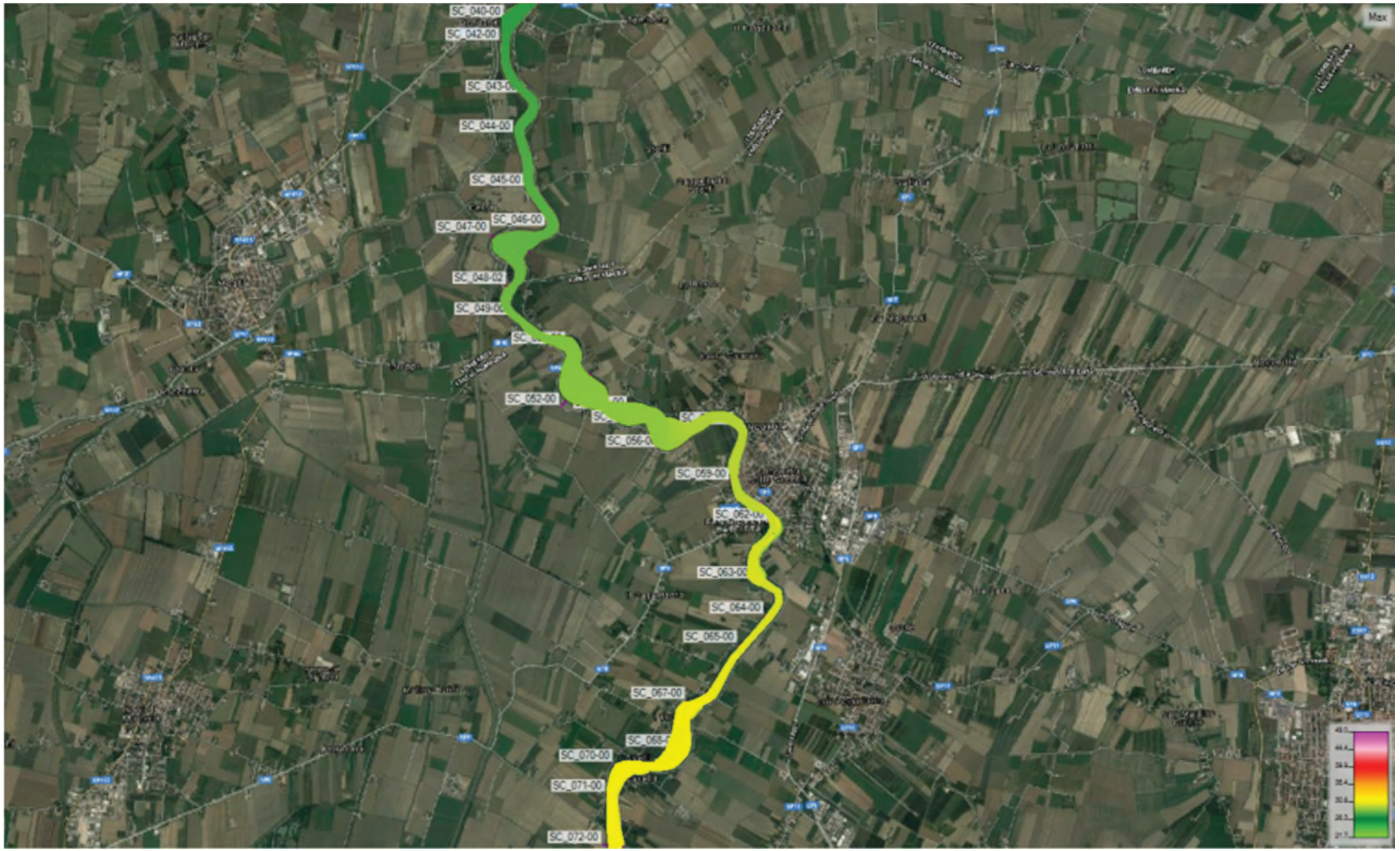



**Fig. 180 Massimi livelli idrici della piena di progetto TR 20 anni (durata critica 24 ore) nella configurazione di progetto**

# 6 Verifica della stabilità delle opere di protezione spondale (sezione tipo D)

L'analisi della stabilità del materiale utilizzato per la difesa spondale in condizioni di progetto è svolta secondo la procedura seguente:

- definizione dei parametri idraulici di interesse;
- caratterizzazione del materiale e verifica della sua stabilità nella situazione di progetto.

## 6.1 Calcolo delle condizioni critiche di moto incipiente

Differenti formule di calcolo sono disponibili in letteratura per la valutazione della stabilità di materiali di assegnata granulometria soggetti all'azione di trascinamento della corrente.

Questi procedimenti si basano sulla determinazione dei valori critici (in generale desunti da dati sperimentali) delle velocità o delle tensioni tangenziali (intesi come valori che corrispondono alle condizioni di moto incipiente per il materiale considerato) e sul confronto con i valori reali di tali grandezze.

Le formule che si basano sul concetto di velocità critica, sebbene molto usate in passato, presentano evidenti limiti di applicabilità: infatti, non essendo generalmente disponibili informazioni sulla distribuzione delle velocità nelle sezioni d'alveo, si utilizza nei calcoli il valore della velocità media per il confronto con il valore di velocità critica, che porta ad una sovrastima della velocità allo strato limite, specialmente per alvei che hanno elevata scabrezza e che quindi non presentano certo uno strato limite laminare.

Per questo motivo appare preferibile l'utilizzo di formule basate sul confronto delle tensioni di trascinamento.

Tale criterio si basa sulla definizione dello sforzo tangenziale esercitato dalla corrente sul materiale costituente il letto fluviale, secondo la formula:

$$\tau_0 = \gamma \cdot R \cdot i$$

Dove:

- $\gamma$ (kg/m$^3$) = è il peso specifico dell'acqua;
- R (m) = è il raggio idraulico della sezione;
- i (m/m) = la pendenza di fondo.

La condizione di stabilità del fondo risulta quando $\tau_{cr} \geq \tau_0$, ovvero quando la tensione tangenziale critica è maggiore o uguale a quella di moto incipiente esercitata dalla corrente.

La seguente analisi di stabilità è riferita alla teoria della tensione tangenziale critica (Shields - 1936 - la cui formula base è stata ricavata da esperimenti su letti a granulometria uniforme di forte scabrezza), attraverso la valutazione della forza che determina il moto incipiente dei granuli, esprimibile in termini generali con la seguente relazione che esprime una condizione di equilibrio:

$$\frac{\tau_{cr}}{(\gamma_s - \gamma)d} = \varnothing(Re^*)$$

con:

- $\tau_{cr}$ = tensione tangenziale critica (kg/m²);
- $\gamma_s$ = peso specifico materiale d'alveo (kg/m³);
- $\gamma$ = peso specifico dell'acqua (kg/m³);
- d = diametro del granulo (m);

- $\Phi$ = parametro adimensionale dipendente dalle caratteristiche dei granuli e del letto fluviale e dal n. di Reynolds ($Re^*$) relativo alla velocità di attrito ($u^* = \sqrt{\tau_{cr}/\rho}$).

Per la traduzione della condizione di equilibrio suddetta in termini empirici e ingegneristici sono state proposte varie formulazioni, derivanti da osservazioni sperimentali, ciascuna caratterizzata da limiti e campi di applicabilità specifici che ne condizionano l'utilizzo alla preventiva definizione della tipologia dei substrati naturali o artificiali e del comportamento idraulico dell'alveo.

In particolare alcuni autori hanno individuato valori empirici specifici del parametro di Shields:

- $\Phi$ = 0.047 nella espressione di Meyer-Peter, che considera nullo il termine relativo al trasporto solido;
- $\Phi$ = 0.058, 0.060 nella espressione originale di Shields per Re*>400;
- $\Phi$ = 0.116 nella espressione di Kalinske, che considera un fattore di compattezza del materiale rappresentante l'effetto di mutuo incastro delle particelle

Per le verifiche di stabilità dei massi costituenti l'opera in progetto verrà fatto riferimento, nel caso specifico, all'espressione di Shields nella formulazione di Meyer-Peter.

Per le verifiche di stabilità del paramento inclinato, la condizione di moto incipiente va espressa considerando le componenti attive del peso e della spinta idrodinamica in relazione alla pendenza ($\alpha$) della sponda rispetto all'orizzontale.

Viene normalmente utilizzata la seguente espressione (E.Lane (1953), con $\tau_{cr}(0)$= tensione critica sul fondo e $\varphi$ = angolo d'attrito interno del materiale):

$$\tau_{cr}(\alpha) = \tau_{cr}(0)\left[\cos\alpha\sqrt{1-\frac{tg^2\alpha}{tg^2\varphi}}\right]$$

Dal confronto fra le tensioni tangenziali esercitate dalla corrente sul fondo e la corrispondente tensione tangenziale critica legata alla pezzatura del materiale utilizzato per il rivestimento, è possibile verificarne la stabilità in alveo identificando le dimensioni dei massi impiegati attraverso il diametro medio di calcolo $D_{50}$.

Volendo esprimere l'ordine di grandezza dei massi tramite il loro peso, si consideri che, in generale, il volume di elementi di forma abbastanza regolare è compreso tra quello di un cubo di lato pari alla dimensione caratteristica calcolata $D_{50}$ e quello di una sfera di tale diametro.

Il rapporto tra questi due volumi è 0.52, mentre il volume del masso caratteristico sarà circa pari a 0.75 volte il volume del cubo.

Quindi, per calcolare il volume del masso caratteristico si può utilizzare la seguente semplice formula:

$$V = 0.75 \cdot (D_{50})^3$$

Il volume per il peso specifico del materiale utilizzato fornisce il peso corrispondente del materiale impiegato.

Di seguito si descrivono i calcoli eseguiti per la verifica dei vari tratti di intervento, per i quali si sono adottati i valori relativi al tratto in corrispondenza delle varie sezioni idrauliche ubicate in corrispondenza delle opere per la piena TR20 con la configurazione di progetto.

## 6.2 Calcolo della tensione tangenziale

La tensione tangenziale $\tau_0$ agente sul fondo (piede della difesa nel caso specifico) è stata calcolata con riferimento all'espressione:

$$\tau_0 = \gamma \cdot R \cdot i$$

assumendo:

- $\gamma$ = 1000 kg/m³ peso specifico dell'acqua;
- R = raggio idraulico dedotto dai dati idraulici delle varie sezioni in corrispondenza dei tratti di intervento al transito della portata con tempo di ritorno 20 anni nella configurazione di progetto;
- i = pendenza di fondo, assunta cautelativamente pari a 0.1 m/m (superiore alla pendenza del tratto di intervento).

## 6.3 Definizione del peso dei massi da impiegarsi

Con riferimento a quanto precedentemente descritto, il diametro stabile di 0,55 m comporta un volume teorico di un masso sferico pari a

$$V = 0.75 \cdot d^3 = 0{,}15 \text{ m}^3$$

a cui corrisponde un peso minimo del masso di 375 kg.

Si prevede pertanto di utilizzare massi di pezzatura non inferiore a 400 Kg.

## 6.4 Risultati delle verifiche di stabilità delle opere di protezione spondale

Dalla formulazione di Meyer-Peter della formula di Shields – Krey precedentemente descritta, si ottiene la condizione di stabilità assumendo un diametro di riferimento $d_{50}$ pari a 0,55 m e un peso specifico dei massi pari a 2.500 kg/m³ che determinano un valore della tensione critica sul fondo riportata nella tabella sottostante, in cui è altresì riportato il relativo coefficiente di sicurezza ottenuto.

Trasponendo tali valori sulla sponda (paramento inclinato della difesa) ed assumendo un angolo della scarpata pari a 32° (paramento inclinato di 2/3) ed un angolo di attrito del materiale pari a 45° (valido nel caso specifico in cui l'elevata pezzatura dei massi determina un effetto rilevante di mutuo incastro) si ottiene la tensione critica sulla sponda, con il conseguente coefficiente di sicurezza sempre superiore a 3.5.

Nella tabella seguente si riportano i risultati ottenuti.

| **TRATTO** | **ST64** | **ST86** | **ST118** | **ST129.1** | **ST140** | **ST148** | **ST153** | **ST161** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **SPONDA** | SX | SX | SX | SX | SX | SX | SX | SX |
| **SEZIONE IDRAULICA** | 129-00 | 120-00 | 105-00 | 102-00 | 096-00 | 094-00 | 092-00 | 090-00 |
| **Progressiva** | 18951.33 | 23365.12 | 30236.96 | 32617.22 | 35592.88 | 36511.72 | 37957 | 39544.69 |
| **Raggio idraulico [m]** | 6.29 | 5.53 | 3.72 | 4.12 | 4.64 | 4.74 | 4.09 | 4.79 |
| **Volume masso [m³]** | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| **$\tau_0$ [kg/m²]** | 9.44 | 8.30 | 5.58 | 6.18 | 6.96 | 7.11 | 6.14 | 7.19 |
| **$\tau_{cr}$ [kg/m²]** | 38.78 | 38.78 | 38.78 | 38.78 | 38.78 | 38.78 | 38.78 | 38.78 |
| **CS ($\tau_{cr}$ / $\tau_0$)** | **4.1** | **4.7** | **6.9** | **6.3** | **5.6** | **5.5** | **6.3** | **5.4** |
| **$\tau_{0S}$ [kg/m²]** | 7.08 | 6.22 | 4.19 | 4.64 | 5.22 | 5.33 | 4.60 | 5.39 |
| **$\tau_{cr}(\alpha)$ [kg/m²]** | 25.67 | 25.67 | 25.67 | 25.67 | 25.67 | 25.67 | 25.67 | 25.67 |
| **CS' ($\tau_{cr}(\alpha)$ / $\tau_{0S}$)** | **3.6** | **4.1** | **6.1** | **5.5** | **4.9** | **4.8** | **5.6** | **4.8** |

**Tab. 21 Tabella di riepilogo con la indicazione dei coefficienti di sicurezza per i tratti in cui è prevista la realizzazione della scogliera (sezione tipo D) – Sponda sinistra – Tratto da ST64 a ST161**

| TRATTO | ST161 | ST173 | ST202.1 | ST211 | ST217 | ST228 | ST233 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SPONDA | SX | SX | SX | SX | SX | SX | SX |
| SEZIONE IDRAULICA | 090-00 | 085-00 | 074-00 | 069-00 | 067-00 | 063-00 | 059-00 |
| Progressiva | 39544.69 | 42939.92 | 48109.85 | 50301.22 | 51240.3 | 53188.03 | 54579.2 |
| Raggio idraulico [m] | 4.79 | 3.84 | 4.05 | 3.9 | 4.19 | 3.88 | 3.06 |
| Volume masso [m³] | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| $\tau_0$ [kg/m²] | 7.19 | 5.76 | 6.08 | 5.85 | 6.29 | 5.82 | 4.59 |
| $\tau_{cr}$ [kg/m²] | 38.78 | 38.78 | 38.78 | 38.78 | 38.78 | 38.78 | 38.78 |
| CS ($\tau_{cr}$ / $\tau_0$) | **5.4** | **6.7** | **6.4** | **6.6** | **6.2** | **6.7** | **8.4** |
| $\tau_{0S}$ [kg/m²] | 5.39 | 4.32 | 4.56 | 4.39 | 4.71 | 4.37 | 3.44 |
| $\tau_{cr}(\alpha)$ [kg/m²] | 25.67 | 25.67 | 25.67 | 25.67 | 25.67 | 25.67 | 25.67 |
| CS' ($\tau_{cr}(\alpha)$ / $\tau_{0S}$) | **4.8** | **5.9** | **5.6** | **5.9** | **5.4** | **5.9** | **7.5** |

**Tab. 22 Tabella di riepilogo con la indicazione dei coefficienti di sicurezza per i tratti in cui è prevista la realizzazione della scogliera (sezione tipo D) – Sponda sinistra – Tratto da ST161 a ST233**

| TRATTO | ST113 | ST119 | ST129 | ST136 | ST152 | ST171 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| SPONDA | DX | DX | DX | DX | DX | DX |
| SEZIONE IDRAULICA | 116-00 | 112-00 | 108-00 | 106-00 | 101-00 | 093-00 |
| Progressiva | 25312.71 | 26462.82 | 28402.97 | 29769.51 | 33020.57 | 37354.88 |
| Raggio idraulico [m] | 4.77 | 5 | 3.58 | 3.22 | 4.78 | 5.03 |
| Volume masso [m³] | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| $\tau_0$ [kg/m² | 7.16 | 7.50 | 5.37 | 4.83 | 7.17 | 7.55 |
| $\tau_{cr}$ [kg/m² | 38.78 | 38.78 | 38.78 | 38.78 | 38.78 | 38.78 |
| CS ($\tau_{cr}$ / $\tau_0$ | **5.4** | **5.2** | **7.2** | **8.0** | **5.4** | **5.1** |
| $\tau_{0S}$ [kg/m² | 5.37 | 5.63 | 4.03 | 3.62 | 5.38 | 5.66 |
| $\tau_{cr}(\alpha)$ [kg/m²] | 25.67 | 25.67 | 25.67 | 25.67 | 25.67 | 25.67 |
| CS' ($\tau_{cr}(\alpha)$ / $\tau_{0S}$) | **4.8** | **4.6** | **6.4** | **7.1** | **4.8** | **4.5** |

**Tab. 23 Tabella di riepilogo con la indicazione dei coefficienti di sicurezza per i tratti in cui è prevista la realizzazione della scogliera (sezione tipo D) – Sponda destra da ST113 a ST171**

| TRATTO | ST174 | ST196 | ST213 | ST230 | ST233 |
|---|---|---|---|---|---|
| SPONDA | DX | DX | DX | DX | DX |
| SEZIONE IDRAULICA | 092-00 | 085-00 | 076-00 | 069-00 | 066-00 |
| Progressiva | 37957 | 42939.92 | 47207.65 | 50301.22 | 51476.58 |
| Raggio idraulico [m] | 4.09 | 3.84 | 3.59 | 3.9 | 3.31 |
| Volume masso [m³] | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| $\tau_0$ [kg/m²] | 6.14 | 5.76 | 5.39 | 5.85 | 4.97 |
| $\tau_{cr}$ [kg/m²] | 38.78 | 38.78 | 38.78 | 38.78 | 38.78 |
| CS ($\tau_{cr}$ / $\tau_0$ | **6.3** | **6.7** | **7.2** | **6.6** | **7.8** |
| $\tau_{0S}$ [kg/m²] | 4.60 | 4.32 | 4.04 | 4.39 | 3.72 |
| $\tau_{cr}(\alpha)$ [kg/m²] | 25.67 | 25.67 | 25.67 | 25.67 | 25.67 |
| CS' ($\tau_{cr}(\alpha)$ / $\tau_{0S}$ ) | **5.6** | **5.9** | **6.4** | **5.9** | **6.9** |

**Tab. 24 Tabella di riepilogo con la indicazione dei coefficienti di sicurezza per i tratti in cui è prevista la realizzazione della scogliera (sezione tipo D) – Sponda destra da ST174 a ST233**

# 7 Scenario di cantierizzazione

Per la verifica idraulica relativa allo scenario di cantierizzazione, è prassi consolidata quella di assumere un tempo di ritorno che, in funzione della durata del cantiere, comporti il medesimo livello di pericolosità idraulica relativa rispetto alle opere in progetto.

La pericolosità idraulica relativa, definita come probabilità di accadimento di un evento di piena in un intervallo di tempo di N anni, è espressa tramite la formulazione:

$$P_{rel} = 1 - (1 - 1/T)^N$$

dove T rappresenta il tempo di ritorno e N il periodo di vita dell'opera.

Assumendo cautelativamente per le opere in progetto una vita economica pari a N = 50 anni (vedi vita nominale assunta per le verifiche sismiche), dimensionate rispetto alla piena con tempo di ritorno di 20 anni (come stabilito dall'Ordinanza), si ha:

$$P_{rel} = 0.92$$

Ciò significa che vi è la probabilità del 92% che nei 50 anni di vita dell'opera si verifichi almeno una volta la piena ventennale.

Poiché la durata del cantiere è fissata in 1 anno, sarebbe sufficiente, per la verifica dello scenario di cantierizzazione, assumere come evento di riferimento quello relativo alla piena ordinaria, quella cioè

che si verifica ordinariamente almeno una volta all'anno, in modo da avere una probabilità di accadimento già superiore a quella relativa alle opere in progetto.

Anche in ragione di quanto richiesto nell'ambito dell'iter di verifica del progetto esecutivo di I stralcio, si è deciso di assumere cautelativamente un evento avente tempo di ritorno pari a 2,5 anni.

Per stimarne il valore di portata è stata condotta un'analisi statistica dei valori di portata registrati negli annali idrologici. In particolare sono stati utilizzati i dati registrati nella stazione di misura di Ponte Alto, stazione ubicata in posizione baricentrica rispetto al cantiere in esame ed in prossimità dei guadi provvisori previsti.

La serie storica a disposizione per la stazione di Ponte Alto inizia dall'anno 2005 fino all'anno 2016. Di questi 12 anni è stata considerata la massima portata media giornaliera annua; su tale serie, adottando una distribuzione di Gumbel, è stato possibile attribuire a ciascun valore di portata il tempo di ritorno corrispondente.

**Tab. 25 Serie storica dei massimi annui delle portate medie giornaliere per la stazione idrometrica di ponte Alto**

| ANNO | Qm ($m^3/s$) |
|---|---|
| 2005 | 281 |
| 2006 | 132 |
| 2007 | 137 |
| 2008 | 539 |
| 2009 | 444 |
| 2010 | 280 |
| 2011 | 185 |
| 2012 | 191 |
| 2013 | 230 |
| 2014 | 315 |
| 2015 | 279 |
| 2016 | 259 |

L'elaborazione statistica dei dati (Tab. 25) è stata effettuata mediante la distribuzione di probabilità di Gumbel espressa dalla seguente funzione di probabilità di non superamento:

$$P(Q) = e^{-e^{\frac{Q-u}{\alpha}}}$$

Introducendo la variabile ridotta:

$$y = \frac{Q-u}{\alpha}$$

L'equazione assume la forma canonica:

$$P(y) = e^{-e^{y}}$$

Con densità di probabilità pari a:

$$p(y) = e^{(-e^y - y)}$$

La media e lo scarto quadratico medio della densità di probabilità sono rispettivamente:

$$\mu(y) = 0.5772$$
$$\sigma(y) = \frac{\pi}{\sqrt{6}}$$

Essendo poi:

$$\mu(y) = \frac{\mu(Q) - u}{\alpha}$$
$$\sigma(y) = \frac{1}{\alpha}\sigma(Q)$$

Si ottengono le seguenti equazioni:

$$u = \mu(Q) - 0.5772\alpha$$
$$\alpha = 0.779\sigma(Q)$$

Invertendo poi la funzione di distribuzione e introducendo il tempo di ritorno si ottiene:

$$Q(T) = u - \alpha \ln\left[-ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right]$$

La stima dei parametri della distribuzione è stata condotta mediante il metodo dei momenti sostituendo alla media $\mu$ ed allo scarto $\sigma$ i corrispettivi valori campionari.

Applicando quanto detto sopra sono stati ottenuti i valori riportati in Tab. 26.

**Tab. 26 Elaborazione statistica secondo Gumbel**

| ANNO | Qm ($m^3/s$) | P($Q_m$) | T (anni) |
|---|---|---|---|
| 2006 | 132 | 0,077864176 | 1,08 |
| 2007 | 137 | 0,089009838 | 1,10 |
| 2011 | 185 | 0,236260342 | 1,31 |
| 2012 | 191 | 0,258575216 | 1,35 |
| 2013 | 230 | 0,411140411 | 1,70 |
| 2016 | 259 | 0,521803036 | 2,09 |
| 2015 | 279 | 0,591874011 | 2,45 |
| 2010 | 280 | 0,595207299 | 2,47 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 2005 | 281 | 0,598523365 | 2,49 |
| 2014 | 315 | 0,700504256 | 3,34 |
| 2009 | 444 | 0,915058507 | 11,77 |
| 2008 | 539 | 0,968582952 | 31,83 |

Sempre dall'analisi dei dati riportati negli annali è stato possibile anche definire il coefficiente di punta che corrisponde al rapporto tra la portata media giornaliere e la portata massima giornaliera. Tale valore è stato stimato pari a 1,4. Di conseguenza è stato possibile definire per ciascun tempo di ritorno anche la massima portata al colmo (Tab. 27).

**Tab. 27 Porte al colmo e relative tempi di ritorno**

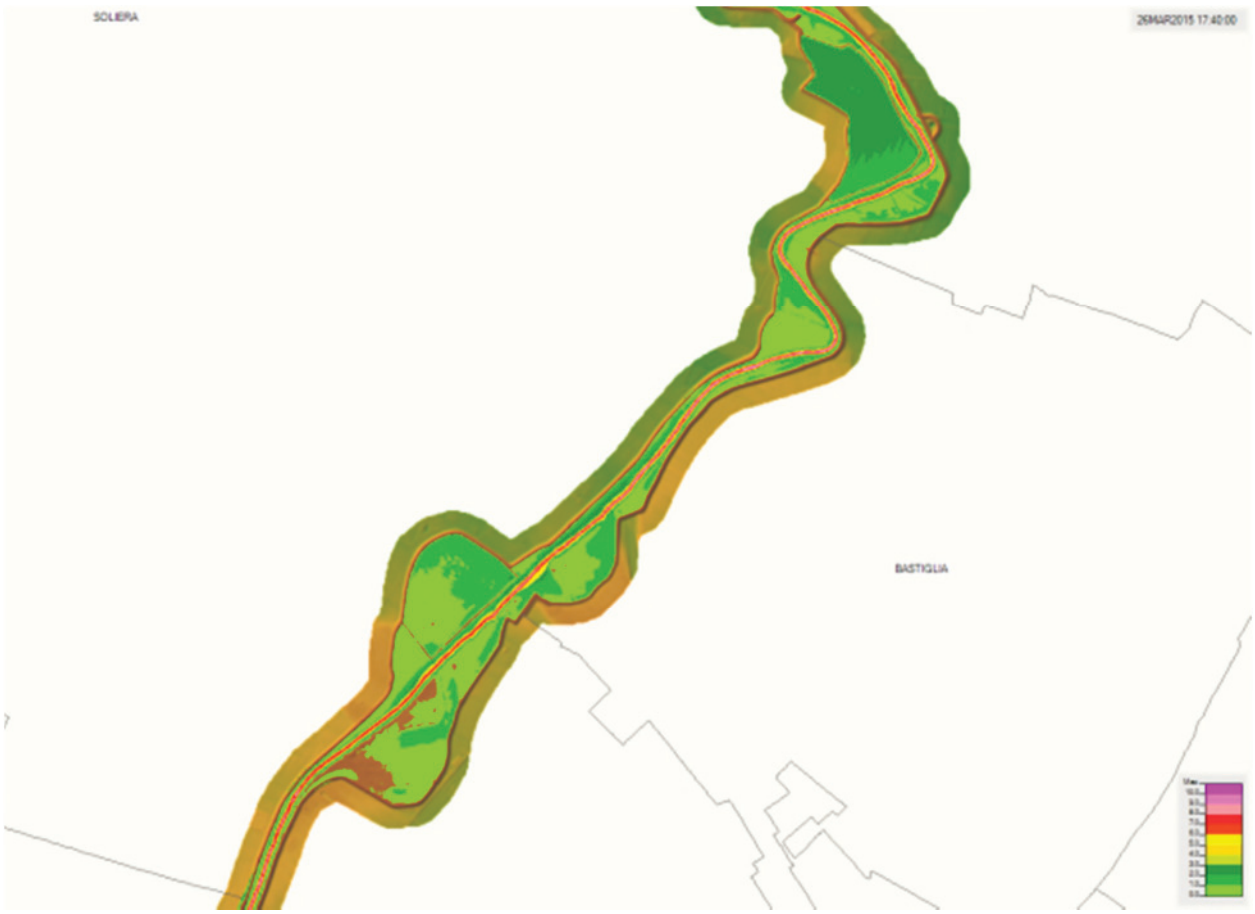
| T (anni) | Qc ($m^3/s$) |
|---|---|
| 1,08 | 149,96 |
| 1,10 | 155,64 |
| 1,31 | 210,17 |
| 1,35 | 216,99 |
| 1,70 | 261,29 |
| 2,09 | 294,24 |
| 2,45 | 316,96 |
| 2,47 | 318,09 |
| 2,49 | 319,23 |
| 3,34 | 357,86 |
| 11,77 | 504,41 |
| 31,83 | 612,33 |

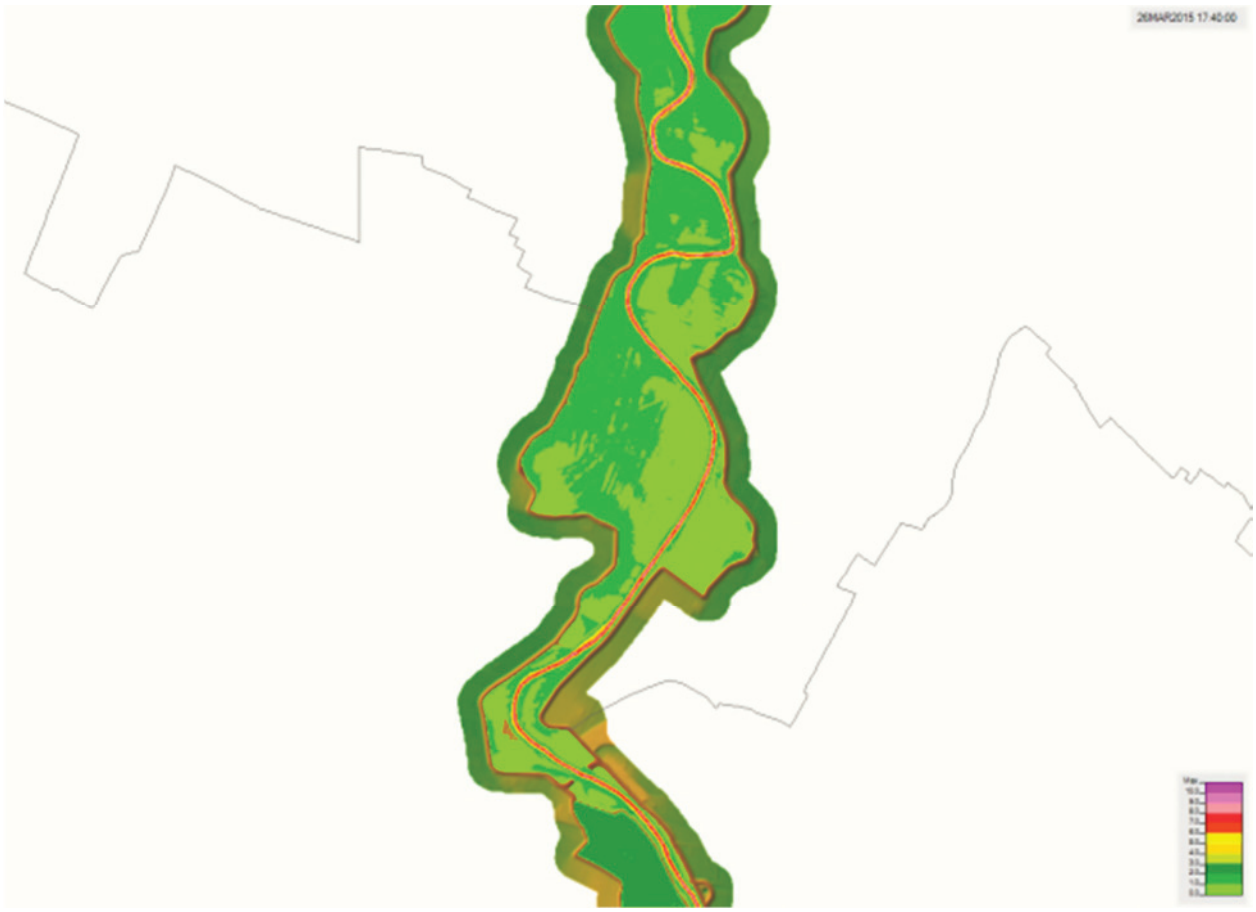
Quindi dalla Tab. 27 si osserva che la porta relativa ad un tempo di ritorno di 2,5 anni a Ponte Alto è pari a circa 320 $m^3/s$.

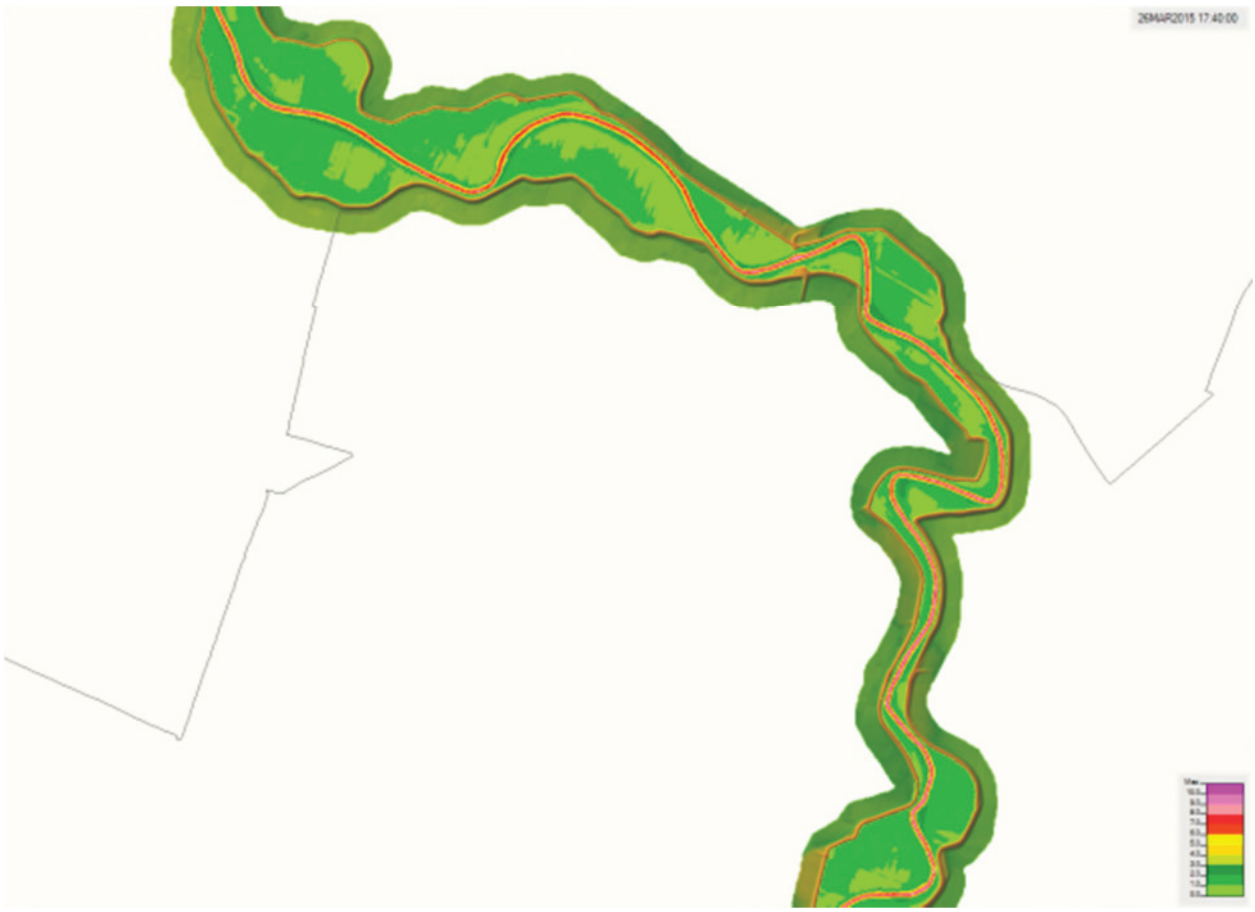
Analizzando i risultati provenienti dal modello idraulico, è possibile associare a tale valore di portata misurata a Ponte Alto, un valore pari a circa 534 $m^3/s$ al ponte dell'Autostrada (7,5 km più a monte); tale valore è congruentemente più alto rispetto al valore utilizzato nell'ambito della progettazione definitiva del I stralcio, pari a 450 $m^3/s$.

Si sottolinea come nell'ambito del presente II stralcio non sia stata prevista la realizzazione di guadi provvisionali per il passaggio da una sponda all'altra, per cui i tiranti idrici possono essere cautelativamente desunti dalla configurazione dello stato di fatto.

In ragione del valore di portata assunto, si verificano degli allagamenti delle aree golenali con tiranti idrici in prossimità dei rilevati arginali prossimi ad 1 m, tali da non determinare criticità alle gradonature in corso di realizzazione, come è possibile verificare dalle immagini di seguito riportate.


SOLIERA
26MAR2015 17:40:00
BASTIGLIA


26MAR2015 17:40:00


26MAR2015 17:40:00

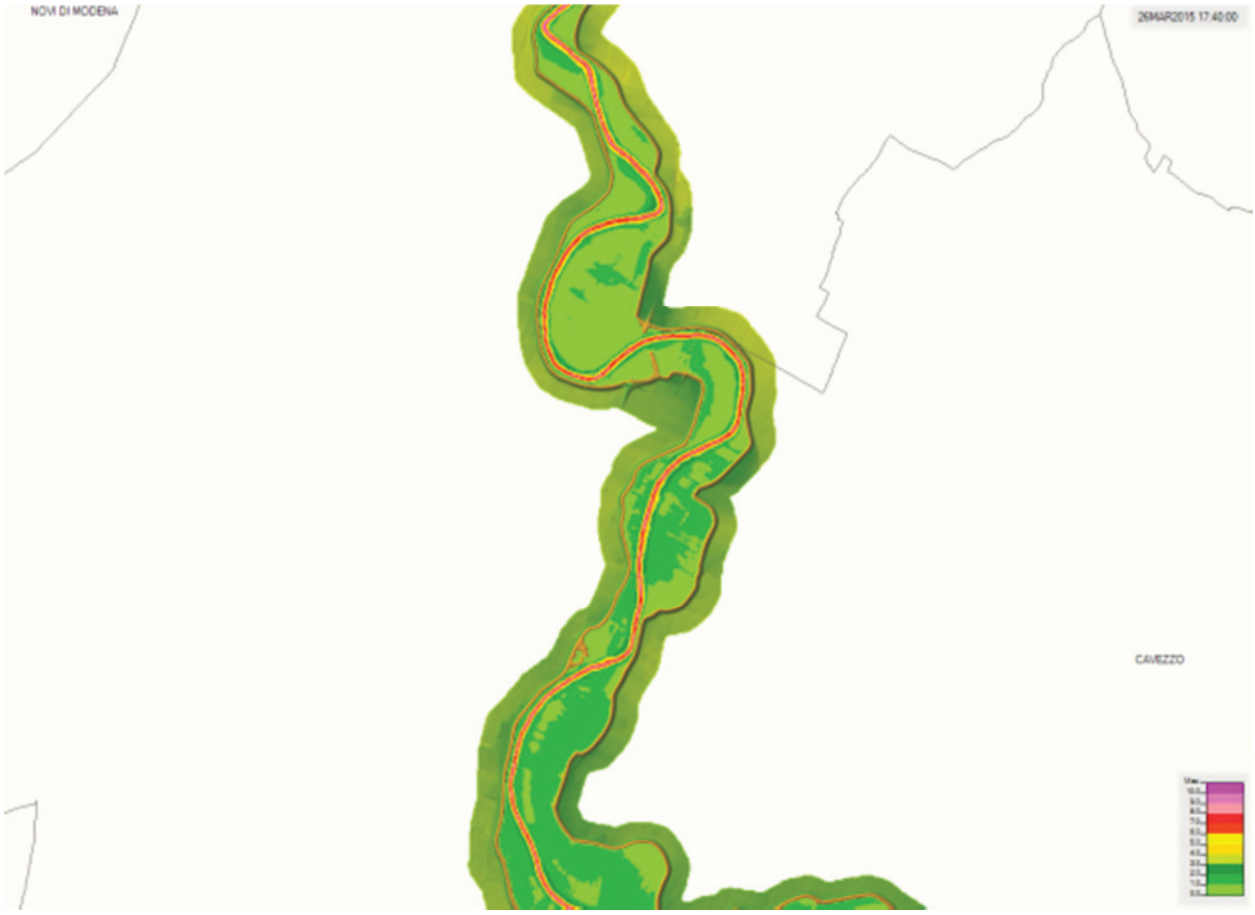

NOVI DI MODENA
26MAR2015 17:40:00
CAVEZZO

**Fig. 181 Tiranti idrici determinati da una portata di circa 540 $m^3/s$ al ponte dell'autostrada A1**

Le caratteristiche idrologiche del f. Secchia sono peraltro tali da non permettere un tempo di preavviso legato alla misurazione dei livelli idrometrici anche per il fatto che a seconda dell'entità dell'evento il sistema di invasi, cassa e golene, intervengono in maniera diversificata modificando anche i tempi di trasferimento dell'onda (p.e. il tempo di propagazione della piena dal ponte autostradale fino al ponte dell'Uccellina è pari a circa 6 ore rispetto alla piena TR 20 anni). In sede di redazione del Piano di Sicurezza verrà pertanto sviluppato un piano di allerta e di evacuazione collegato con il sistema previsionale delle piene di AIPo.

Infine per comunque garantire una certa sicurezza della stabilità delle lavorazioni la esecuzione dei lavori dovrà avvenire per sezioni finite, programmando le attività in modo da non avere fronti di scavo/gradonature superiori a 100 m, in modo da potere intervenire in caso di piena alla realizzazione di ture provvisionali a difesa del piede arginale.

# 8 Dimensionamento delle vasche di dissipazione delle opere di sfioro delle aree golenali

A valle dello sfioro che alimentano le aree golenali chiuse, è stata prevista una vasca di dissipazione tale da dissipare l'energia della vena liquida stramazzante dallo scarico per poi defluire l'acqua all'interno dell'area golenale.

Il funzionamento dell'area golenale è tale da determinare un progressivo innalzamento dei livelli a valle dello sfioro, per cui lo scenario più critico è quello legato alle immediate fasi di sormonto della soglia, in corrispondenza dei quali si può immaginare a valle alcun rigurgito. Parimenti la condizione più gravosa è quella legata alla presenza, a monte, del livello della piena di riferimento.

Per il dimensionamento dello scarico di superficie è stata utilizzata la formula dello stramazzo a larga soglia:

$$Q = 0.385LH\sqrt{2gH}$$

Pertanto il valore della altezza $y_1$ è stata ricavata applicando il bilancio di energia tra la sezione 1 e la sezione di monte dello sfioro, caratterizzata dal tirante idrico $H_c$ e dal dislivello pari ad $h$:

$$H_C + h = y_1 + \frac{v_1^2}{2g}$$

dove

$$H_C = \frac{3}{2}\sqrt[3]{\frac{Q^2}{gB^2}}$$

La portata a valle dello sfioro può invece essere valutata cautelativamente con la seguente formula:

$$Q = \mu L(y_2 - a)^{3/2}\sqrt{2g}$$

dove:

- $\mu$ è stato imposta pari a 0,6 m;
- $a$: rappresenta l'altezza della soglia di dissipazione che occorre attribuire per garantire la formazione del risalto idraulico.

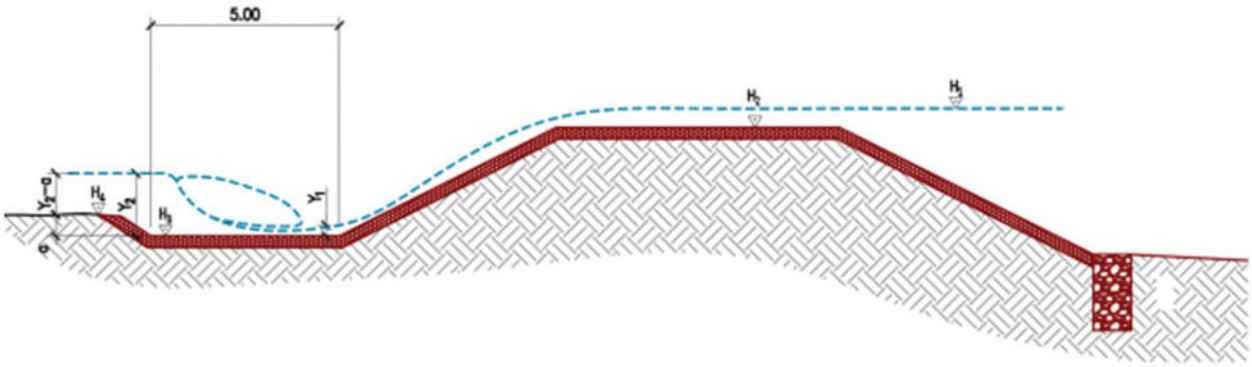



**Fig. 182 Dimensionamento della vasca di dissipazione in corrispondenza degli sfiori delle aree golenali chiuse**

Il calcolo dell'altezza del risalto idraulico $y_2$ è stato effettuato mediante il confronto delle spinte totali del profilo idrico tra la sezione 1 e 2, ricavando l'equazione:

$$y_2 = \frac{-y_1}{2} + \sqrt{\frac{y_1^2}{4} + \frac{2Q^2}{gy_1}}$$

Eguagliando i valori delle portate sfiorate con quelle che proseguono a valle del risalto, si ottengono i risultati riportati nella tabella seguente.

| | Golena Cantone | Golena Bacchello |
|---|---|---|
| $H_1$ [m s.l.m.] | 36.10 | 34.10 |
| $H_2$ [m s.l.m.] | 35.60 | 33.60 |
| L [m] | 50.0 | 50.0 |
| $H_c$ [m] | 0.50 | 0.50 |
| h [m] | 3.87 | 2.88 |
| Q [m³/s] | 30.2 | 30.2 |
| $H_3$ [m s.l.m.] | 31.73 | 30.72 |
| $H_4$ [m s.l.m.] | 32.39 | 31.29 |
| $y_1$ [m s.l.m.] | 0.07 | 0.07 |
| $y_2$ [m s.l.m.] | 1.03 | 0.96 |
| a [m] | 0.66 | 0.58 |
| $Q_{valle}$ [m³/s] | 30.0 | 30.9 |

Per la definizione della lunghezza della vasca di dissipazione è stato considerato quanto definito dalla relazione seguente:

$$L = 4.8 \div 6\ (y_2 - y_1)$$

Mantenendo un valore medio tra 4.8 e 6 è stato calcolato una larghezza della vasca pari a 5 m.

# 9 Approfondimento degli scenari idraulici relativi alla progettazione degli interventi di ampliamento e di adeguamento della cassa di espansione del f. Secchia

Attualmente è in corso di redazione, da parte dell'RTP formato dalle società di Ingegneria DiZeta et all.[1], la progettazione degli interventi di adeguamento della cassa di espansione, con la seguente finalità:

- adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali costituenti il sistema della cassa di espansione esistente;
- adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della stessa cassa di espansione, comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato;
- adeguamento del sistema difensivo immediatamente a valle della cassa.

[1] Progetto di fattibilità tecnico ed economica relativo agli interventi di adeguamento del sistema di laminazione delle piene della cassa di espansione del Fiume Secchia (provincia di Modena) (MO-E-1357) finanziati con ordinanza commissariale 7 e 8/2015 come modificati dall'ordinanza 2/2016 – ottobre 2017 – RTP formato dalle società DiZeta Ingegneria (mandataria), Majone&Partners (mandante), Lombardi (mandante), ENGEO (mandante), Graia (mandante), Studio Pandakovic (mandante).

In particolare la finalità dell'intervento è funzionale alla risoluzione delle criticità connesse al nodo, ed in particolare (vedi relazione descrittiva del Progetto Preliminare):

1. *….Insufficienza a fornire un grado di laminazione adeguato per il tempo di ritorno di 200 anni;*
2. *Insufficienza a fornire un grado di laminazione adeguato anche per eventi a minor tempo di ritorno a causa dell'inefficienza dei manufatti di regolazione e sfioro laterale;*
3. *Mancato rispetto delle prescrizioni del DPR 1363/59 e s.m.i, con particolare riferimento al franco dei rilevati arginali.*

*Le soluzioni progettuali individuate sono state suddivise in 4 lotti a priorità crescente (si veda la corografia riportata in allegato I alla presente relazione):*

- *Il lotto A riguarderà sostanzialmente le opere di adeguamento dei manufatti idraulici ed opere connesse ed è funzionale a massimizzare l'efficienza del sistema cassa sia nello stato di fatto, sia in previsione della realizzazione delle opere dei lotti successivi. Una volta realizzate, le opere di questo lotto permetteranno un aumento dell'efficienza di laminazione, potendo introdurre regole di gestione degli invasi di eventi di piena ventennali, e la messa in sicurezza delle aree sensibili a valle della cassa […];*
- *Il Lotto B riguarderà in particolare la soluzione della criticità n.3 prevedendo il rialzo e il ringrosso delle arginature esistenti e portando a rispettare la normativa vigente per gli sbarramenti. La realizzazione di tale intervento porterà inoltre ad un aumento dell'efficienza complessiva, potendo permettere lo sfruttamento alla massima capacità degli invasi;*
- *Il Lotto C, che riguarda l'ampliamento della cassa d'espansione, permetterà di ottenere complessivamente una adeguata laminazione di eventi di piena sovra ventennali fino ad eventi di piena cinquantennali, pur non garantendo il franco per quanto riguarda i tratti di arginatura di valle;*
- *Il Lotto D, che comprende due ulteriori interventi, realizzazione seconda cassa di espansione del fiume Secchia e ricalibratura dell'alveo del fiume a valle, permetterà il raggiungimento dello scenario di progetto […] ovvero l'adeguamento della capacità di laminazione a fronte della piena duecentennale, con una portata rilasciata a valle di circa 900 m³/s. "*

Nell'ambito delle disponibilità delle somme finanziate, il progetto di fattibilità, seppur individuando gli scenari di riferimento relativi al completamento di tutti i lotti di intervento (fino al lotto D che permetterà, con la laminazione della portata duecentennale, il contenimento della piena all'interno delle arginature adeguate di valle alla TR20 nella configurazione attuale) ha sviluppato le soluzioni progettuali incluse nei lotti A, B e C.

Durante i lavori dello Staff Tecnico di cui all'Ordinanza n° 1 del 05/06/14 è stato richiesto nella riunione del 05.02.18 di eseguire alcuni approfondimenti tecnici, ed in particolare:

- Punto 4.b) "*Approfondire l'analisi dell'area di espansione non arginata a valle della cassa interessata dalla realizzazione di un argine golenale attraverso analisi idrologiche-idrauliche che illustrino come sia garantito il non peggioramento delle condizioni attuali, una volta adeguato il manufatto regolatore, in termini di medesima frequenza di allagamento*";
- Punto 4.c) "*Canale Calvetro: verificare le dinamiche di esondazione nel tratto terminale del canale nello stato di fatto e nello scenario di progetto che prevede il rialzo dell'argine nord del Calvetro, a difesa dell'abitato di Campogalliano. In tale scenario si richiede in particolare di verificare eventuali effetti delle opere rispetto ai tiranti idrici riscontrabili in corrispondenza della A1*";
- Punto 4.d) "*Analizzare che effetti può portare l'installazione della chiavica proposta dall'Autorità di Bacino sul canale Canalazzo avendo in particolare a riferimento il sistema di scolo delle aree limitrofe*".

Nell'ambito della presente Progettazione, la scrivente Società, in accordo con quanto previsto dal Disciplinare di Incarico, ha condotto l'analisi del comportamento idrodinamico del tratto di corso d'acqua in oggetto mediante la implementazione di un modello numerico con l'impiego del codice di calcolo HEC-RAS 5.0.3, in grado di simulare le condizioni di deflusso di tipo non stazionario in condizioni 1D e 2D. ([2])

Per coerenza con i risultati degli scenari e delle modellazioni condotte nella progettazione degli interventi sugli argini, è stato richiesto alla scrivente Società di supportare con il medesimo modello 2D le analisi condotte dall'RTP Dizeta e riferite ai punti suindicati secondo le ipotesi progettuali sviluppate nell'ambito della redazione del Progetto di Fattibilità Tecnico-economica (ex Preliminare).

I risultati delle valutazioni preliminari svolte dallo scrivente vennero illustrate nell'ambito della riunione dello Staff Tecnico del 19/02/2018, nella quale fu peraltro evidenziata la necessità di un ulteriore approfondimento, da parte dell'RTP Dizeta, in merito alla "iso-frequenza" degli allagamenti in corrispondenza dell'area golenale a valle della cassa nella configurazione "ante" e "post" interventi di adeguamento del manufatto regolatore.

In quella sede peraltro venne ribadito, come indicato nel relativo verbale, che:

- Punto 4.b) "*La realizzazione di un argine golenale, in sinistra a valle della cassa, per garantire agli insediamenti presenti il non peggioramento delle condizioni attuali, in termini di frequenza di allagamento, una volta adeguato il manufatto regolatore, è stata lungamente dibattuta. L'ADBPo sottolinea che l'argine in questione non è presente negli strumenti pianificatori esistenti (PAI, PGRA) e che la sua realizzazione potrebbe andare a modificare l'assetto delle mappe del PGRA. Si decide di approfondire ulteriormente la questione andando a simulare eventi con tempi di ritorno 20, 50 e 200 anni per verificare gli effetti dell'arginatura sulle aree allagabili, tenendo presente che l'obiettivo di quell'argine è di non andare a peggiorare con la realizzazione del nuovo manufatto la situazione attuale in generale*";
- Punto 4.c) "*….Viene deciso di limitare l'analisi e la trattazione del canale Calvetro nel progetto preliminare e di non svilupparla nella progettazione definitiva. Si ipotizza di affidarne la progettazione all'ente titolare della gestione e manutenzione del canale quindi al Consorzio di Bonifica dell'Emilia Centrale, che in via preliminare ha manifestato la propria disponibilità*";
- Punto 4.d) "*Realizzazione chiavica sul canale Canalazzo: questo sistema di chiusura e contenimento del rigurgito di Secchia interferisce con il sistema di scolo delle aree limitrofe e si rilevano ancora varie questioni aperte: dove localizzarla, chi la gestirebbe in futuro, se serve e chi installerebbe un impianto di sollevamento per lo smaltimento delle acque "urbane". Si condivide di prevedere, a livello di progetto di fattibilità tecnico-economica, la realizzazione della chiavica*".

Allo scopo di finalizzare le richieste espresse nello Staff Tecnico, sono stati svolti alcuni incontri, presso la sede AIPo, tra la scrivente Società e l'RTP Dizeta, durante i quali si condivise peraltro la necessità di svolgere un adeguato rilievo celerimetrico del tratto arginato del canale Calvetro, allo scopo di avere indicazione precisa dell'eventuale franco disponibile.

In ragione dei dati successivamente forniti, anche con riferimento alle soluzioni progettuali nel frattempo individuate dall'RTP Dizeta per la chiusura del canale Canalazzo, sono state finalizzate dallo scrivente alcune ulteriori analisi e modellazioni, che vengono di seguito illustrate.

## 9.2 Dati di riferimento

La seguente nota fa riferimento ai seguenti dati:

[2] Rimandando per la descrizione del modello alla relazione idraulica allegata al Progetto Definitivo di II stralcio, è qui opportuno richiamare come il modello sia stato applicato al tratto di corso d'acqua compreso tra la sezione di Rubiera (ponte SS 9) e una sezione di controllo posta adeguatamente a valle del termine del tratto interessato dal progetto di interventi di adeguamento del sistema difensivo. Le modellazioni condotte (adeguatamente tarate rispetto agli eventi del 2009 e del 2015) hanno permesso di valutare le condizioni di deflusso con riferimento sia alle condizioni attuali che a quelle di progetto riferite al tratto arginato a valle della A1.

- Progetto di Fattibilità Tecnico-economica degli “interventi di adeguamento del sistema di laminazione delle piene della cassa di espansione del f. Secchia (MO-E-1357) –Dizeta Ingegneria ed altri - Rev. 00 – Ottobre 2017;
- Rilievo del canale Calvetro trasmesso da AIPo via mail in data 14.02.18;
- Verbale dello Staff Tecnico di cui all’Ordinanza n° 1/14 del 05.02.18 (vedi allegato 2);
- Verbale dello Staff Tecnico di cui all’Ordinanza n° 1/14 del 19.02.18 (vedi allegato 2);
- Nota illustrativa dell’RTP Dizeta sulla piena di sormonto dell’argine golenale trasmessa da AIPo in data 13.04.18 (vedi allegato 3);
- Idrogrammi di piena a seguito realizzazione interventi in corrispondenza del manufatto regolatore, trasmessi dall’RTP Dizeta via mail in data 17.04.18.

## 9.3 Punto 4.b) - Argine golenale a valle del manufatto regolatore

Obiettivo dell’argine golenale a valle del manufatto regolatore è quello di impedire il peggioramento della frequenza di allagamento dell’area ubicata in sinistra idraulica tra la cassa esistente e la autostrada A1.

Le quote di sommità del rilevato arginale sono state definite dall’RTP Dizeta con la finalità di non determinare potenziali situazioni di trasferimento del rischio verso le infrastrutture di valle; si rimanda alla Relazione Idrologico ed Idraulica del Progetto di fattibilità tecnico economica per le valutazioni che hanno portato alla definizione del tracciato e della quota di sommità arginale[3].

In ragione di quanto indicato dall’RTP Dizeta, sono state implementate dallo scrivente le seguenti nuove modellazioni per l’evento con TR 2 anni:

- Scenario I: cassa di espansione nella configurazione attuale; tratto arginato nella configurazione di progetto (adeguamento alla TR20 -MO-E-1323);
- Scenario II: **cassa e manufatto di regolazione adeguato**; tratto arginato nella configurazione di progetto MO-E-1323;
- Scenario III: cassa e manufatto di regolazione adeguato e **argine golenale realizzato**; tratto arginato nella configurazione di progetto MO-E-1323.

Si precisa che, non disponendo della modellazione di progetto del manufatto regolatore della cassa, in quanto rappresentata dall’RTP Dizeta mediante una modellazione 1D, si è ritenuto opportuno, per non introdurre elementi di taratura difficilmente ricostruibili, modellare gli scenari II e III attraverso la implementazione di una nuova geometria bidimensionale, creata appositamente per utilizzare come condizione di monte gli idrogrammi in uscita dalla cassa in progetto trasmessi dall’RTP Dizeta.

[3] In particolare, i contenuti dell’analisi di frequenza delle esondazioni dell’area in questione illustrato dall’RTP Dizeta durante la riunione dello Staff Tecnico del 19.02.18, poi trasmessi allo scrivente da AIPo con mail del 13.04.18

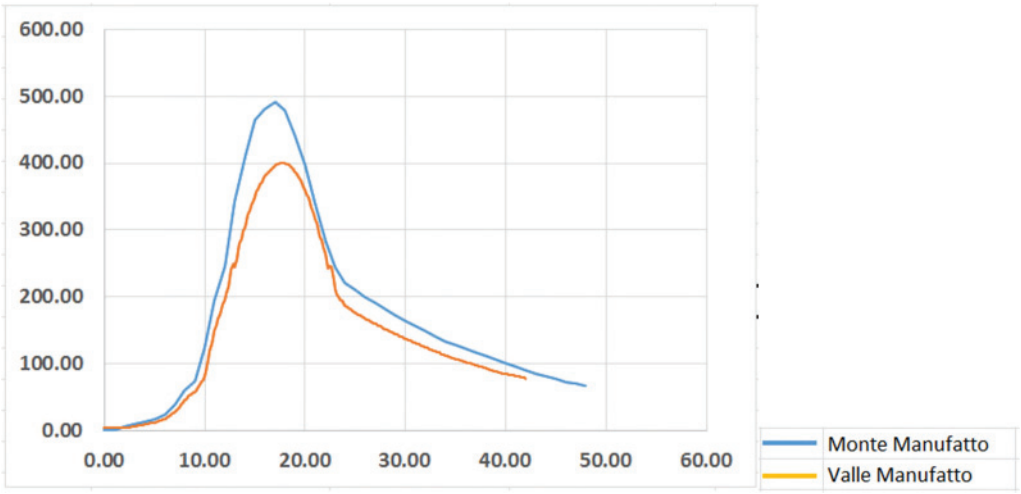



***Fig. 183 Confronto tra gli idrogrammi a monte ed a valle del manufatto sfioratore (denominato A1) nella configurazione attuale (fonte RTP Dizeta)***

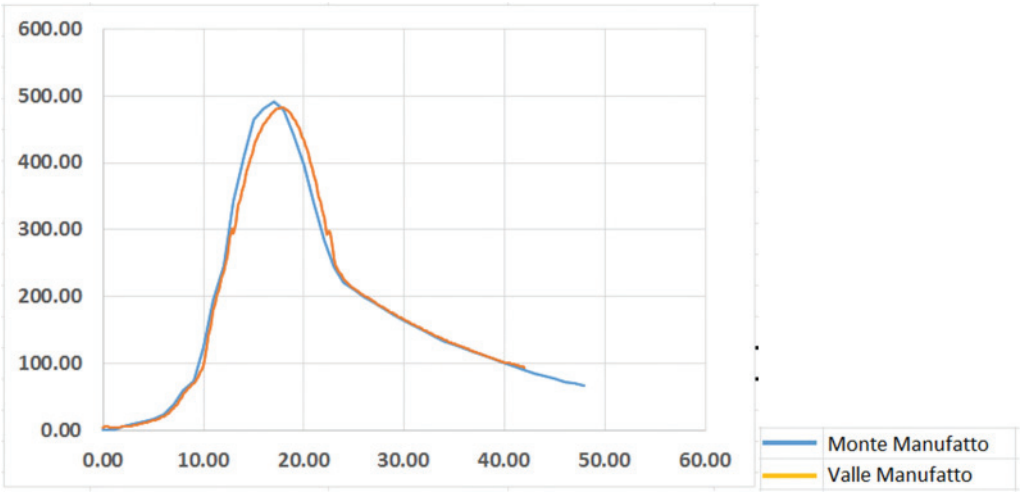



***Fig. 184 Confronto tra gli idrogrammi a monte ed a valle del manufatto A1 nella configurazione di adeguamento del manufatto sfioratore (fonte RTP Dizeta)***

Nel seguito si riportano i risultati delle modellazioni svolte, in termini di aree di allagamento e di livelli idrici massimi, con particolare riferimento alla sezione a monte della autostrada A1 e a monte di Ponte Alto.

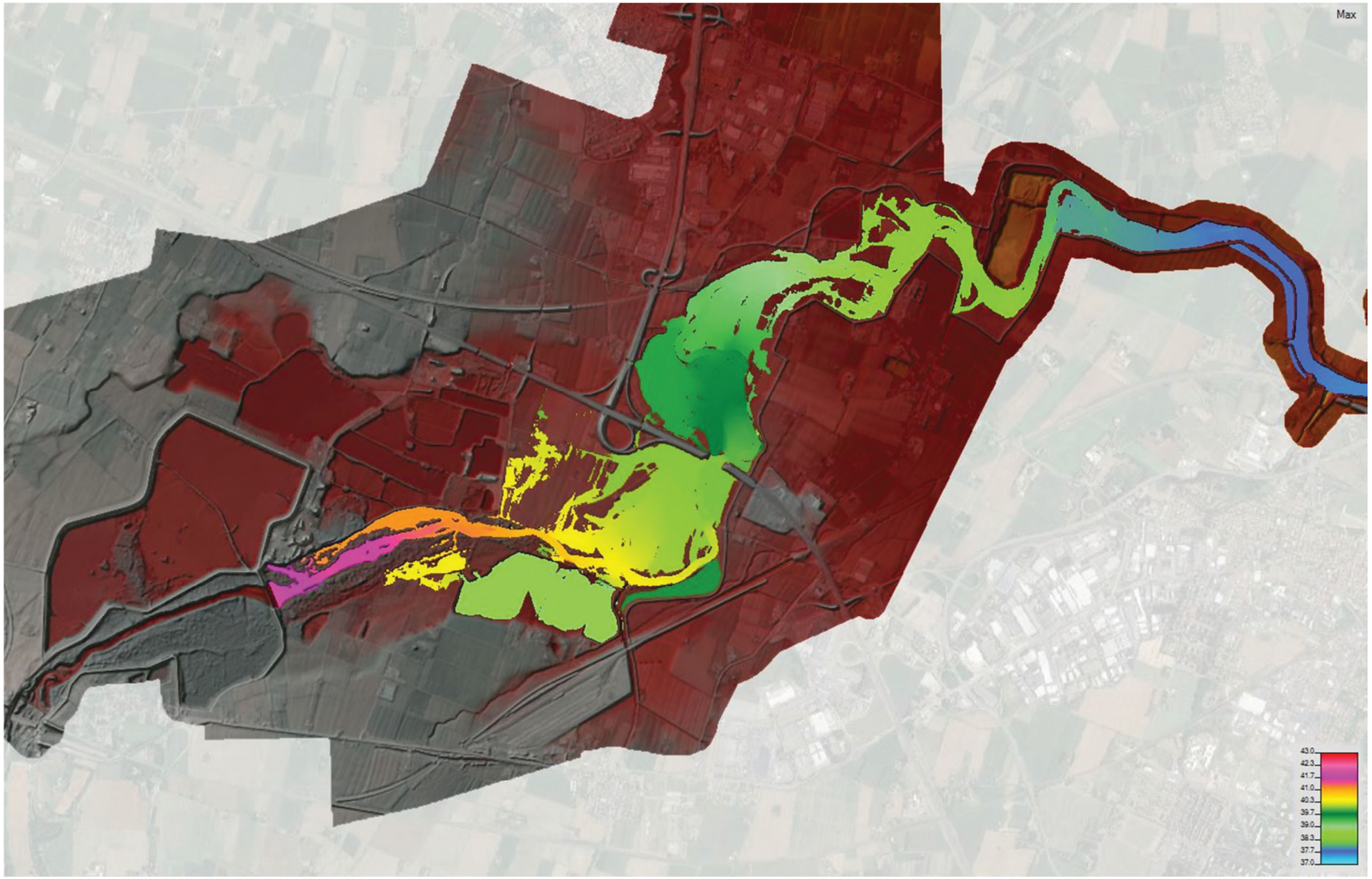



***Fig. 185 Scenario I – TR 2 anni - Massimi livelli idrici nel tratto compreso tra la cassa di espansione e l'Autostrada A1***

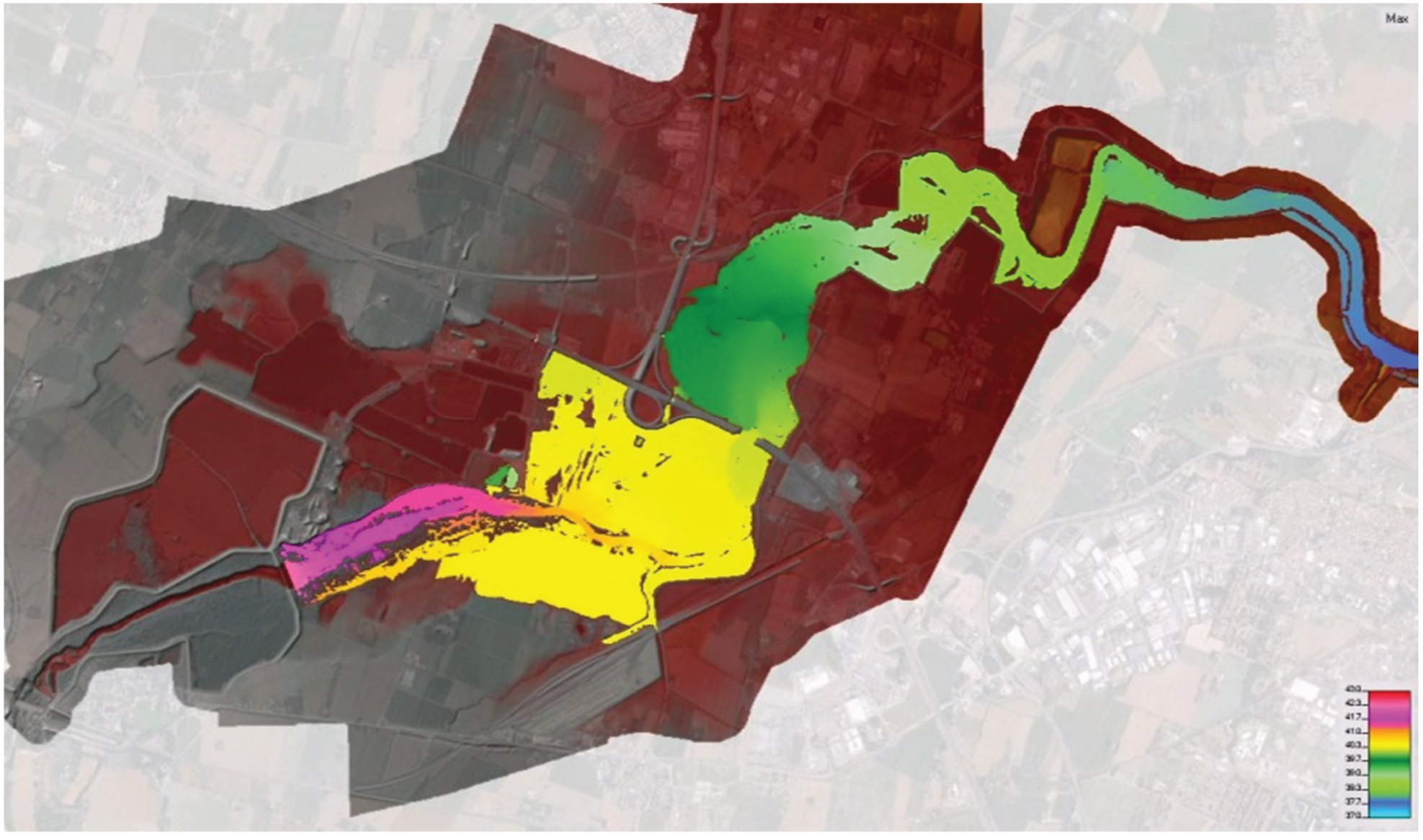



*Fig. 186 Scenario II – TR 2 anni - Massimi livelli idrici nel tratto compreso tra la cassa di espansione e l'Autostrada A1*

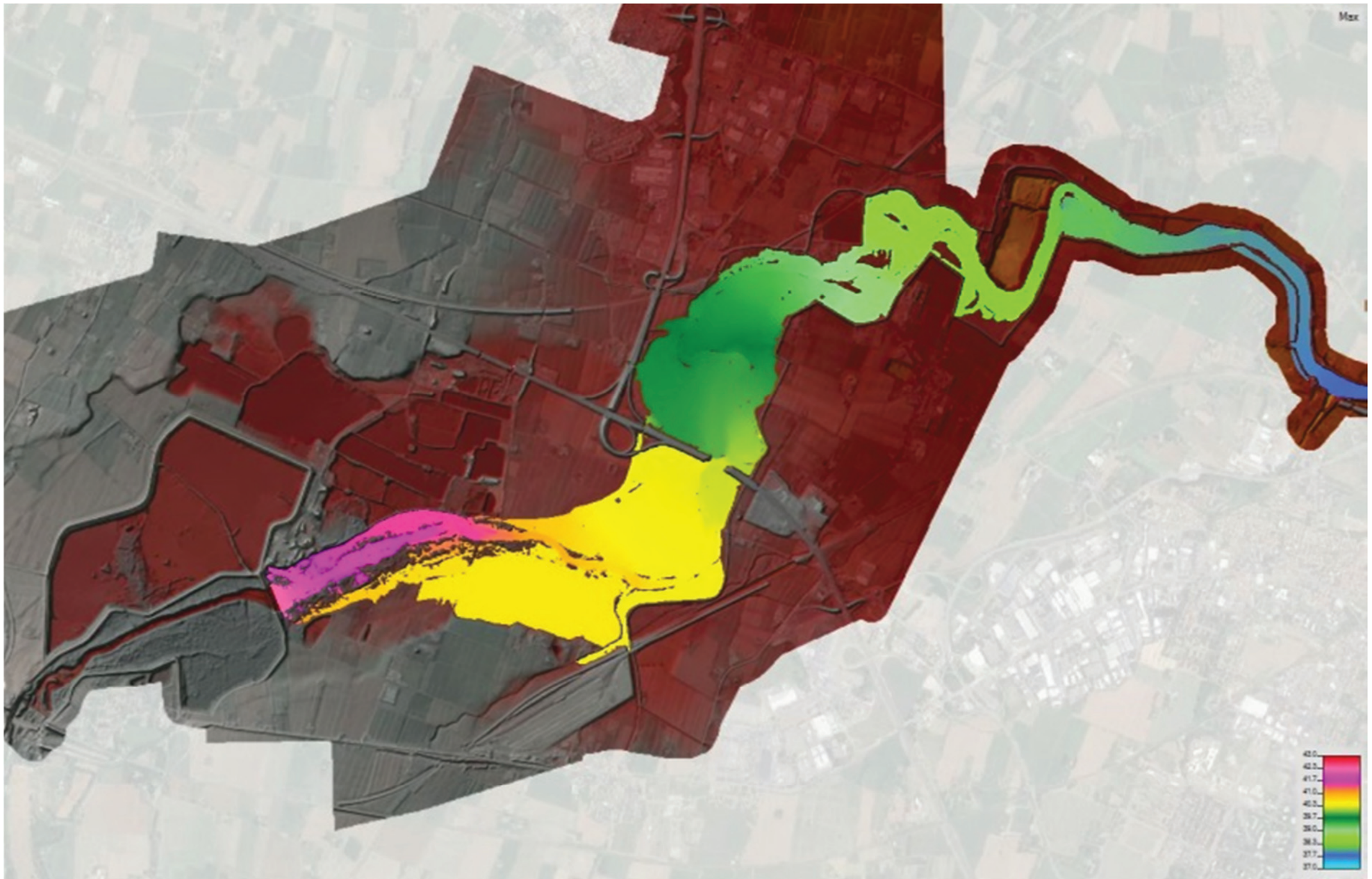



*Fig. 187 Scenario III – TR 2 anni - Massimi livelli idrici nel tratto compreso tra la cassa di espansione e l'Autostrada A1*

**Tab. 28 Confronto tra i livelli idrometrico al colmo per l'evento TR 2 anni nei vari scenari analizzati**

| Sezione di riferimento | Scenario I | | Scenario II | | Scenario III | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Q (TR2) ($m^3/s$) | H max (m slm) | Q (TR2) ($m^3/s$) | H max (m slm) | Q (TR2) ($m^3/s$) | H max (m slm) |
| Monte sfioratore | 491,36 | Non disponibile | 491,36 | Non disponibile | 491,36 | Non disponibile |
| Valle sfioratore | 400,00 | 41,95 | 481,85 | 42,39 | 481,85 | 42,39 |
| Viadotto A1 | 357,19 | 40,00 | 397,38 | 40,19 | 400,00 | 40,20 |
| Ponte Alto | 327,95 | 37,63 | 347,54 | 37,77 | 348,79 | 37,77 |
| Ponte Uccellino | 315,72 | 35,23 | 330,78 | 35,39 | 331,38 | 35,39 |

Si riportano nel seguito la batimetria dell'argine golenale così come rappresentato nel modello.

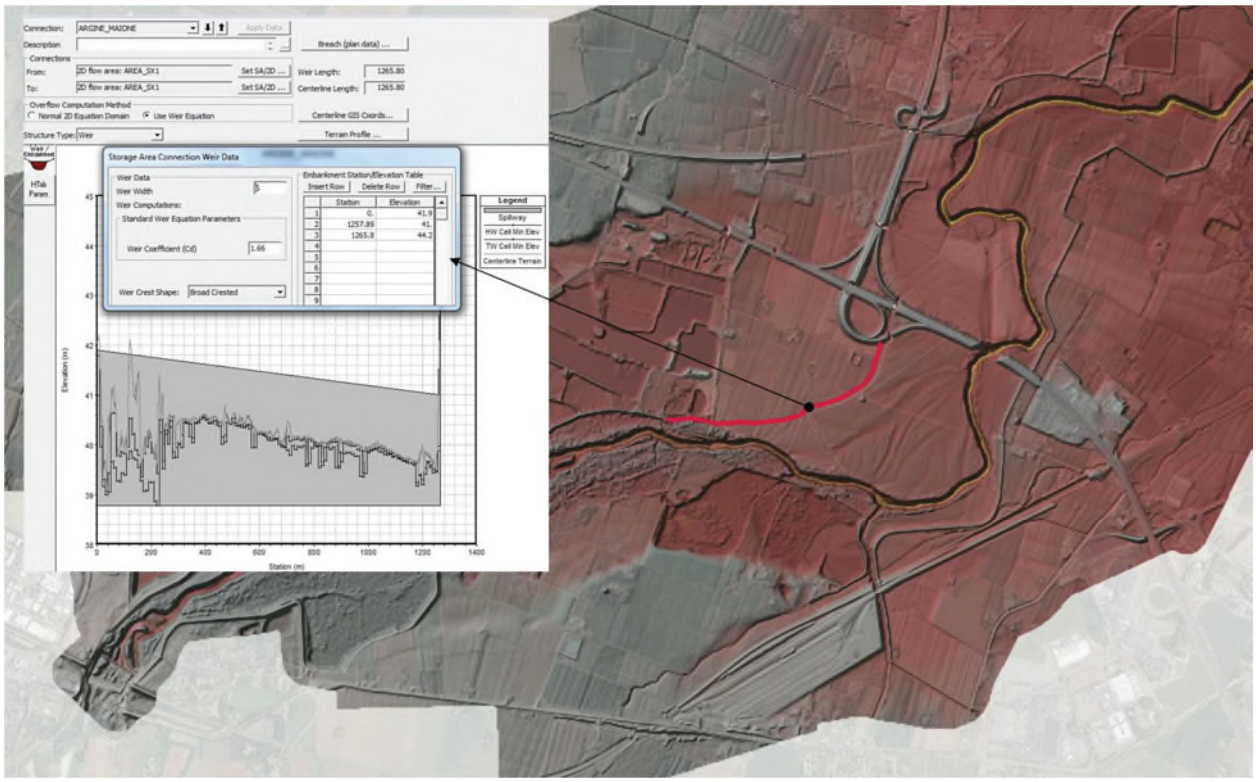


***Fig. 188 Scenario III – TR 2 anni – Conformazione del nuovo rilevato arginale golenale rappresentato nelle modellazioni condotte***

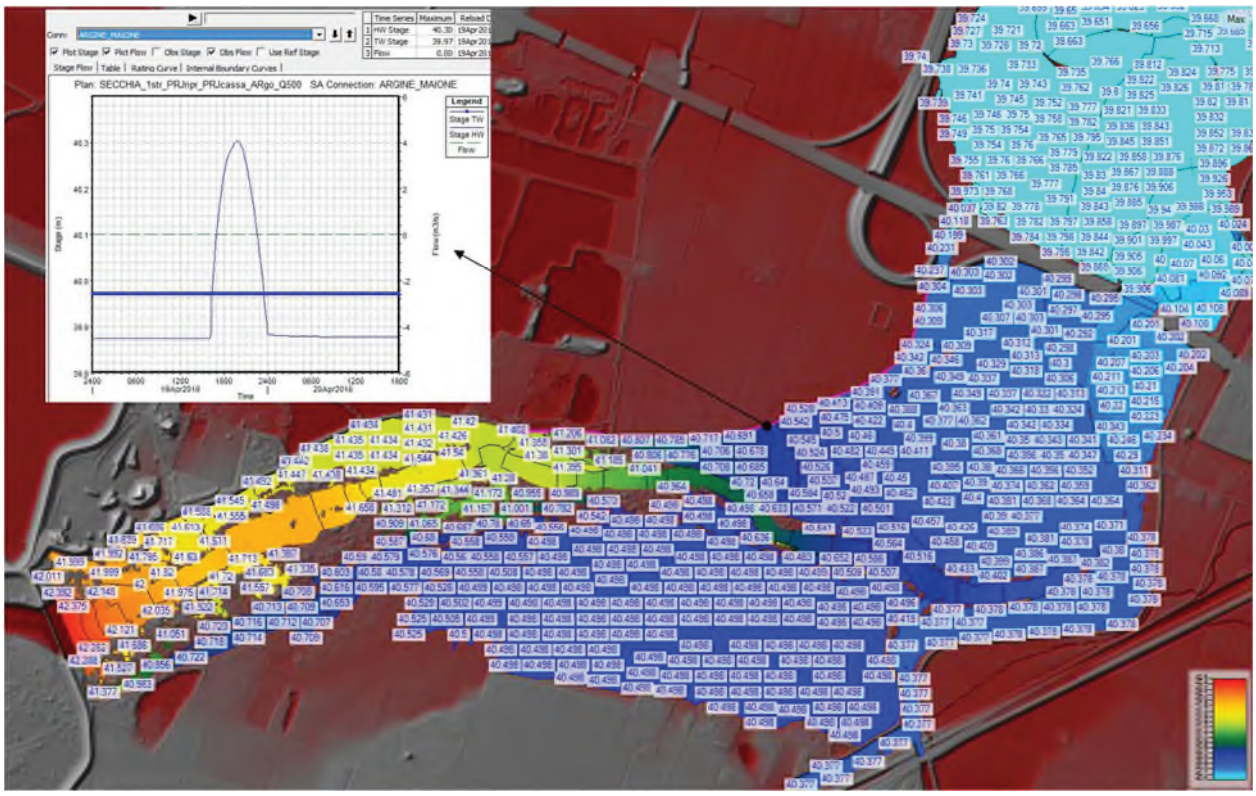


***Fig. 189 Scenario III – TR 2 anni – Valori puntuali dei massimi livelli idrici in corrispondenza del nuovo rilevato arginale golenale***

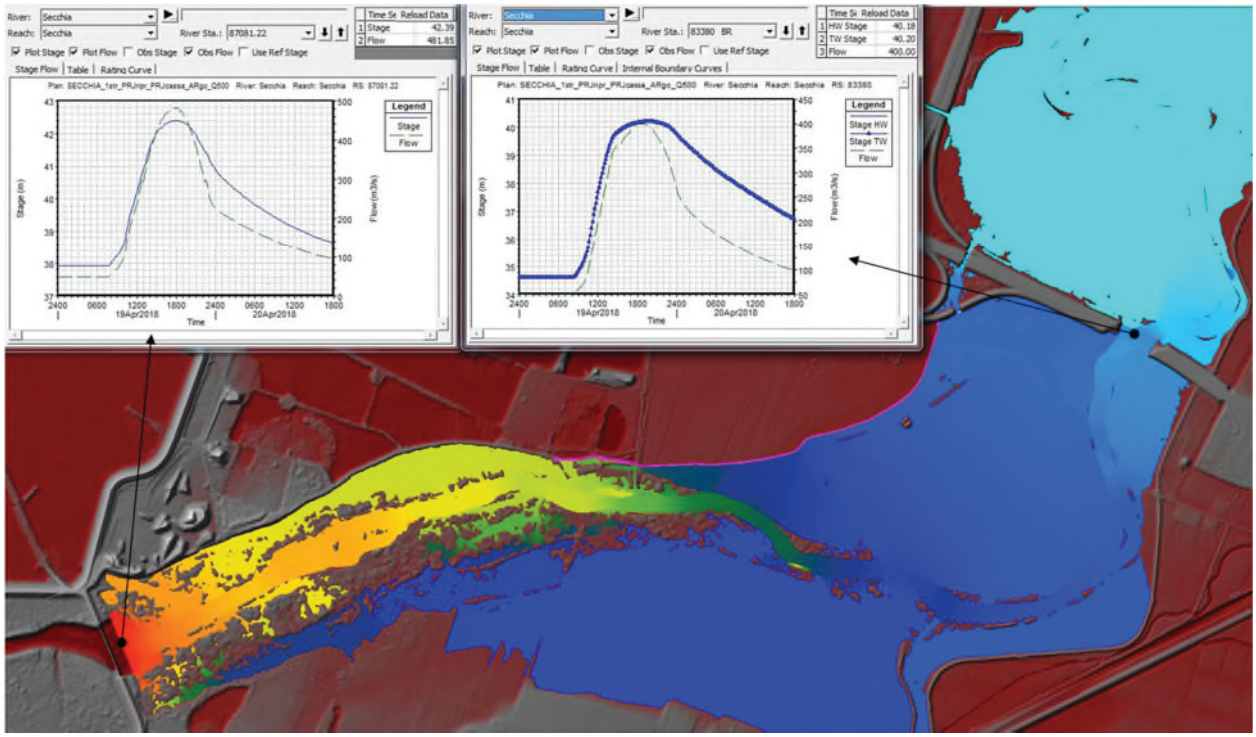


***Fig. 190 Scenario III – TR 2 anni – Idrogrammi di piena estratti dal modello a valle del nuovo manufatto di sfioro ed in corrispondenza del viadotto della A1***

Implementando le assunzioni fornite dall'RTP Dizeta nel modello idraulico di dettaglio è stata effettuata una prima analisi per lo studio dell'isofrequenza degli eventi in funzione della realizzazione degli interventi di progetto previsti dai progettisti della cassa, ed in particolare l'adeguamento del manufatto

regolatore in linea e fuori linea e la realizzazione dell'argine golenale sulla sponda sinistra nel tratto compreso tra la cassa e l'autostrada A1 .

Prendendo un evento di piena caratteristico in termini di maggior frequenza come quello con tempo di ritorno di 2 anni si osserva come il funzionamento di progetto degli organi della cassa determinano, a parità di evento, un rilascio di portata a valle cassa maggiore rispetto alla configurazione attuale. Nello specifico come riportato in Tab. 28, nella configurazione di progetto l'onda di piena in uscita dalla cassa ha una valore al colmo superiore rispetto alla configurazione attuale di circa 82 $m^3/s$.

Come previsto dall'RTP Dizeta, nella configurazione di massima apertura delle 8 luci di fondo del nuovo manufatto in linea, per eventi di piena più frequenti e con portata al colmo inferiore a 750 $m^3/s$, a valle della cassa transitano onde di piena più gravose a parità di evento rispetto a quanto accade nella configurazione di scenario I.

Questo determina inevitabilmente anche un incremento dei livello del profilo di piena nel tratto a valle della cassa. Come si evince sempre in Tab. 28 l'incremento dei livelli rispetto alla configurazione di scenario I varia da 20 a 15 cm circa.

Confrontando invece lo scenario II e III si percepisce come **l'inserimento dell'argine golenale in sponda sinistra posto tra la cassa e l'autostrada A1 per l'evento con tempo di ritorno di 2 anni non determina un aggravio del deflusso delle piene nel tratto di valle del fiume Secchia**.

Inoltre si evidenzia come rispetto al profilo di progetto definito dall'RTP Dizeta dell'argine golenale sopra menzionato, la piena con tempo di ritorno di 2 anni che in uscita dalla cassa in progetto ha un valore al colmo di 481.85 $m^3/s$ e al ponte dell'A1 di 400 $m^3/s$ , mantiene un franco idraulico medio sui livelli di piena di circa 70 cm Fig. 189.

In sintesi le simulazioni svolte in questa sede con strumenti di maggior dettaglio e con riferimento alla piena con tempo di ritorno 2 anni che è quella che da luogo all'incipiente allagamento della golena sinistra:

- mostrano che l'argine golenale così come realizzato non modifica il deflusso verso valle della T=2;
- evidenziano che la maggiore portata di 82 mc/s in conseguenza del nuovo manufatto in alveo della cassa provocherebbe l'allagamento dell'area ubicata in sinistra idraulica (Fig. 4 - scenario II) mentre la costruzione dell'argine golenale rende non allagabile tale area (Fig. 5 - scenario III).

## 9.4 Analisi con TR20 – 50 e 200 anni

Sono state svolte le analisi idrauliche per valutare gli effetti della presenza dell'argine golenale in progetto anche per eventi di piena più gravosi quindi con tempo di ritorno 20, 50 e 200 anni.

Per effettuare un'accurata valutazione degli effetti di tale opera in progetto sono state prese in considerazione le tre differenti configurazioni modellistiche già descritte nei paragrafi precedenti: scenario I, scenario II e scenario III. Si sottolinea che tali scenari sono stati studiati tenendo conto di arginature insormontabili, argine golenale escluso.

E' importante in questa sede sottolineare come la quota di sommità del rilevato golenale è stata ottimizzata, mediante la esecuzione di alcune differenti modellazioni (di cui lo scenario III rappresenta la ottimizzazione finale), con la finalità di non determinare significative variazioni al regime di piena nel tratto arginato di valle anche con riferimento alle piene con elevato tempo di ritorno. E' stato infatti verificato come la quota di sommità dell'arginello golenale può determinare una significativa riduzione della capacità di laminazione del tratto compreso tra la cassa e la A1, con conseguente incremento (fino a circa 45 $m^3/s$ con le quote indicate inizialmente dall'RTP Dizeta) del colmo di piena a valle.

Il profilo sommitale dell'argine golenale nella configurazione finale è variabile da 41.60 m slm a 40.50 m slm (la sommità arginale mantiene un franco di circa 50 cm sulla TR2 anni).

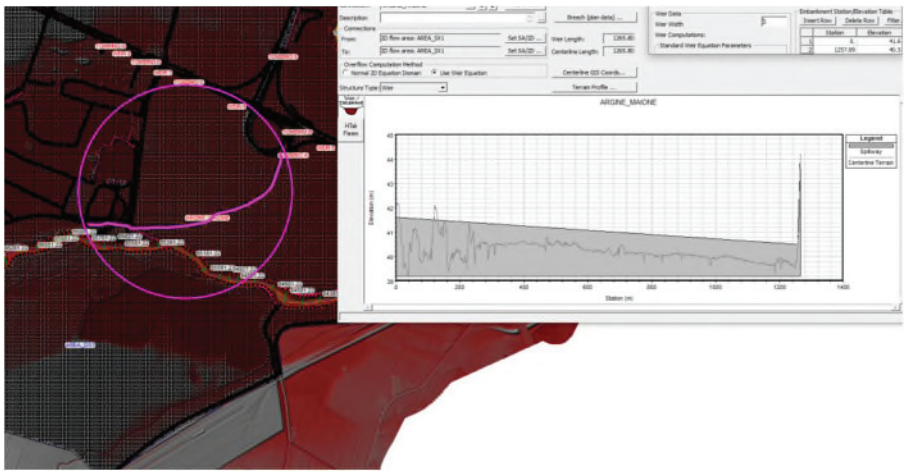


**Fig. 191 Profilo longitudinale dell'arginello golenale nella configurazione definitiva**

Lo scenario che viene nel seguito riportato è pertanto quello definitivo, che se da un lato garantisce la non inondabilità dell'area golenale per eventi di piena ordinari, dall'altra parte non determina l'aggravio del regime idraulico a valle.

Di seguito si riportano gli idrogrammi definiti dall'RTP Dizeta ed utilizzati per le simulazioni sopra descritte.

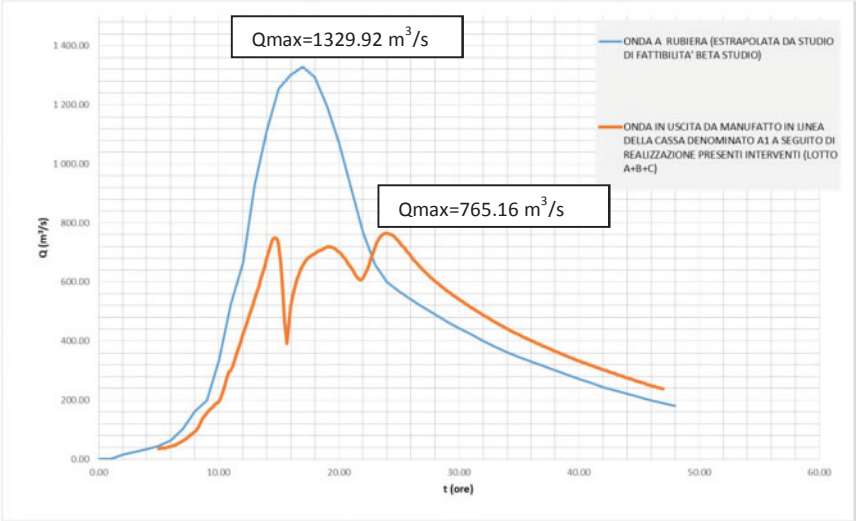



**Fig. 192 Idrogrammi TR 20 anni (fonte: RTP Dizeta)**

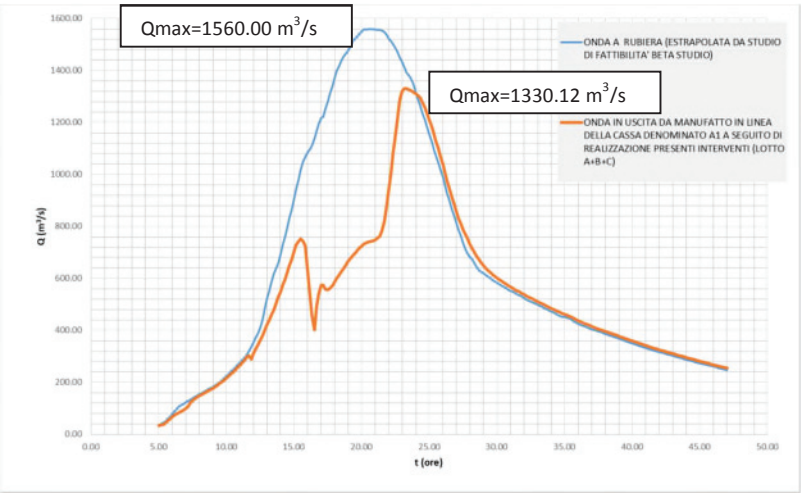



**Fig. 193 Idrogrammi TR 50 anni (fonte: RTP Dizeta)**

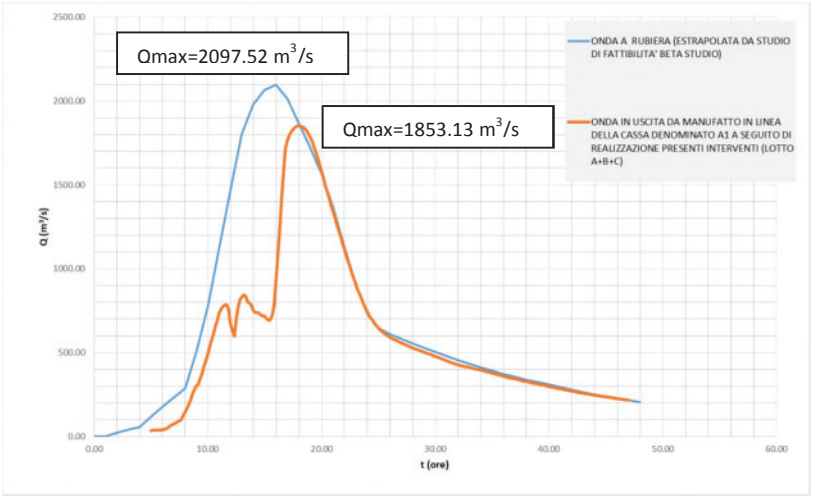



**Fig. 194 Idrogrammi TR 200 anni (fonte: RTP Dizeta)**

**Tab. 29 Confronto risultati - Evento di piena con tempo di ritorno di 20 anni**

| Sezione | SCENARIO I | | SCENARIO II | | SCENARIO III | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Portata al colmo ($m^3/s$) | Livelli (m s.l.m.) | Portata al colmo ($m^3/s$) | Livelli (m s.l.m.) | Portata al colmo ($m^3/s$) | Livelli (m s.l.m.) |
| Ponte autostrada A1 SC_153-00 | 730 | 41,31 | 588 | 41,16 | 593 | 41,16 |
| Ponte Alto SC_142-00 | 647 | 39,87 | 555,6 | 39,69 | 557,61 | 39,73 |
| Ponte dell'Uccellina SC_130-00 | 643 | 37,14 | 551,3 | 36,87 | 557,62 | 36,85 |
| Ponte Bacchello SC_115-00 | 616 | 34,00 | 521,78 | 33,63 | 520,45 | 33,63 |
| Ponte Motta SC_093-00 | 515 | 31,54 | 477,64 | 30,99 | 457,77 | 30,95 |
| Ponte Pioppa SC_080-00 | 493 | 30,68 | 436,90 | 29,94 | 429,72 | 29,93 |
| Ponte Concordia SC_061-00 | 454 | 29,00 | 352,25 | 28,28 | 357,18 | 28,27 |

Come si osserva in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**9 l'adeguamento della cassa e delle opere accessorie rispetto alla piena con tempo di ritorno di 20 anni determina una riduzione dei livelli di

piena nel tratto arginato del fiume Secchia che va da un minimo di 15 cm al ponte dell'autostrada fino a raggiungere i 70 cm nel tratto tra ponte Pioppa e Concordia.

Analizzando invece la configurazione di progetto della cassa con anche la presenza dell'argine golenale si osserva come l'inserimento di tale struttura incide in modo limitato sui livelli della piena con tempo di ritorno di 20 anni nel tratto arginato del fiume. Locali peggioramenti (nel tratto di monte) non superano i 5 cm, per poi rendersi ininfluenti verso valle. I valori mantengono comunque sempre il franco di 1 m, sull'adeguamento delle arginature in corso.

**Tab. 30 Confronto risultati - Evento di piena con tempo di ritorno di 50 anni**

| Sezione | SCENARIO I | | SCENARIO II | | SCENARIO III | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Portata al colmo ($m^3/s$) | Livelli (m s.l.m.) | Portata al colmo ($m^3/s$) | Livelli (m s.l.m.) | Portata al colmo ($m^3/s$) | Livelli (m s.l.m.) |
| Ponte autostrada A1 SC_153-00 | 886,86 | 42,54 | 812,59 | 41,92 | 792,18 | 41,82 |
| Ponte Alto SC_142-00 | 868,46 | 40,98 | 739,75 | 40,44 | 725,06 | 40,27 |
| Ponte dell'Uccellina SC_130-00 | 849 | 37,98 | 731 | 37,50 | 712,47 | 37,49 |
| Ponte Bacchello SC_115-00 | 806 | 34,74 | 657,51 | 34,21 | 649,65 | 34,18 |
| Ponte Motta SC_093-00 | 677,21 | 32,35 | 571,46 | 31,60 | 558,75 | 31,58 |
| Ponte Pioppa SC_080-00 | 590,40 | 31,44 | 511,35 | 30,64 | 515,47 | 30,67 |
| Ponte Concordia SC_061-00 | 525,40 | 29,70 | 408 | 28,85 | 449,37 | 28,97 |

Per l'evento con tempo di ritorno di 50 anni si conferma come gli interventi di progetto sulla cassa determinano un beneficio per l'intero sistema fluviale di valle raggiungendo una diminuzione di livello media di circa 60 cm.

**Per quanto concerne l'argine golenale, si osserva come per l'evento con tempo di ritorno di 50 anni, l'intervento genera un leggero beneficio per il tratto arginato di valle** fungendo da laminazione della piena in uscita dalla cassa; il beneficio in termini di livello è di qualche centimetro e, ma mano poi si raggiunge il confine regionale svanisce. Si noti tuttavia che i livelli dello scenario I a Ponte Alto e dell'Uccellina sono superiori a quelli degli argini di progetto, valori che negli scenari II e III sono sempre contenuti in tutte le sezioni anche con franchi importanti (dell'ordine di 1 m da p.te Bacchello verso valle).

**Tab. 31 Confronto risultati - Evento di piena con tempo di ritorno di 200 anni**

| Sezione | SCENARIO I | | SCENARIO II | | SCENARIO III | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Portata al colmo ($m^3/s$) | Livelli (m s.l.m.) | Portata al colmo ($m^3/s$) | Livelli (m s.l.m.) | Portata al colmo ($m^3/s$) | Livelli (m s.l.m.) |
| Ponte autostrada A1 SC_153-00 | 1100,12 | 43,12 | 1018,29 | 42,80 | 1013,55 | 42,74 |
| Ponte Alto SC_142-00 | 981,64 | 41,63 | 932,76 | 41,22 | 923,63 | 41,19 |
| Ponte dell'Uccellina SC_130-00 | 964,15 | 38,46 | 895,49 | 38,15 | 903,58 | 38,11 |
| Ponte Bacchello SC_115-00 | 917,58 | 35,30 | 840,34 | 34,80 | 835,88 | 34,79 |
| Ponte Motta SC_093-00 | 750,86 | 33,25 | 702,36 | 32,25 | 691,66 | 32,20 |
| Ponte Pioppa SC_080-00 | 660,79 | 32,55 | 590,83 | 31,42 | 588,67 | 31,28 |
| Ponte Concordia SC_061-00 | 592 | 30,85 | 478,96 | 29,64 | 467,26 | 29,52 |

Anche per l'evento con tempo di ritorno di 200 anni si conferma come gli interventi di progetto sulla cassa determinano un beneficio per l'intero sistema fluviale di valle raggiungendo una diminuzione di livello media di circa 70 cm.

**Analizzando gli effetti dell'arginello golenale durante la piena duecentennale si evince anche in tal caso un abbassamento del profilo di piena nel tratto arginato di valle del fiume Secchia** anche se di pochi centimetri. Nello scenario II, ed a maggior ragione nello scenario III, i livelli di piena sono contenuti negli argini di progetto per un lungo tratto dal p.te dell'Uccellina verso valle.

Nel seguito si riportano i profili idraulici dei vari scenari modellati per la TR20, 50 e 200 anni (12h).

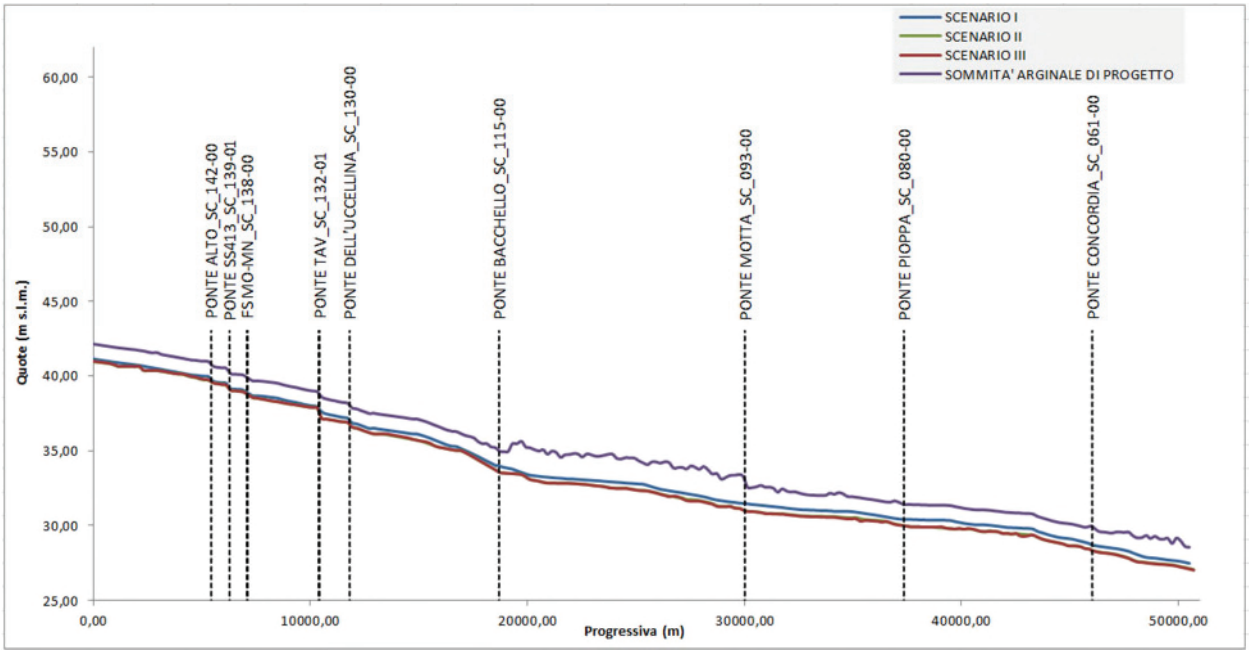



**Fig. 195 Confronto fra i profili idraulici degli scenari I, II e III per il tempo di ritorno 20 anni – 24 h**

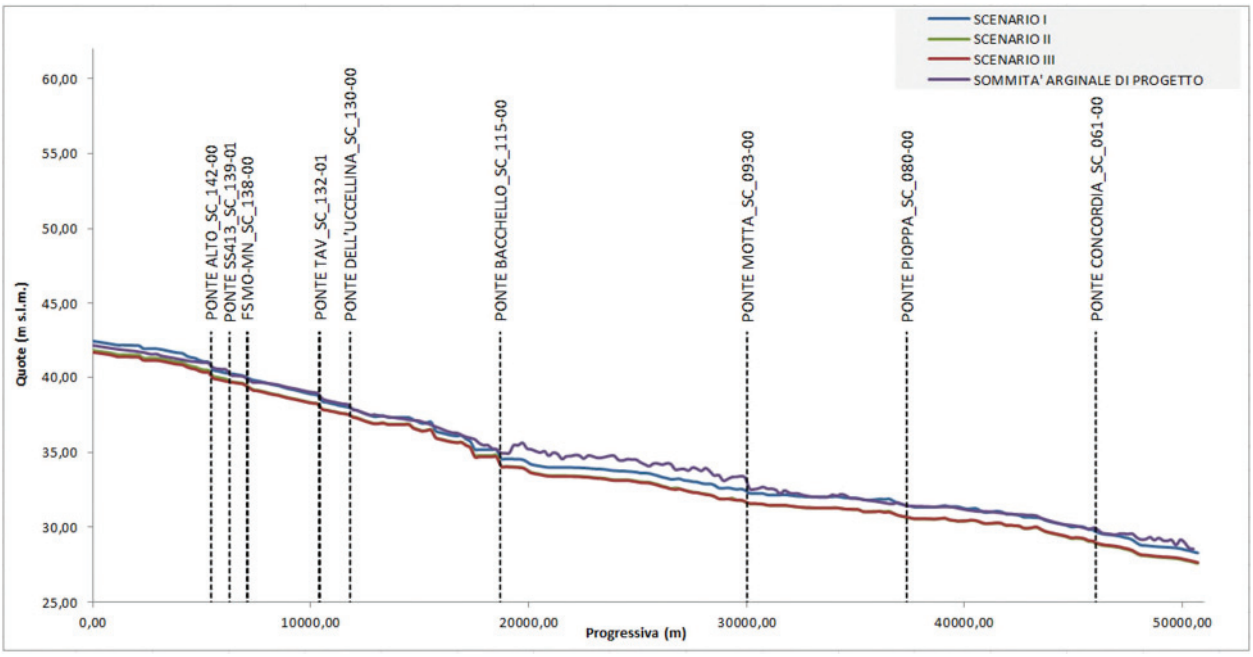



**Fig. 196 Confronto fra i profili idraulici degli scenari I, II e III per il tempo di ritorno 50 anni – 24 h**

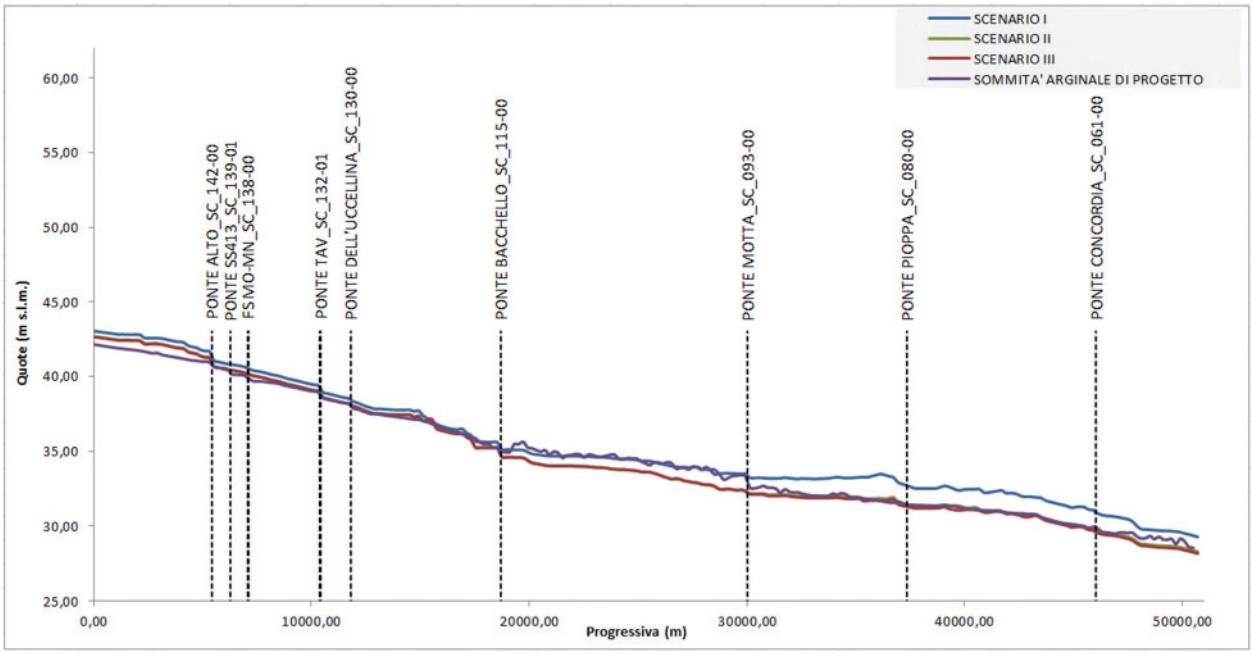



**Fig. 197 Confronto fra i profili idraulici degli scenari I, II e III per il tempo di ritorno 200 anni – 24 h**

## 9.5 Punto 4.c) - Canale Calvetro

Allo scopo di valutare le dinamiche di esondazione del tratto terminale del canale Calvetro per l'evento TR20 anni – 12h nello stato di fatto, e di verificarne le variazioni a seguito di un intervento di rialzo dell'argine di sinistra, è stato effettuato un confronto tra la configurazione dello scenario I e lo scenario IV. Quest'ultimo a differenza della scenario I non tiene conto del rialzo dell'argine in sinistra idraulica del canale Calvetro per il contenimento della piena di riferimento.

Si precisa come la batimetria del modello utilizzato per la progettazione degli interventi di adeguamento arginale sia stata aggiornata sulla base del citato rilievo topografico di dettaglio svolto da AIPo.

Sulla base dei risultati ottenuti, è stato possibile:

- individuare la quota di sommità da attribuire all'argine sinistro del canale Calvetro;
- verificare come il rialzo arginale, oltre ad impedire l'allagamento dell'area di Campogalliano, non determina variazioni significative dei livelli idrometrici in corrispondenza della autostrada A1.

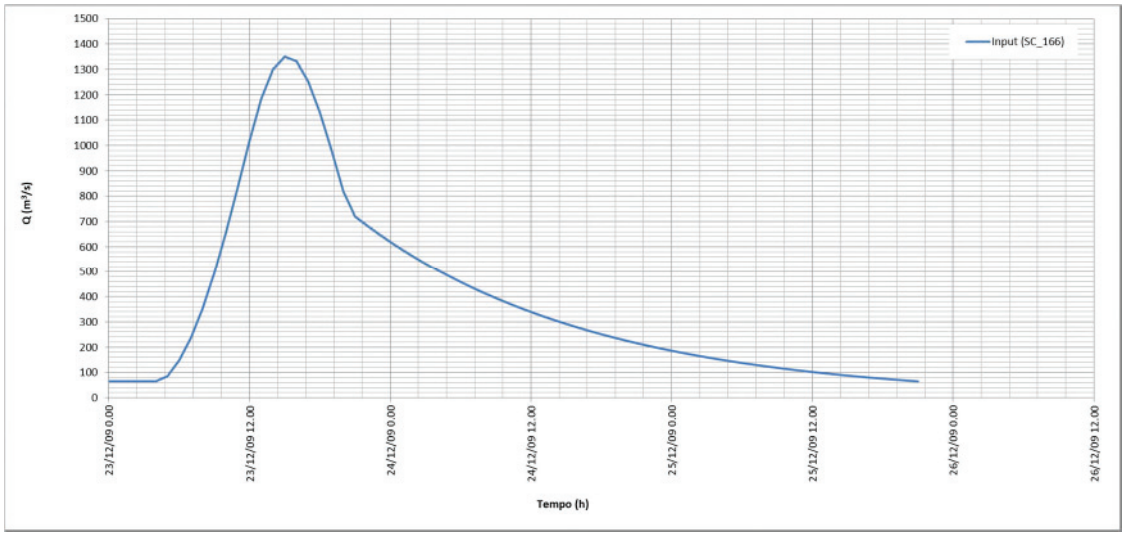



***Fig. 198 Idrogramma a monte della cassa di espansione – TR 20 anni – 12 h utilizzato per la individuazione del profilo di progetto dell'argine sinistro del canale Calvetro***

Nel seguito si riportano i risultati delle modellazioni svolte, in termini di aree di allagamento e di livelli idrici massimi, con particolare riferimento ad alcuni punti significativi. In allegato si riporta il profilo idraulico dell'evento considerato lungo la arginatura del canale Calvetro.

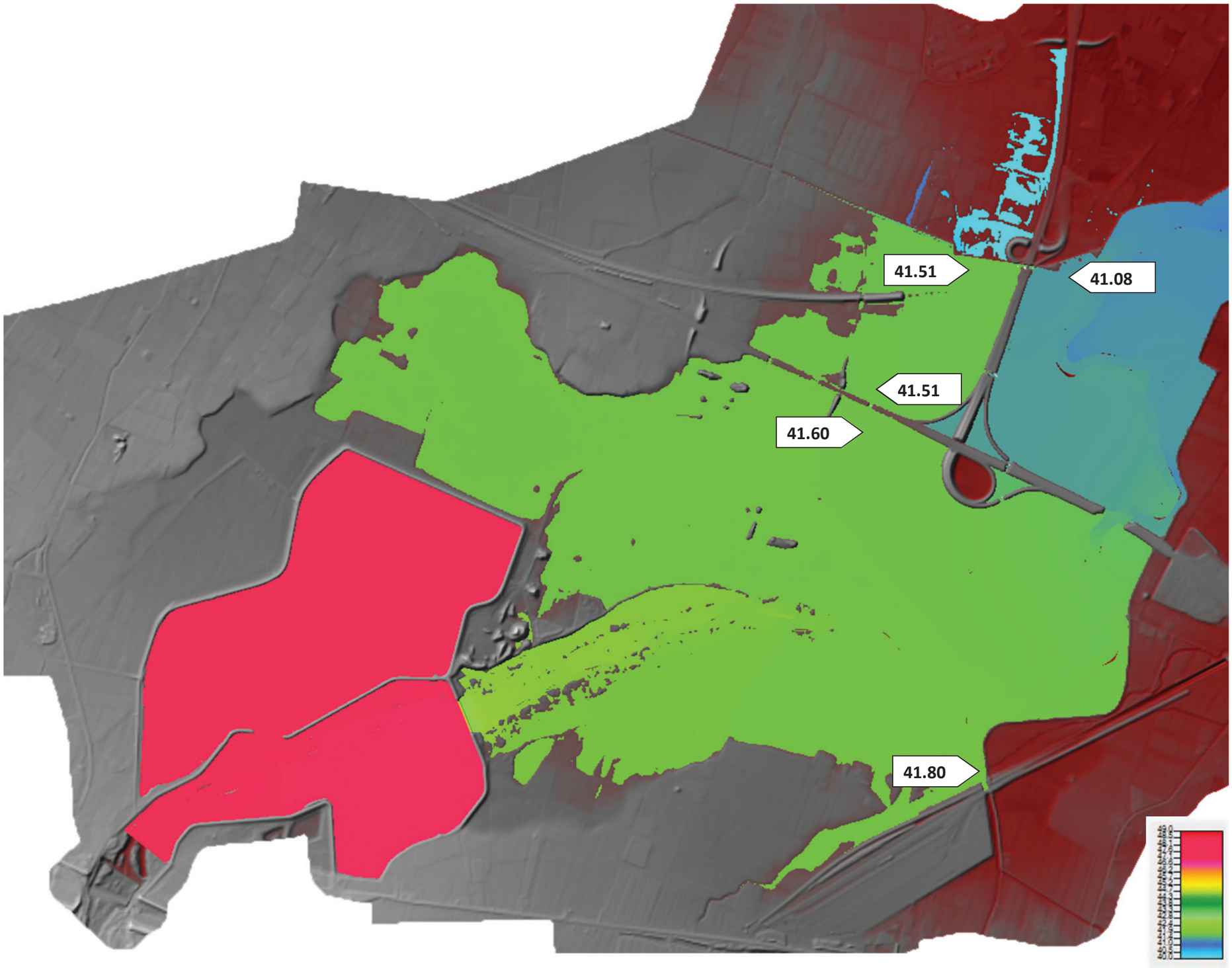



**Fig. 199 Scenario IV – TR 20 anni – 12h - Massimi livelli idrici in corrispondenza dell'area della cassa senza il rialzo dell'argine di Calvetro**

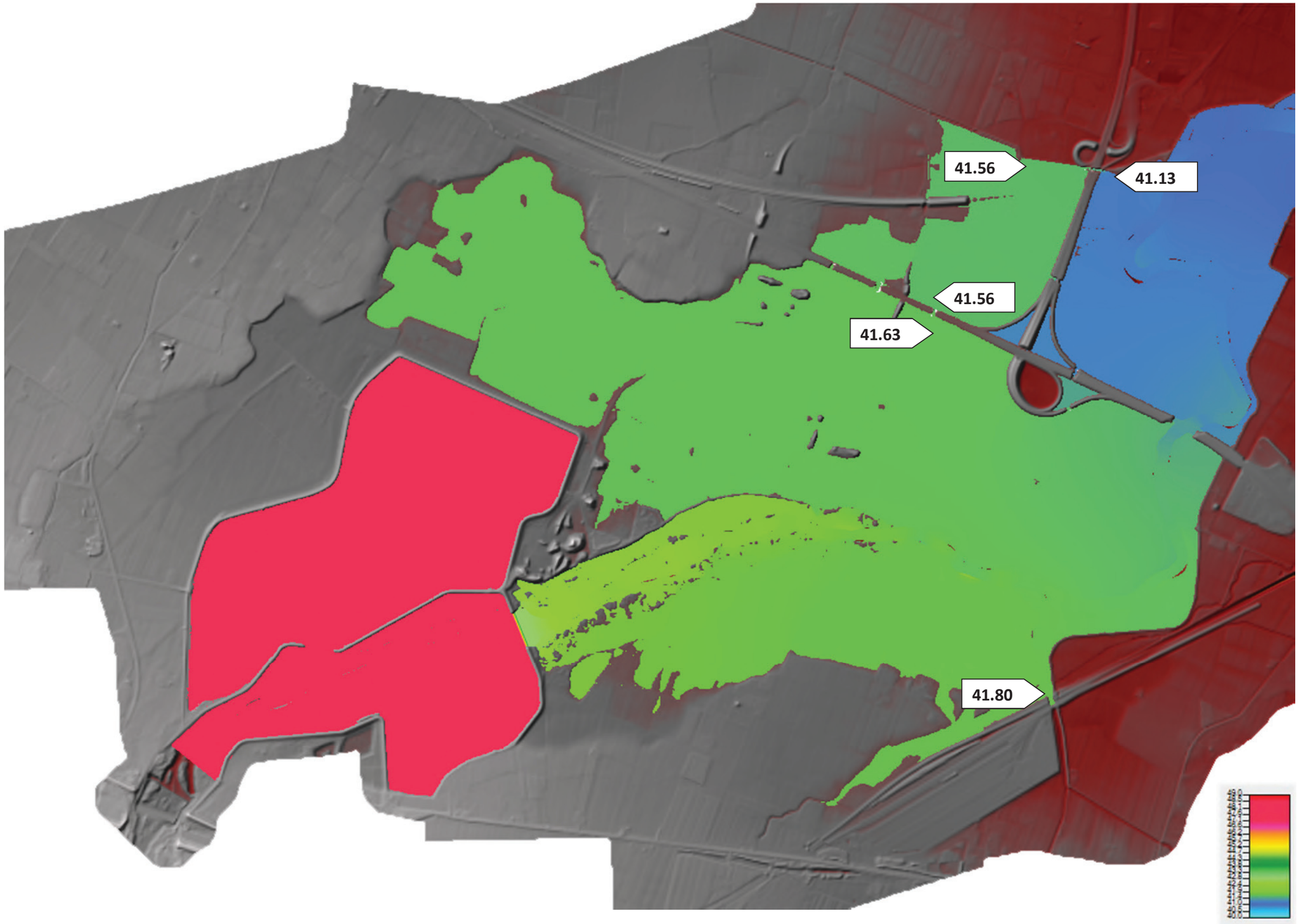



**Fig. 200 Scenario I – TR 20 anni – 12h - Massimi livelli idrici in corrispondenza dell'area della cassa con l'argine di Calvetro adeguato in quota**

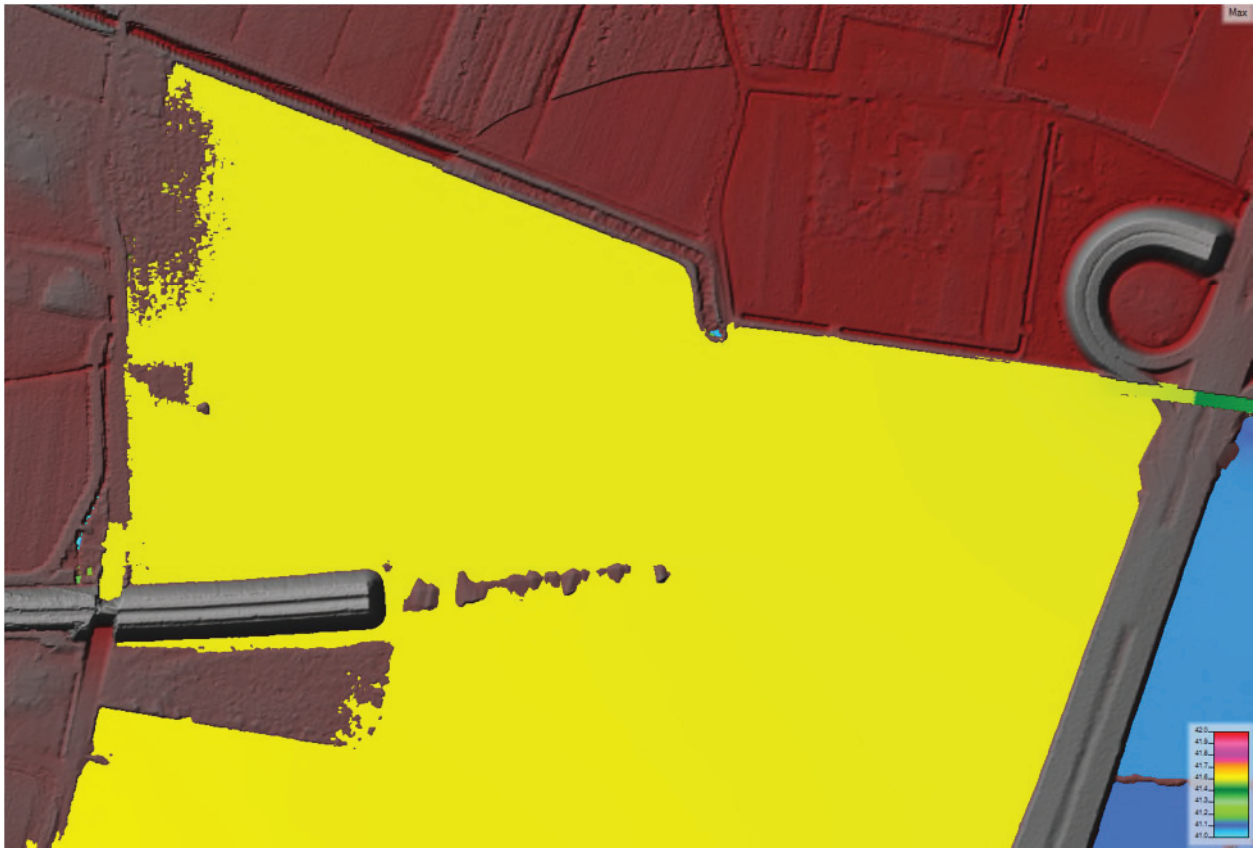


***Fig. 201 Scenario IV – TR 20 anni – 12h – ingrandimento dei massimi livelli idrici nel tratto in corrispondenza del canale Calvetro***

## 9.6 Punto 4.d) - Canale Canalazzo

La finalità degli interventi in corrispondenza del canale Canalazzo è quella di impedire, durante gli eventi di piena, l'allagamento dell'areale retrostante allo scalo merci della AA.VV. ferroviaria. L'areale, delimitato a sud dalla via Emilia, ad ovest dallo scalo merci ed infine ad est dall'argine destro del f. Secchia (che si origina proprio in tale punto), è attraversato dal canale Canalazzo di Cittanova, in cui confluisce, prima dell'attraversamento della linea ferroviaria, il cavo Diversivo a valle dell'attraversamento del centro commerciale "GrandEmilia".

A seguito della analisi del funzionamento del nodo idraulico in questione, nell'ambito della riunione svoltasi presso AIPo in data 06/04/2018 l'RTP Dizeta ha illustrato la soluzione progettuale prevista per la messa in sicurezza di tale area, che prevede i seguenti interventi:

- Argini di rigurgito a quota T20 + 1 m lungo il canale Canalazzo di Cittanova nel tratto compreso tra la via Emilia e lo scalo merci della AA.VV. ferroviaria; l'adeguamento dell'argine destro prosegue fino allo stante 3 del Secchia per raccordarsi alle attuali quote arginali nello stante 4.
- Manufatto antirigurgito nel Cavo Diversivo immediatamente a monte dell'immissione nel Canale Canalazzo di Cittanova;
- Argine di rigurgito a quota T20, in sponda destra, lungo il Cavo Diversivo nel tratto a monte della confluenza con il canale Canalazzo di Cittanova fino a Grande Emilia.

Sulla base delle analisi idrauliche condotte nella configurazione di progetto per l'evento TR20 anni – 12h si conferma, come già anticipato in precedenza, che il massimo livello idrico raggiunto in corrispondenza del manufatto di attraversamento della linea AA.VV. è pari a 41.80 m slm.

***Fig. 202 Scenario V – TR 20 anni – 12h - Massimi livelli idrici nel tratto in corrispondenza dell'attraversamento della linea AA.VV.***

## 9.7 Modellazione del I stralcio di interventi

Con riferimento alla modellazione dei soli interventi relativi al I stralcio, sono stati estratti, in corrispondenza di ponte dell'Uccellino, gli idrogrammi di piena relativi alla configurazione di stato di fatto e di progetto. Il ponte dell'uccellino rappresenta infatti la struttura di divisione tra il I stralcio ed il II stralcio degli interventi.

L'analisi comparativa tra i due idrogrammi, riportati nella figura sottostante, evidenziano come la realizzazione degli interventi di I stralcio non determini variazioni significative, sia in termini di colmo (che anzi si riduce da 657 a 650 $m^3/s$) che di volume in transito.

Si può pertanto affermare che la realizzazione degli interventi di I stralcio non determina alcun aggravio delle condizioni di valle anche in assenza di realizzazione degli interventi di II stralcio.

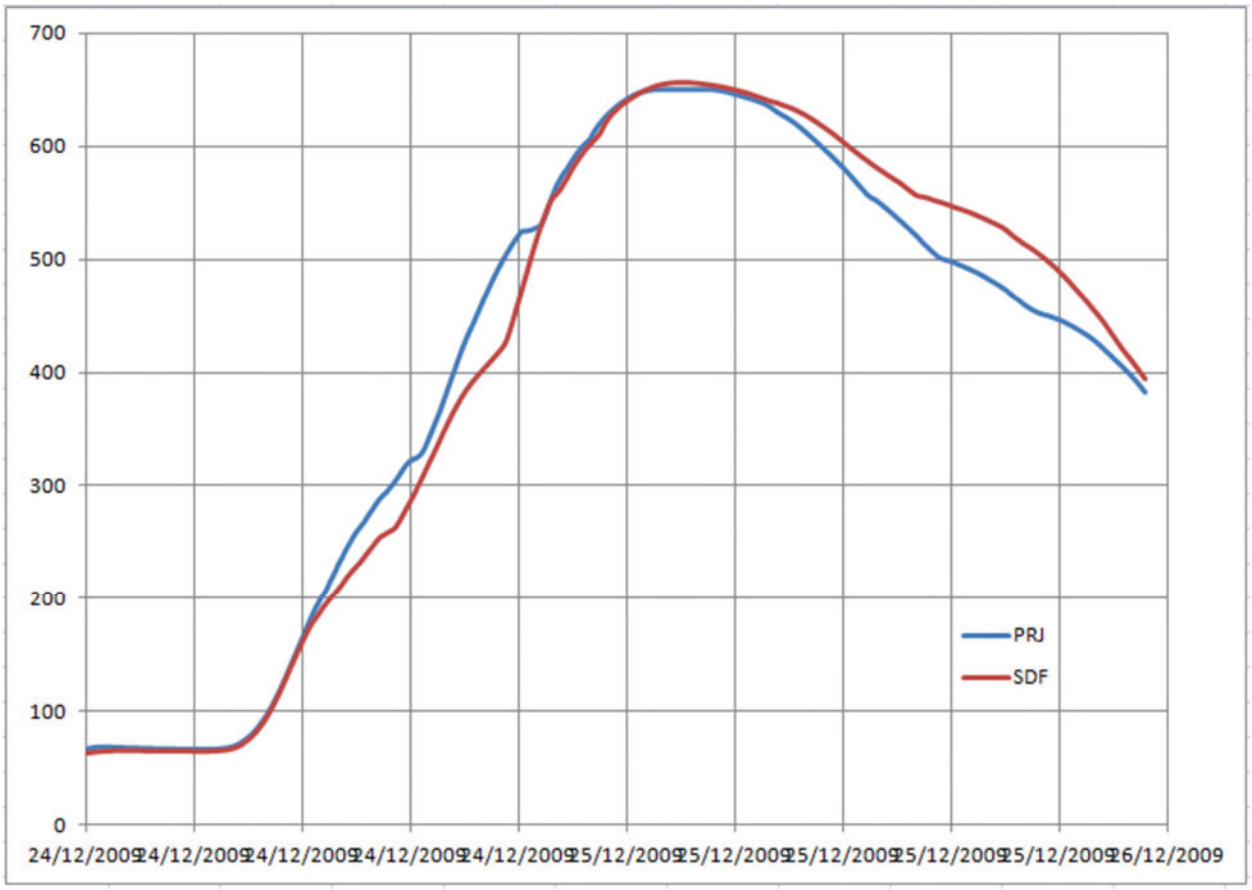



**Fig. 186 Idrogramma di piena TR20 – 12 h in corrispondenza del ponte dell'Uccellino**

## 9.8 Precisazioni relative agli drogrammi di piena

Il progetto assume come onde di piena di riferimento (per assegnati tempi di ritorno) quelle definite nello Studio di fattibilità, in quanto si tratta di valori verificati e adottati negli strumenti di pianificazione di bacino e nella precedente progettazione degli interventi.

I valori discendono dall'applicazione del modello HMS-RAS al sottobacino idrografico chiuso alla sezione di Castellarano (976 km²) e al trasferimento alla sezione di Rubiera (ponte sulla SS 9, 1.341 km²) per mezzo di procedure di tipo idrologico e idraulico.

Le elaborazioni più recenti - Studio di fattibilità (Autorità di bacino del fiume Po, 2007); Progetto preliminare per l'ampliamento della cassa di laminazione del fiume Secchia (AIPO, 2007); dagli Studi in attuazione della Direttiva 2007/60/CE (Autorità di bacino, 2014) - mostrano una sostanziale coerenza per quanto riguarda i valori al colmo e le relative onde di piena.

Con le elaborazioni svolte nel progetto, previa un'ulteriore verifica del livello di attendibilità del modello idrologico utilizzato e della taratura eseguita, si è esteso il modello idrologico direttamente alla sezione di Rubiera, operando modeste correzioni ai parametri caratteristici del bacino idrografico, in modo che l'output di uscita per ciascun tempo di ritorno sia coincidente con quello delle elaborazioni già consolidate.

Il confronto delle onde di piena per i tempi di ritorno di 20 e 200 anni relative rispettivamente alle elaborazioni originali e a quelle derivanti dal nuovo modello hanno mostrato differenze del tutto trascurabili: nettamente inferiori al 5% sul volume totale dell'onda di piena e sul valore del colmo di portata.

Il modello predisposto permette di semplificare in misura consistente la costruzione di onde di piena a diverso tempo di ritorno e a diversa durata della precipitazione critica che sarà necessario effettuare per le valutazioni circa le opzioni alternative di adeguamento della cassa di espansione, mantenendo la completa coerenza con le onde di piena utilizzate per il progetto in argomento.

Gli stessi idrogrammi di piena sono stati utilizzati nell'ambito del Progetto Preliminare "Cassa"

# 1 ALLEGATO 1 – Interventi “Cassa”