Agenzia Regionale per la Sicurezza Territoriale e la Protezione Civile

SERVIZIO COORDINAMENTO PROGRAMMI SPECIALI E PRESIDI DI COMPETENZA

Ordinanza Commissariale n° 8 del 28 novembre 2016

Codice intervento: 12642

Titolo intervento: Interventi di messa in sicurezza del torrente Tiepido al fine di migliorare strutturalmente e funzionalmente il sistema difensivo esistente adeguando nodi e tratti particolarmente critici al fine di ridurne la vulnerabilità in caso di eventi di piena

Importo del finanziamento: € 850.000,00

PROGETTO DEFINITIVO-ESECUTIVO

B.2	RELAZIONE IDROLOGICA ED IDRAULICA
Scala -	

PROGETTAZIONE

BETA studio

WATER AND NATURAL RESOURCES CONSULTANTS

BETA Studio s.r.l. - Via Guido Rossa, 29/A
35020 Ponte S. Nicolò Padova – ITALIA
info@betastudio.it - www.betastudio.it
tel. +390498961120 fax +390498961090

Il responsabile del progetto

BETA Studio srl

Ing. Massimo COCCATO

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI PADOVA
MASSIMO COCCATO
INGEGNERE
Sez. A - n° 2405
SETTORE : Civile e Ambientale

Data	Rev.	Cod. Elab.
Maggio 2018	00	RTC_02

Visto di validazione

(art. 26 co. 8 D.Lgs 50/2016)

Il Responsabile Unico del Procedimento

(Dott.ssa Rita Nicolini)

Indice

Pag.

Introduzione VII
1. Inquadramento generale e finalità dell'intervento 1
1.1 Inquadramento generale 1
1.2 Obiettivi dell'intervento 2
2. Raccolta e analisi dei dati relativi al fiume Tiepido 7
2.1 Dati topografici 7
2.2 Dati idrometrici 8
3. Idrologia 9
3.1 Inquadramento idrografico 9
3.2 Bacini idrografici 10
3.3 Analisi degli studi pregressi 12
3.3.1 Sottoprogetto SP1 "Piene e naturalità alvei fluviali" – Progetto Po - Area Assetto Idrogeologico – Attività di studio e di ricerca a supporto della redazione del Piano di Bacino – Autorità di Bacino del Fiume Po – 1996 12
3.3.2 PGRA - Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni – Autorità diBacino del Fiume Po – marzo 2016 14
3.4 Realizzazione del modello idrologico-idraulico dell'area compresa tra la pedecollina modenese a sud della città di Modena e la cassa di laminazione dei prati di San Clemente (MO), Dipartimento di Ingegneria e Architettura - Università degli studi di Parma (2016-2017) 15
3.4.1 Progetto di fattibilità tecnico-economica – Fiume Panaro (provincia di Modena) – Adeguamento strutturale e funzionale del sistema arginale tramite interventi di sistemazione morfologica dell'alveo, adeguamento in quota e in sagoma a valle della cassa al confine provinciale - 2017. 16
3.4.1.A Idrologia del torrente Tiepido 16
3.4.1.B Effetti del Panaro sull'area terminale del torrente Tiepido 17
3.5 Analisi degli eventi di piena recenti 19
4. Implementazione del modello idraulico dello stato di fatto 21
4.1 Modello idraulico 1D 21
4.1.1 Geometria 21
4.1.2 Profilo longitudinale e manufatti interferenti 24
4.1.2.A Da Torre Maina a Gorzano 24
4.1.2.B Da Gorzano a Catelnuovo Rangone 27
4.1.2.C Da Castelnuovo Rangone fino all'autostrada A1 29
4.1.2.D Attraversamento sulla SP 17 – via Montanara 32
4.1.2.E Tratto da San Donnino a San Damaso 33
4.1.2.F Tratto terminale da San Damaso alla confluenza 37
4.1.3 Scabrezza 40
4.1.4 Portate e condizioni al contorno 40
4.1.5 Validazione del modello 41
4.1.6 Analisi dell'effetto di rigurgito dovuto ai livelli in Panaro 42
4.2 Studio idraulico 2D 43
4.2.1 Geometria 43
4.2.2 Portate e condizioni al contorno 44
4.2.3 Validazione del modello 2D 45
5. Risultati ottenuti e analisi delle criticità nello stato di fatto 47
5.1 Determinazione della pericolosità idraulica 47
5.2 Determinazione della vulnerabilità 47
5.3 Carta della pericolosità 49
5.4 Analisi delle criticità idrauliche 49
5.4.1 Tratto A: da Torre Maina a Gorzano 51
5.4.2 Tratto B: Pozza fino alla SP 16 53
5.4.3 Tratto C: Castelnuovo Rangone 55
5.4.4 Tratto D: Autostrada A1 – San Donnino 57

5.4.5 Tratto E: San Damaso 59
5.4.6 Tratto F: SP 623 – Via Emilia 61
5.4.6.A Risultati della modellazione monodimensionale 62
5.4.6.B Risultati della modellazione bidimensionale 62
6. Analisi idraulica dell'intervento in progetto 65
6.1 Implementazione del modello idraulico 1D 65
6.1.1 Stato di fatto 66
6.1.2 Stato di progetto 69
6.2 Risultati delle simulazioni idrauliche 73
6.3 Confronto tra situazione attuale e quella di progetto 77
7. Conclusioni 81
Riferimenti bibliografici 83
App. A Il modello HEC-RAS A.1
A.1 Ipotesi di funzionamento e capacità di calcolo A.1
A.2 Definizione dei parametri fondamentali A.2
A.2.1 Moto permanente e vario A.2
A.2.2 Moto uniforme e vario A.3
A.2.3 Moto subcritico e supercritico A.3
A.2.4 Altezza critica A.4
A.3 Procedure di calcolo per simulazioni in moto permanente A.4
A.3.1 Determinazione della distribuzione del moto in una sezione trasversale A.5
A.3.2 Distribuzione delle pressioni in una sezione trasversale A.5
A.3.3 Calcolo dei profili idraulici A.6
A.3.3.A Bilancio dell'energia A.6
A.3.3.B Perdite di energia A.6
A.3.4 Standard step method A.7
App. B Risultati del modello idraulico 1D B.1
B.1 Situazione attuale B.1
B.1.1 Tempo di ritorno 20 anni B.1
B.1.2 Tempo di ritorno 100 anni B.3
B.1.3 Tempo di ritorno 200 anni B.5
B.2 Configurazione di progetto B.7
B.2.1 Tempo di ritorno 20 anni B.7
B.2.2 Tempo di ritorno 100 anni B.9
B.2.3 Tempo di ritorno 200 anni B.11

Figure

Pag.

Figura 1.1 – Inquadramento territoriale e indicazione dell'ambito di indagine. 1
Figura 1.2 – Immagini fotografiche relative al bacino del Tiepido. In sinistra sono visibili le colline e alcune formazioni calanchive mentre in destra si può notare il corridoio fluviale interamente ricoperto dalla vegetazione. 2
Figura 1.3 – Briglia oggetto di studio e controbriglia crollata (Beta Studio, Aprile 2017). 3
Figura 1.4 – Briglia, oggetto di studio, a seguito del primo parziale crollo (Beta Studio, 6 Marzo 2018). 4
Figura 1.5 – Briglia, oggetto di studio, a seguito del totale crollo (Protezione Civile, 19 Marzo 2018). 5
Figura 2.1 – Estensione del DTM ricavato dal rilievo laser altimetrico. 8
Figura 2.2 – Posizione planimetrica e immagine fotografica della stazione idrometrica San Donnino. 8
Figura 3.1 – Bacino del fiume Panaro (fonte: Linee generali di Assetto idrogeologico e Quadro degli Interventi – Bacino del Panaro -. 9
Figura 3.2 – Recapito del canale San Pietro nel Tiepido a monte dell'Autostrada A1. 10
Figura 3.3 – Inquadramento dei bacini idrografici sottesi dal torrente Tiepido. 11
Figura 3.4 – Inquadramento idrografico dell'area a monte di Modena e individuazione del tracciato del Diversivo Martiniana. 11
Figura 3.5 – Idrogramma calcolato dall'AdB PO nell'ambito degli studi a supporto della redazione del Piano di Bacino. 12

Figura 3.6 – Idrogrammi di piena sintetici per il Tiepido a San Donnino. 15
Figura 3.7 – Idrogrammi del torrente Tiepido alla confluenza con il f. Panaro per TR50 e TR200 anni. 17
Figura 3.8 – Aree di allagamento dovuto al rigurgito del Panaro durante un evento di piena TR50 anni. 18
Figura 3.9 – Proposta di opere di contenimento dei livelli di piena del Panaro per un evento con TR50 anni. 19
Figura 4.1 – Estensione dell'area modellata nel presente studio. 21
Figura 4.2 - Esempio di geometria in HEC-GeoRAS, in blu le flowpath, in verde le "banks" e in rosso le tracce delle sezioni. 22
Figura 4.3 – Sezione trasversale implementata nel modello idraulico a partire dal DTM ottenuto da rilievo LiDAR. 23
Figura 4.4 – Schema del modello idraulico implementato in HEC-RAS. Sullo sfondo, il DEM ottenuto da LiDAR. .23
Figura 4.5 – Profilo longitudinale del Tiepido da Torre Maina fino alle briglie a valle del Ponte di Gorzano. 24
Figura 4.6 – Stazione di misura idrometrica installata sull'attraversamento di via Gremiole. 25
Figura 4.7 – Briglia a monte del ponte di Gorzano. 25
Figura 4.8 – Briglie a valle del ponte di Gorzano. 27
Figura 4.9 – Profilo longitudinale del Tiepido da Gorzano a Castelnuovo Rangone. 27
Figura 4.10 – Attraversamenti nei pressi di Pozza. 28
Figura 4.11 – Posizione del ponte della SP 16 (linea rossa tratteggiata) e della briglia (linea rossa continua). 28
Figura 4.12 – Attraversamento della SP 16 sul torrente Tiepido. 29
Figura 4.13 – Briglia a valle del ponte della SP 16. 29
Figura 4.14 – Profilo longitudinale del Tiepido da Castelnuovo Rangone all'autostrada A1. 30
Figura 4.15 – Posizione dell'attraversamento ciclabile a Castelnuovo Rangone (linea rossa). 30
Figura 4.16 – Attraversamento ciclabile a Castelnuovo Rangone. 31
Figura 4.17 – Attraversamento di via Zenzalose. 31
Figura 4.18 – Attraversamento sulla SP 17. 32
Figura 4.19 – Ponte ciclabile a monte dell'autostrada A1. 32
Figura 4.20 – Attraversamento sull'autostrada A1, visto da monte verso valle. 33
Figura 4.21 – Attraversamento sulla strada Gherbella in località San Donnino. 34
Figura 4.22 – Manutenzione periodica dell'alveo a San Donnino. 34
Figura 4.23 – Idrometro installato sul ponte di via Gherbella. 35
Figura 4.24 – Attraversamento ciclabile Modena - Vignola. 35
Figura 4.25 – Passerella ciclopedonale a San Damaso. 36
Figura 4.26 – Briglia a San Damaso. 36
Figura 4.27 – Profilo longitudinale del Tiepido da San Damaso alla SS 9 – via Emilia. 37
Figura 4.28 – Attraversamento sulla SP 623 – strada Collegara. 37
Figura 4.29 – Briglia a scatola a monte della strada Curtatona. 38
Figura 4.30 – Attraversamento sulla strada Curtatona. 38
Figura 4.31 – Attraversamento ciclopedonale a monte della via Emilia. 39
Figura 4.32 – Attraversamento della SS 9 – via Emilia sul torrente Tiepido. 39
Figura 4.33 – Sezione trasversale del fiume Panaro immediatamente a monte della confluenza con il torrente Tiepido. 40
Figura 4.34 – Confronto del profilo del Tiepido per un evento con Tr 200 anni: in blu I risultati del PGRA e in rosso quelli del presente studio 41
Figura 4.35 – Scala delle portate presso la stazione di San Donnino misurata (ARPA ER – linea blu) e calcolata dal modello idraulico HEC-RAS (linea rossa). 42
Figura 4.36 – Confronto tra i profili longitudinali del tratto terminale del Tiepido nelle tre configurazioni. 43
Figura 4.37 – Geometria del modello bidimensionale implementato. 44
Figura 4.38 – Idrogramma in ingresso al modello 2D –Tr = 200 anni. 45
Figura 4.39 - Confronto tra i risultati ottenuti nel Progetto di adeguamento del sistema arginale del f. Panaro (2017) e nel presente studio. 46
Figura 5.1 – Classi di pericolosità secondo il PGRA. 47
Figura 5.2 – Classificazione del danno secondo PGRA. 48
Figura 5.3 – Stralcio della Carta della vulnerabilità. 48
Figura 5.4 – Stralcio della Carta della pericolosità idraulica – Stato di fatto. 49
Figura 5.5 – Stralcio della carte delle criticità. 50
Figura 5.6 – Suddivisione del torrente Tiepido in tratti ai fini dell'analisi delle criticità. 51

Figura 5.7 – Planimetria delle criticità idrauliche evidenziate nel tratto A. 52
Figura 5.8 – Sezione 16677 a monte della briglia e del ponte di Gorzano. 52
Figura 5.9 - Profilo idraulico ottenuto dalla modellazione monodimensionale del tratto A. 53
Figura 5.10 - Profilo idraulico ottenuto dalla modellazione monodimensionale del tratto B. 53
Figura 5.11 – Sezioni trasversali del tratto B. 54
Figura 5.12 – Planimetria delle criticità idrauliche evidenziate nel tratto C. 55
Figura 5.13 – Sezione 9733 a monte del ponte di via Zenzalose. 56
Figura 5.14 – Sezione 9113 a valle del ponte di via Zenzalose, in corrispondenza dell'abitato di via Leonardo Da Vinci. 56
Figura 5.15 – Sezione 6661 a monte del ponte ciclabile. 56
Figura 5.16 - Profilo idraulico ottenuto dalla modellazione monodimensionale del tratto C. 57
Figura 5.17 – Planimetria delle criticità idrauliche evidenziate nel tratto D. 58
Figura 5.18 - Profilo idraulico ottenuto dalla modellazione monodimensionale del tratto D. 58
Figura 5.19 – Planimetria delle criticità idrauliche evidenziate nel tratto E. 59
Figura 5.20 - Profilo idraulico ottenuto dalla modellazione monodimensionale del tratto E. 60
Figura 5.21 – Sezione 2723 a monte del ponte della SP 623, con indicazione delle sponde utilizzate per il profilo idraulico. In sinistra idraulica si evidenzia la posizione degli edifici civili, evidenziati in giallo nelle planimetrie associate (sx con DTM, dx con ortofoto). 60
Figura 5.22 – Planimetria delle criticità idrauliche evidenziate nel tratto F. 61
Figura 5.23 – Sezione a monte del ponte sulla strada Curtatona. 62
Figura 5.24 – Esondazioni nel tratto terminale del Tiepido e del Grizzaga per il solo effetto del Panaro con livello di piena cinquantennale. 63
Figura 5.25 – Esondazioni nel tratto terminale del Tiepido e del Grizzaga per l'effetto combinato del livello cinquantennale del Panaro e piena duecentennale del sistema Tiepido – Grizzaga - Gherbella. 64
Figura 6.1 – Estensione dell'area modellata per l'analisi dell'intervento in progetto. 65
Figura 6.2 – Planimetria del modello idraulico: in alto a sinistra il tratto oggetto di modellazione e in basso a destra l'inquadramento del tratto oggetto di aggiornamento mediante inserimento dei dati ottenuti dalla campagna di rilievi topografici. 66
Figura 6.3 – Sezione d'alveo ottenuta da rilievo topografico (marzo 2018) implementata nel modello idraulico monodimensionale. 67
Figura 6.4 – Briglia posizionata a monte della briglia oggetto di intervento di ricostruzione. 67
Figura 6.5 – Briglia oggetto dell'intervento: a sinistra immagine della briglia in funzione (aprile 2017), a destra immagine della briglia completamente crollata (marzo 2018). 68
Figura 6.6 – Secondo salto di fondo di valle. 68
Figura 6.7 – Planimetria del modello idraulico con posizionamento della briglia e della controbriglia di progetto. 69
Figura 6.8 – Implementazione della briglia di progetto nel modello idraulico. 70
Figura 6.9 – Implementazione della controbriglia di progetto nel modello idraulico. 71
Figura 6.10 – Planimetria del modello idraulico con suddivisione in tratti di intervento per il risezionamento del torrente Tiepido. 72
Figura 6.11 – Implementazione di una sezione trasversale di progetto prevista nel tratto 1 di intervento. 72
Figura 6.12 – Implementazione di una sezione trasversale di progetto prevista nel tratto 2 di intervento. 73
Figura 6.13 – Implementazione di una sezione trasversale di progetto prevista nel tratto 3 di intervento. 73
Figura 6.14 – Profili idraulici ottenuti dalla simulazione degli eventi considerati nella configurazione di progetto. 74
Figura 6.15 – Livelli idraulici in una sezione trasversale del tratto 1 ottenuti dalla simulazione degli eventi considerati nella configurazione di progetto. 74
Figura 6.16 – Livelli idraulici nella sezione trasversale del tratto 2, posta circa 5 m a valle della briglia di progetto, ottenuti dalla simulazione degli eventi considerati nella configurazione di progetto. 75
Figura 6.17 – Livelli idraulici nella sezione trasversale, posta immediatamente a monte della controbriglia, ottenuti dalla simulazione degli eventi considerati nella configurazione di progetto. 75
Figura 6.18 – Livelli idraulici in una sezione trasversale del tratto 3 ottenuti dalla simulazione degli eventi considerati nella configurazione di progetto. 75
Figura 6.19 – Livelli idraulici in corrispondenza della briglia di progetto ottenuti dalla simulazione degli eventi considerati nella configurazione di progetto. 76
Figura 6.20 – Livelli idraulici in corrispondenza della controbriglia di progetto ottenuti dalla simulazione degli eventi considerati nella configurazione di progetto. 76

Figura 6.21 – Profilo idraulico nella situazione esistente e nella configurazione di progetto per un evento con tempo di ritorno di 20 anni. 77
Figura 6.22 – Profilo idraulico nella situazione esistente e nella configurazione di progetto per un evento con tempo di ritorno di 100 anni. 78
Figura 6.23 – Profilo idraulico nella situazione esistente e nella configurazione di progetto per un evento con tempo di ritorno di 200 anni. 78
Figura 6.24 – Briglia oggetto di intervento nella situazione esistente e nella configurazione di progetto per un evento con tempo di ritorno di 200 anni. 79
Figura 6.25 – Briglia oggetto di intervento nella situazione esistente e nella configurazione di progetto per un evento con tempo di ritorno di 100 anni. 79
Figura A.7.1 - Finestra principale del modello HEC-RAS (vers. 3.1.3 Maggio 2005) A.1

Tabelle

Pag.

Tabella 3.I – Risultati della laminazione delle piene lungo il torrente Tiepido. 14
Tabella 3.II – Portate di picco per vari TR nelle sezioni significative del torrente Tiepido. 14
Tabella 3.III – Analisi degli eventi di piena recenti del torrente Tiepido. 20
Tabella 4.I – Livelli idrometrici del fiume Panaro utilizzati come condizione al contorno di valle nel modello idraulico 1D. 40
Tabella 5.I – Classi di pericolosità utilizzate nel presente studio per l'analisi idraulica. 47

Introduzione

In data 28/11/2016 è stata firmata l'ordinanza n 8 del Commissario-Delegato *"Interventi urgenti relativi al programma di messa in sicurezza idraulica, connessi ai fiumi che hanno generato gli eventi alluvionali abbattutisi sulla provincia di Modena tra il 17 ed il 19 gennaio 2014, interessanti i Comuni già colpiti dal sisma del 2012 individuati nel decreto legge del 28 gennaio 2014, n. 4. Approvazione ulteriore stralcio e altre disposizioni."* Il servizio coordinamento Programmi Speciali e Presidi di Competenza dell'Agenzia per la Sicurezza del Territorio e la Protezione Civile è stato individuato quale soggetto attuatore degli interventi urgenti connessi al programma di messa in sicurezza idraulica dei corsi d'acqua del c.d. nodo idraulico di Modena.

In particolare l'intervento in oggetto *"Interventi di messa in sicurezza del torrente Tiepido al fine di migliorare strutturalmente e funzionalmente il sistema difensivo esistente adeguando nodi e tratti particolarmente critici al fine di ridurne la vulnerabilità in caso di eventi di piena"* rientra tra quelli di cui all'allegato 1 dell'Ordinanza Commissariale suddetta col codice 12642.

In esecuzione della determina a contrarre n. 227 del 01/02/2017, mediante procedura di affidamento diretto, è stato affidato a BETA Studio srl l'incarico di progettazione, nei tre livelli di progetto preliminare (progetto di fattibilità tecnica ed economica), definitivo ed esecutivo, e coordinamento della sicurezza in fase di progettazione per i lavori indicati in oggetto.

Il presente documento rappresenta la *Relazione idrologica e idraulica* del progetto definitivo - esecutivo dell'intervento in località Gorzano che prevede la realizzazione delle opere strutturali del sistema briglia – controbriglia in calcestruzzo armato e la ricalibratura e protezione a scogliera di un tratto di circa ottanta di metri a cavallo delle opere in progetto.

1. Inquadramento generale e finalità dell'intervento

1.1 Inquadramento generale

Il torrente Tiepido si origina in comune di Serramazzoni alla confluenza degli apporti laterali che provengono dai monti Cornazzano, Ravaglia e Monfestino, in località Malandrone di Granarolo e dopo circa 27 km, attraversando diversi comuni tra cui Maranello e Castelnuovo Rangone, si immette nel fiume Panaro essendo suo affluente in sinistra idrografica. L'immissione avviene in località Fossalta, situata a Est rispetto alla città di Modena. In Figura 1.1 si fornisce un inquadramento territoriale dell'area interessata dal presente progetto, evidenziando l'estensione della superficie di competenza del torrente, fino alla confluenza con il fiume Panaro.

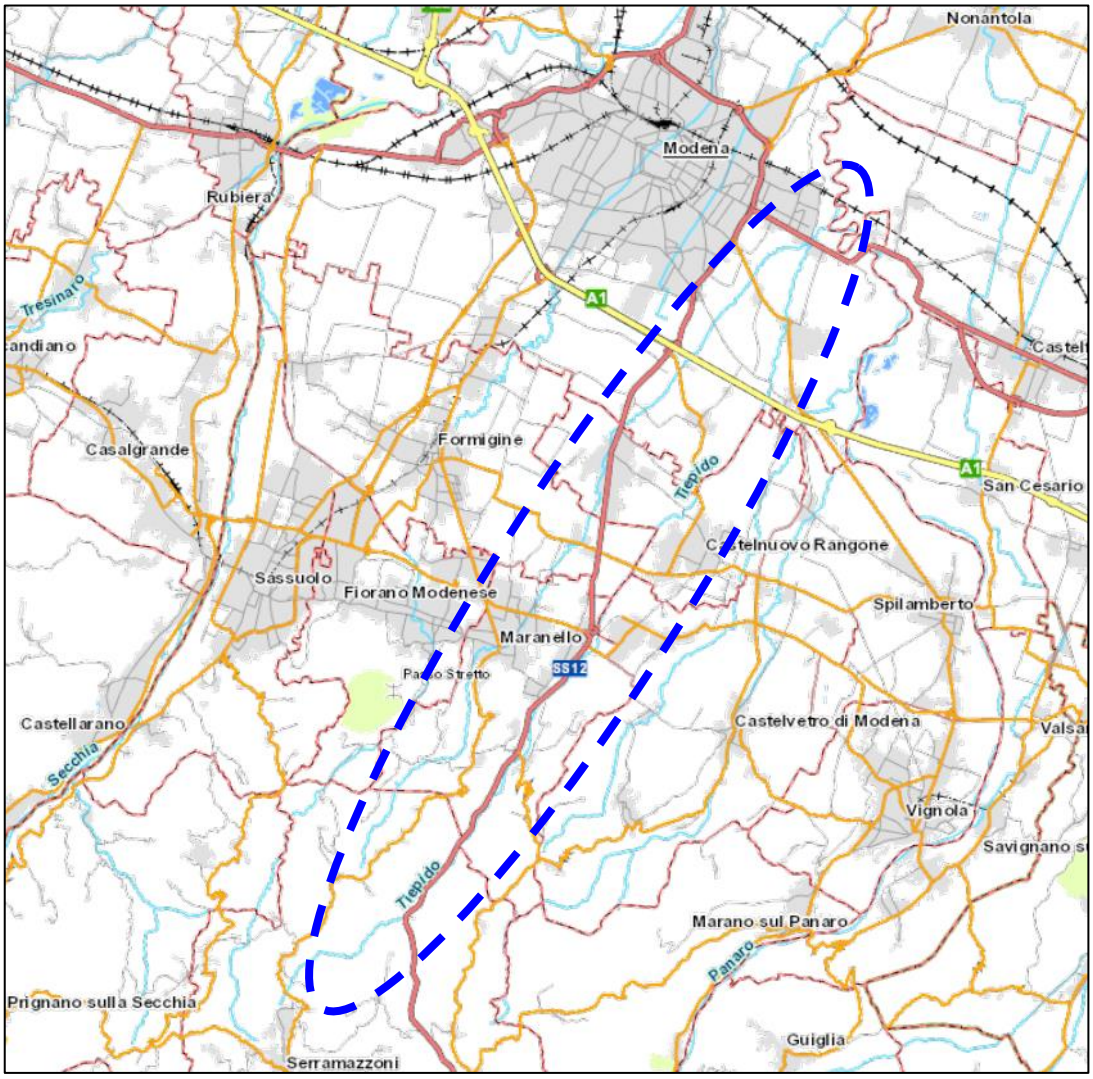


Figura 1.1 – Inquadramento territoriale e indicazione dell'ambito di indagine.

Lungo il corso del torrente Tiepido si può notare una notevole varietà in ambito paesaggistico e ambientale: nel tratto montano il bacino è caratterizzato da estesi versanti coperti da boschi, che lasciano spazio a formazioni argillose di tipo calanchivo nel tratto immediatamente a ridosso della pianura. Nella zona pianeggiante il tracciato

del torrente scorre in ambito prevalentemente agricolo e solo localmente le sue sponde sono lambite da insediamenti e/o costruzioni. In quest'ultimo tratto sulle sue sponde è presente una fitta vegetazione pressoché continua in cui prevalgono la quercia, il pioppo e in misura inferiore la roverella, l'acero campestre, la robinia e il salice. In Figura 1.2 si presenta un inquadramento fotografico dell'ambito di studio.

Figura 1.2 – Immagini fotografiche relative al bacino del Tiepido. In sinistra sono visibili le colline e alcune formazioni calanchive mentre in destra si può notare il corridoio fluviale interamente ricoperto dalla vegetazione.

Il torrente Tiepido ha subito nel corso del tempo numerose pressioni e interventi antropici che hanno portato ad una progressiva canalizzazione di alcuni tratti e riduzione delle fasce di pertinenza fluviale, soprattutto nel tratto di valle.

Lungo il corso d'acqua sono presenti numerose opere di attraversamento e opere trasversali di consolidamento (briglie, soglie): alcune di queste opere presentano situazioni di criticità legate alle modalità di deflusso ovvero a dissesti locali e strutturali.

Lungo il corso del torrente, in particolare tra Torre Maina, Castelnuovo Rangone e Modena, si sviluppa un percorso naturalistico-sportivo-ciclabile attrezzato che consente una buona fruizione dei luoghi.

1.2 Obiettivi dell'intervento

L'intervento consiste nel rifacimento del sistema briglia – controbriglia posto circa 225 m a valle del ponte di Gorzano, al Km 16+400 a partire dalla foce, in sostituzione di quello precedentemente esistente, che è crollato.

Nello specifico l'opera, da monte verso valle, è costituita dai seguenti tre elementi strutturalmente connessi:

- un primo monolite in calcestruzzo che funge da briglia;
- una vasca di dissipazione in calcestruzzo con una profondità tale da ricomprendere uno strato di materiale arido simile a quello utilizzato per la protezione a scogliera e da realizzare un cuscino d'acqua per la dissipazione della vena sfiorante il primo manufatto;
- un secondo monolite con funzione di controbriglia anch'esso in calcestruzzo.

A valle della controbriglia è stato adottato un rivestimento del fondo con massi ciclopici di diametro 1.0 m per una profondità di circa 2.0 m. Tale protezione è stata utilizzata anche subito a valle della briglia esistente posta alla progressiva 16440, in modo tale da evitare l'erosione e lo scalzamento della fondazione.

Il tratto del torrente Tiepido compreso fra la briglia di monte ed il sistema briglia – controbriglia in progetto, nonché quello a valle di quest'ultimo per un'estensione di circa una quarantina di metri, è oggetto di ricalibratura e protezione del fondo e delle scarpate mediante scogliera in massi.

Figura 1.3 – Briglia oggetto di studio e controbriglia crollata (Beta Studio, Aprile 2017).

La struttura principale della briglia ha subito danneggiamenti consistenti dovuti probabilmente all'aggiramento della struttura da parte della corrente del fiume, aggravato dall'assenza della controbriglia a valle, e si è verificato un primo parziale crollo nei primi mesi del 2018 (Figura 1.4). Con il passare del tempo e il continuo agire della corrente, il crollo è divenuto totale nel mese di marzo 2018 (Figura 1.5). La controbriglia era crollata e non funzionante da tempo, come evidenziato dalle Autorità competenti e confermato dal sopralluogo di aprile 2017 (Figura 1.3).

Data l'importanza della struttura, che presentava un salto di fondo di circa 2.5 m tra monte e valle e la cui presenza permetteva la stabilizzazione del tratto fluviale di monte, il quale attualmente si trova in una condizione di mancanza di equilibrio con conseguenti fenomeni di erosione che hanno portato in breve tempo all'affioramento del dado di fondazione della briglia posta a monte, risulta necessario e di prioritaria importanza intervenire con il ripristino della configurazione precedente ai crolli. L'obiettivo dell'intervento è quello quindi di intervenire in una situazione di emergenza, al fine di ripristinare le condizioni di deflusso, stabilizzare la livelletta al fine di porre in sicurezza anche la struttura presente a monte dell'area di intervento e risezionare le sezioni trasversali di deflusso di modo da stabilizzare le sponde ed evitare crolli delle stesse all'interno dell'alveo del torrente, situazione che potrebbe minare la sicurezza del Percorso Natura del torrente Tiepido e del transito sulla adiacente Strada Provinciale Nuova Estense.

Figura 1.4 – Briglia, oggetto di studio, a seguito del primo parziale crollo (Beta Studio, 6 Marzo 2018).

Figura 1.5 – Briglia, oggetto di studio, a seguito del totale crollo (Protezione Civile, 19 Marzo 2018).

2. Raccolta e analisi dei dati relativi al fiume Tiepido

2.1 Dati topografici

Nell'ambito del presente progetto sono stati reperiti i seguenti dati relativi alla topografia dell'area di studio e alla batimetria del fiume Tiepido:

- sezioni trasversali d'alveo del tratto dal ponte di Torre Maina fino al ponte di Gorzano rilevate nel progetto "Rilievi topografici di sezioni e profili, individuazione delle pertinenze demaniali, posa in opera di capisaldi nei comuni di Modena e Maranello", Regione Emilia Romagna;
- rilievo laseraltimetrico LiDAR fornito dalla Regione Emilia Romagna (DTM 1.0x1.0m, 2011);
- rilievo topografico eseguito durante la presente fase di progettazione.

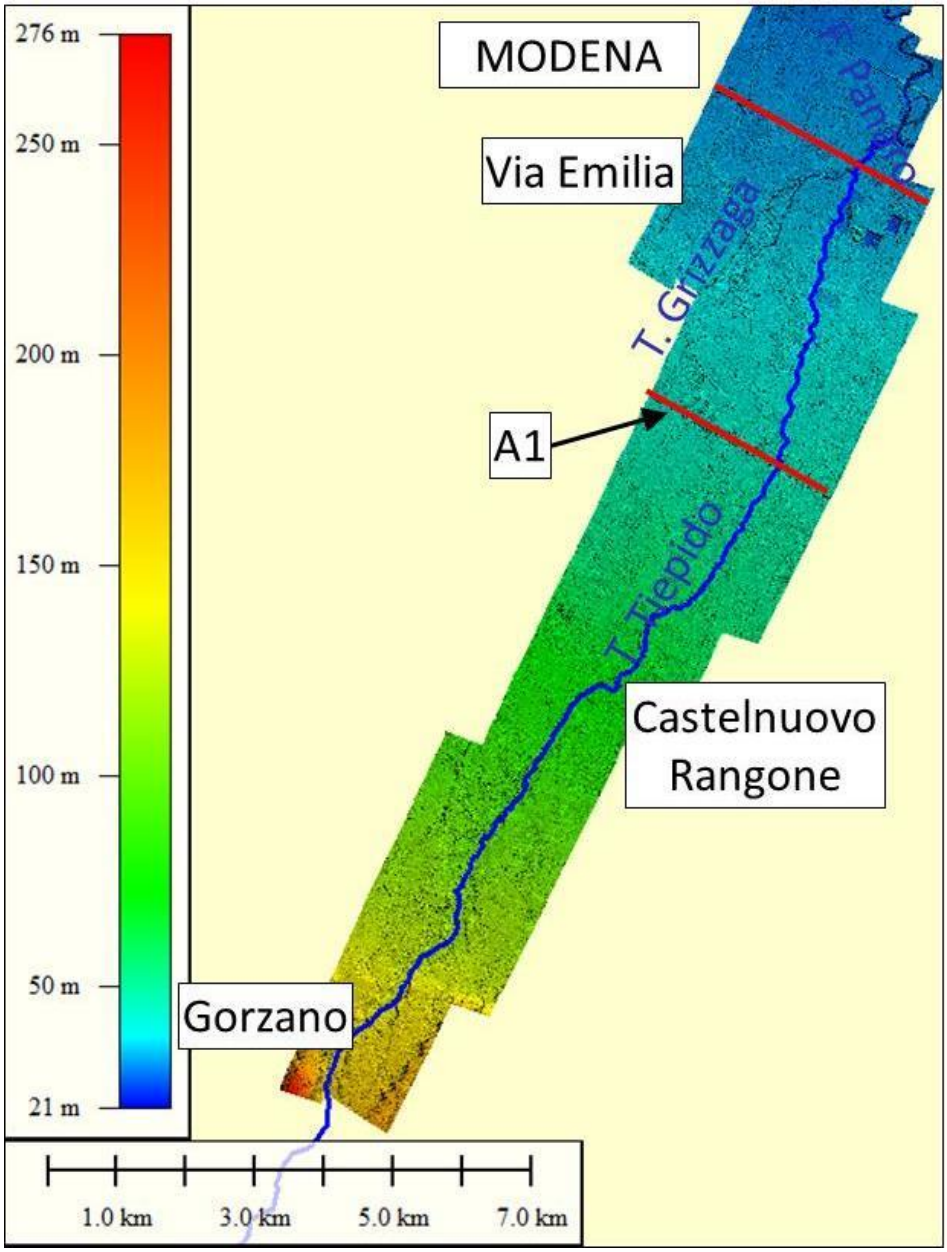


Figura 2.1 – Estensione del DTM ricavato dal rilievo laser altimetrico.

2.2 Dati idrometrici

È stata reperita presso ARPA Emilia Romagna – Servizio Idro Meteo Clima – Area Idrologia, la scala di deflusso del torrente Tiepido presso la stazione di San Donnino, collocata sull'attraversamento di via Gherbella (Figura 2.2). La scala di deflusso è aggiornata al 01/11/2011 e risulta valida dal 01/01/2010.

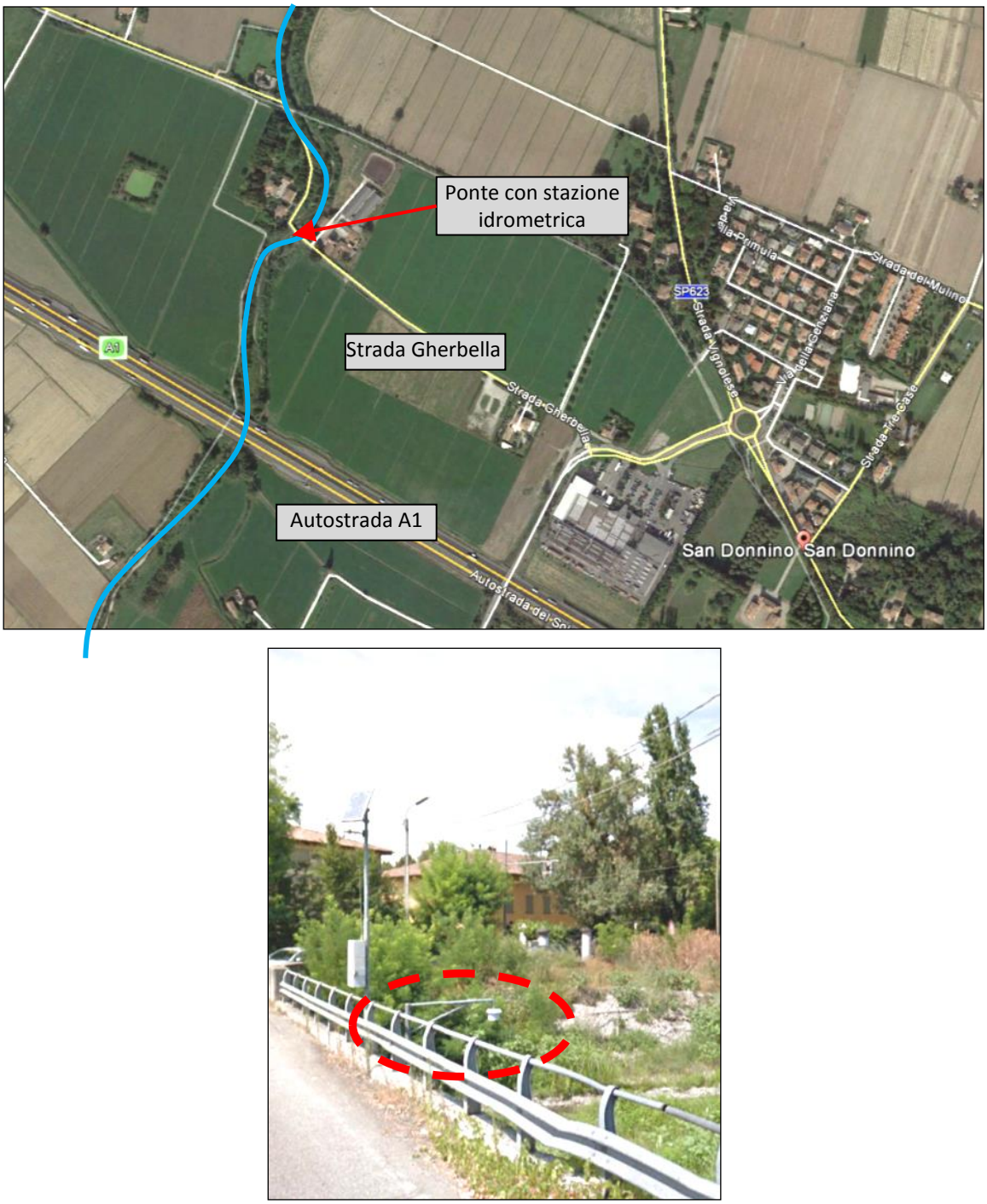


Figura 2.2 – Posizione planimetrica e immagine fotografica della stazione idrometrica San Donnino.

Sono stati anche acquisiti i livelli idrometrici registrati durante eventi recenti presso la stazione di San Donnino sul t. Tiepido e presso la stazione di Sant'Ambrogio sul fiume Panaro.

3. Idrologia

3.1 Inquadramento idrografico

Il torrente Tiepido è un affluente del basso Panaro, nel quale vi si immette a monte della città di Modena (Figura 3.1).

Le sorgenti del torrente Tiepido sono situate sulle pendici dei monti Cornazzano, Ravaglia, Pizzicano, Monfestino e Serramazzoni. Si origina nel comune di Serramazzoni ricevendo le acque del rio Bucamante, del torrente Valle e del rio Morto a livello della S.P. Estense fra gli abitati di Valle e Riccò, oltre a raccogliere le acque dei vari rii di destra e sinistra idrografica della vallata.

Il corso d'acqua ha andamento pressoché rettilineo in direzione sud-ovest — nord-est e presenta un alveo di larghezza modesta, compatibile peraltro con il suo regime di deflusso. Dopo aver percorso circa 35 km si immette in Panaro, in sinistra orografica. In corrispondenza della confluenza il suo bacino imbrifero ha superficie di circa 107 km^2.

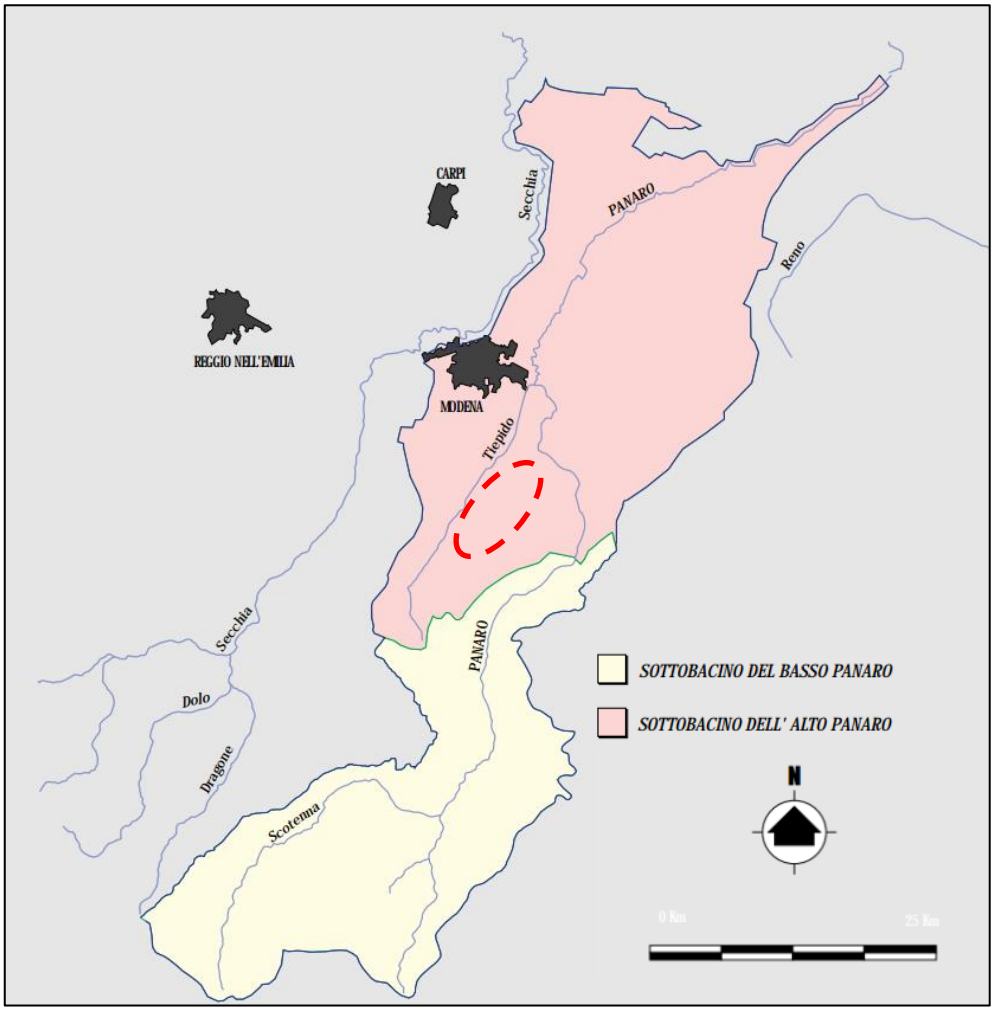


Figura 3.1 – Bacino del fiume Panaro (fonte: Linee generali di Assetto idrogeologico e Quadro degli Interventi – Bacino del Panaro - AdB PO).

Il torrente Tiepido, da Gorzano alla confluenza in Panaro, è caratterizzato da un andamento sostanzialmente rettilineo, con curvature appena accennate. La struttura è monocursale, anche se in alcuni segmenti sono presenti barre longitudinali non stabilizzate. Negli anni il corso d'acqua ha diminuito la sua larghezza, a eccezione del tratto immediatamente a monte della confluenza.

Nello stesso tratto, il torrente è caratterizzato da una scarsa presenza di opere; è arginato infatti solo il tratto terminale dell'asta, immediatamente prossimo alla confluenza. Le opere di difesa spondale e di stabilizzazione del fondo alveo sono quasi assenti, conferendo al corso d'acqua un assetto pressoché naturale.

3.2 Bacini idrografici

Dal punto di vista idrografico, il corso d'acqua riceve diversi contributi sia nella parte collinare del bacino sia nella parte valliva caratterizzata da un andamento prettamente pianeggiante; nel tratto pianeggiante i principali affluenti sono i canali S. Pietro e Diamante e, subito prima della confluenza in Panaro, il torrente Grizzaga.

In Figura 3.3 è mostrato un inquadramento del sistema dei bacini idrografici che compongono il bacino del torrente Tiepido. Come si può notare, oltre al bacino principale, vi sono il bacino del torrente Grizzaga in sinistra idrografica, che raccoglie le acque della pedecollina mentre nella parte valliva vi è un bacino identificato con il nome di "Canale San Pietro" che possiede un recapito in Tiepido (Figura 3.2) ma possiede ulteriori sbocchi verso valle, fuori dal bacino principale.

Figura 3.2 – Recapito del canale San Pietro nel Tiepido a monte dell'Autostrada A1.

Va inoltre ricordato che il torrente Tiepido riceverà, tramite il torrente Grizzaga, le acque dello scolmatore Martiniana che raccoglie a sua volta le acque di numerosi canali e scoli a Sud di Modena, appartenenti al sottobacino del canale Naviglio, per mitigare le portate di piena che attraversano il capoluogo: in Figura 3.4 è rappresentato un inquadramento planimetrico del sistema idrografico nei pressi di Modena con evidenziato il tracciato dello scolmatore che recapiterà le sue acque nel Tiepido (via Grizzaga).

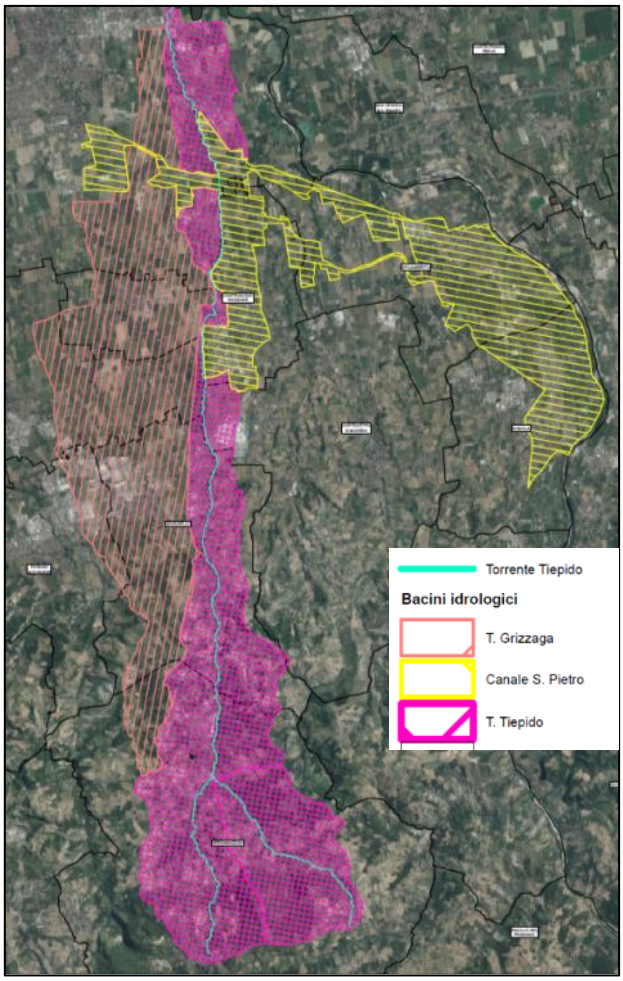


Figura 3.3 – Inquadramento dei bacini idrografici sottesi dal torrente Tiepido.

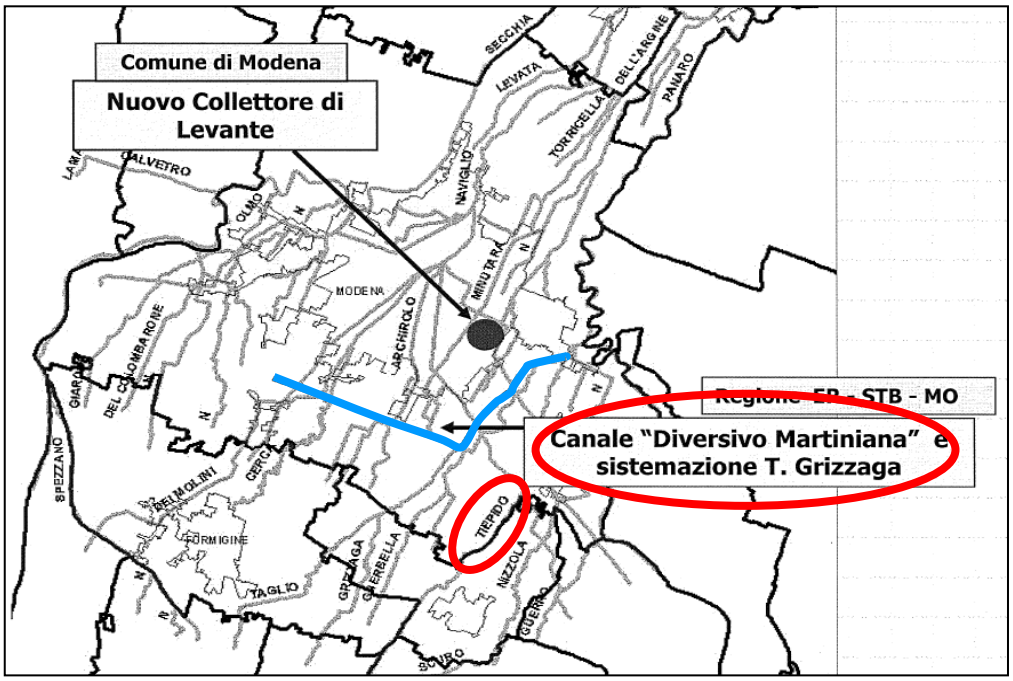


Figura 3.4 – Inquadramento idrografico dell'area a monte di Modena e individuazione del tracciato del Diversivo Martiniana.

3.3 Analisi degli studi pregressi

Sono presenti diversi studi sia idrologici che idraulici inerenti il bacino del torrente Tiepido. Di seguito vengono riportati i più significativi per gli scopi del presente progetto, ponendo una particolare attenzione agli aspetti idrologici di determinazione del picco di piena per eventi di piena con determinati tempi di ritorno e di propagazione e laminazione della piena lungo l'asta fluviale.

3.3.1 Sottoprogetto SP1 "Piene e naturalità alvei fluviali" – Progetto Po - Area Assetto Idrogeologico – Attività di studio e di ricerca a supporto della redazione del Piano di Bacino – Autorità di Bacino del Fiume Po – 1996

Nell'ambito delle attività di studio e di ricerca a supporto della redazione del Piano di Bacino è stato realizzato il sottoprogetto "Piene e naturalità alvei fluviali", nel quale sono stati condotti studi idrologici e idraulici mediante l'applicazione di un modello di simulazione idrologico-idraulico al fine di valutare il rischio attuale di esondazione dei corsi d'acqua appartenenti al bacino del Po, tra cui il fiume Panaro e il torrente Tiepido.

Nello studio idrologico sono state calcolate le portate per eventi di piena con tempo di ritorno di 20, 100 e 200 anni sulla base di formule di regionalizzazione che correlano la portata al colmo ad alcune caratteristiche del bacino e della precipitazione. Gli idrogrammi di piena sono stati ottenuti considerando un evento pluviometrico della durata di 4 ore pari al tempo di corrivazione del bacino montano. L'apporto idrologico è stato inserito all'interno del modello idraulico fornendo un input concentrato a monte, derivante dall'idrogramma calcolato a Gorzano (Figura 3.5), e un input distribuito lungo l'asta fluviale di valle.

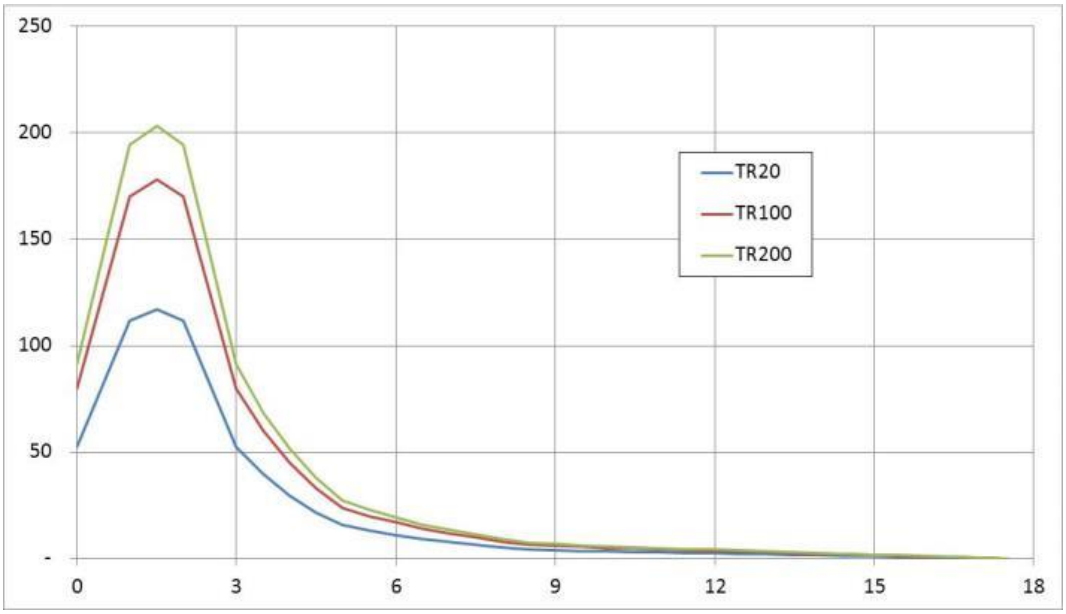


Figura 3.5 – Idrogramma calcolato dall'AdB PO nell'ambito degli studi a supporto della redazione del Piano di Bacino.

La descrizione geometrica del T.Tiepido, che si estende da Gorzano alla confluenza in Panaro, è stata effettuata, per la insufficienza delle sezioni trasversali rilevate disponibili (solo 3 sezioni concentrate in corrispondenza della confluenza con il F.Panaro), attraverso sezioni trasversali dedotte, con opportuna distribuzione, dalla base cartografica di lavoro rappresentata, per entrambi i corsi d'acqua considerati, dalla C.T.R. scala 1:10000 riferita ad un rilievo del 1976-79 ed ottenuta per riduzione fotomeccanica dalla scala 1:5000.

L'evoluzione del fenomeno di piena è stata rappresentata fornendo gli inviluppi dei colmi di piena per le sezioni di calcolo del modello e gli idrogrammi di portata individuati in otto sezioni:

- Gorzano - inizio tratto (km 0.00)
- Pozza - monte attraversamento SS n. 569 (km 2.203)
- Castelnuovo Rangone (km 6.849)
- monte attraversamento A1 (km 11.736)
- valle attraversamento A1 (km 12.143)
- San Damaso (km 13.982)
- confluenza F.Panaro (km 16.925)

I risultati dello studio sono i seguenti

"la significativa riduzione dei valori del colmo di piena in corrispondenza degli attraversamenti TP06 e TP08 (in quest'ultimo caso solo per le piene centenaria e bicentenaria) legata, nel caso del primo, più ad un'ampia esondazione indotta a monte che ad una effettiva riduzione della sezione idraulica (si fa presente che il TP06 è un ponte autostradale), mentre nel caso del secondo, prevalentemente alla significativa riduzione della sezione idraulica conseguente al ponte stesso (TP08 è un ponte stradale ad arco la cui luce massima è di circa 15 m);

al netto dei suddetti effetti locali il contributo laterale distribuito risulta globalmente di entità confrontabile alla laminazione"

"…Dall'esame del grafico si evidenzia come il tempo di traslazione del colmo di piena risulti per i tre eventi mediamente comparabile al netto di un breve tratto vallivo (dalla progressiva 14.146) in corrispondenza del quale, in relazione all'effetto di rigurgito legato alla confluenza nel F.Panaro, la piena bicentenaria, più delle altre, subisce un certo rallentamento relativo.

Si segnala inoltre l'effetto di ritardo indotto dagli attraversamenti TP06 e TP08 variabile da 30 minuti a 1 ora (al crescere del tempo di ritorno), in accordo con l'effetto laminazione dei colmi di piena già segnalato (cfr. para. 1.1.4.2).

I tempi di traslazione da Gorzano sono i seguenti:

- Gorzano - attraversamento A1: circa 1 ora
- Gorzano - S.Damaso: circa 1 e 30 minuti
- Gorzano - confluenza nel F.Panaro: circa 1 e 50 minuti"

"…Le aree di esondazione per un tempo di ritorno di 20 anni risultano contenute interessando limitate zone in fregio al corso d'acqua prive di infrastrutture e/o insediamenti abitativi di rilievo.

Per i tempi di ritorno di 100 e 200 anni sia per naturale espansione della sezione di deflusso che in seguito a restringimenti indotti da attraversamenti le aree di esondazione risultano più estese comprendendo prevalentemente aree agricolo-boschive.

Tra queste si segnala un'ampia zona a monte dell'attraversamento dell'Autostrada A1 (TP06) interessata da esondazioni sia in destra che sinistra idrografica ed un'area a valle dello stesso attraversamento in sinistra idrografica…."

"…Per tutto il torrente Tiepido e per la parte del Fiume Panaro non arginata o contenuta da terrazzamenti naturali (da Marano sul Panaro all'attraversamento autostradale a valle di Castelnuovo Rangone) le aree allagabili sono

spesso costituite da superfici non connesse fra loro, legate ciascuna a un tratto d'alveo critico, si tratta comunque, prevalentemente, di brevi segmenti di fasce laterali prossime al corso d'acqua, in linea di massima provocate dalla insufficiente officiosità idraulica dell'alveo o, meno frequentemente, dal rigurgito legato a quegli attraversamenti che presentano una sezione idraulica non adeguata; in alcuni casi si evidenziano intrusioni verso l'esterno, che arrivano a lambire, e in un caso ad interessare marginalmente, alcuni centri abitati limitrofi; le aree a rischio di allagamento sono costituite da terreni agricoli con presenza di qualche edificio sparso…."

In Tabella 3.I si riportano i picchi di portata degli idrogrammi inseriti a Gorzano e i picchi di portata degli idrogrammi di piena laminati lungo l'asta fluviale del torrente Tiepido.

Tabella 3.I – Risultati della laminazione delle piene lungo il torrente Tiepido.

Sezione	***Tempo di ritorno (anni)***		
	20	***100***	***200***
Immissione a Gorzano	117	178	203
Confluenza nel Panaro	100	146	163
Laminazione	15%	18%	20%

In questo studio si evidenzia il significativo effetto di rigurgito indotto dalla confluenza con il F.Panaro che, risalendo per più di 1 km dal punto di immissione lungo l'asta del torrente, ne incrementa il livello di piena anche di 5 metri. Questo effetto è stato analizzato in maniera più dettagliata nello studio riportato nel paragrafo successivo.

Gli studi del sottoprogetto SP1 sono poi stati sostanzialmente recepiti dal PAI dell'AdB Po per il tracciamento delle fasce di pertinenza fluviale.

3.3.2 PGRA - Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni – Autorità diBacino del Fiume Po – marzo 2016

Il PGRA riprende i contenuti del PAI in termini di portate di colmo e profili di piena dei corsi d'acqua ricadenti nel bacino del Po, per determinati tempi di ritorno, e ne aggiorna le conoscenze acquisite nell'ambito della redazione del PAI, ove si siano effettuati studi e analisi specifiche che abbiano determinato una variazione di queste grandezze.

Per il torrente Tiepido si riportano i valori di portata calcolati nelle sezioni di Gorzano e San Damaso, per tempi di ritorno di 20, 200 e 500 anni (Tabella 3.II).

Tabella 3.II – Portate di picco per vari TR nelle sezioni significative del torrente Tiepido.

Sezione	***Superficie (km^2)***	***Tempo di ritorno (anni)***		
		20	***200***	***500***
Gorzano	44	100	175	210
San Damaso	67	120	200	240

La superficie del bacino sotteso a San Damaso evidenzia che la portata riportata dal PGRA non comprende il contributo del torrente Grizzaga, che si immette nel Tiepido in località Fossalta, immediatamente a monte della

confluenza con il fiume Panaro. Si può invece considerare compreso il contributo fornito dal bacino del canale San Pietro.

Il profilo longitudinale presente nel PGRA è stato utilizzato per la successiva validazione del modello idraulico.

3.4 Realizzazione del modello idrologico-idraulico dell'area compresa tra la pedecollina modenese a sud della città di Modena e la cassa di laminazione dei prati di San Clemente (MO), Dipartimento di Ingegneria e Architettura - Università degli studi di Parma (2016-2017)

Di recente, nell'ambito del progetto di "Realizzazione del modello idrologico-idraulico dell'area compresa tra la pedecollina modenese a sud della città di Modena e la cassa di laminazione dei prati di San Clemente (MO)", l'Università di Parma ha svolto degli approfondimenti per la definizione non solo delle portate al colmo del torrente Tiepido ma anche dei volumi di piena da attribuire al torrente Tiepido, compreso tra l'attraversamento dell'autostrada A1 e la confluenza con il torrente Grizzaga.

Le onde di piena di progetto sono state ottenute dall'elaborazione dei dati idrometrici acquisiti dalla stazione sull'attraversamento della Strada Gherbella a San Donnino durante gli eventi di piena verificatisi nel Tiepido nel periodo di funzionamento (dal 2001). Sono stati analizzati quindi i livelli idrometrici registrati durante 36 eventi in 14 anni, utilizzando un'analisi statistica con il metodo delle eccedenze. Tali livelli sono stati convertiti in portate con l'utilizzo della scala delle portate fornita da ARPAE (si veda paragrafo 2.2).

Gli idrogrammi di piena sintetici calcolati presso la stazione di San Donnino sono riportati in Figura 3.6.

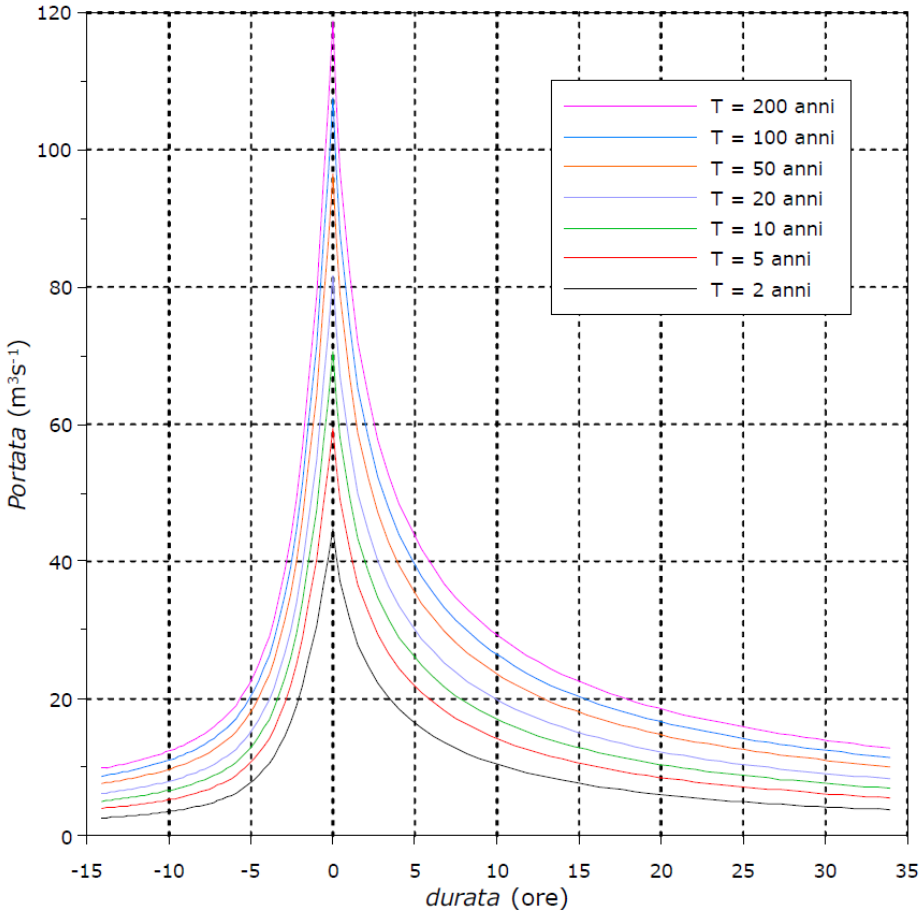


Figura 3.6 – Idrogrammi di piena sintetici per il Tiepido a San Donnino.

3.4.1 Progetto di fattibilità tecnico-economica – Fiume Panaro (provincia di Modena) – Adeguamento strutturale e funzionale del sistema arginale tramite interventi di sistemazione morfologica dell'alveo, adeguamento in quota e in sagoma a valle della cassa al confine provinciale - 2017.

Nell'ambito del Progetto di adeguamento del sistema arginale del f. Panaro, sono state effettuate delle analisi idrologiche e idrauliche relative al torrente Tiepido chiuso alla confluenza col Panaro.

In particolare, i temi trattati relativi al Tiepido riguardano la determinazione dell'idrogramma di piena del Tiepido chiuso alla confluenza col Panaro, nell'ambito dell'analisi dell'ipotesi di non contemporaneità dei picchi di piena del f. Panaro e del t. Tiepido, e l'analisi delle esondazioni che si verificano nel tratto terminale del t. Tiepido dovute ai livelli che si instaurano in piena nel fiume Panaro.

3.4.1.A Idrologia del torrente Tiepido

L'analisi della validità dell'ipotesi di non contemporaneità di picchi di piena del f. Panaro e del t. Tiepido sono state condotte ai fini di determinare una gestione ottimale delle casse di espansione di Sant'Anna sul fiume Panaro, per garantire a valle una portata coerente con la portata di progetto della cassa di espansione.

Le analisi sono state condotte utilizzando un idrogramma per il torrente Tiepido determinato come segue:

- eventi con Tr 50 e 200 anni
- ietogramma di pioggia di tipo Chicago sul bacino del Tiepido identici a quelli considerati per il Panaro per la durata di 24 ore di tempo di ritorno; ciò al fine di considerare un evento avente una distribuzione temporale particolarmente gravosa in modo da enfatizzare cautelativamente l'importanza della concomitanza della piena del Tiepido;
- valutazione delle perdite idrologiche effettuata utilizzando il metodo SCS – CN utilizzando un valore di Initial Abstraction = 0.05 mm, con CN = 60;
- adottato un Idrogramma Unitario Istantaneo IUH ottenuto utilizzando l'idrogramma di Nash con tre serbatoi lineari (n=3) aventi costante d'invaso k = 1.25 ore; tale IUH presenta un tempo di risposta paragonabile a uello che caratterizza il metodo cinematico avente il tempo di corrivazione di 5 ore ritenuto adeguato per il bacino del Tiepido;
- la convoluzione del IUH con gli ietogrammi di input è stata effettuata inserendo una superficie complessiva di 116 km² del bacino del Tiepido alla confluenza con il Panaro.

Gli idrogrammi ottenuti sono riportati nella seguente Figura 3.7. Da questi idrogrammi si ottiene un picco di piena del t. Tiepido pari a 205 m³/s per un evento con TR 50 anni e pari a circa 275 m³/s per TR 200 anni.

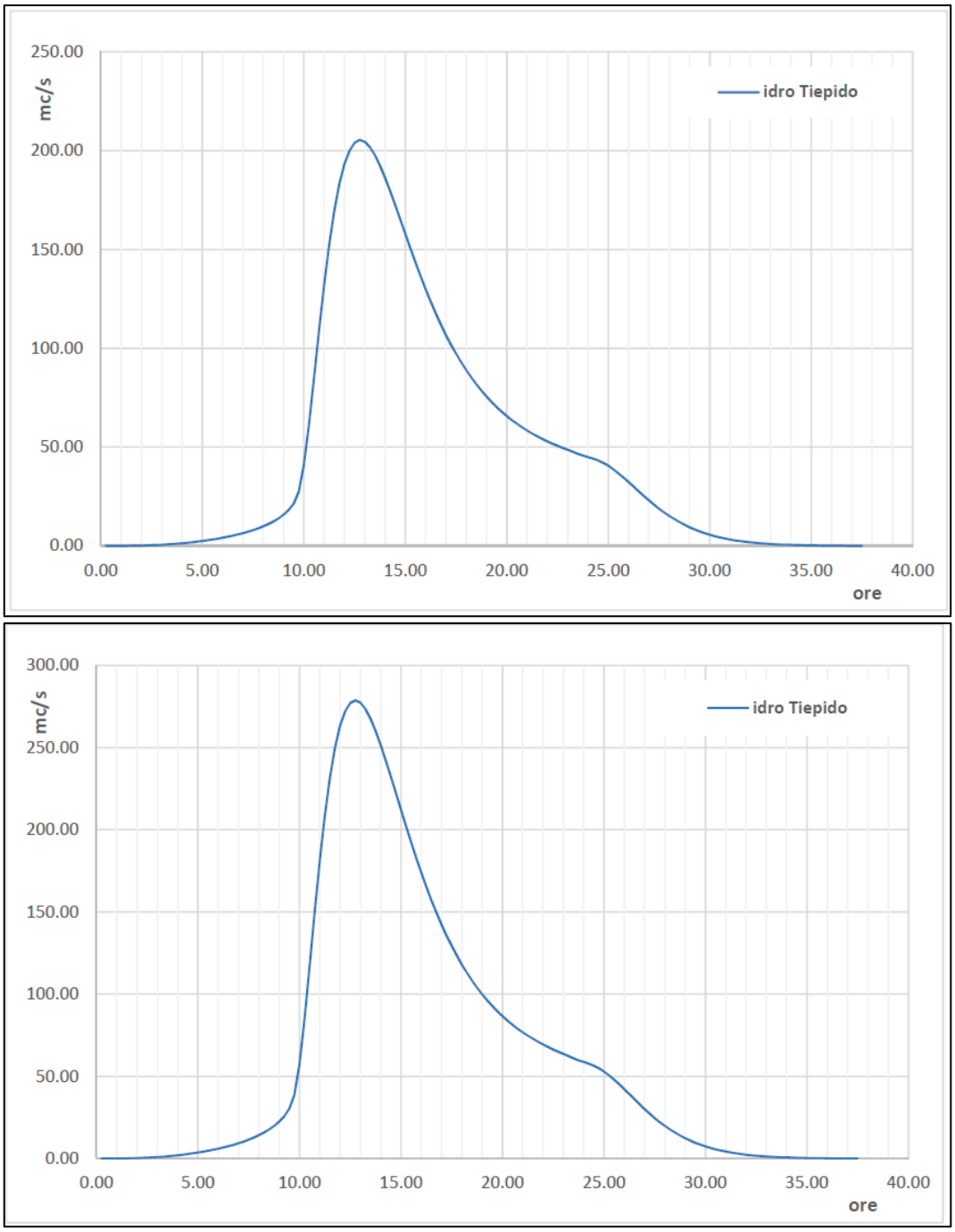


Figura 3.7 – Idrogrammi del torrente Tiepido alla confluenza con il f. Panaro per TR50 e TR200 anni.

3.4.1.B Effetti del Panaro sull'area terminale del torrente Tiepido

Nell'ambito del suddetto progetto, sono state eseguite delle simulazioni mediante modello idraulico bidimensionale al fine di valutare gli effetti di rigurgito lungo l'asta del Tiepido per effetto della piena del Panaro.

Le simulazioni sono state condotte considerando a monte le portate scaricate dalla cassa di espansione di Sant'Anna, per vari tempi di ritorno, non inserendo nessun apporto del Tiepido, nell'ipotesi di non contemporaneità degli eventi. Per il tempo di ritorno di riferimento (50 anni) si ottiene un livello del Panaro presso la confluenza del Tiepido di 34.79 m s.m.m.

Le simulazioni evidenziano che nel tratto terminale del fiume Tiepido si verificano importanti e diffusi fenomeni di esondazione (Figura 3.8):

- lungo la via Emilia, in particolare tra l'incrocio con la strada Scariazza e il ponte sul Tiepido;
- lungo il Tiepido in sponda destra, con interessamento di alcune aree urbanizzate;
- lungo il Grizzaga, sia in sponda destra che in sponda sinistra con interessamento di aree urbanizzate della città di Modena.

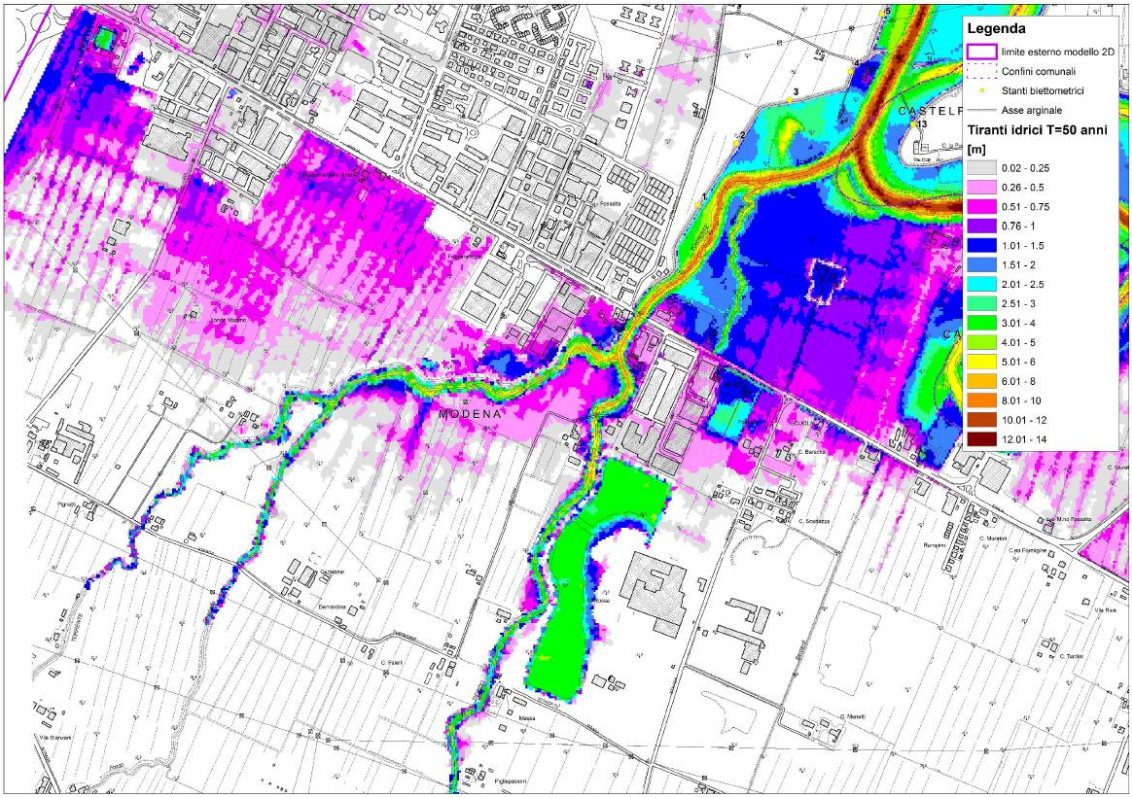


Figura 3.8 – Aree di allagamento dovuto al rigurgito del Panaro durante un evento di piena TR50 anni.

Lo studio evidenzia le criticità idrauliche del tratto e propone il tracciato di possibili interventi necessari al contenimento dell'allagamento con TR50 anni nell'area fluviale (Figura 3.9). Tuttavia gli interventi proposti non sono inclusi nel progetto, anche se inseriti nelle somme a disposizione del quadro economico del progetto, poiché si evidenzia la necessità di approfondimenti di carattere idrologico e idraulico dei torrenti Tiepido e Grizzaga e delle relative opere di protezione rispetto al rigurgito, oltre che a necessitare di un appropriato iter di approvazione da parte degli Enti competenti.

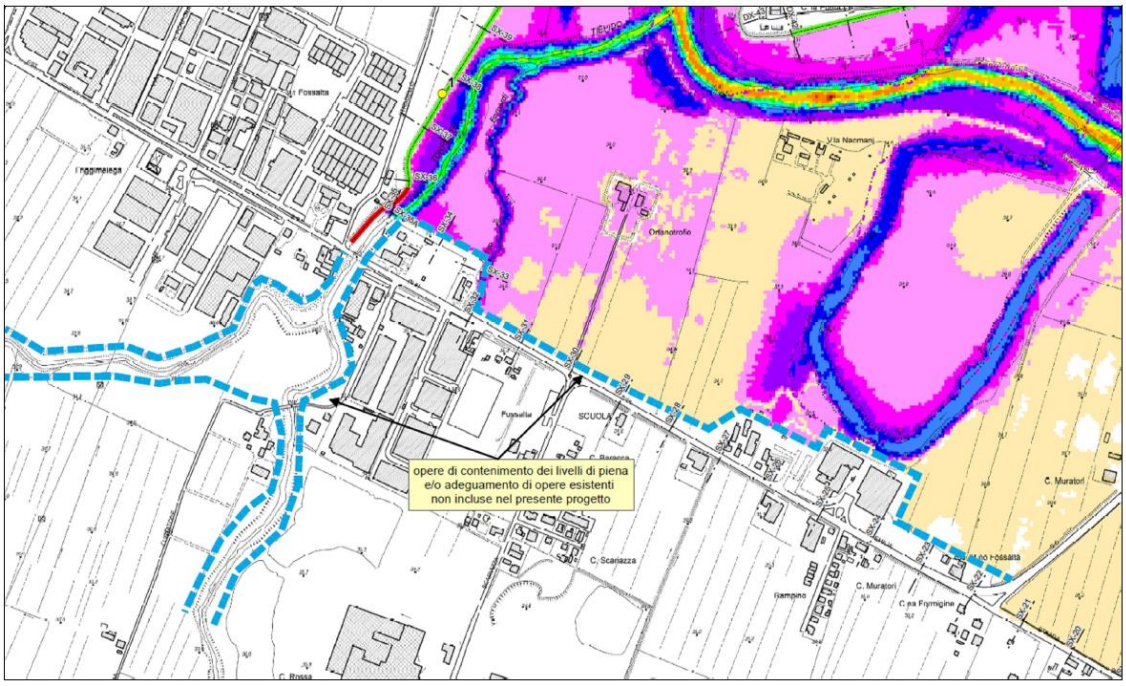


Figura 3.9 – Proposta di opere di contenimento dei livelli di piena del Panaro per un evento con TR50 anni.

3.5 Analisi degli eventi di piena recenti

Il Progetto di adeguamento del sistema arginale del f. Panaro evidenzia la necessità di studiare in maniera più approfondita il rigurgito del fiume Panaro all'interno dell'ambito fluviale del torrente Tiepido. Al fine di delineare un inquadramento completo del comportamento idraulico del t. Tiepido in esame e dell'interazione tra lo stesso e il f. Panaro si procede all'analisi degli eventi di piena recenti. L'obiettivo è quello di:

- verificare l'ipotesi di non contemporaneità dei picchi del Tiepido e del Panaro
- verificare gli effetti del rigurgito del Panaro

Si prende come riferimento il ponte sulla strada Curtatona che risulta essere un attraversamento particolarmente critico nel tratto terminale del Tiepido. Infatti la Protezione Civile segnala che il ponte è stato chiuso, nel periodo 2005 – 2016, durante i seguenti eventi di piena:

- 5-7 novembre 2016
- 25-27 marzo 2016
- 3-5 marzo 2014
- 30-31 gennaio 2014
- 18-19 gennaio 2014
- 5-6 gennaio 2014
- 26-27 dicembre 2013
- 18-19 marzo 2013
- 11-13 novembre 2012
- 22-27 dicembre 2010
- 1-6 novembre 2010
- 24-26 dicembre 2009

- 20-23 gennaio 2009
- 1 dicembre 2008
- 3-5 dicembre 2005

Si procede quindi al confronto dei livelli registrati presso la stazione di misura di San Donnino sul Tiepido e la stazione di Sant'Ambrogio sul f. Panaro, durante questi eventi. In particolare, per gli eventi di piena analizzati, si considera la portata massima calcolata mediante la scala delle portate fornita dall'ARPA ER e il livello idrometrico registrato presso il f. Panaro alla stazione di misura di Sant'Ambrogio nell'istante in cui si ha il picco di piena del Tiepido (Tabella 3.III).

Tabella 3.III – Analisi degli eventi di piena recenti del torrente Tiepido.

Evento	***Qmax t. Tiepido [m³/s]***	***Livello Panaro [m]***	***Chiusura del ponte sulla strada Curtatona***
5 Marzo 2014	50	7.0	Sì
30-31 Gennaio 2014	40	7.0	Sì
18-19 Gennaio 2014	25-30	8.6	Sì
18-19 Marzo 2013	20	7.0	Sì
11-13 Dicembre 2012	45	5.0	Sì
5 Aprile 2013	40	< 3.0	No
Novembre 2012	20	-	No

Il confronto ha evidenziato che, anche per eventi con tempo di ritorno contenuto nel Tiepido, il ponte ha subito la chiusura a causa del livello che si era instaurato nel fiume Panaro.

Si evidenzia inoltre che, durante i due eventi del 2012 e del 2013, nei quali è stata registrata una portata massima analoga ai successivi, non si è verificata la chiusura del ponte sulla strada Curtatona poiché il livello del Panaro durante la piena del Tiepido è rimasto contenuto al di sotto dei 3 m.

Quest'analisi permette quindi di affermare che il tratto terminale del Tiepido è influenzato in maniera importante dal livello che si instaura nel fiume Panaro. Per la definizione delle criticità idrauliche di questo tratto quindi si rende necessaria, oltre all'analisi delle criticità quando il torrente Tiepido è in piena, anche un'analisi delle criticità legata ai livelli che si instaurano in Panaro.

4. Implementazione del modello idraulico dello stato di fatto

4.1 Modello idraulico 1D

4.1.1 Geometria

È stato costruito un modello idraulico monodimensionale a moto permanente con l'impiego del software HEC-RAS, di cui si riporta una breve descrizione in Appendice A.

Il modello si estende per circa 18.5 km a partire dalla sezione di valle del ponte di Torre Maina fino a circa 85 m a valle del ponte sulla SS9 – via Emilia (Figura 4.1).

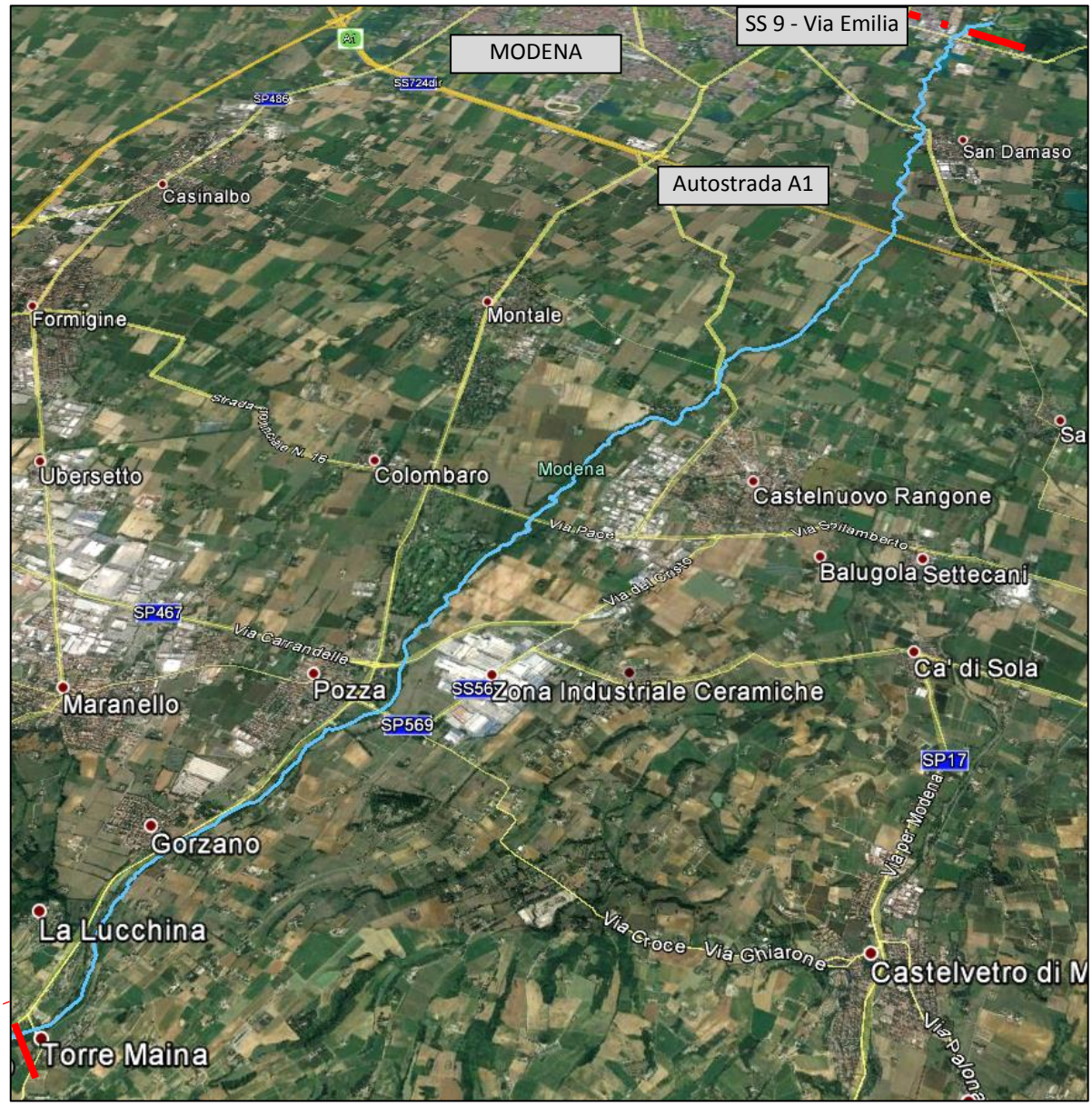


Figura 4.1 – Estensione dell'area modellata nel presente studio.

Il modello idraulico monodimensionale è stato costruito impiegando:

- sezioni trasversali e manufatti idraulici dal progetto "Rilievi topografici di sezioni e profili, individuazione delle pertinenze demaniali, posa in opera di capisaldi nei comuni di Modena e Maranello", Regione Emilia Romagna;
- sezioni trasversali ricavate da modello digitale del terreno LiDAR fornito dalla Regione Emilia Romagna (DTM 1.0x1.0m);
- soglie in alveo ricavate da rilievo LiDAR;
- attraversamenti stradali ricavati da ortofoto o documentazione fotografica ottenuta durante i sopralluoghi.

L'estrapolazione delle sezioni trasversali da LiDAR è stata effettuata mediante HEC-GeoRAS, che è un applicativo del programma ArGIS, sviluppato dall'U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center. Con HEC-GeoRAS è possibile costruire la geometria di un modello in HEC-RAS completamente in ambiente GIS, una volta in possesso di un DEM in formato TIN della zona da modellizzare. In ambiente GIS si definiscono:

- l'asse del fiume;
- le "flow path", da cui si calcolano le distanze tra le sezioni sia lungo l'alveo che lungo le zone golenali;
- le "banks, che definiscono la separazione tra aree golenali e alveo inciso,
- le tracce delle sezioni, che possono essere rettilinee o formate da delle spezzate, il programma estrae i profili delle sezioni dal DEM;
- le "ineffective flow area", che permettono di definire le reali aree di deflusso nei tratti di espansione e contrazione.

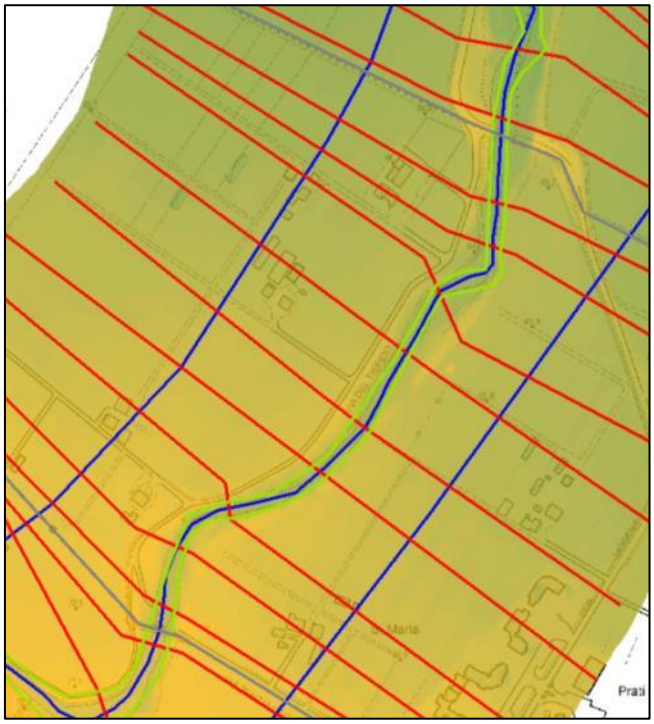


Figura 4.2 - Esempio di geometria in HEC-GeoRAS, in blu le flowpath, in verde le "banks" e in rosso le tracce delle sezioni.

Hec-GeoRAS esporta un file direttamente importabile in HEC-RAS. La geometria importata è georeferenziata.

Sono state impiegate anche sezioni trasversali non rettilinee al fine di garantire in ogni sezioni l'ortogonalità del deflusso alla sezioni stessa. In Figura 4.3 si riporta un esempio di sezione ricavata da DTM ottenuto dal LiDAR.

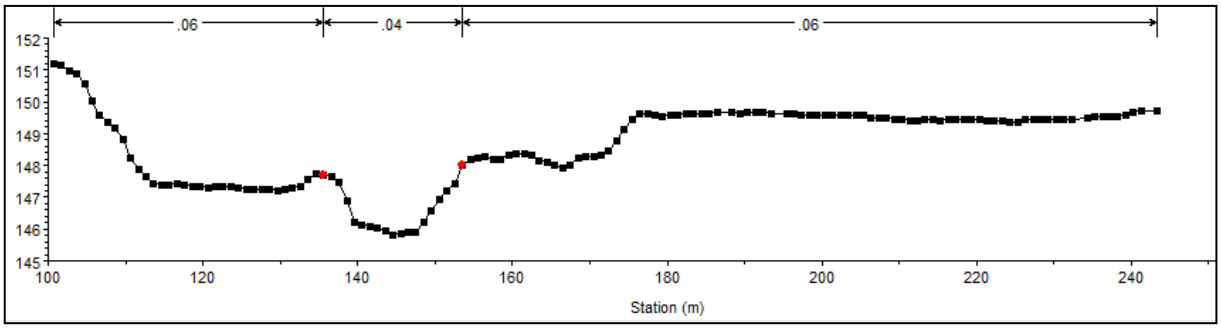


Figura 4.3 – Sezione trasversale implementata nel modello idraulico a partire dal DTM ottenuto da rilievo LiDAR.

Al fine di estendere il modello a monte fino a Torre Maina, la geometria ottenuta da LiDAR è stata integrata con le sezioni trasversali e i manufatti idraulici ricavati dal progetto della Regione Emilia Romagna. Le sezioni e i manufatti sono stati quindi georiferiti e inseriti all'interno del modello idraulico.

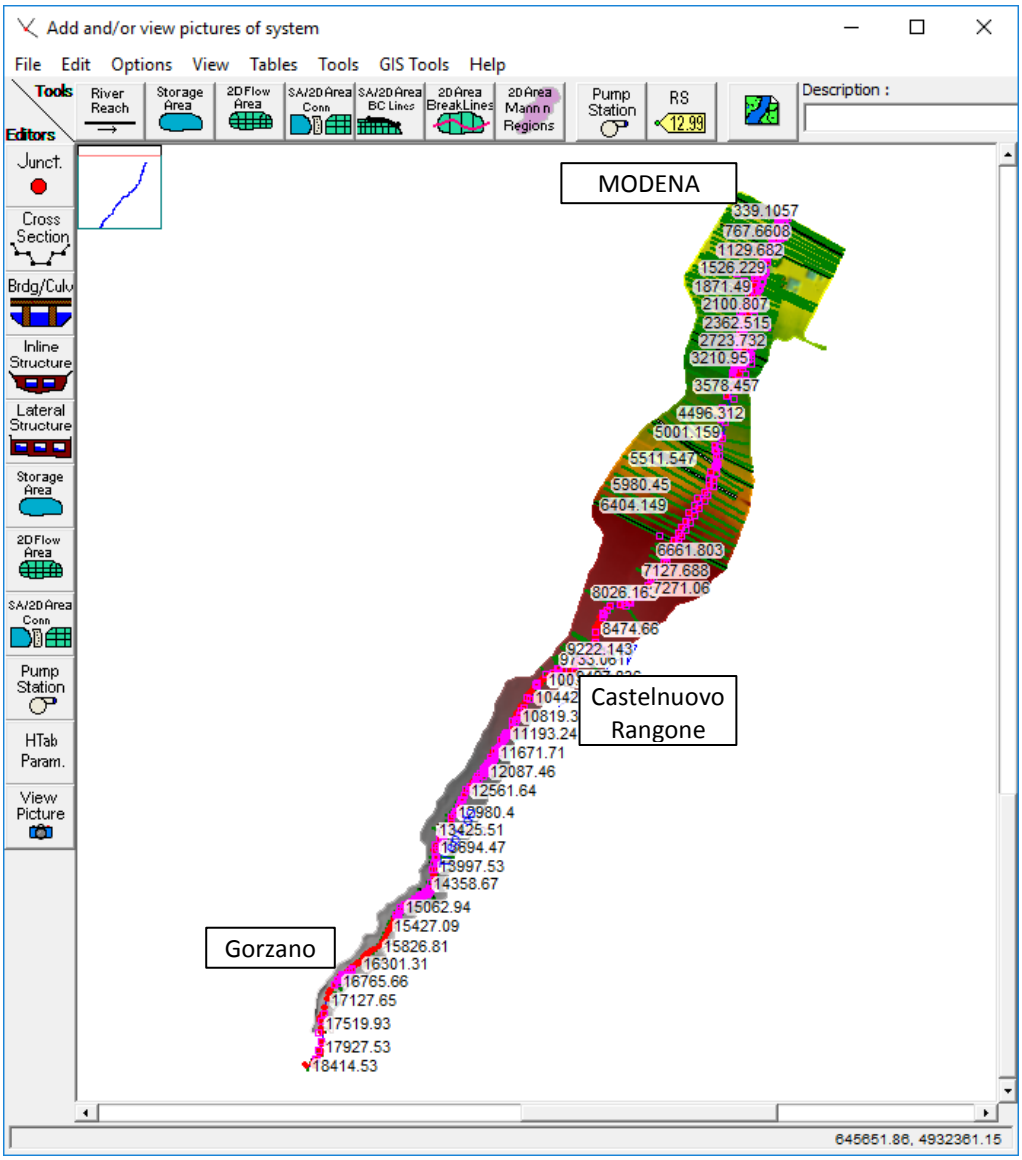


Figura 4.4 – Schema del modello idraulico implementato in HEC-RAS. Sullo sfondo, il DEM ottenuto da LiDAR.

4.1.2 Profilo longitudinale e manufatti interferenti

Il torrente Tiepido, nell'area di studio, presenta tratti con pendenza costante che diminuisce verso valle ed è interessato da 15 attraversamenti stradali e da 9 trasverse fluviali. Di seguito si riporta una descrizione dei manufatti idraulici principali interferenti con il torrente Tiepido. Tale inquadramento risulta necessario al fine di determinare le caratteristiche degli attraversamenti che possono influenzare il comportamento idraulico del torrente Tiepido, anche in maniera considerevole.

Di seguito si riportano alcune considerazioni relative al profilo longitudinale del torrente nei vari tratti omogenei con indicazione dei manufatti interferenti presenti, con le loro caratteristiche principali.

4.1.2.A Da Torre Maina a Gorzano

Nel tratto compreso tra Torre Maina e Gorzano il torrente ha una pendenza media del 1.4% ed è caratterizzato dalla presenza di diverse briglie. Le briglie poste a monte del ponte di Gorzano presentano dislivelli contenuti.

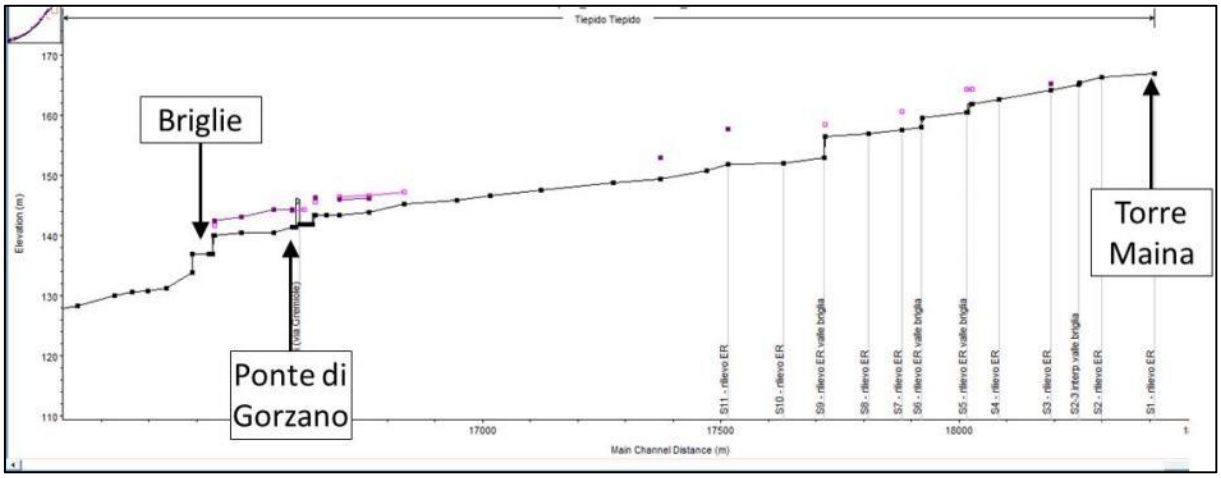


Figura 4.5 – Profilo longitudinale del Tiepido da Torre Maina fino alle briglie a valle del Ponte di Gorzano.

In corrispondenza dell'abitato di Gorzano, posto in sinistra idraulica, è presente un attraversamento stradale, lungo via Gremiole, sul quale è installato un idrometro (Figura 4.6), mentre a monte dell'attraversamento è presente una briglia in calcestruzzo che impone al fondo alveo un salto di circa 2.0 m (Figura 4.7).

Figura 4.6 – Stazione di misura idrometrica installata sull'attraversamento di via Gremiole.

Figura 4.7 – Briglia a monte del ponte di Gorzano.

Le briglie più importanti nel tratto, in termini di dislivello, sono le briglie poste a valle del ponte di Gorzano che complessivamente producono un salto di oltre 7 m. A valle della seconda briglia sono presenti i resti di una controbriglia, che è stata scalzata e distrutta dalle piene del torrente.

a) Vista delle due briglie da valle

b) Vista laterale della seconda briglia

c) Resti della controbriglia posta a valle

Figura 4.8 – Briglie a valle del ponte di Gorzano.

4.1.2.B Da Gorzano a Catelnuovo Rangone

A valle delle briglie che costituiscono un'importante discontinuità nel profilo longitudinale del torrente, la pendenza dello stesso risulta costante e pari a circa 0.95% fino alla briglia posta a valle del ponte sulla SP 16.

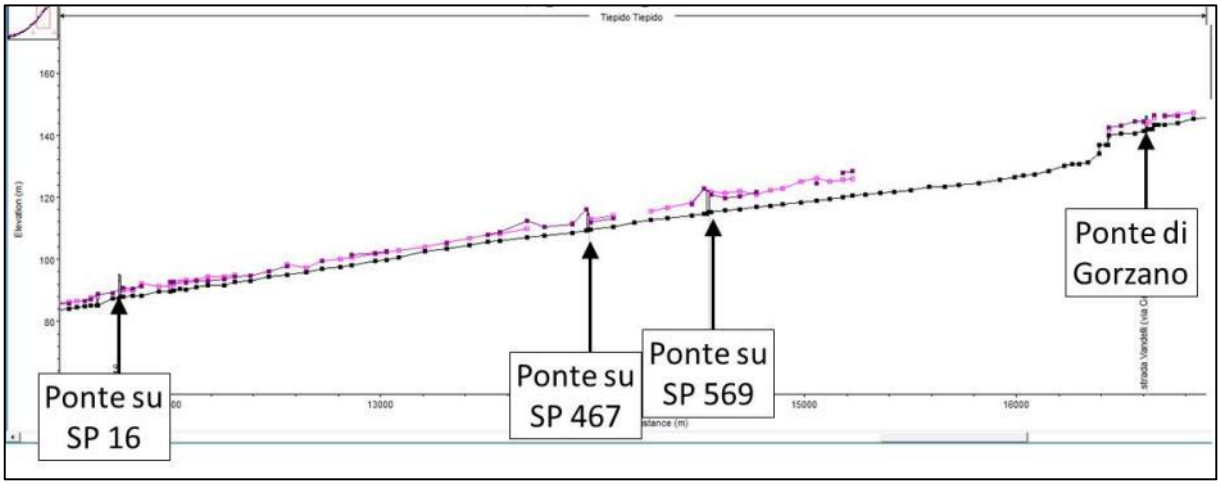


Figura 4.9 – Profilo longitudinale del Tiepido da Gorzano a Castelnuovo Rangone.

Gli attraversamenti presenti sono sufficientemente alti da far passare anche eventi di piena importanti.

L'attraversamento sulla SP 569 – via Claudia collega la località Ponte Rosa in destra idrografica alla località Pozza in sinistra. Il ponte risulta avere una quota di calpestio posta a circa 9 m al di sopra del fondo alveo.

L'attraversamento sulla SP 467 si trova a valle del ponte sulla SP 569 e permette la connessione tra Pozza e la zona industriale Ceramiche. La quota di calpestio del ponte è posta a circa 6.3 m dal fondo dell'alveo.

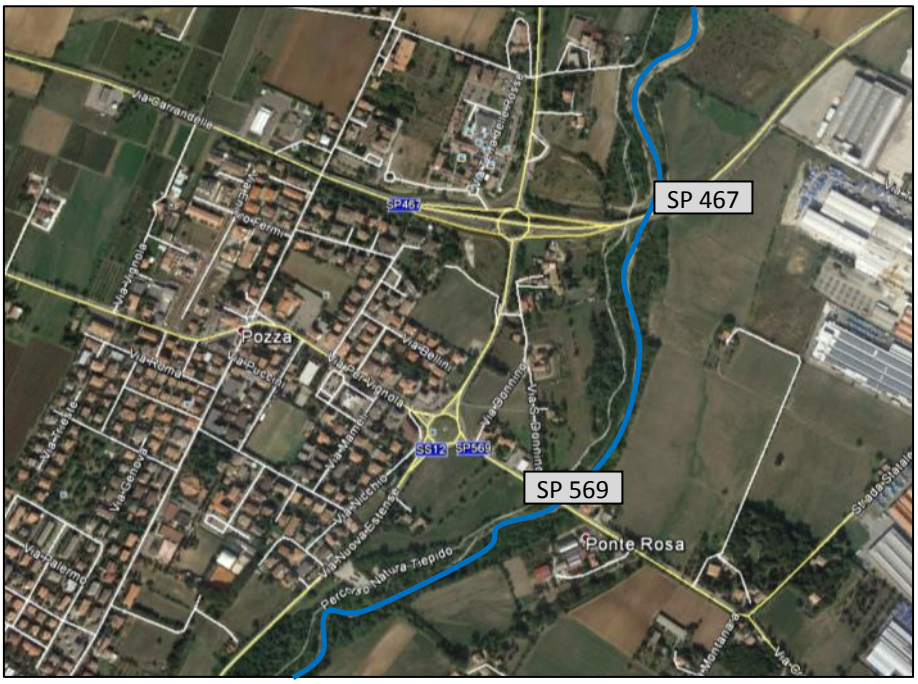


Figura 4.10 – Attraversamenti nei pressi di Pozza.

Immediatamente a monte dell'abitato di Castelnuovo Rangone sono presenti il ponte della SP 16 sul torrente Tiepido e, immediatamente a valle, una briglia di controllo (Figura 4.11). Il ponte della SP 16 sul torrente Tiepido è costituito da una serie di campate sorrette da pile (Figura 4.12). La differenza di quota tra il piano stradale e il fondo dell'alveo è di circa 7.4 m. La briglia di valle (Figura 4.13) impone un salto al torrente circa 2.6 m.

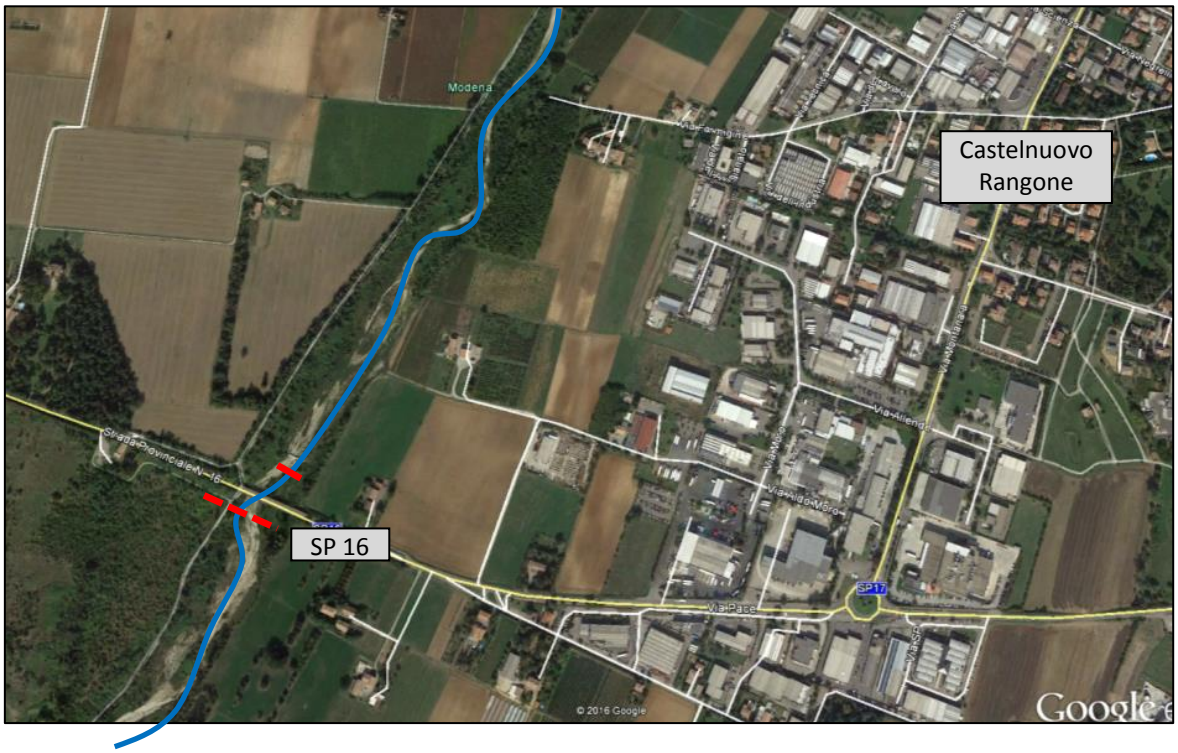


Figura 4.11 – Posizione del ponte della SP 16 (linea rossa tratteggiata) e della briglia (linea rossa continua).

Figura 4.12 – Attraversamento della SP 16 sul torrente Tiepido.

Figura 4.13 – Briglia a valle del ponte della SP 16.

4.1.2.C Da Castelnuovo Rangone fino all'autostrada A1

Tra l'attraversamento della SP 16 e il ponte sull'autostrada la pendenza media del torrente diminuisce assumendo un valore dello 0.7% nel tratto compreso tra la SP 16 e la SP 17 e dello 0.55% fino all'autostrada.

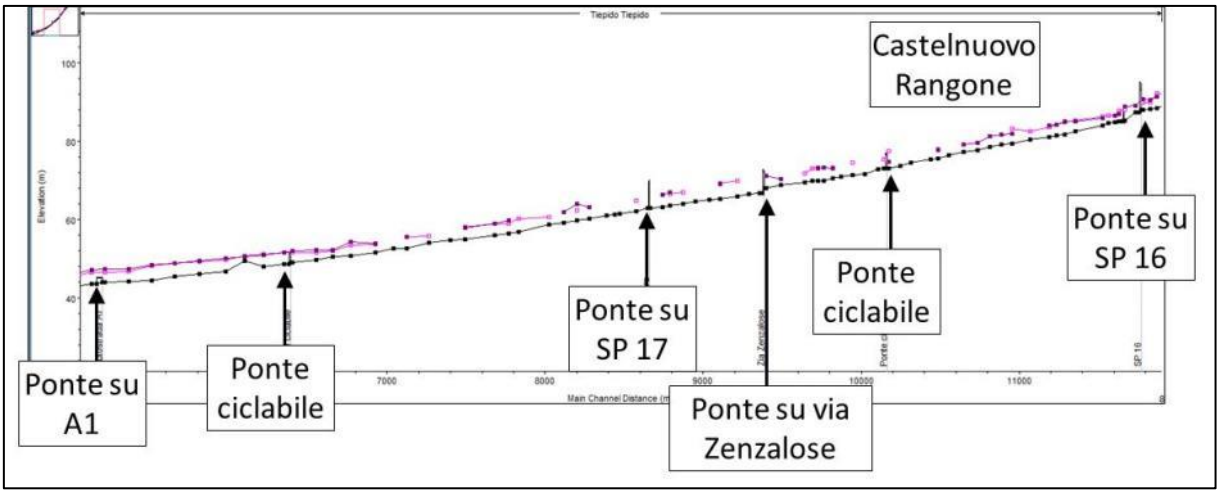


Figura 4.14 – Profilo longitudinale del Tiepido da Castelnuovo Rangone all'autostrada A1.

L'area in corrispondenza di Castelnuovo Rangone e l'area a monte dell'autostrada sono segnalate in bibliografia come aree critiche per le esondazioni del Tiepido.

In corrispondenza dell'abitato di Castelnuovo Rangone è presente un attraversamento ciclabile sul torrente Tiepido (Figura 4.15), che fa parte del Percorso Natura che costeggia un lungo tratto del torrente e che è costituito da un impalcato al di sopra del quale è presente una struttura reticolare. Il ponte è sorretto da quattro pile poste in area fluviale (Figura 4.16).

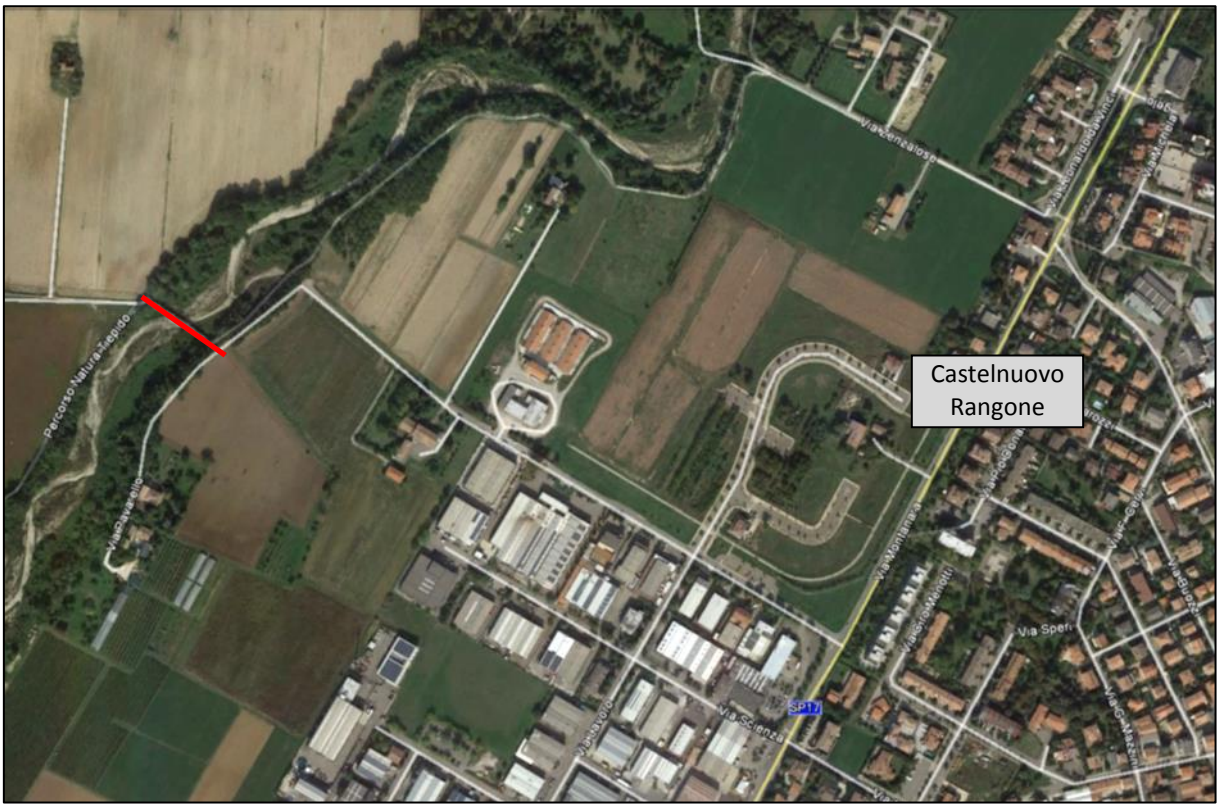


Figura 4.15 – Posizione dell'attraversamento ciclabile a Castelnuovo Rangone (linea rossa).

Figura 4.16 – Attraversamento ciclabile a Castelnuovo Rangone.

L'attraversamento di via Zenzalose, presso Castelnuovo Rangone, si trova a valle di due importanti meandri del torrente Tiepido. È costituito da un impalacato alto oltre 10 m rispetto al fondo alveo sorretto da una pila in alveo e una pila nella golena sinistra (Figura 4.17).

Figura 4.17 – Attraversamento di via Zenzalose.

4.1.2.D Attraversamento sulla SP 17 – via Montanara

A valle dell'abitato di Castelnuovo Rangone è presente l'attraversamento della SP 17 sul Tiepido, costituito da un ponte ad archi a tre campate e due pile in alveo (Figura 4.18). Si stima una luce delle pile pari a circa 5.5 m.

Figura 4.18 – Attraversamento sulla SP 17.

A monte dell'autostrada A1, presso la strada Cavedole, è presente un ponte ciclabile che presenta 6 pile in area golenale. Il Percorso Natura passa dalla sinistra idraulica a monte alla destra idraulica a valle del ponte.

Figura 4.19 – Ponte ciclabile a monte dell'autostrada A1.

L'attraversamento autostradale è costituito da due campate, di larghezza pari a circa 14 m, sorrette da una pila in alveo. Il deflusso avviene solamente attraverso la luce destra del ponte in quanto la luce sinistra appare compromessa da un consistente deposito di materiale trasportato dal torrente (Figura 4.20).

Figura 4.20 – Attraversamento sull'autostrada A1, visto da monte verso valle.

4.1.2.E Tratto da San Donnino a San Damaso

La pendenza del tratto che si estende dall'autostrada A1 fino alla briglia a monte della SP 623, posta in corrispondenza dell'abitato di San Damaso è di circa 0.3%.

A valle dell'autostrada sono presenti il ponte di San Donnino e il ponte ciclabile.

Il ponte sulla strada Gherbella a San Donnino (Figura 4.21) è notoriamente insufficiente al deflusso delle portata non solo di piena, ma anche di morbida del Tiepido. Il comune di Modena esegue periodicamente operazioni di taglio selettivo, sfalcio e sghiaiamento (Figura 4.22). Sul ponte è installato anche una stazione idrometrica (Figura 4.23).

Figura 4.21 – Attraversamento sulla strada Gherbella in località San Donnino.

Figura 4.22 – Manutenzione periodica dell'alveo a San Donnino.

Figura 4.23 – Idrometro installato sul ponte di via Gherbella.

A valle del ponte sulla strada Gherbella è presente il vecchio attraversamento della strada che è stato riconvertito ad attraversamento della pista ciclabile Modena – Vignola (Figura 4.24).

Figura 4.24 – Attraversamento ciclabile Modena - Vignola.

In corrispondenza della località di San Damaso è invece presente un passerella ciclopedonale (Figura 4.25) e una briglia che impone al torrente un salto di circa 2.5 m (Figura 4.26).

Figura 4.25 – Passerella ciclopedonale a San Damaso.

Figura 4.26 – Briglia a San Damaso.

4.1.2.F Tratto terminale da San Damaso alla confluenza

Nel tratto terminale, a partire dalla SP 623 il Tiepido assume una pendenza esigua (0.1% fino alla briglia a monte della Curtatona e poi ancora inferiore). In questo tratto il torrente risulta essere influenzato in maniera importante dal rigurgito del fiume Panaro, come evidenziato dall'analisi riportata al paragrafo 3.5.

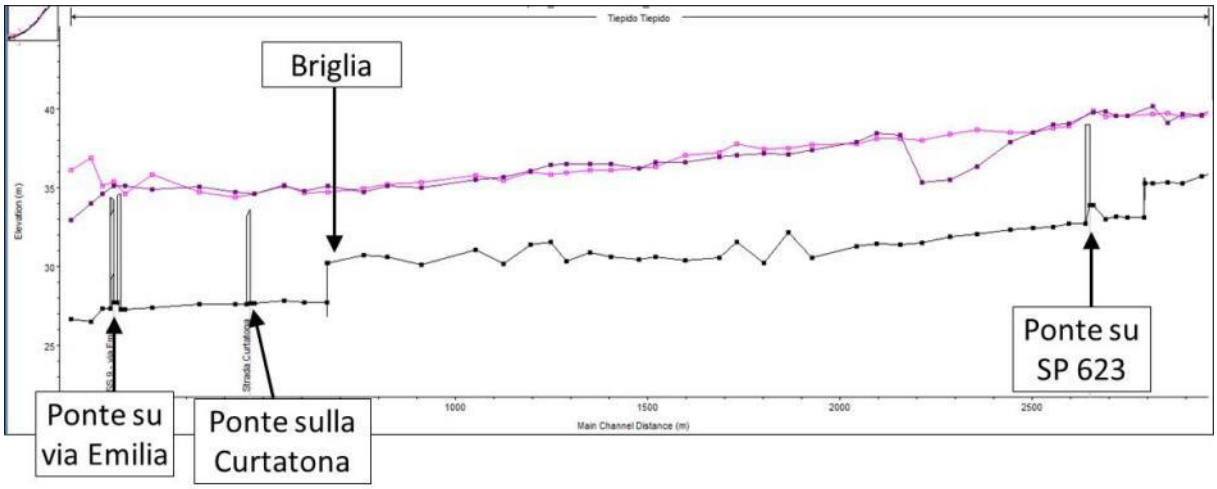


Figura 4.27 – Profilo longitudinale del Tiepido da San Damaso alla SS 9 – via Emilia.

Il ponte sulla SP 623 è costituito da un ponte ad arco di larghezza pari a circa 12 m (Figura 4.28).

Figura 4.28 – Attraversamento sulla SP 623 – strada Collegara.

A monte della strada Curtatona, in corrispondenza del lago posto in destra idraulica è presente una briglia a scatola (Figura 4.29), che impone al fondo dell'alveo un salto di circa 2.5 m.

Figura 4.29 – Briglia a scatola a monte della strada Curtatona.

Sulla strada Curtatona è presente un attraversamento (Figura 4.30) che per la propria geometria e altimetria risulta critico poiché viene spesso chiuso per ragioni di sicurezza in quanto sormontato dalle acque. Dalle informazioni ottenute dalla Protezione Civile il ponte è stato infatti chiuso 15 volte nel periodo compreso tra il 2005 e il 2016 (paragrafo 3.5).

Figura 4.30 – Attraversamento sulla strada Curtatona.

A valle del ponte sulla Curtatona è presente la confluenza con il torrente Grizzaga, il quale nel tratto compreso tra la strada Curtatona e la SS 9 – Via Emilia presenta in sinistra idrografica una difesa arginale continua, realizzata negli anni Settanta, di circa 2.0 – 2.5 m rispetto al piano campagna.

A monte della via Emilia è presente un attraversamento ciclopedonale ad unica campata (Figura 4.31).

Figura 4.31 – Attraversamento ciclopedonale a monte della via Emilia.

Il limite dell'area di studio è costituito dall'attraversamento di via Emilia, costituito da un ponte su tre archi (Figura 4.32). Il deflusso attraverso il ponte avviene solamente attraverso la luce centrale mentre le luci laterali risultano ostruite da sedimenti trasportati dal torrente.

Figura 4.32 – Attraversamento della SS 9 – via Emilia sul torrente Tiepido.

4.1.3 Scabrezza

Nell'alveo è stato imposto un valore di scabrezza pari a 0.04, eccetto che in tratti soggetti a manutenzione periodica (San Donnino) dove si è scelto un valore di 0.035, mentre nelle aree golenali è stato imposto un valore di 0.06.

4.1.4 Portate e condizioni al contorno

Le portate di progetto sono state considerate variabili lungo l'asta del Tiepido, per tenere conto nello stato di fatto di fenomeni di propagazione e di laminazione degli eventi di piena, e sono state ricavate dallo studio dell'Autorità di Bacino (1996, paragrafo 3.3.1). I tempi di ritorno considerati sono: 20, 100 e 200 anni

Mediante il modello monodimensionale si vuole analizzare il comportamento idraulico del torrente Tiepido a seguito del verificarsi di piene con diversi tempi di ritorno, definiti in 20, 100 e 200 anni.

Le condizioni di valle sono scelte quindi al fine di analizzare il comportamento del torrente quando questo sia libero di scaricare a valle o al massimo leggermente rigurgitato.

Pertanto sono state condotte delle simulazioni considerando due condizioni di valle:

- Scenario 1 (senza effetto del Panaro): si considera un livello idrometrico pari al livello di piene rive nella sezione del Panaro in corrispondenza della confluenza (Figura 4.33);
- Scenario 2 (Panaro in piena con TR inferiore a 50 anni): si considera un livello idrometrico di 1 m inferiore al livello calcolato nel Panaro per un evento con tempo di ritorno di 50 anni.

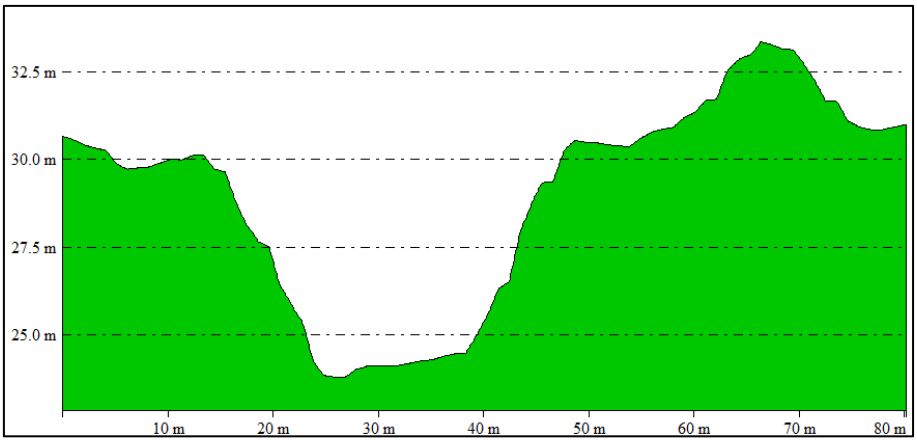


Figura 4.33 – Sezione trasversale del fiume Panaro immediatamente a monte della confluenza con il torrente Tiepido.

Tabella 4.I – Livelli idrometrici del fiume Panaro utilizzati come condizione al contorno di valle nel modello idraulico 1D.

Scenario	***Livello imposto a valle [ms.m.m.]***
Senza Panaro	30.50
Panaro in piena (Tr<50anni)	33.79

La condizione in cui il Panaro risulta in piena con un livello corrispondente alla portata scaricata a valle dalla cassa di espansione di Sant'Anna per un tempo di ritorno di 50 anni, pari a 34.79 m s.m.m., è stato analizzato mediante modellazione bidimensionale, la cui implementazione viene trattata nel capitolo successivo.

Questa modellazione permette di evidenziare in maniera più corretta le criticità generate dal rigurgito del Panaro nel tratto terminale del torrente Tiepido e del torrente Grizzaga.

4.1.5 Validazione del modello

Il modello nello stato di fatto è stato validato considerando il profilo di piena presente nel PGRA per Tr 200 anni.

Il grafico di sovrapposizione dei due profili mostra un sostanziale buon adattamento del profilo del modello implementato con quello ottenuto nell'ambito della redazione del PGRA (Figura 4.34).

Si è inoltre validata la scelta dei coefficienti di scabrezza confrontando la scala delle portate nella sezione del ponte di San Donnino sulla strada Gherbella, fornita da ARPA Emilia Romagna, con la scala delle portate ottenuta dal modello idraulico (Figura 4.35).

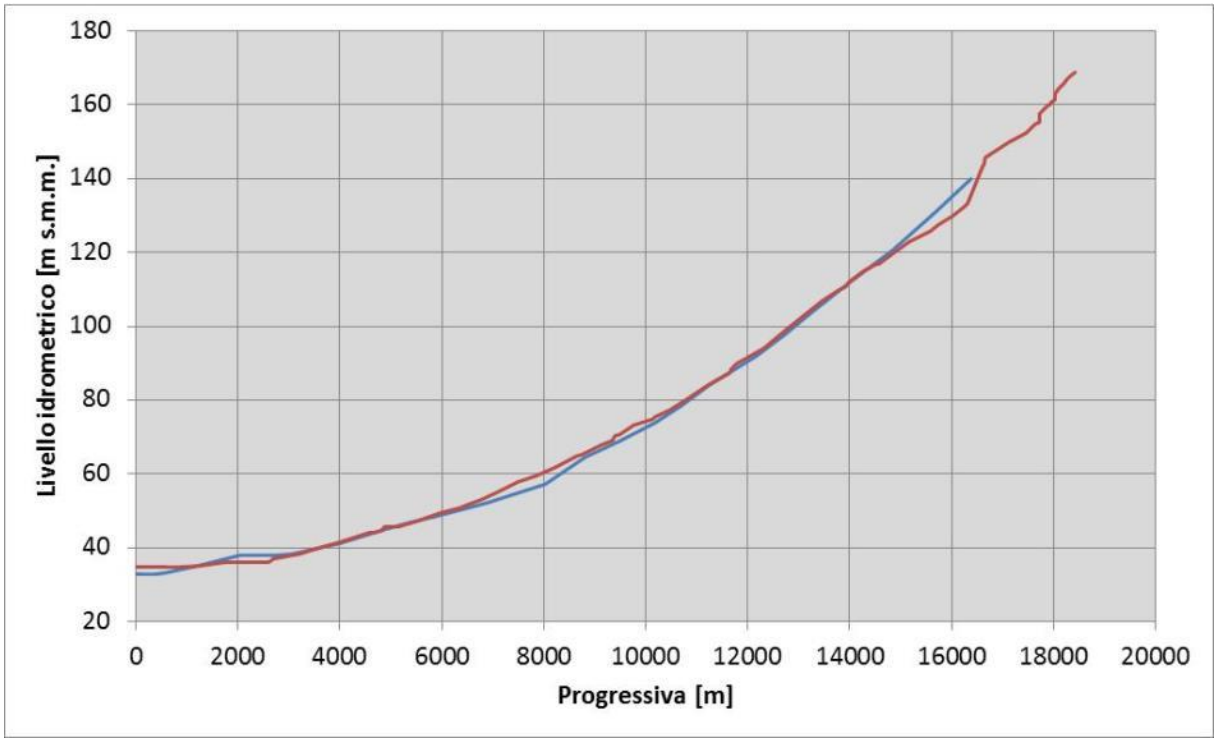


Figura 4.34 – Confronto del profilo del Tiepido per un evento con Tr 200 anni: in blu I risultati del PGRA e in rosso quelli del presente studio .

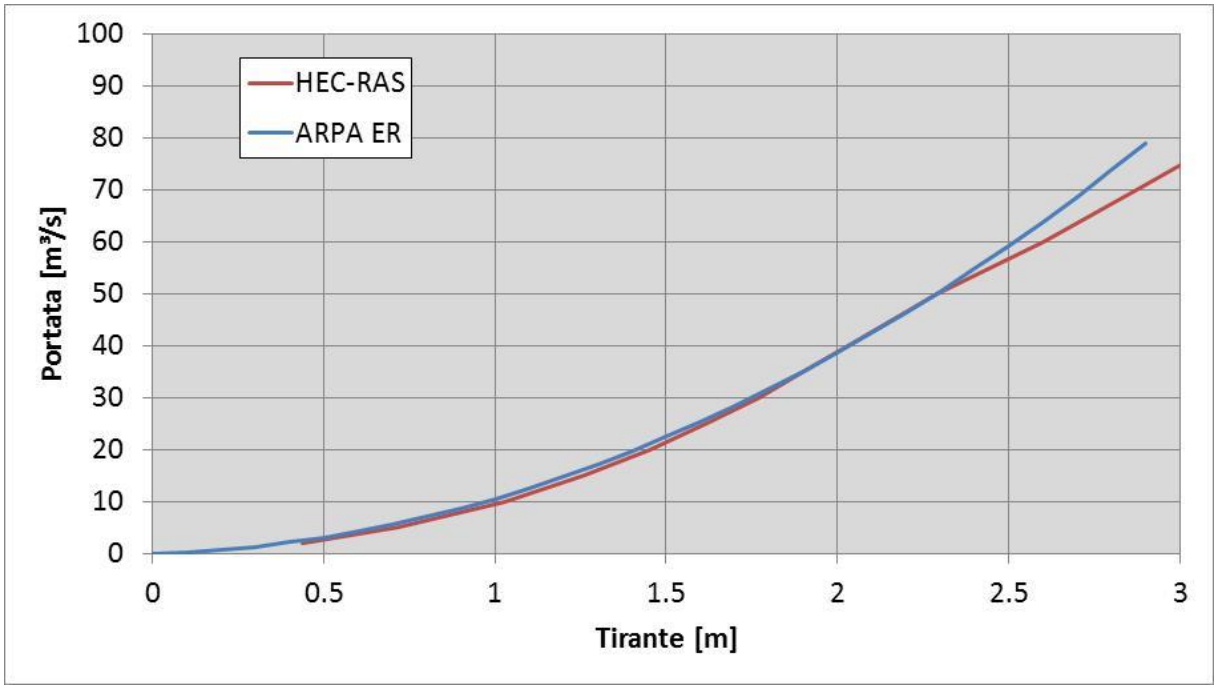


Figura 4.35 – Scala delle portate presso la stazione di San Donnino misurata (ARPA ER – linea blu) e calcolata dal modello idraulico HEC-RAS (linea rossa).

4.1.6 Analisi dell'effetto di rigurgito dovuto ai livelli in Panaro

Al fine di definire il tratto di Tiepido, a partire dalla confluenza, da modellare mediante il modello bidimensionale, al fine di tenere conto del rigurgito dovuto al fiume Panaro in piena, si è valutato l'effetto del rigurgito nei livelli idrometrici del Tiepido mediante il modello 1D. In particolare, è stato modellato un evento di piena del torrente con tempo di ritorno di 200 anni, considerando tre condizioni di valle:

- livello Panaro 1 m sotto i TR 50
- livello Panaro TR 50
- livello Panaro TR 200

I risultati sono riportati in Figura 4.36.

Gli effetti del rigurgito del Panaro sul comportamento idraulico del fiume Tiepido si esauriscono alla sezione 2664 del modello, nella condizione più gravosa di Panaro in piena e Tiepido in piena con evento TR 200 anni. La sezione 2664 corrisponde alla sezione a monte dell'attraversamento sulla SP 623, dove è presente una soglia che scollega il comportamento idraulico di monte alle condizioni di valle.

Nel caso si attuasse la gestione ottimale delle casse di espansione di Sant'Anna poste a monte della confluenza del Tiepido, l'effetto di rigurgito si sentirebbe indicativamente per circa 1 km dal ponte sulla via Emilia.

Da queste analisi si considera di utilizzare il modello idraulico 2D a partire dalla sezione in corrispondenza dell'attraversamento sulla SS623, in località San Damaso.

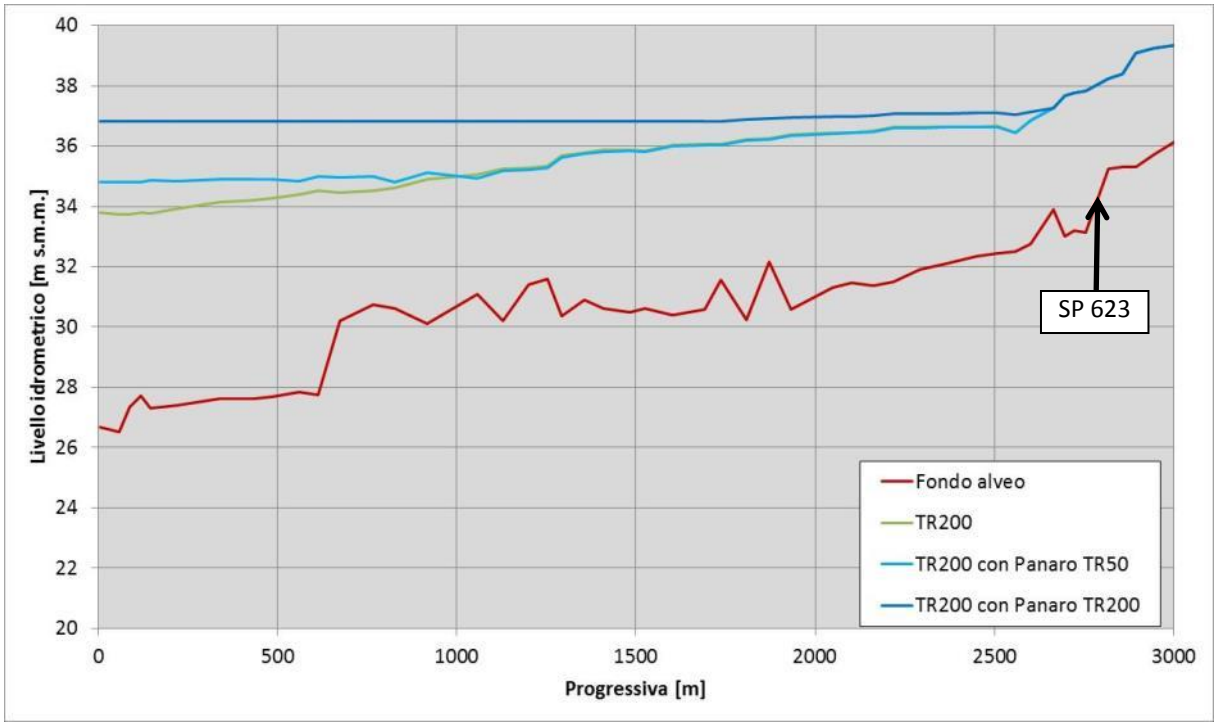


Figura 4.36 – Confronto tra i profili longitudinali del tratto terminale del Tiepido nelle tre configurazioni.

4.2 Studio idraulico 2D

Gli studi pregressi e l'analisi condotta al paragrafo 3.5 hanno evidenziato che il tratto terminale del torrente Tiepido è fortemente influenzato dal livello nel fiume Panaro.

L'analisi combinata degli eventi di piena recenti verificatisi sul Tiepido e sul Panaro ha evidenziato che la chiusura della strada Curtatona è avvenuta sempre a causa dei livelli instauratisi nel Panaro, piuttosto che per le portate di piena in arrivo dal Tiepido.

Da queste considerazioni si è evidenziata la necessità di studiare il tratto terminale del Tiepido implementando un modello idraulico 2D a moto vario con il software HEC-RAS, al fine di evidenziare anche le criticità idrauliche legate al rigurgito del Panaro.

4.2.1 Geometria

Il modello si estende dall'attraversamento sulla SP 623 a San Damaso fino a valle del ponte di via Emilia (Figura 4.37) e si basa sul DTM 1mx1m ottenuto dal rilievo LiDAR. Il modello considera il sistema fluviale nell'area della confluenza del torrente Tiepido con il fiume Panaro. Nell'area è presente anche la confluenza del Tiepido con il Grizzaga e poco più a monte la confluenza del torrente Grizzaga con il torrente Gherbella

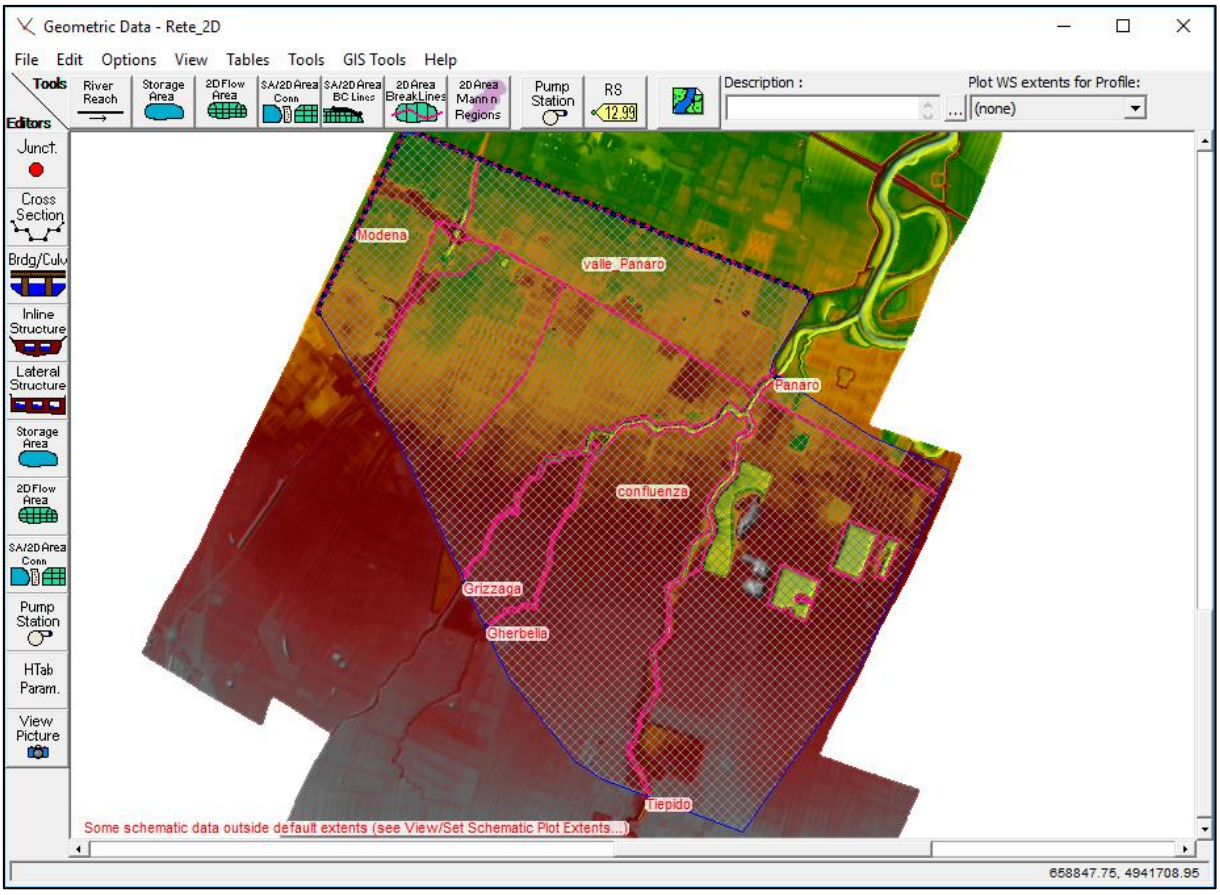


Figura 4.37 – Geometria del modello bidimensionale implementato.

4.2.2 Portate e condizioni al contorno

Il modello richiede l'inserimento dell'idrogramma di progetto in corrispondenza degli attraversamenti della SP 623 – via Vignolese dei torrenti Tiepido, Grizzaga e Gherbella.

L'idrogramma del torrente Tiepido è stato ricavato, per i tempi di ritorno di 20, 100 e 200 anni, dall'idrogramma calcolato dalla modellazione dello studio dell'Autorità di Bacino (1996) presso San Damaso.

Gli idrogrammi del Grizzaga e del Gherbella, per gli stessi tempi di ritorno, sono stati ottenuti scalando l'idrogramma unitario calcolato a San Damaso (AdB, 1996) con dei colmi di piena calcolati per differenza tra il picco di piena del Tiepido a San Damaso e alla confluenza con il Panaro.

Gli idrogrammi di input per il tempo di ritorno di 200 anni sono riportati in Figura 4.38.

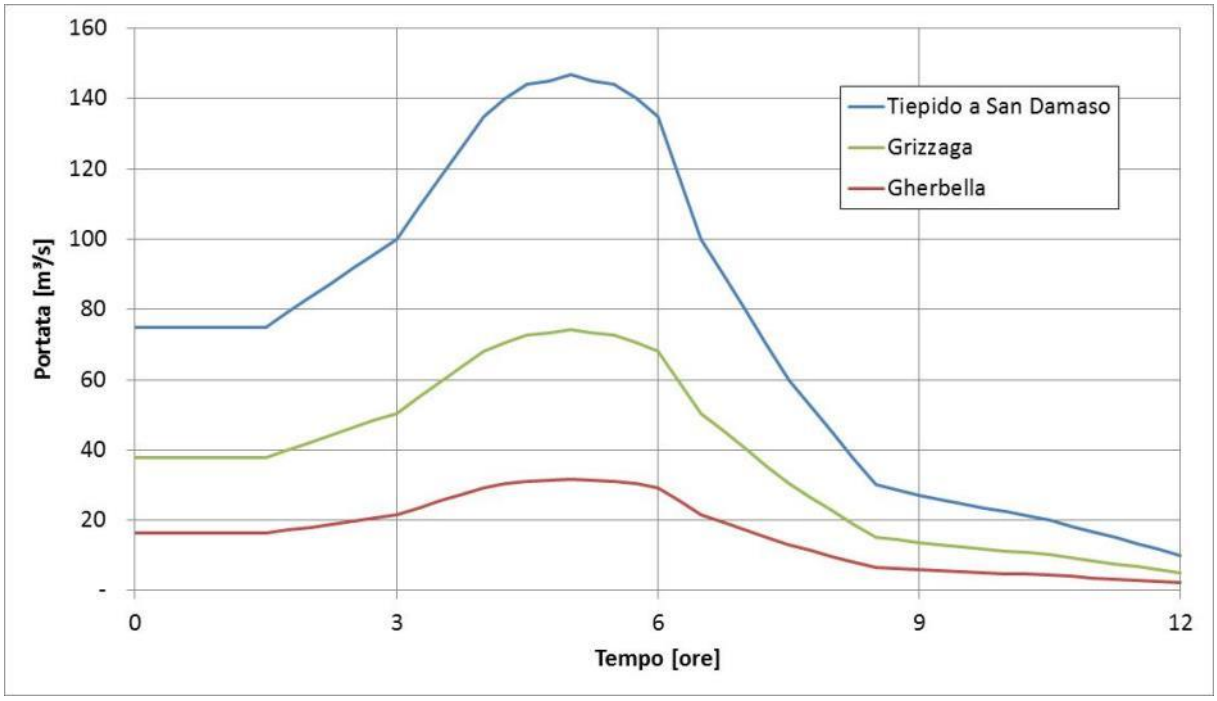


Figura 4.38 – Idrogramma in ingresso al modello 2D –Tr = 200 anni.

Come condizione di valle si è imposto il livello del fiume Panaro in condizioni di piena per un evento con tempo di ritorno di 50 anni. La cassa di espansione di Sant'Anna, posta a monte della confluenza con il torrente Tiepido, si suppone che, per l'evento considerato, scarichi una portata massima di 525 m³/s, che generano un livello presso la confluenza tra Panaro e Tiepido pari a 34.79 ms.m.m., secondo i risultati ottenuti dal Progetto di adeguamento del sistema arginale del f. Panaro (2017). Si sceglie di considerare il solo tempo di ritorno di 50 anni in analogia col Progetto analizzato e considerando la possibilità di una gestione ottimale della cassa di Sant'Anna, che prevede la gestione dell'invaso in relazione non solo alle portate in arrivo dal fiume Panaro ma anche dal torrente Tiepido. La gestione ottimale della cassa, come prospettata nel Progetto suddetto, permetterebbe di scaricare una portata massima di 525 m³/s anche per i tempi di ritorno di 100 e 200 anni.

Le simulazioni considerano i seguenti scenari:

- Piena del Panaro (Tr = 50 anni) e nessun contributo del sistema Tiepido-Grizzaga-Gherbella
- Piena del Panaro (Tr = 50 anni) e piena del Tiepido con Tr = 200 anni

4.2.3 Validazione del modello 2D

È stato simulato uno scenario di allagamento dovuto al livello di piena del Panaro con tempo di ritorno di 50 anni, senza inserire apporti del Tiepido e del Grizzaga – Gherbella.

I risultati ottenuti dalla simulazione sono stati confrontati con quelli ottenuti dal Progetto di adeguamento del sistema arginale del f. Panaro (2017). Dal confronti è possibile evidenziare che i risultati ottenuti sono analoghi. Tuttavia, un'analisi approfondita del DTM ha evidenziato alcuni "buchi" lungo l'argine del torrente Grizzaga. È stato verificato mediante riscontro con gli enti competenti che l'argine del Grizzaga è un argine continuo a partire dalla strada Curtatona fino alla via Emilia. Questi errori del DTM, giustificabili con una non corretta classificazione dei punti del rilievo laseraltimetrico, sono stati corretti ipotizzando un andamento lineare della quota arginale nei tratti ove si evidenziano tali errori.

I risultati ottenuti con il DTM corretto sono riportati al paragrafo 5.4.6.B.

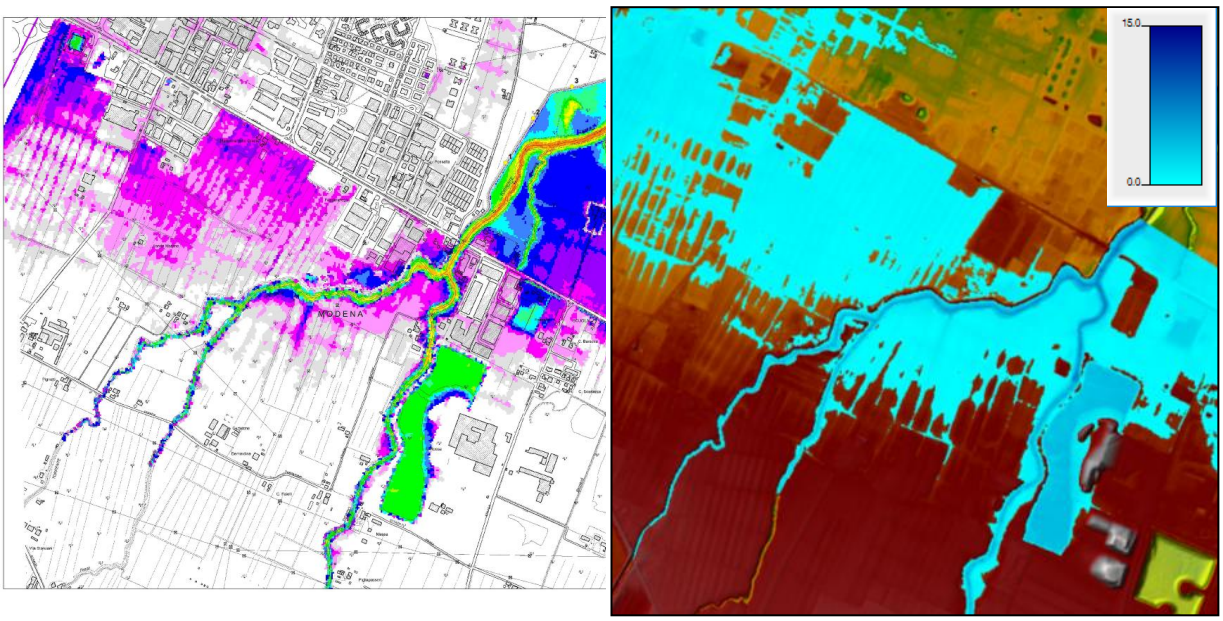


Figura 4.39 - Confronto tra i risultati ottenuti nel Progetto di adeguamento del sistema arginale del f. Panaro (2017) e nel presente studio.

5. Risultati ottenuti e analisi delle criticità nello stato di fatto

Dalle modellazioni idrauliche sono stati ottenuti profili longitudinali e le caratteristiche del moto nelle sezioni trasversali (livello, velocità, numero di Froude ecc.) per i tempi di ritorno considerati (20, 100 e 200 anni) e nelle varie configurazioni del Panaro prese in considerazione (paragrafi 4.1.4 e 4.2.2).

5.1 Determinazione della pericolosità idraulica

La determinazione della pericolosità è stata effettuata seguendo lo schema logico definito dal PGRA, nel quale si prevede per il reticolo principale RP a cui appartiene anche il torrente Tiepido la suddivisione nelle classi di pericolosità secondo la definizione riportata in Figura 5.1.

Direttiva Alluvioni		Pericolosità
Scenario	Tempo di ritorno	
Aree allagabili – scenario frequente Elevata probabilità di alluvioni (H = high)	20-50 anni (frequente)	P3 elevata
Aree allagabili – scenario poco frequente Media probabilità di alluvioni (M = medium)	100-200 anni (poco frequente)	P2 media
Aree allagabili – scenario raro Scarsa probabilità di alluvioni o scenari di eventi estremi (L = low)	500 anni o massimo storico registrato	P1 bassa

Figura 5.1 – Classi di pericolosità secondo il PGRA.

Tale definizione è stata adattata al nostro caso di studio adottando le opportune modifiche alla definizione di pericolosità (Tabella 5.I).

Tabella 5.I – Classi di pericolosità utilizzate nel presente studio per l'analisi idraulica.

Scenario	*Tempo di ritorno*	*Pericolosità*
Aree allagabili – scenario frequente	20	P3 elevata
Aree allagabili – scenario poco frequente	100	P2 media
Aree allagabili – scenario raro	200	P1 bassa

5.2 Determinazione della vulnerabilità

Per la valutazione della vulnerabilità cui è soggetto il territorio si è fatto ricorso alle metodologie proposte nell'ambito del PGRA del fiume Po.

Per la redazione delle mappe della vulnerabilità, secondo quanto riportato nelle procedure di cui al PGRA, si sono analizzati:

- carta dell'uso del suolo;
- mappatura degli elementi esposti.

Quindi si è fatto ricorso alla classificazione riportata in Figura 5.2 dove viene riportata una classificazione del danno a peso variabile a seconda dell'importanza, dando i pesi maggiori alle classi riconducibili ad una presenza antropica costante sul territorio, considerando un'aggregazione in classi degli elementi espost

CLASSE D4	
1111	Tessuto residenziale denso
1112	Tessuto residenziale continuo mediamente denso
1121	Tessuto residenziale discontinuo
1122	Tessuto residenziale rado e nucleiforme
1123	Tessuto residenziale sparso
11231	Cascine
1424	Aree archeologiche
12122	Impianti di servizi pubblici e privati
12111	Insediamenti industriali, artigianali, commerciali
12112	Insediamenti produttivi agricoli
12121	Insediamenti ospedalieri
12123	Impianti tecnologici
1222	Reti ferroviarie e spazi accessori
123	Aree portuali
12125	Aree militari obliterate
124	Aeroporti ed eliporti
1421	Impianti sportivi
1423	Parchi divertimento
1422	Campeggi e strutture turistiche e ricettive

CLASSE D3	
133	Cantieri
12124	Cimiteri
132	Discariche
131	Cave
2113	Colture orticole
2114	Colture floro-vivaistiche
2115	Orti familiari

Reti stradali	
D4	Reti primarie: autostrade, strade statali/regionali, strade provinciali
D3	Reti secondarie: strade comunali

CLASSE D2	
211	Seminativi
1411	Parchi e giardini
221	Vigneti
222	Frutteti e frutti minori
223	Oliveti
3114	Castagneti da frutto
213	Risaie
2313	Marcite
1412	Aree verdi incolte
2241	Pioppeti
2242	Altre legnose agrarie

Elementi esposti puntuali	Danno
Beni culturali vincolati	D4
Immobili e aree di notevole interesse pubblico	D4
Impianti allegato I del D.L. 59/2005	D4
Aree protette per estrazione acqua a uso idropotabile	D4
Strutture ospedaliere	D4
Scuole	D4
Dighe	D4
Depuratori	D3
Inceneritori	D3

CLASSE D1	
134	Aree degradate non utilizzate e non vegetate
231	Prati permanenti in assenza di specie arboree ed arbustive
311	Boschi di latifoglie
312	Boschi conifere
313	Boschi misti
314	Rimboschimenti recenti
331	Spiagge, dune ed alvei ghiaiosi
321	Praterie naturali d'alta quota
322 - 324	Cespuglieti
332	Accumuli detritici e affioramenti litoidi privi di vegetazione
333	Vegetazione rada
411	Vegetazione delle aree umide interne e delle torbiere
3113	Formazioni ripariali
3222	Vegetazione dei greti
3223	Vegetazione degli argini sopraelevati
511	Alvei fluviali e corsi d'acqua artificiali
5121	Bacini idrici naturali
5123	Bacini idrici da attività estrattive interessanti la falda
5122	Bacini idrici artificiali
335	Ghiacciai e nevi perenni

Figura 5.2 – Classificazione del danno secondo PGRA.

Il risultato della mappatura della vulnerabilità, di cui in Figura 5.3 si riporta uno stralcio, è rappresentato nell'Elaborato n. 4.2: "Carta della vulnerabilità".

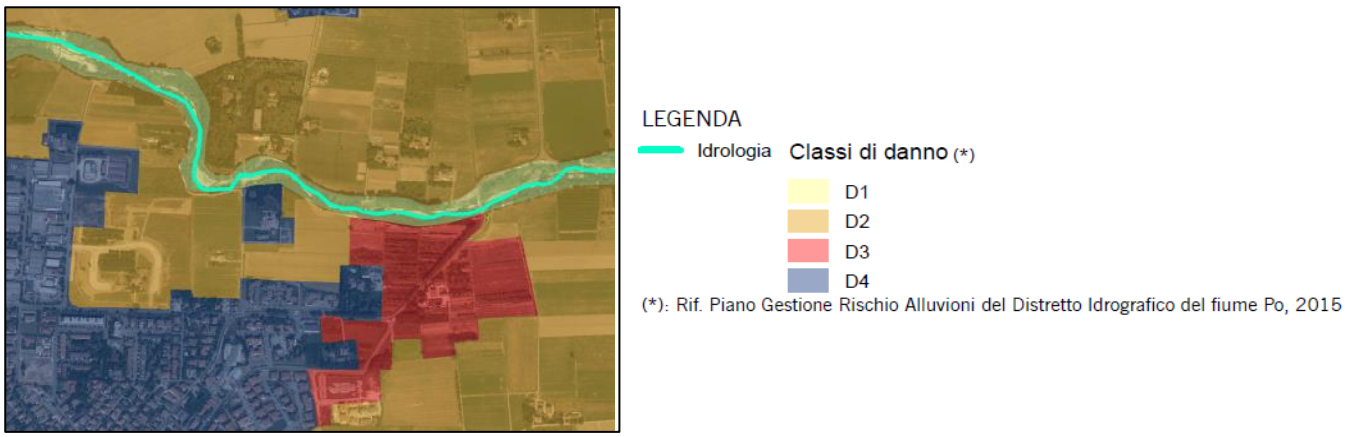


Figura 5.3 – Stralcio della Carta della vulnerabilità.

5.3 Carta della pericolosità

Dalla sovrapposizione della pericolosità e della vulnerabilità sono state elaborate le mappe della pericolosità idraulica di cui si riporta uno stralcio in Figura 5.4. Le cartografie si sono rivelate di estrema importanza per la determinazione delle criticità idrauliche lungo l'asta fluviale.

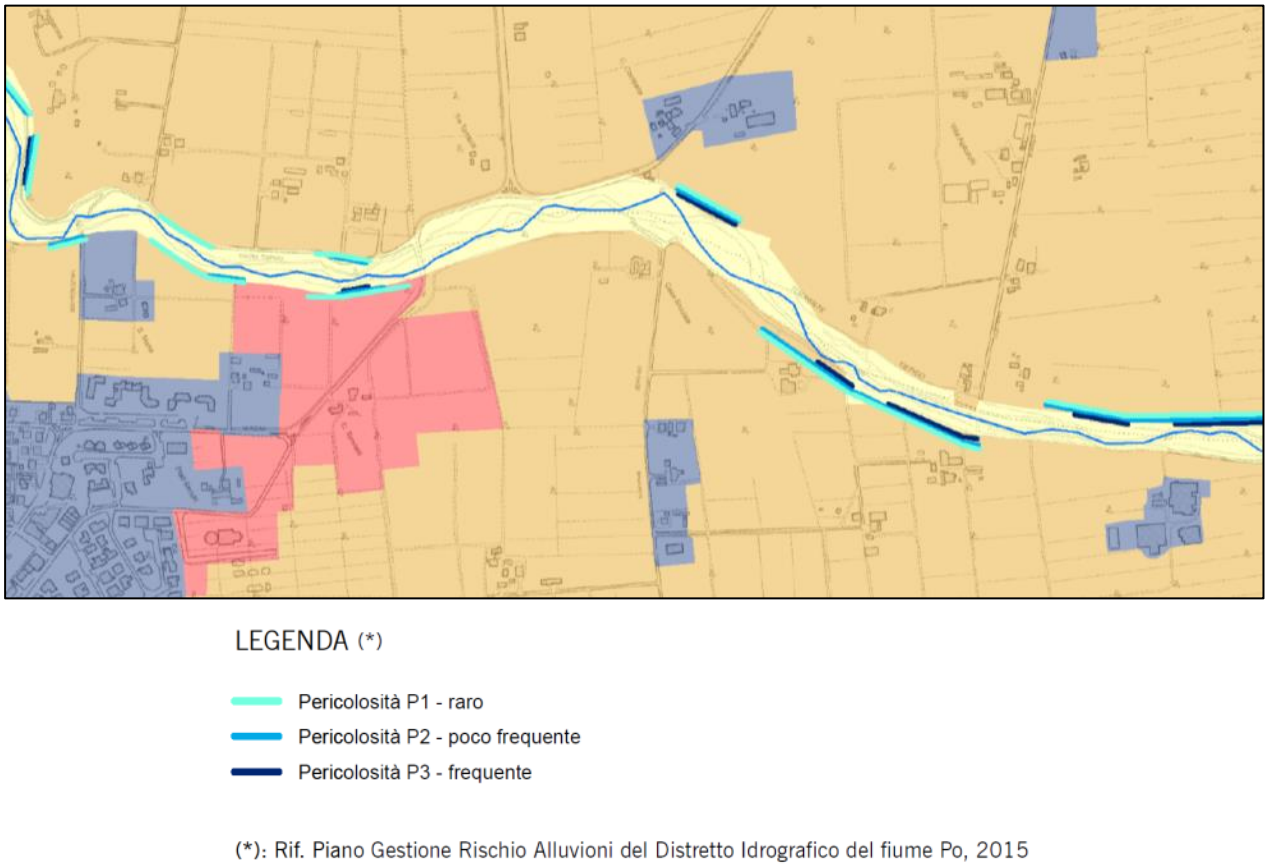


Figura 5.4 – Stralcio della Carta della pericolosità idraulica – Stato di fatto.

Di seguito si riportano alcune considerazioni sulle mappe di pericolosità idraulica:

- le mappe riportano informazioni sull'estensione delle aree inondabili per i diversi tempi di ritorno, ma non contengono ancora indicazioni rispetto alle altezze e alle velocità né valutazioni specifiche sulle dinamiche di allagamento conseguenti a rotture arginali;
- nel caso specifico, non essendovi argini, la mappatura segue il limite dell'esondazione;
- il confronto con la mappatura PGRA (PAI) presenta risultati comparabili.

Dai risultati delle simulazioni idrauliche è possibile effettuare, seppur in maniera qualitativa, la mappatura delle aree allagabili a seguito delle esondazioni del torrente Tiepido per i vari eventi considerati (Tr 20, 100 e 200 anni).

5.4 Analisi delle criticità idrauliche

Ai fini dell'identificazione delle maggiori criticità sono stati presi in considerazione:

- risultati del modello idraulico;
- mappatura della pericolosità;
- segnalazioni circa alcune criticità locali;
- informazioni desunte dallo stato dei luoghi (rilievi, sopralluoghi,…).

Le criticità sono state riassunte lungo l'intera asta e rappresentate nell'Elaborato n. 4.4: "Carta delle criticità", di cui si riporta un estratto in Figura 5.5. È stato fatto anche un confronto tra le criticità segnalate e quelle desunte dall'applicazione idraulica.

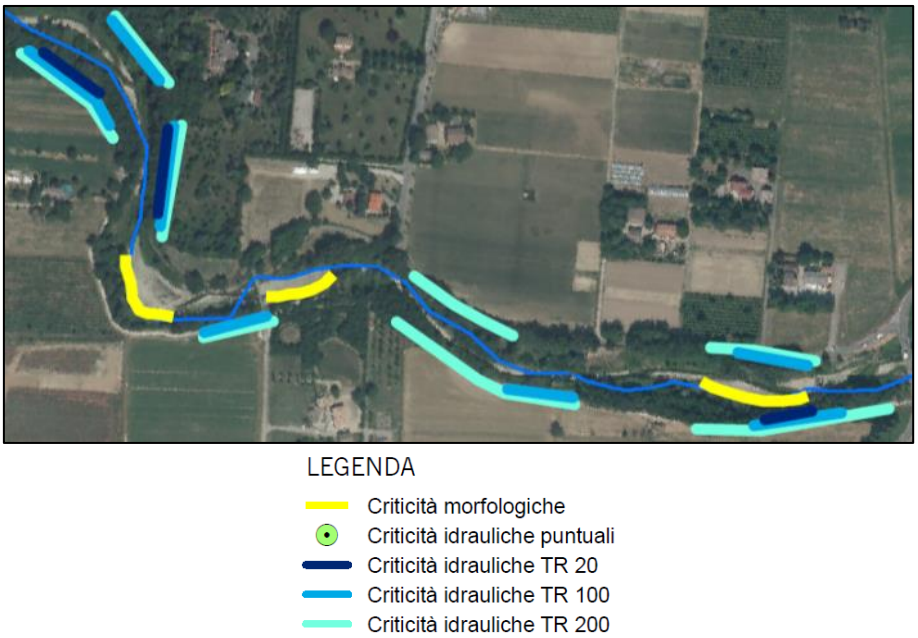


Figura 5.5 – Stralcio della carte delle criticità.

Le criticità di suddividono in criticità idrauliche puntuali, dovute per esempio alla presenza di attraversamenti insufficienti o di edifici a forte rischio esondazione, e criticità idrauliche lineari, legate alle insufficienze di sponda del torrente, suddivise per pericolosità crescente in funzione degli eventi analizzati.

Per facilitare l'analisi e l'individuazione degli interventi il corso d'acqua è stato suddiviso in diversi tratti, di lunghezza limitata, al fine di proporre soluzioni che possono dare risposta alle varie criticità.

In particolare, i tratti sono definiti come segue:

A. Torre Maina – Gorzano: dal ponte di Torre Maina fino alle briglie a valle del ponte

B. Pozza fino alla SP 16: dalle briglie a valle del ponte di Gorzano fino alla SP 16, a monte di Castelnuovo Rangone

C. Castelnuovo Rangone: dalla SP 16 fino al ponte ciclabile a valle di Castelnuovo Rangone

D. Autostrada A1 – San Donnino: dal ponte ciclabile fino a valle degli attraversamenti a San Donnino

E. San Damaso: a partire da valle di San Donnino fino alla SP 623

F. SP 623 – via Emilia: tratto terminale del torrente dalla SP 623 fino a valle del limite di competenza individuato dalla SS 9 – Via Emilia.

Figura 5.6 – Suddivisione del torrente Tiepido in tratti ai fini dell'analisi delle criticità.

Di seguito si riportano quindi i risultati ottenuti dalle simulazioni idrauliche e l'analisi delle criticità evidenziate dagli stessi.

5.4.1 Tratto A: da Torre Maina a Gorzano

Dalla planimetria delle criticità (Figura 5.7), il comportamento idraulico del torrente è influenzato dalla presenza della briglia a monte del ponte di Gorzano, che ha un effetto di innalzamento del livello. Nell'area si evidenzia l'allagamento di un'area in destra idraulica in prossimità di fabbricati civili. L'area è soggetta ad allagamenti anche per tempi di ritorno bassi (TR 20 anni) e può essere considerata come area golenale del torrente, come evidenziato dalla Figura 5.8 che rappresenta la sezione trasversale in corrispondenza dei fabbricati. Dall'immagine si evidenzia anche che, in sinistra idraulica, a monte dell'incrocio tra via Gremiole e via Nuova Estense, il franco di sicurezza per un evento con TR 200 anni viene praticamente annullato.

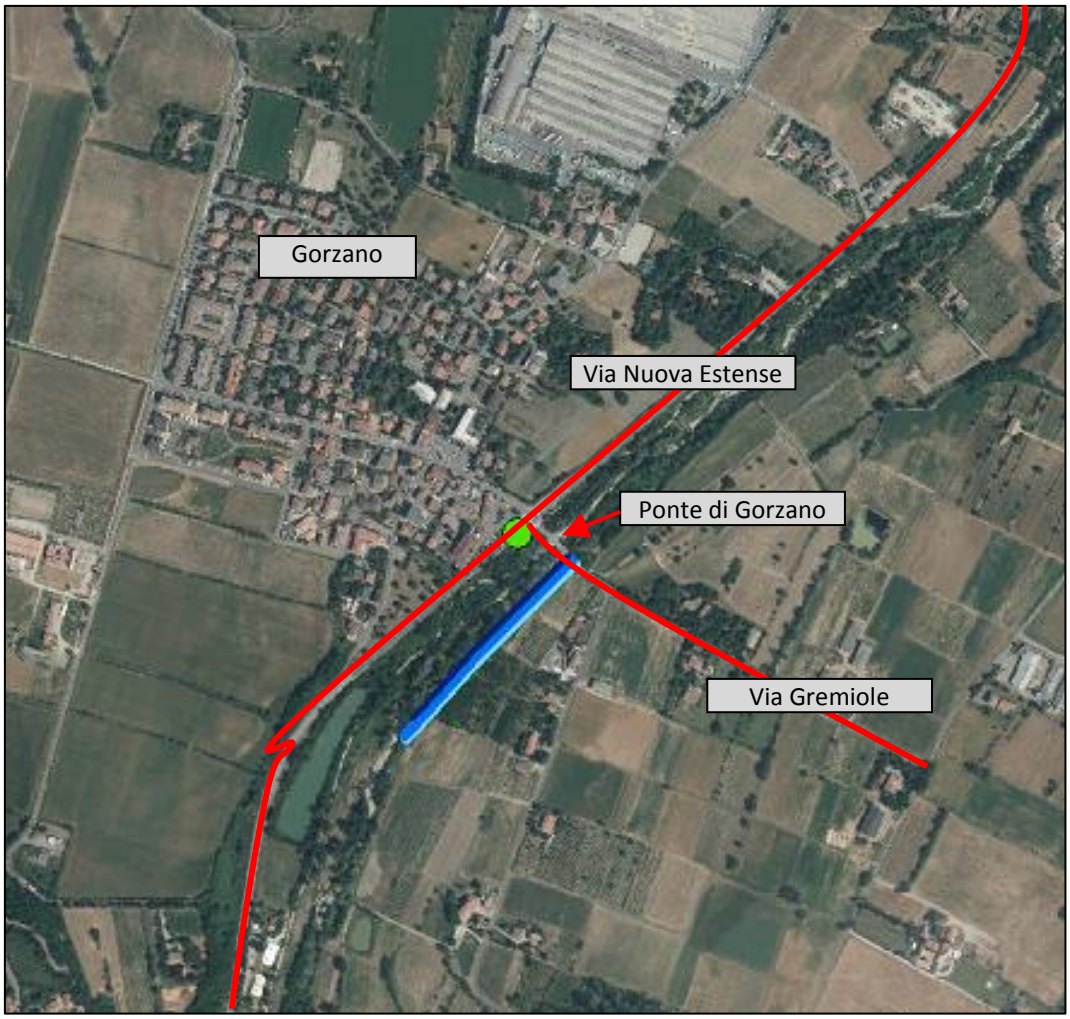


Figura 5.7 – Planimetria delle criticità idrauliche evidenziate nel tratto A.

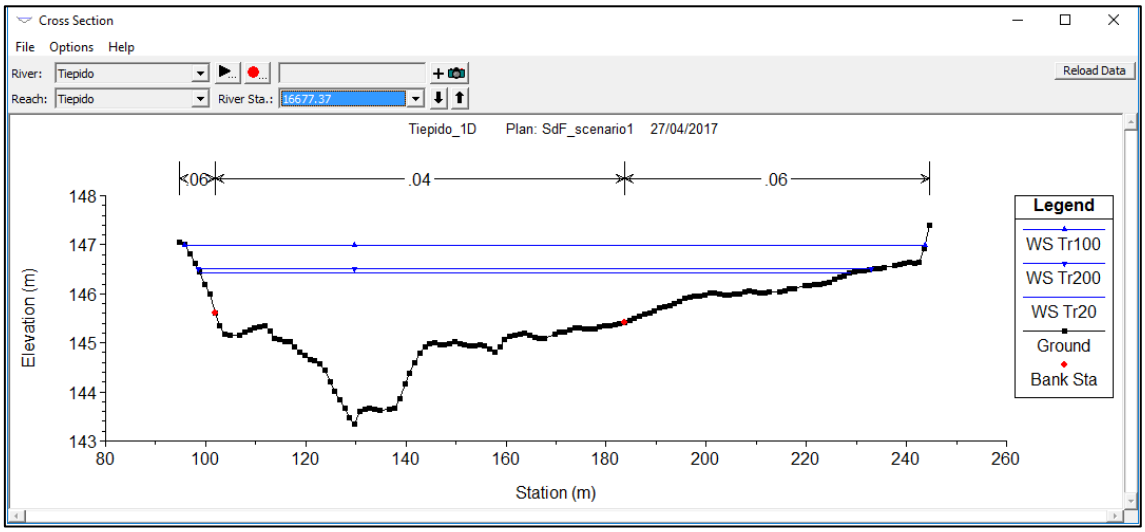


Figura 5.8 – Sezione 16677 a monte della briglia e del ponte di Gorzano.

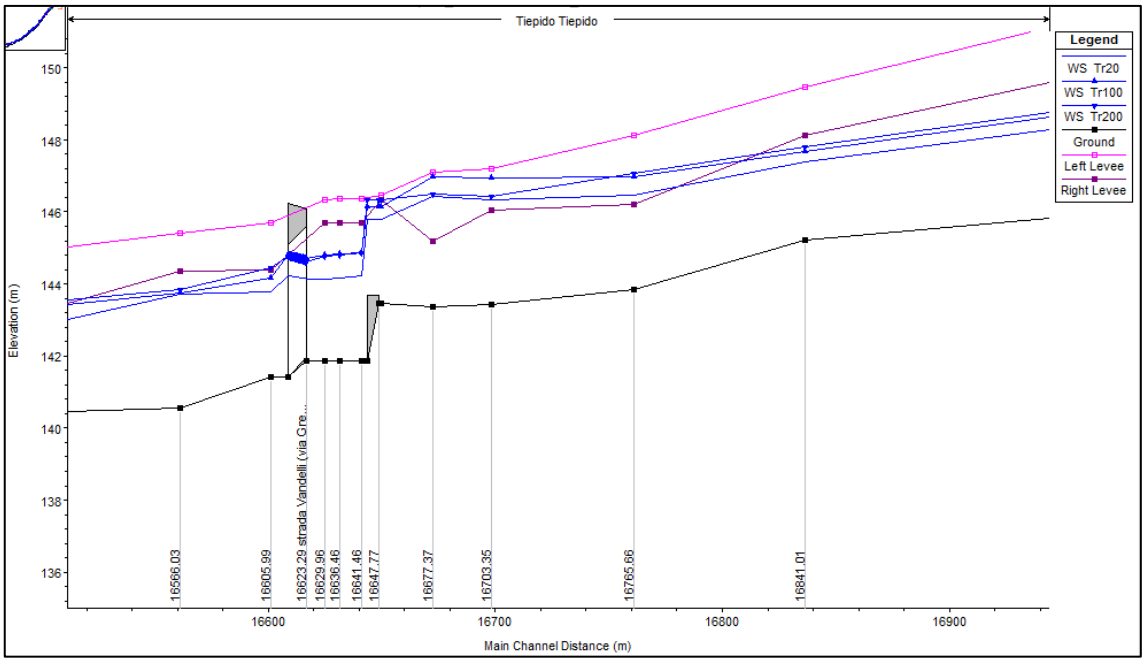


Figura 5.9 - Profilo idraulico ottenuto dalla modellazione monodimensionale del tratto A.

5.4.2 Tratto B: Pozza fino alla SP 16

Nel tratto B non si evidenziano particolari criticità idrauliche. Il fiume in questo tratto risulta piuttosto incassato rispetto al piano campagna e anche il deflusso di piena non interessa aree esterne a quelle di pertinenza fluviale, come si può vedere dalla Figura 5.11, che riporta alcune sezioni trasversali presenti nel tratto. Anche gli attraversamenti presenti nel tratto hanno una quota di impalcato elevata rispetto al fondo alveo e non creano ostacolo al deflusso delle acque in piena.

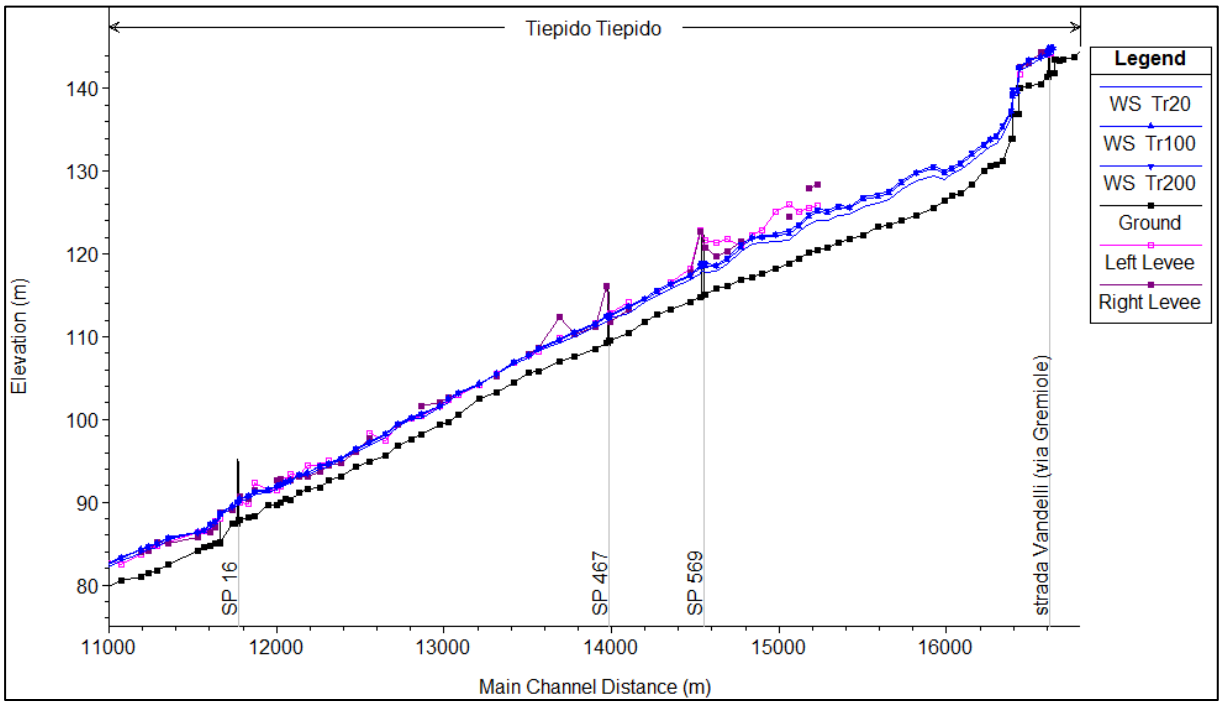


Figura 5.10 - Profilo idraulico ottenuto dalla modellazione monodimensionale del tratto B.

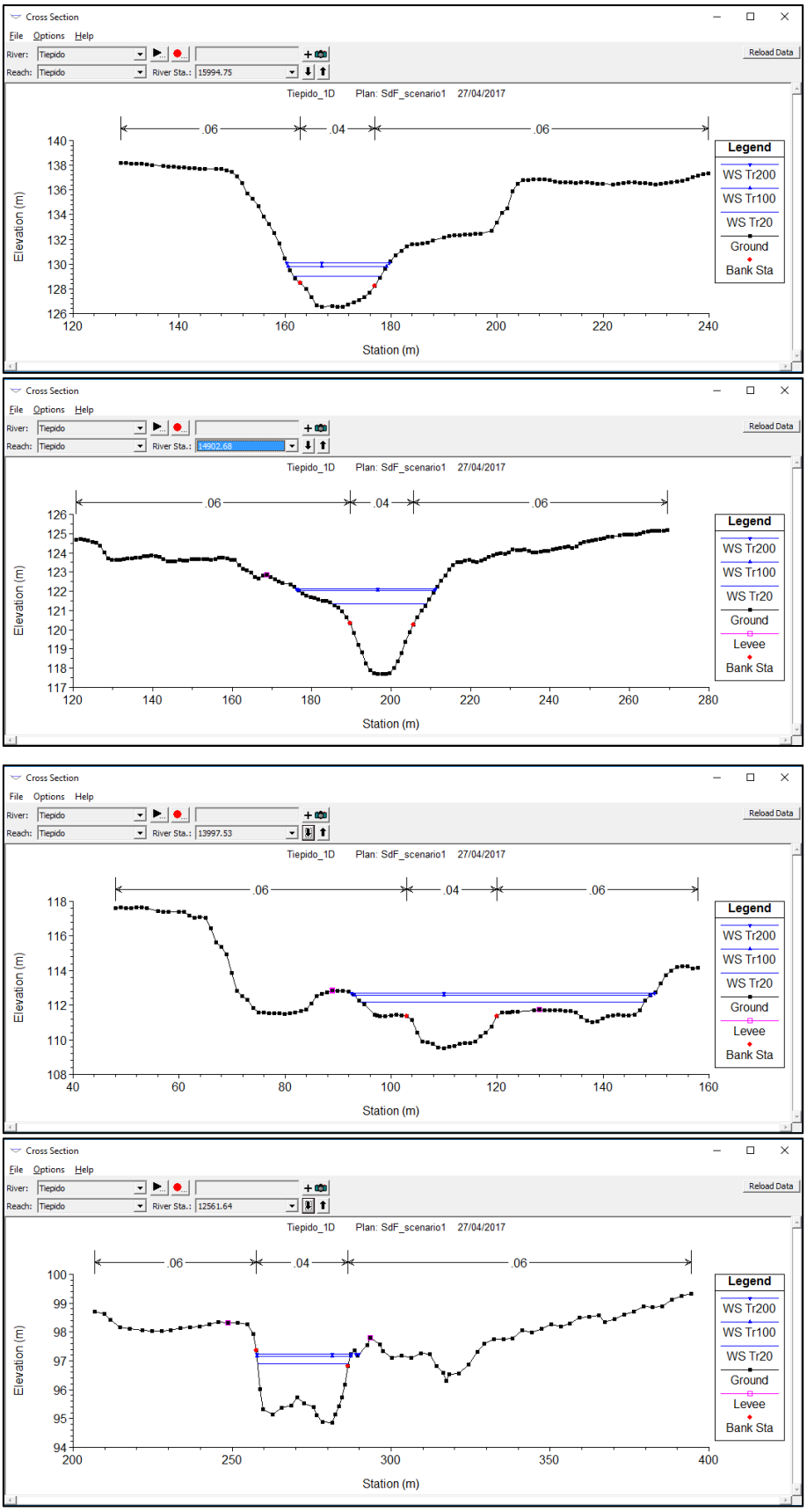


Figura 5.11 – Sezioni trasversali del tratto B.

5.4.3 Tratto C: Castelnuovo Rangone

Nel tratto C si evidenziano allagamenti diffusi sia in destra che in sinistra idraulica a monte e a valle del ponte su via Zenzalose e a monte del ponte sulla strada SP 17 dovuti all'insufficienza della quota spondale rispetto ai livelli che si instaurano negli eventi di piena simulati (Figura 5.12). Tali insufficienze determinano degli allagamenti che possono andare ad interessare i fabbricati sparsi posti in prossimità del fiume (Figura 5.13) e anche l'abitato di via Leonardo Da Vinci, presente in destra idraulica a valle del ponte di via Zenzalose (Figura 5.14).

Inoltre si evidenzia una insufficienza distribuita della sponda sinistra del torrente posta a monte del ponte ciclabile (Figura 5.15), unita ad un insufficienza dell'infrastruttura che funziona in pressione per eventi già per eventi con tempo di ritorno di 20 anni.

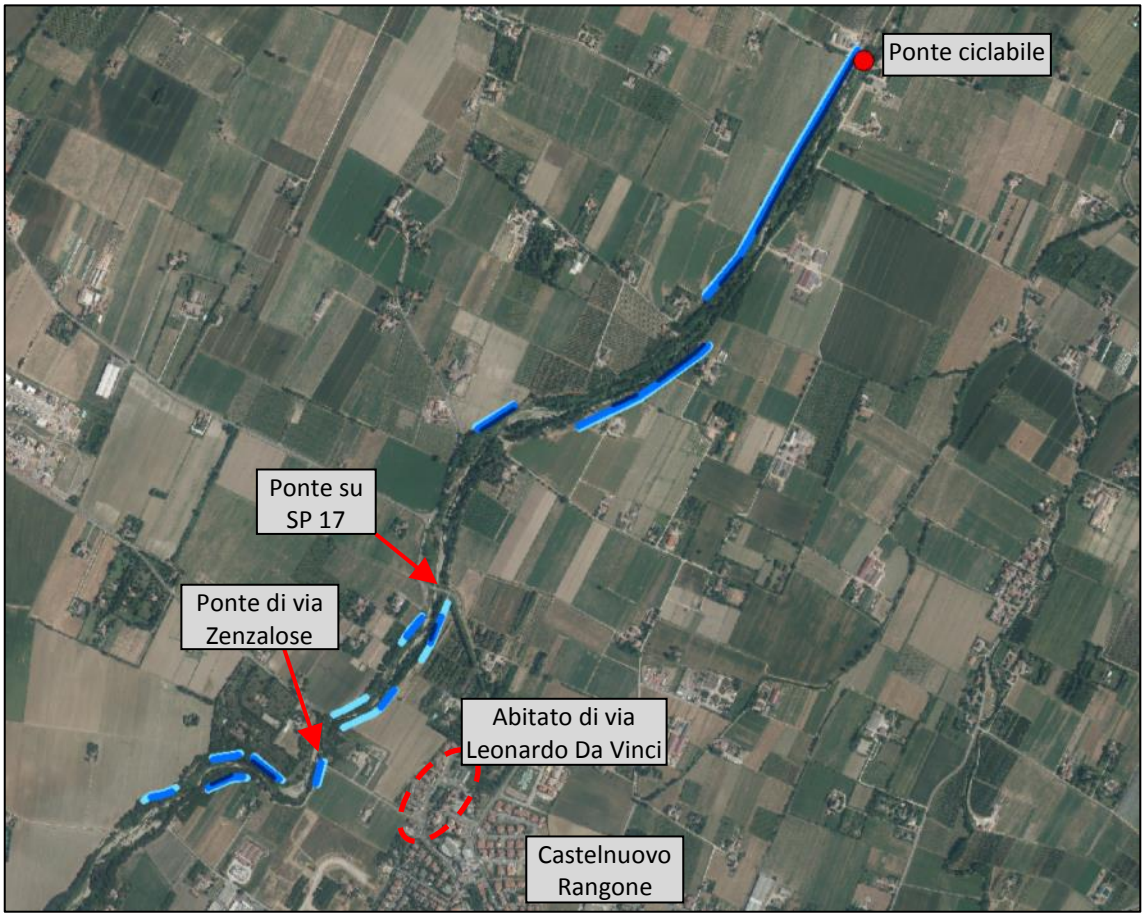


Figura 5.12 – Planimetria delle criticità idrauliche evidenziate nel tratto C.

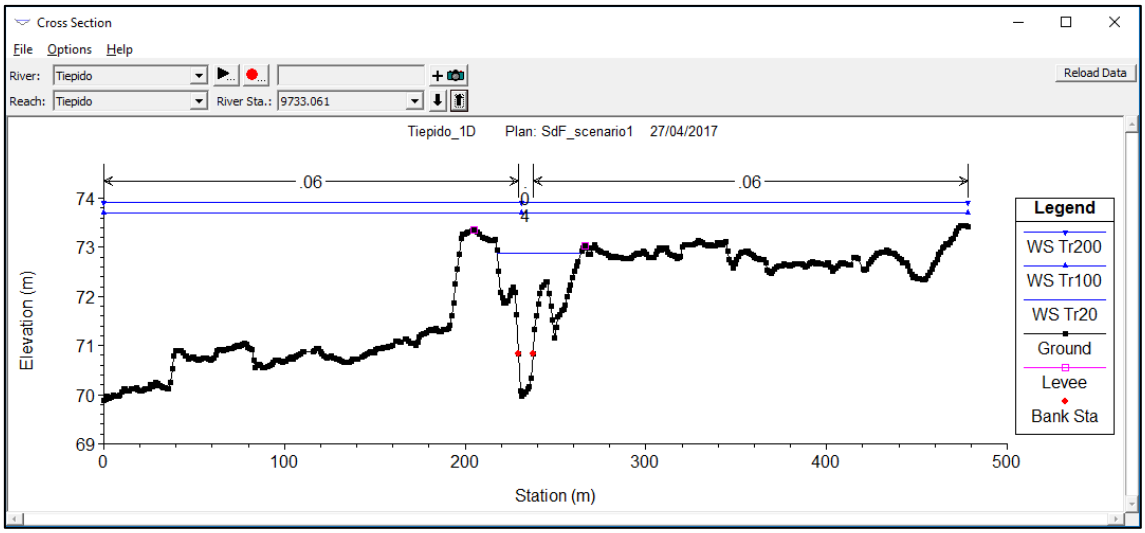


Figura 5.13 – Sezione 9733 a monte del ponte di via Zenzalose.

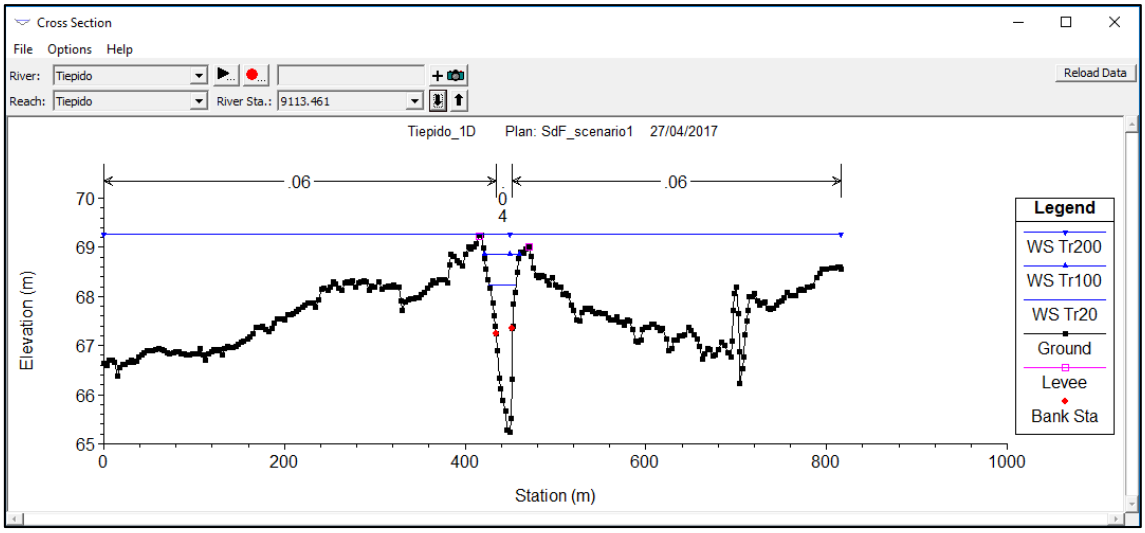


Figura 5.14 – Sezione 9113 a valle del ponte di via Zenzalose, in corrispondenza dell'abitato di via Leonardo Da Vinci.

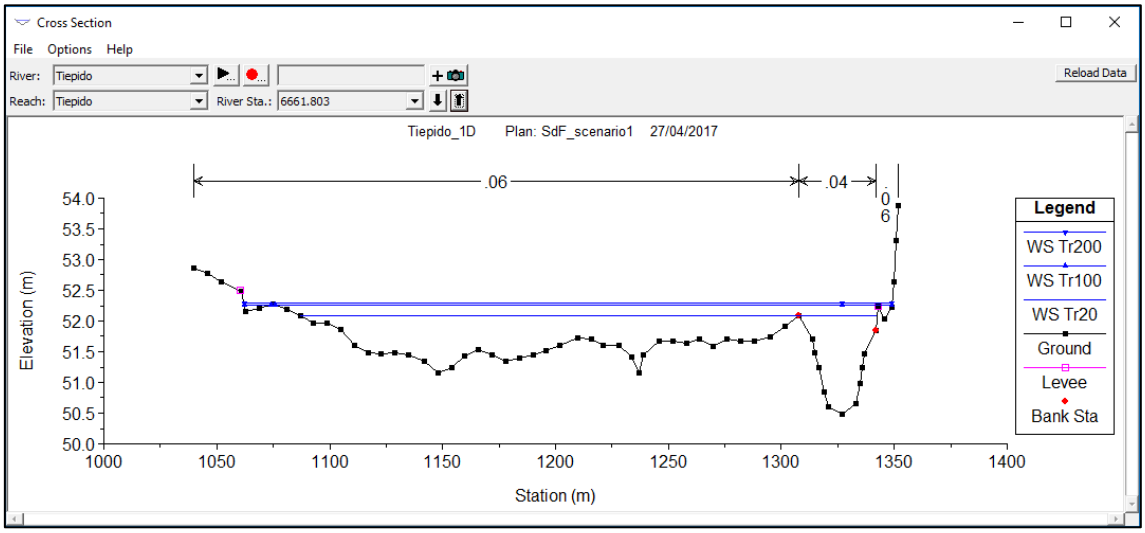


Figura 5.15 – Sezione 6661 a monte del ponte ciclabile.

L'andamento dei livelli per gli eventi di piena simulati, insieme all'insufficienza delle sponde, si può desumere dalla Figura 5.16.

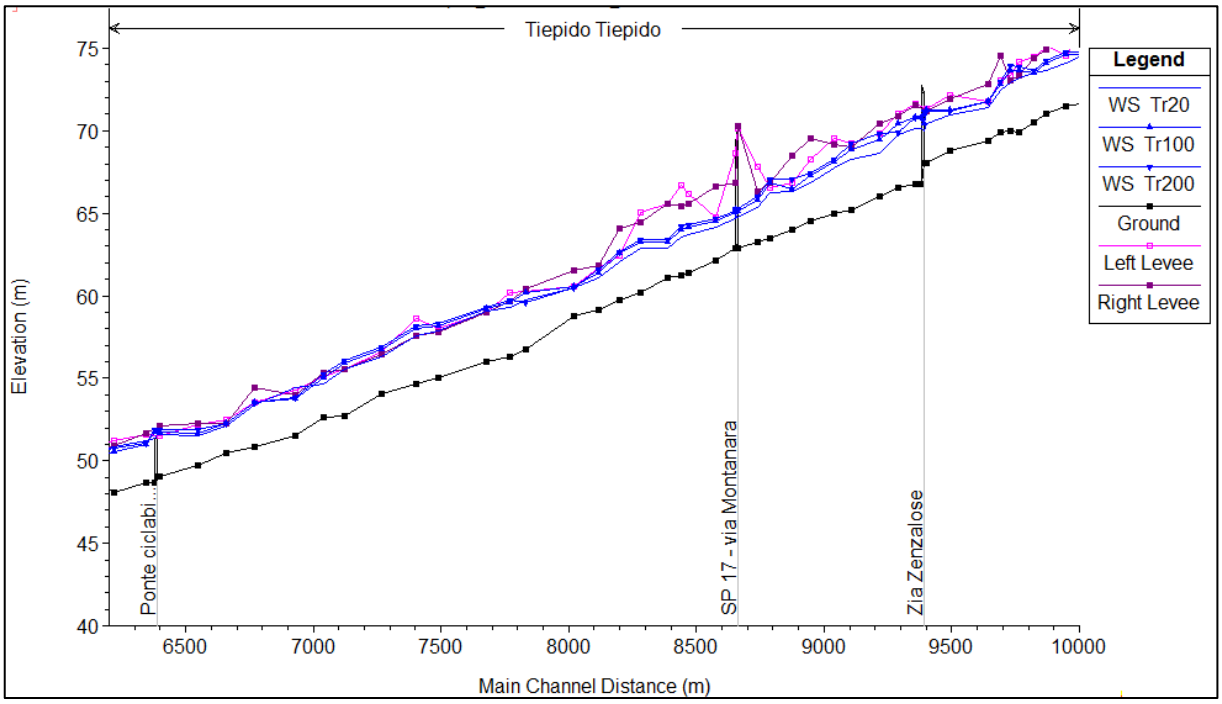


Figura 5.16 - Profilo idraulico ottenuto dalla modellazione monodimensionale del tratto C.

5.4.4 Tratto D: Autostrada A1 – San Donnino

Nel tratto D gli allagamenti diffusi che si verificano sia a monte che a valle degli attraversamenti presenti (A1, strada Gherbella e ciclabile - Figura 5.17) sono dovuti alle ostruzioni generate dagli attraversamenti stessi associate ad una quota spondale non sempre adeguata al contenimento delle portate in arrivo (Figura 5.18). Infatti è noto che il ponte autostradale presenta un accumulo di materiale trasportato dal torrente che ostruisce di fatto il deflusso attraverso la luce sinistra, mentre il ponte della strada Gherbella e il ponte ciclabile (vecchio ponte a servizio della strada Gherbella) presenta un impalcato molto basso, che fornisce una limitata sezione di deflusso delle portate di piena.

A valle del ponte ciclabile invece è presente un allagamento dovuto all'insufficienza della quota spondale destra per eventi con tempo di ritorno superiore a 20 anni.

Nelle aree soggette ad allagamenti sono presenti abitazioni sparse.

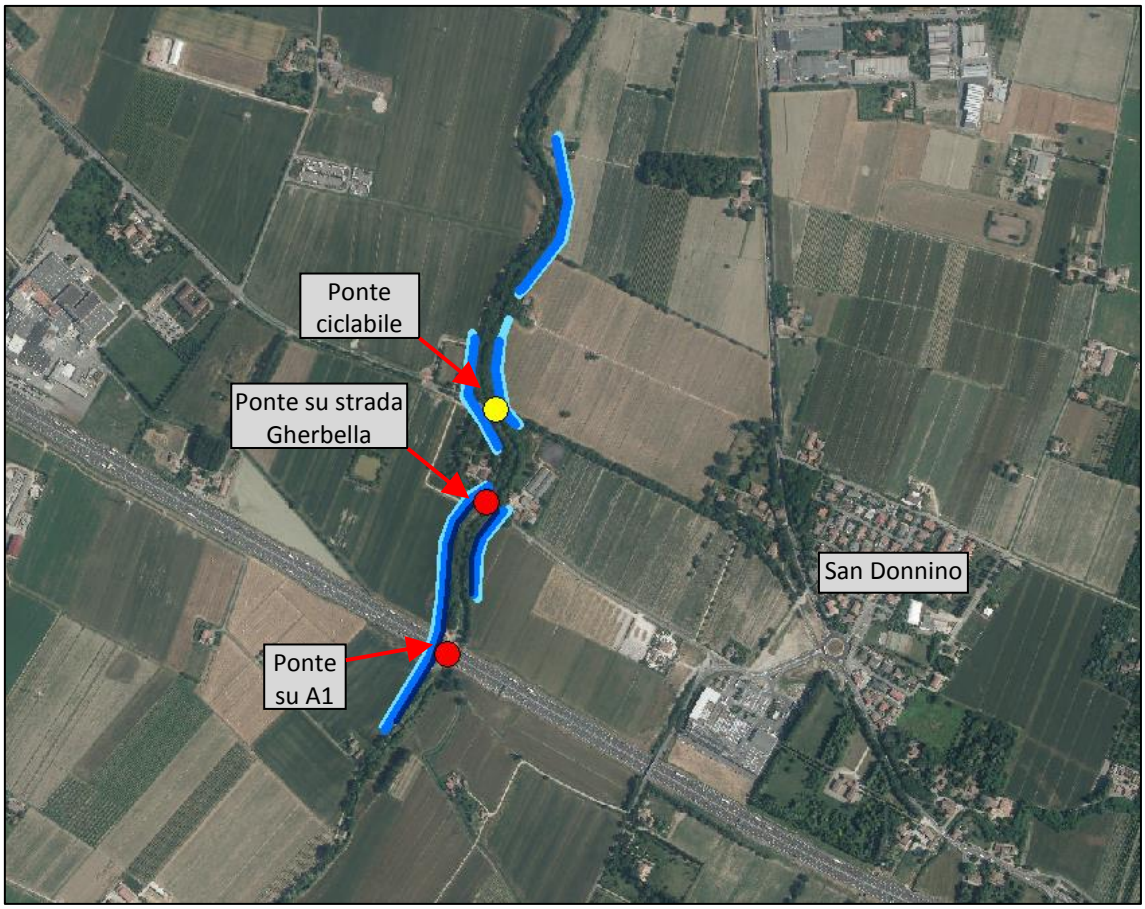


Figura 5.17 – Planimetria delle criticità idrauliche evidenziate nel tratto D.

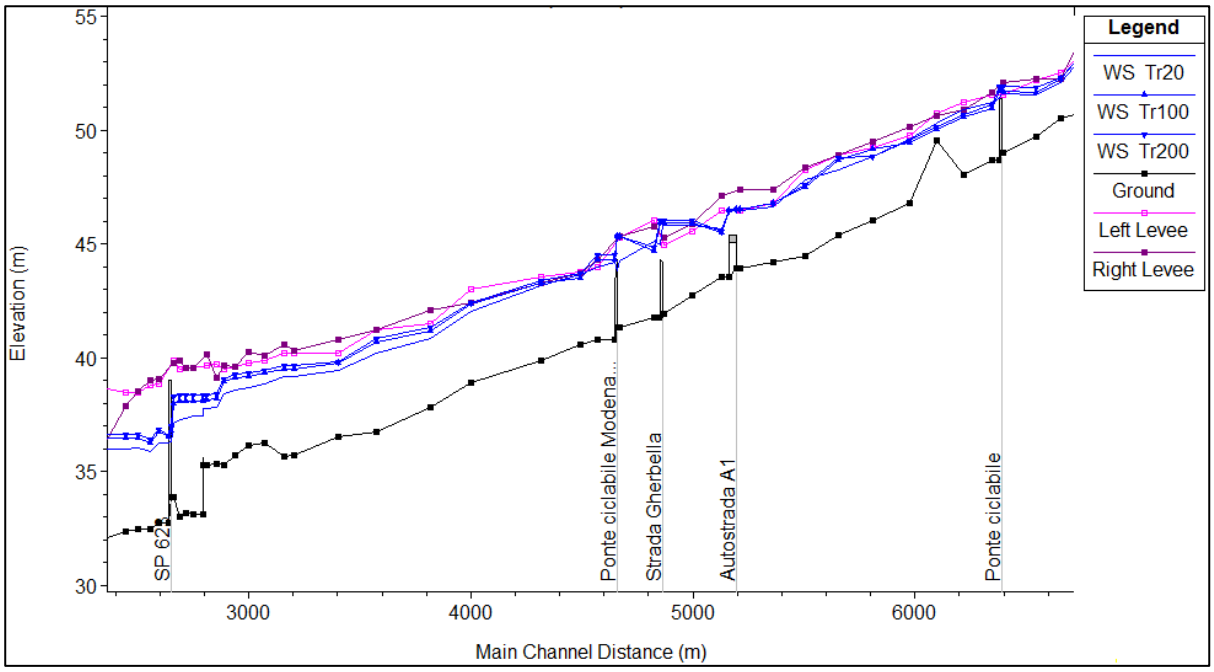


Figura 5.18 - Profilo idraulico ottenuto dalla modellazione monodimensionale del tratto D.

5.4.5 Tratto E: San Damaso

Nel tratto E il torrente passa attraverso la località di San Damaso (Figura 5.19). A monte del ponte sulla SP 623 si segnalano alcuni tratti in cui il torrente ha la tendenza ad occupare aree depresse limitrofe al suo corso d'acqua principale, che sono state segnalate come critiche poiché urbanizzate. A valle del ponte si segnala un'area che risulta particolarmente depressa (area dell'ex fornace) che viene interessata da frequenti allagamenti generati da eventi con tempi di ritorno intorno ai 5 anni. Anche l'edificio posto in sinistra idraulica a monte della briglia è interessato da eventi di piena con la stessa frequenza. D'altronde l'area ha una elevata densità di urbanizzazione in prossimità del torrente e anche all'interno delle aree di pertinenza fluviale (aree golenali e di espansione naturale). Questa situazione crea una mappatura del rischio particolarmente gravosa.

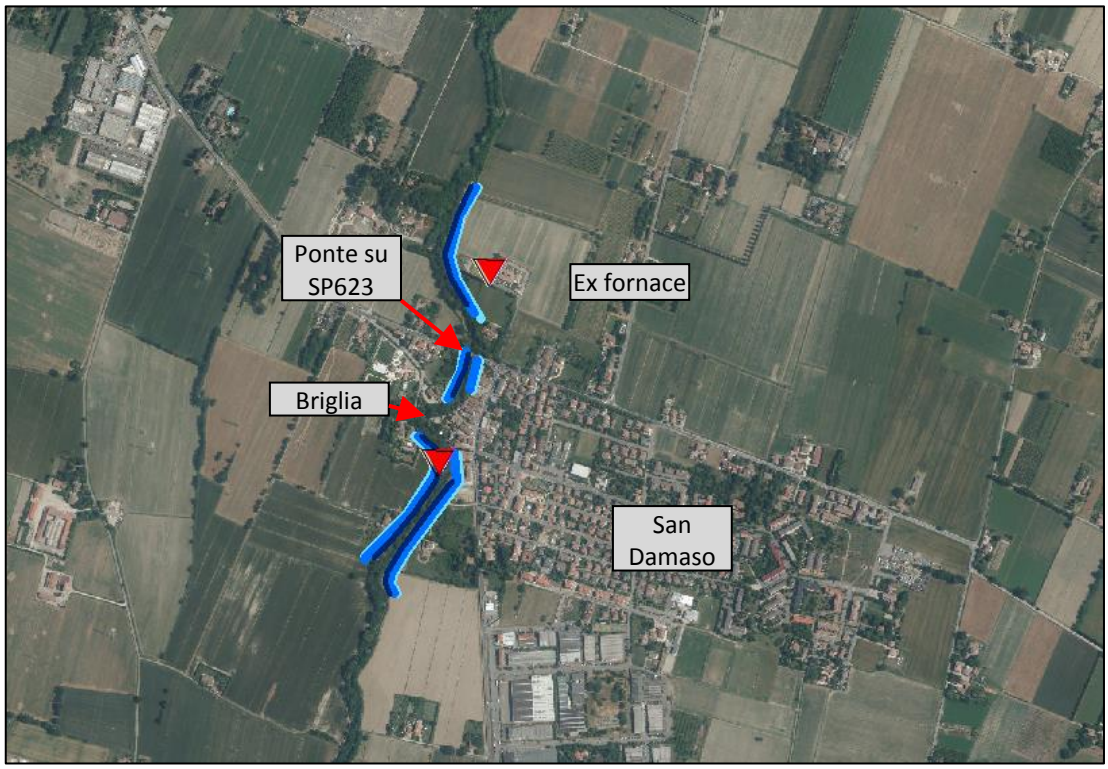


Figura 5.19 – Planimetria delle criticità idrauliche evidenziate nel tratto E.

L'andamento dei livelli per gli eventi di piena simulati, insieme all'insufficienza delle sponde, si può desumere dalla Figura 5.20. Le sponde ripotate nel profilo non evidenziano esondazioni poiché sono poste al limite dell'area di pertinenza fluviale "naturale", ignorando l'urbanizzazione che si è sviluppata successivamente. I limiti delle aree di pericolosità invece tengono conto della presenza di opere civili ed evidenziano la pericolosità legata al fatto che tali aree possano essere interessate da allagamenti. Un esempio della determinazione delle sponde è riportato in Figura 5.21, dove è rappresentata la sezione 2723, nella quale si evidenzia la presenza di edifici civili in area golenale, come da planimetria associata.

Nel profilo si evidenzia come la sponda in destra idraulica a valle della SP 623 sia particolarmente bassa, producendo l'allagamento dell'area denominata "ex fornace" anche per eventi molto frequenti, come descritto in precedenza.

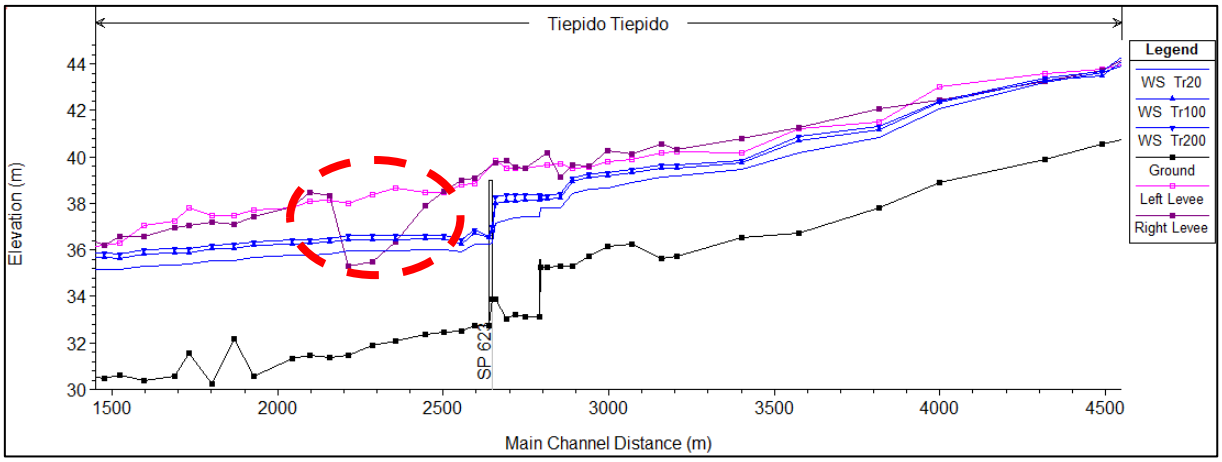
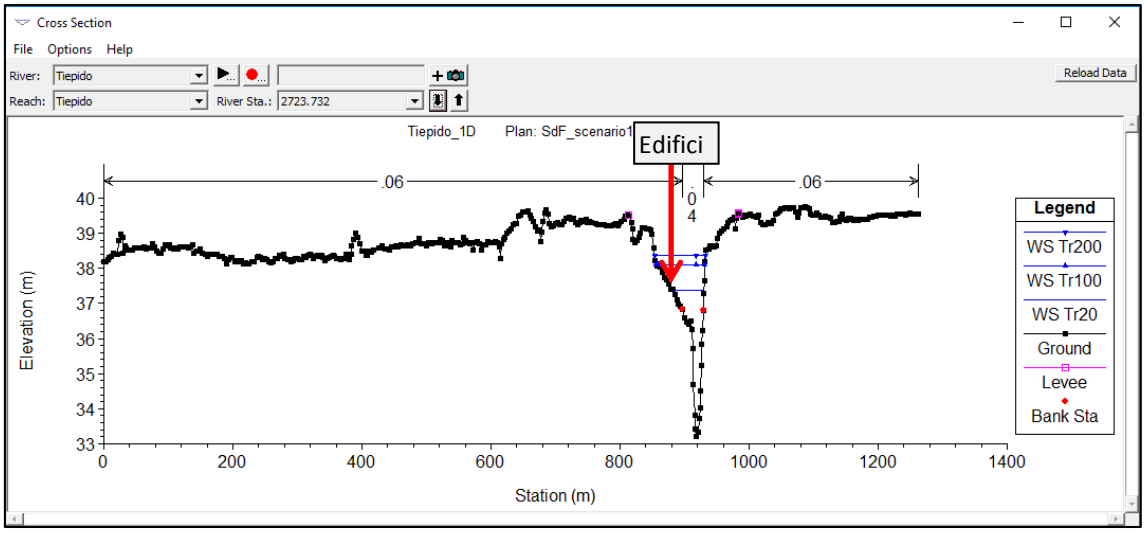


Figura 5.20 - Profilo idraulico ottenuto dalla modellazione monodimensionale del tratto E.



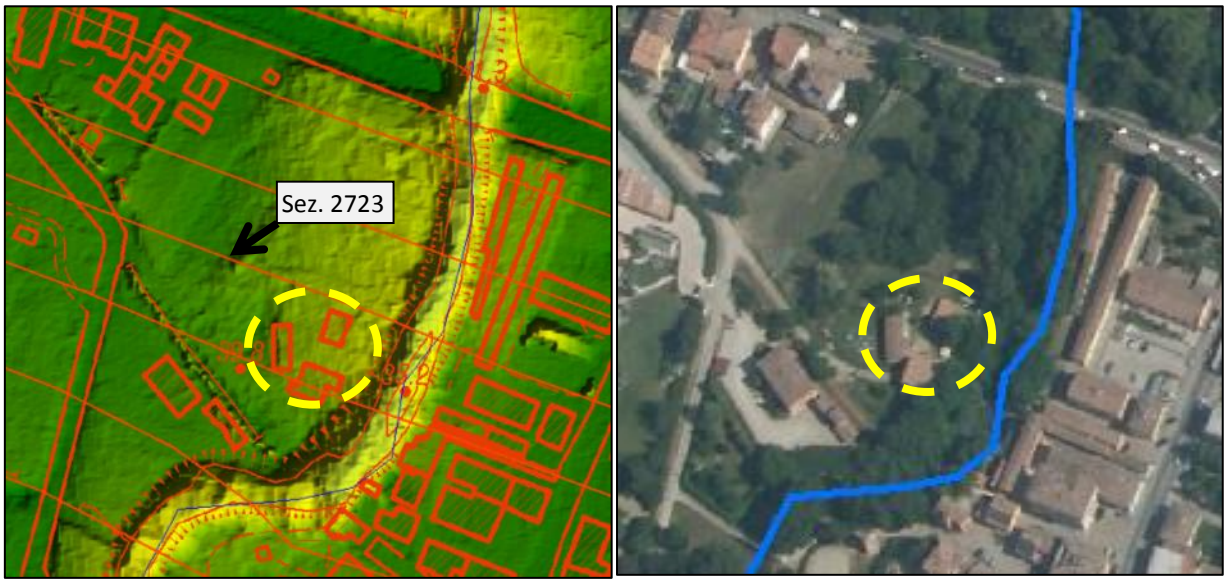


Figura 5.21 – Sezione 2723 a monte del ponte della SP 623, con indicazione delle sponde utilizzate per il profilo idraulico. In sinistra idraulica si evidenzia la posizione degli edifici civili, evidenziati in giallo nelle planimetrie associate (sx con DTM, dx con ortofoto).

5.4.6 Tratto F: SP 623 – Via Emilia

L'analisi esposta al paragrafo 3.5 ha evidenziato come gli effetti di rigurgito del Panaro sul torrente Tiepido abbiano un'importante influenza nell'area di confluenza del Tiepido con Panaro e del Grizzaga con il Tiepido. Pertanto si è reso necessario separare l'analisi idraulica considerando separatamente e mediante l'utilizzo di differenti modelli di calcolo gli effetti relativi agli eventi di piena del Tiepido e gli effetti relativi agli eventi di piena del Panaro sull'area di pertinenza fluviale del sistema Tiepido – Grizzaga.

Le criticità idrauliche evidenziate in Figura 5.22 sono quindi il risultato dell'unione dei risultati ottenuti dalle simulazioni condotte sul modello monodimensionale per lo studio delle piene del Tiepido e sul modello bidimensionale per lo studio sia dell'effetto di rigurgito determinato dai livelli in Panaro che dell'effetto combinato legato alla contemporaneità delle piene sul fiume Panaro e sul torrente Tiepido.

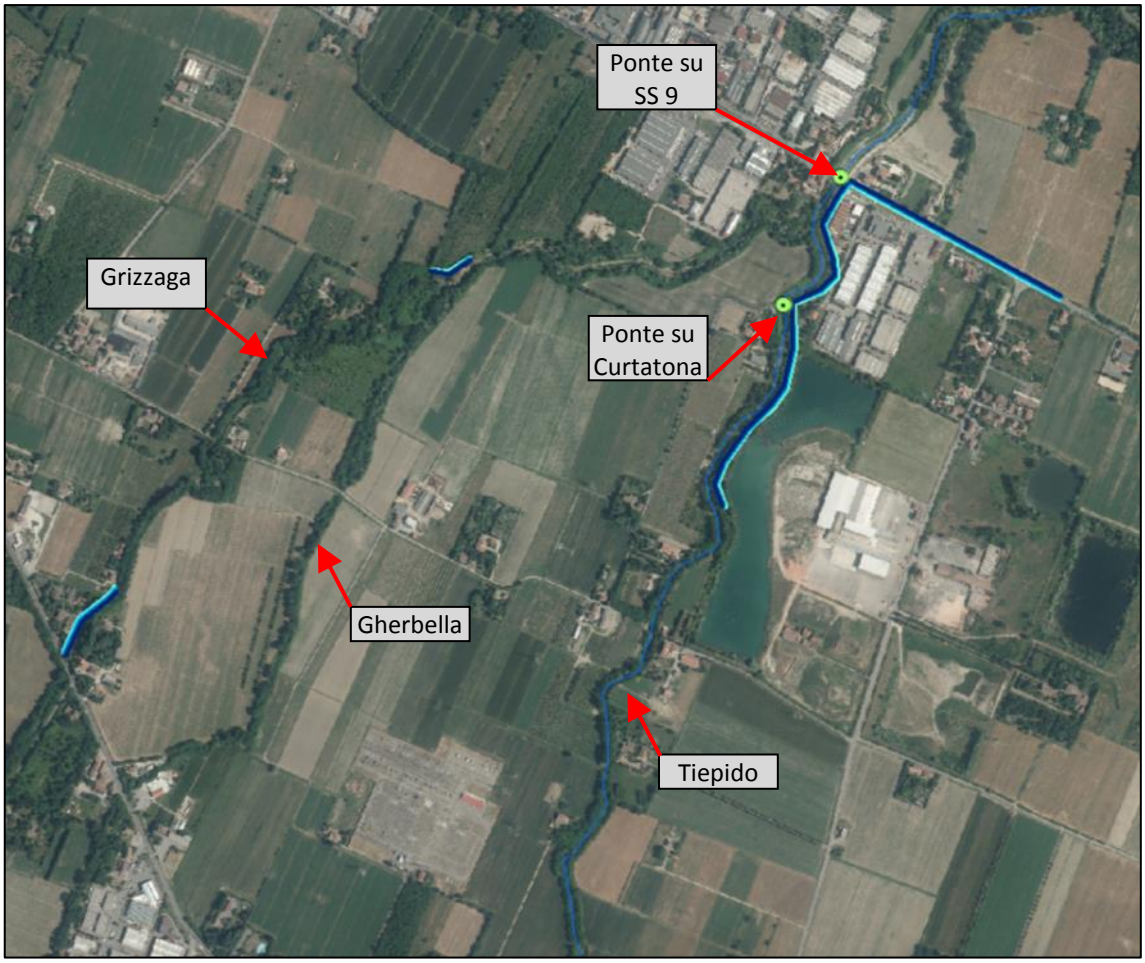


Figura 5.22 – Planimetria delle criticità idrauliche evidenziate nel tratto F.

L'analisi delle criticità proposta di seguito si divide quindi in funzione delle cause che le generano: da un lato infatti vi sono le piene del Tiepido e dei suoi affluenti, dall'altro vi è l'effetto di rigurgito dovuto ai livelli che si instaurano nel Panaro.

Le piene del Tiepido non creano particolari problemi di esondazioni, il deflusso avviene all'interno dell'alveo attivo o al più nelle aree di pertinenza fluviale. L'unica area critica che si evidenzia, soggetta a esondazioni periodiche anche con tempi di ritorno bassi, è l'area già citata nel paragrafo precedente come "ex fornace", posta immediatamente a valle del ponte sulla SP 623.

Si evidenziano alcune criticità legate agli attraversamenti presenti, esposte nel paragrafo relativo ai risultati della modellazione monodimensionale di seguito.

5.4.6.A Risultati della modellazione monodimensionale

La modellazione monodimensionale analizza le piene del Tiepido in due scenari:

- Scenario 1: il fiume Panaro è a piene rive ma non esonda nelle aree golenale;
- Scenario 2: il Panaro è in piena, con un livello inferiore di 1 m a quello dell'evento cinquantennale.

I risultati dello scenario 1 evidenziano che il ponte di via Emilia, nonostante le luci occluse, non presenta funzionamento in pressione per tutti i tempi di ritorno considerati. Anche il ponte ciclabile ha un funzionamento a pelo libero. Il ponte sulla strada Curtatona presenta franco nullo per tempo di ritorno di 200 anni mentre permette il deflusso per eventi con tempi di ritorno inferiori.

Nello scenario 2 si evidenzia il funzionamento in pressione dei ponti di via Emilia e della strada Curtatona (Figura 5.23), senza sormonto dell'impalcato.

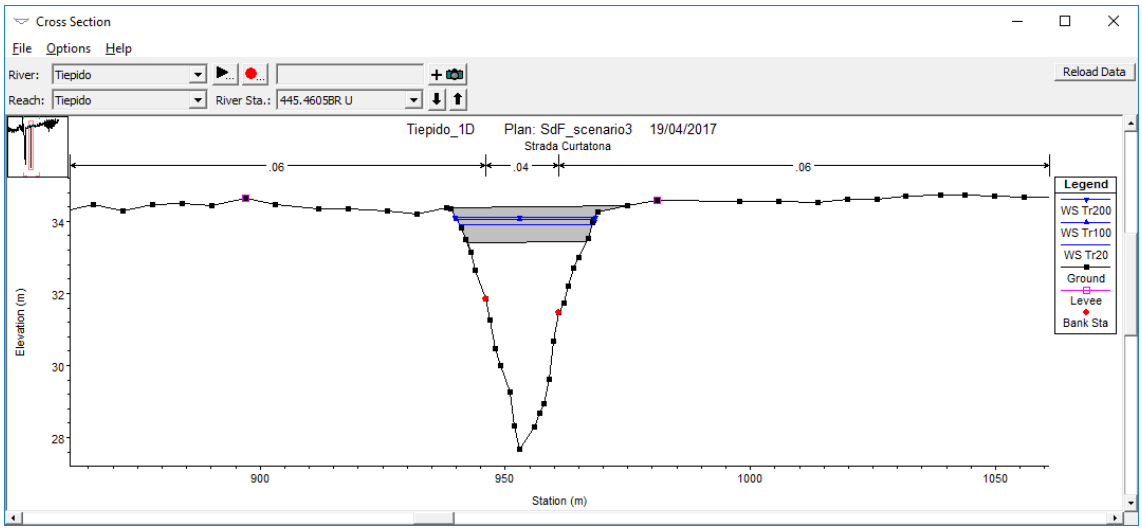


Figura 5.23 – Sezione a monte del ponte sulla strada Curtatona.

5.4.6.B Risultati della modellazione bidimensionale

La modellazione bidimensionale è stata condotta analizzando due scenari:

- Solo Panaro – Tr 50 anni: il Tiepido non ha contributo
- Panaro in piena – Tr 50 anni e Tiepido in piena – Tr 20, 100 e 200 anni.

Il primo scenario permette di evidenziare le aree che subiscono allagamenti legati al livello del Panaro, sia per sia per scavalco della strada Emilia che per esondazioni del Tiepido che subisce un importante effetto di rigurgito da parte del Panaro (Figura 5.24). Vi sono alcune esondazioni che interessano i campi posti in sinistra idraulica del torrente Grizzaga in località Fondo Moraro, che si estendono alla via Emilia interessando anche la località Madonna delle Grazie. In destra idrografica del torrente Tiepido le esondazioni sono dovute in parte al Tiepido che non permette il contenimento dei livelli imposti dal Panaro, in parte dal Panaro stesso che scavalca la via Emilia e si estendono per circa 500 m verso monte a partire dalla via Emilia mentre a Est si fermano indicativamente in corrispondenza della svolta verso nord-est di via Emilia. Gli allagamenti interessano anche l'area interclusa tra il Grizzaga e il Tiepido per circa 700-750 m a monte della confluenza.

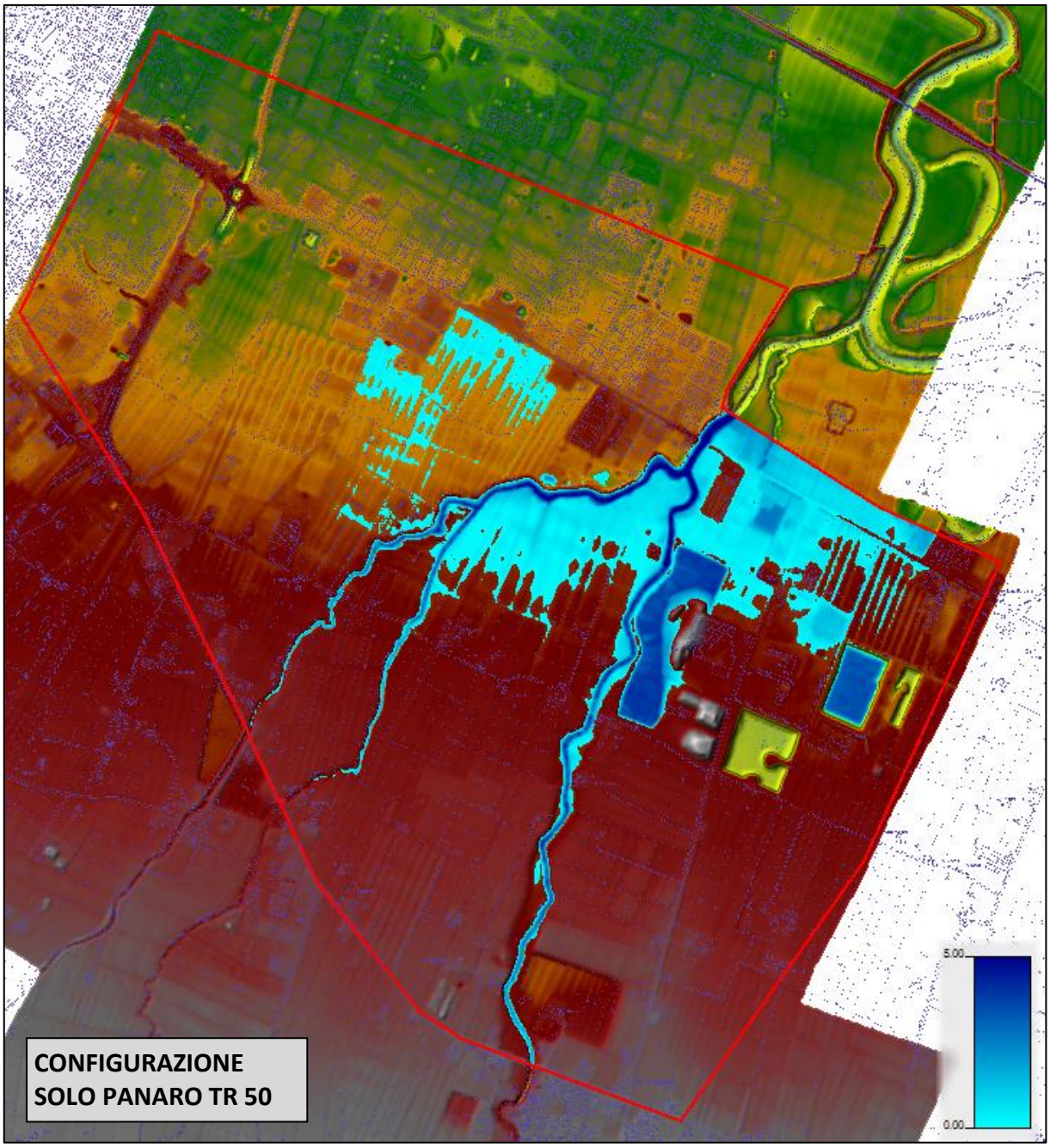


Figura 5.24 – Esondazioni nel tratto terminale del Tiepido e del Grizzaga per il solo effetto del Panaro con livello di piena cinquantennale.

Le aree allagate nello scenario 2 (Figura 5.25) sono superiori rispetto a quelle delimitate nello scenario 1, per il solo effetto del Panaro, in quanto si verificano esondazioni del Grizzaga e del Gherbella che determinano allagamenti diffusi a valle della SP 623 – Vignolese, i quali si estendono verso ovest fino alla SS. 12 "Via Nuova Estense" mentre verso nord oltrepassano la SS. 9 "via Emilia". Inoltre si verificano diffusi allagamenti in tutta l'area interclusa tra i torrenti Grizzaga e Gherbella ed esondazioni in destra idraulica del Gherbella che occupano l'area perifluviale per circa 300 m lungo tutto il Gherbella fino alla confluenza con il Grizzaga, dove si uniscono agli allagamenti determinati dal rigurgito del Panaro.

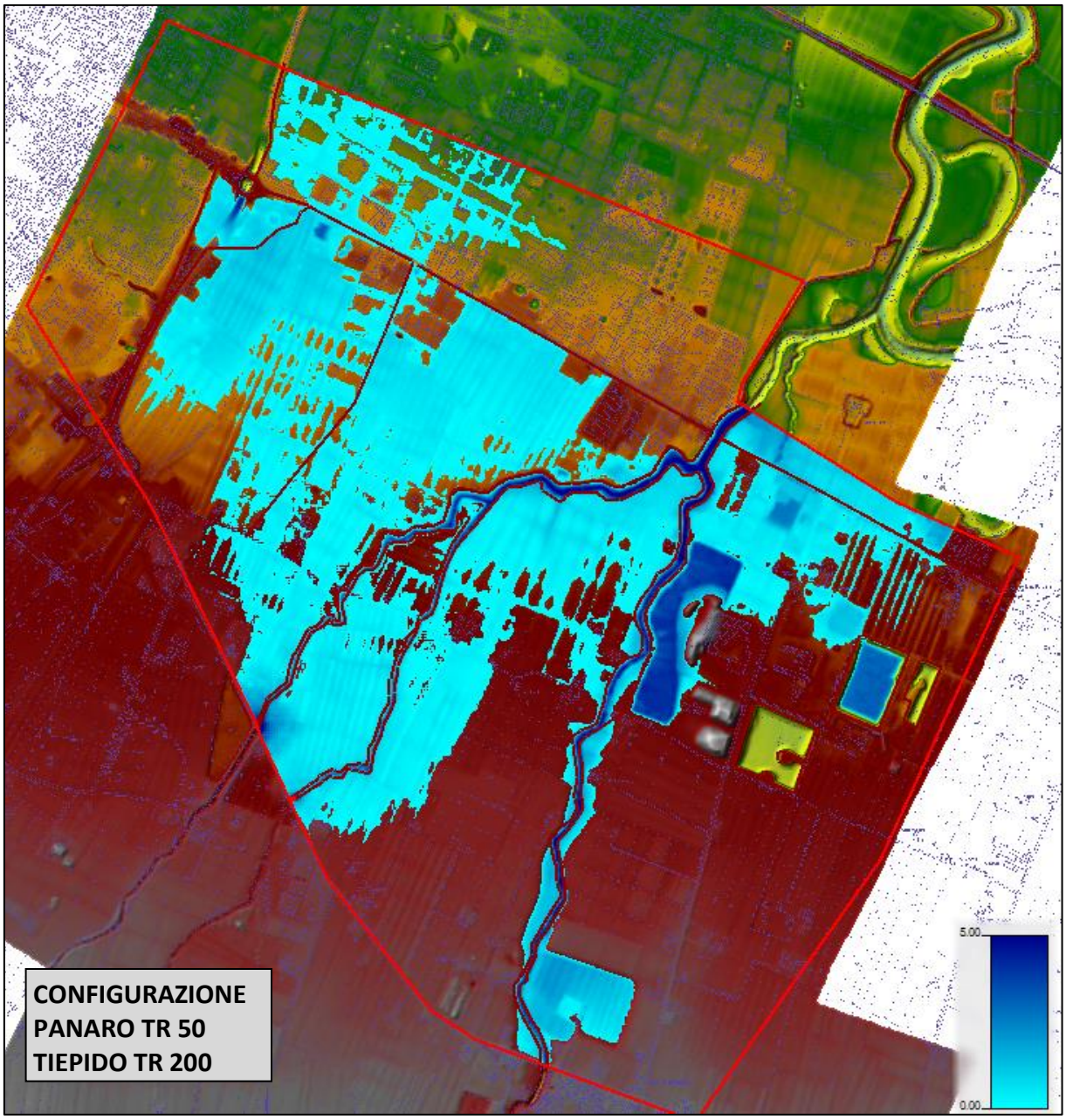


Figura 5.25 – Esondazioni nel tratto terminale del Tiepido e del Grizzaga per l'effetto combinato del livello cinquantennale del Panaro e piena duecentennale del sistema Tiepido – Grizzaga - Gherbella.

6. Analisi idraulica dell'intervento in progetto

La soluzione progettuale costituita dalla ricostruzione della briglia alla progressiva 16+400 e della controbriglia alla progressiva 16+410, entrambe crollate nella situazione attuale, con conseguente regolarizzazione della sezione trasversale e della livelletta nel tratto oggetto di intervento, è stata dimensionata e successivamente verificata mediante l'implementazione della stessa nel modello idraulico monodimensionale del torrente Tiepido.

Nello specifico è stata condotta una simulazione a moto permanente per i seguenti tempi di ritorno:

- Tr 20 anni: portata
- Tr 100 anni portata
- Tr 200 anni: portata

6.1 Implementazione del modello idraulico 1D

Per l'implementazione del modello idraulico monodimensionale a moto permanente del tratto oggetto di intervento, è stato utilizzato come base il modello idraulico 1D implementato per lo studio preliminare delle criticità idrauliche del torrente Tiepido.

L'estensione del modello idraulico per lo studio dell'intervento è stata ridimensionata, analizzando circa 3.15 km di torrente sufficientemente a monte e a valle dell'area di intervento, a partire dalla sezione di monte, corrispondente alla sezione a valle del ponte di Torre Maina, fino al 750 m a monte del ponte sulla S.S. 569 di Vignola (Figura 6.1).

Figura 6.1 – Estensione dell'area modellata per l'analisi dell'intervento in progetto.

6.1.1 Stato di fatto

La geometria del modello idraulico nella situazione attuale è stata aggiornata inserendo le informazioni planoaltimetriche ottenute dall'apposita campagna di rilievi topografici eseguita nei mesi di marzo e aprile 2018. In particolare, il tratto oggetto di aggiornamento si estende a partire da circa 30 m a monte della briglia, localizzata a monte della briglia crollata, oggetto di intervento di rifacimento, fino a circa 115 m a valle della stessa (Figura 6.2).

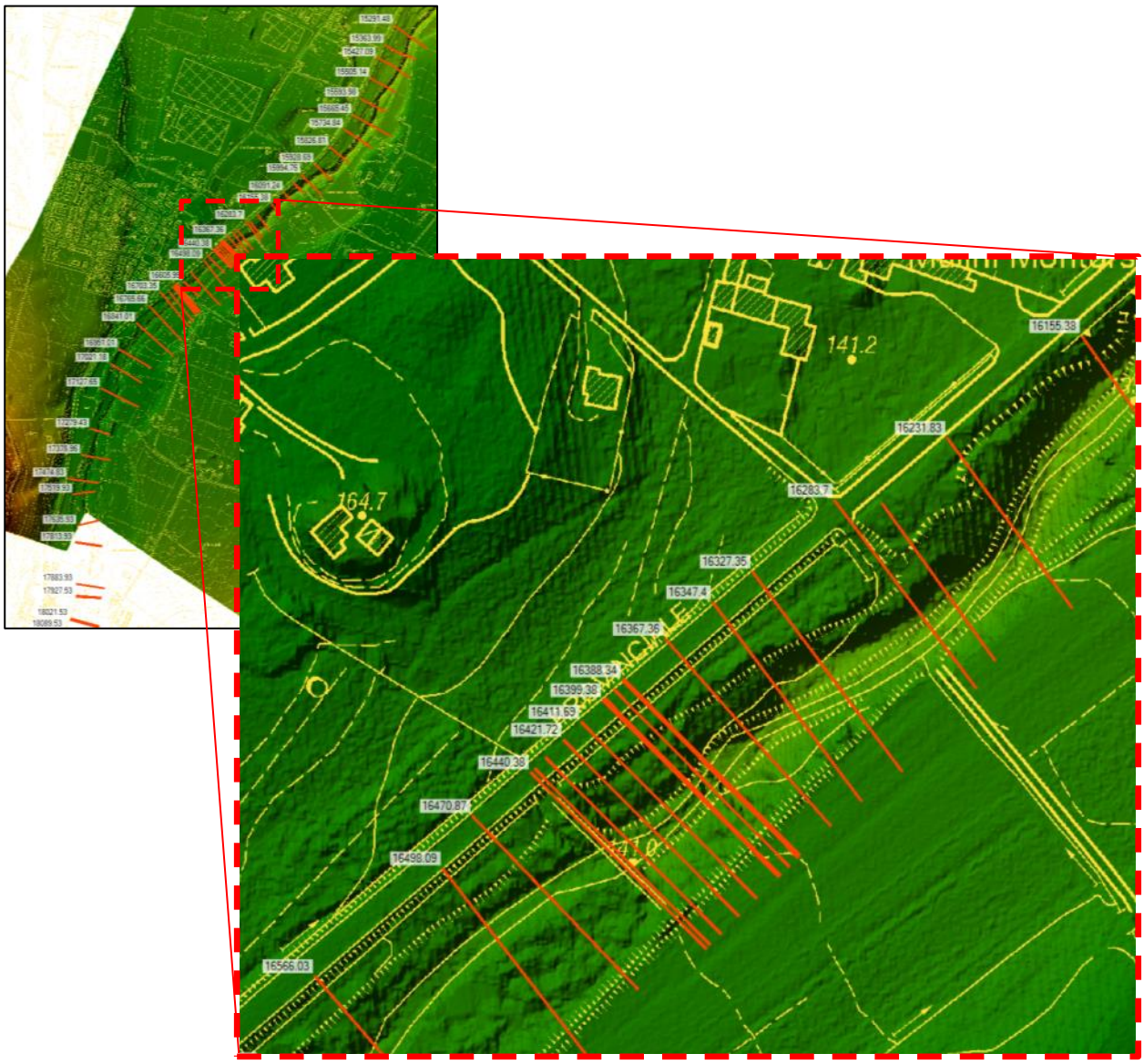


Figura 6.2 – Planimetria del modello idraulico: in alto a sinistra il tratto oggetto di modellazione e in basso a destra l'inquadramento del tratto oggetto di aggiornamento mediante inserimento dei dati ottenuti dalla campagna di rilievi topografici.

L'aggiornamento dello stato di fatto è stato effettuato mediante l'inserimento di 24 sezioni trasversali di rilievo (un esempio è riportato in Figura 6.3) e mediante l'aggiornamento della geometria delle strutture presenti in alveo, ovvero:

- briglia di monte, di altezza pari a circa 5.5 m dal fondo alveo di valle e larghezza della gaveta di circa 16 m (Figura 6.4);
- briglia crollata oggetto di intervento di ricostruzione, di altezza pari a circa 3.5 m dal fondo alveo di valle e larghezza della gaveta di circa 16 m (Figura 6.5);

- due salti di fondo di piccola entità posti a valle della briglia crollata (Figura 6.6).

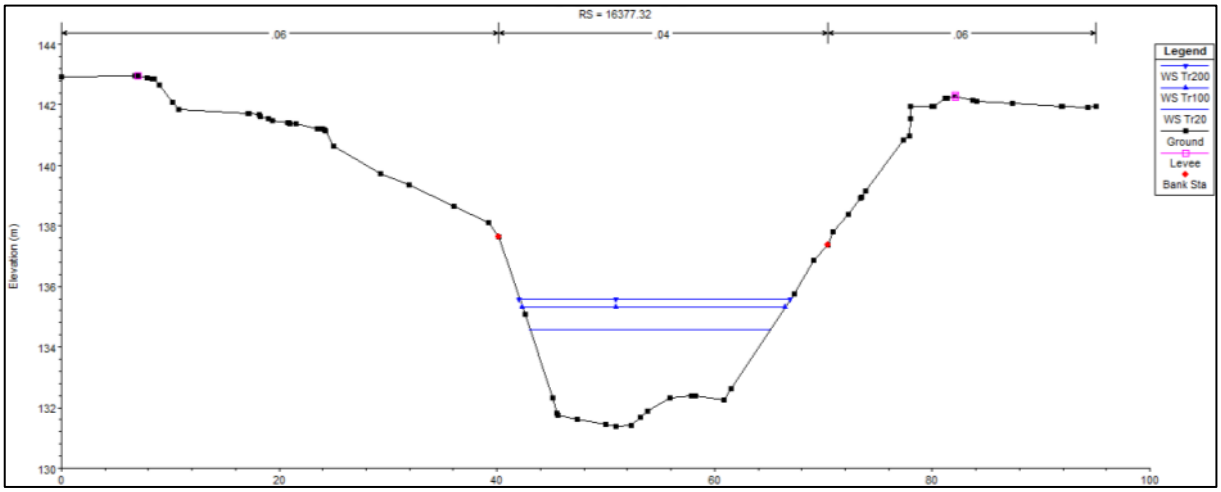


Figura 6.3 – Sezione d'alveo ottenuta da rilievo topografico (marzo 2018) implementata nel modello idraulico monodimensionale.

Figura 6.4 – Briglia posizionata a monte della briglia oggetto di intervento di ricostruzione.

Figura 6.5 – Briglia oggetto dell'intervento: a sinistra immagine della briglia in funzione (aprile 2017), a destra immagine della briglia completamente crollata (marzo 2018).

Figura 6.6 – Secondo salto di fondo di valle.

La briglia oggetto di intervento, nella simulazione dello stato di fatto, viene considerata come ancora in funzione al fine di verificare il comportamento idraulico che si instaurava prima del crollo e di confrontarlo con la configurazione di progetto.

Le condizioni al contorno a monte e le condizioni di scabrezza imposte sono le stesse utilizzate nella modellazione 1D, come descritto al Capitolo 4.1. La condizione di valle imposta si riferisce al tirante a moto uniforme che si instaura considerando la pendenza dell'alveo nel tratto terminale del modello implementato.

6.1.2 Stato di progetto

Nella descrizione dello stato di progetto si provvede all'aggiornamento delle sezioni trasversali e all'inserimento delle strutture di progetto, che consistono nel rifacimento della briglia, posizionata al km 16+400 del torrente Tiepido, e della controbriglia prevista 10 m a valle (Figura 6.7).

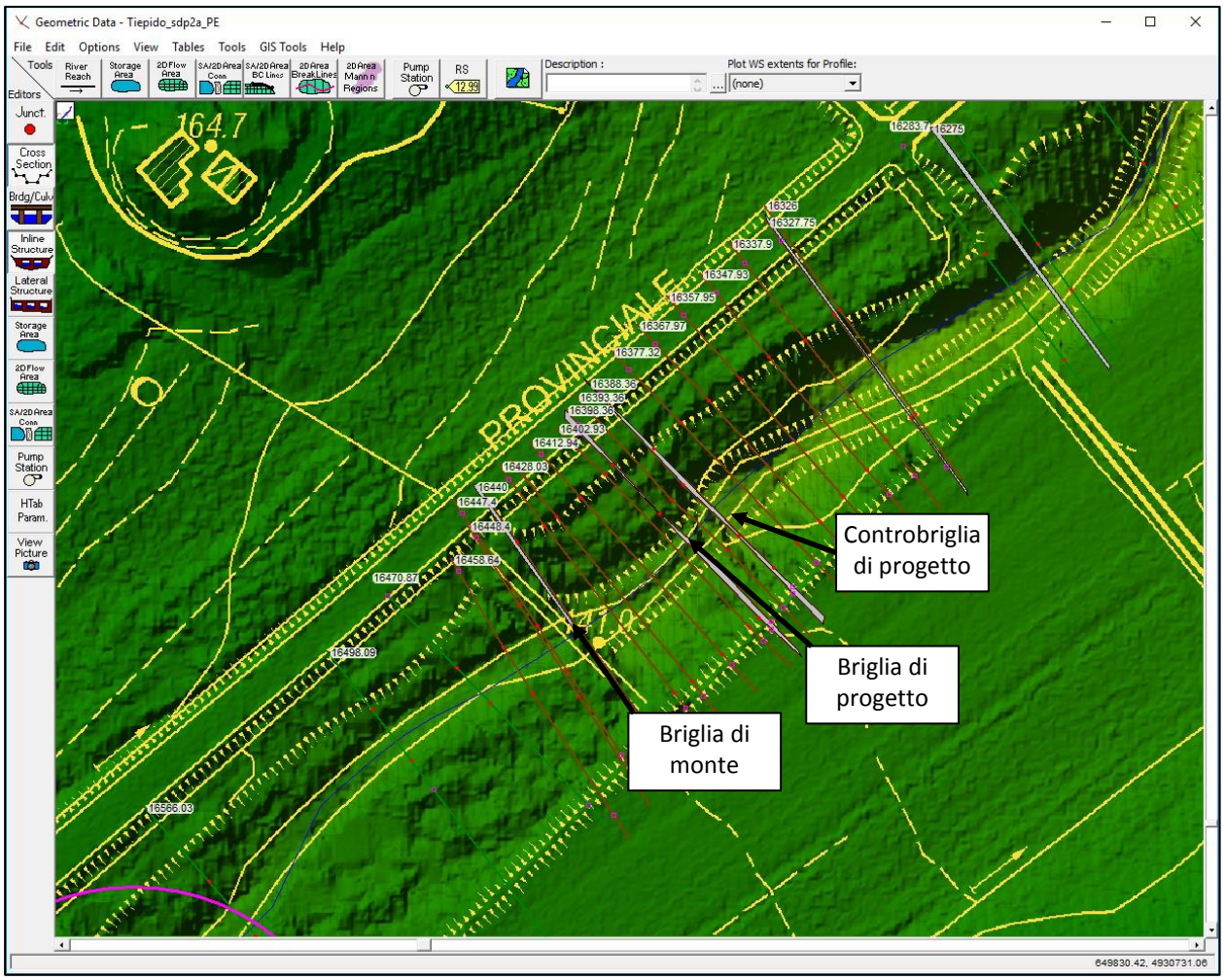


Figura 6.7 – Planimetria del modello idraulico con posizionamento della briglia e della controbriglia di progetto.

La briglia di progetto è costituita da una gaveta di larghezza pari a 23.0 m alla base ed ali di altezza pari a 2.5 m e pendenza 3:2, con quota di sfioro posta a 135.90 m s.m.m. Le ali si estendono su entrambi i lati per una lunghezza di circa 6.75 m per poi raccordarsi con la sezione trasversale con una pendenza di 3:2. Il salto di fondo previsto tra la sezione di monte e la sezione di valle della briglia è di circa 4.65 m.

In Figura 6.8 si riporta la rappresentazione della struttura come da implementazione nel modello idraulico.

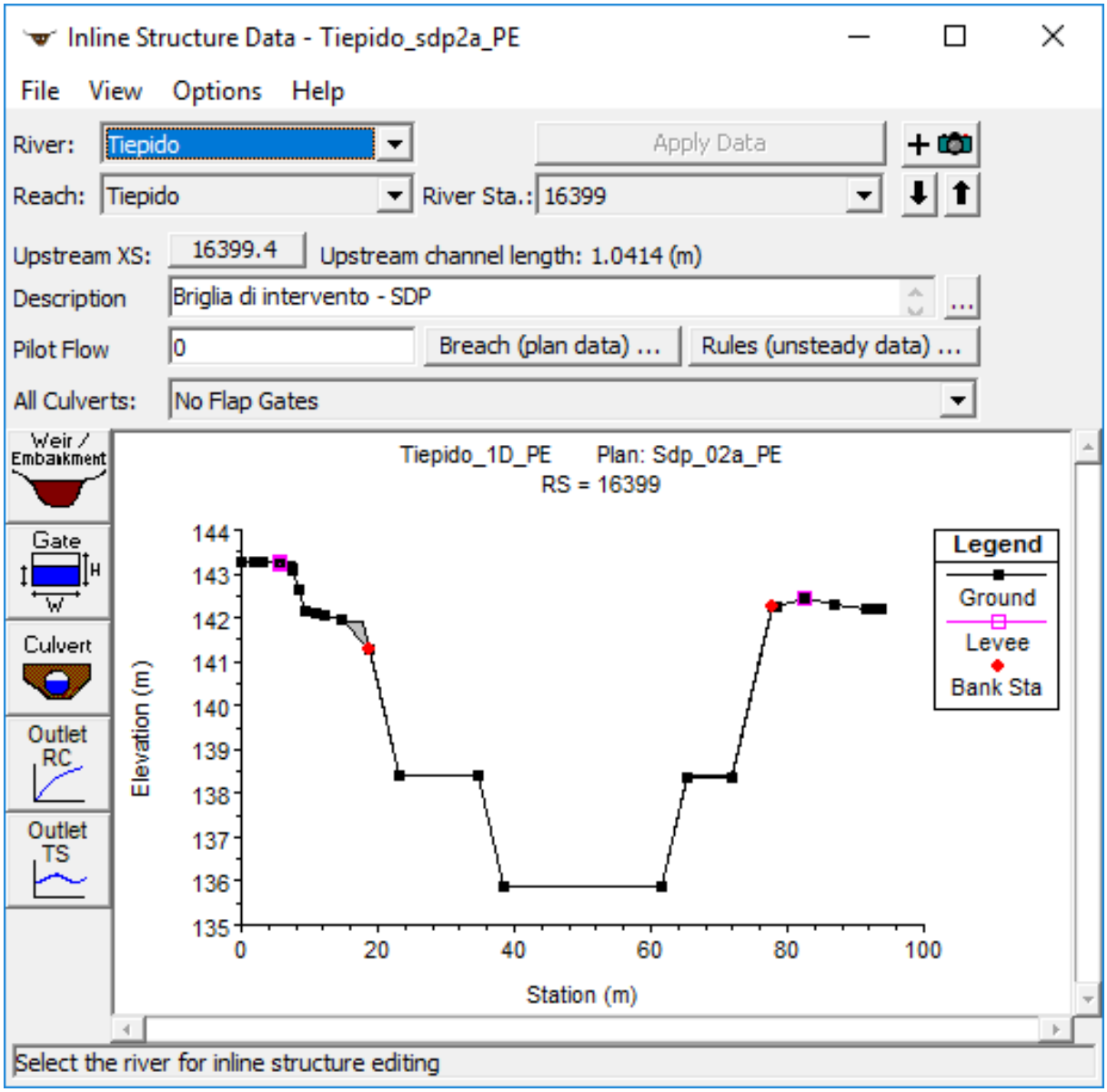


Figura 6.8 – Implementazione della briglia di progetto nel modello idraulico.

A sostegno della briglia principale, si prevede la realizzazione di una controbriglia posta 10 m a valle.

La controbriglia di progetto è costituita da una gaveta di larghezza pari a 16.0 m alla base ed ali di altezza pari a 2.5 m e pendenza 3:2, con quota di sfioro posta a 131.75 m s.m.m. Le ali si estendono su entrambi i lati per una lunghezza di circa 6.75 m per poi raccordarsi con la sezione trasversale con una pendenza di 3:2. La controbriglia non presenta un salto di fondo tra monte e valle, essendo la quota di fondo della sistemazione di valle coincidente con la quota di sfioro della briglia. In Figura 6.9 si riporta la rappresentazione della struttura come da implementazione nel modello idraulico.

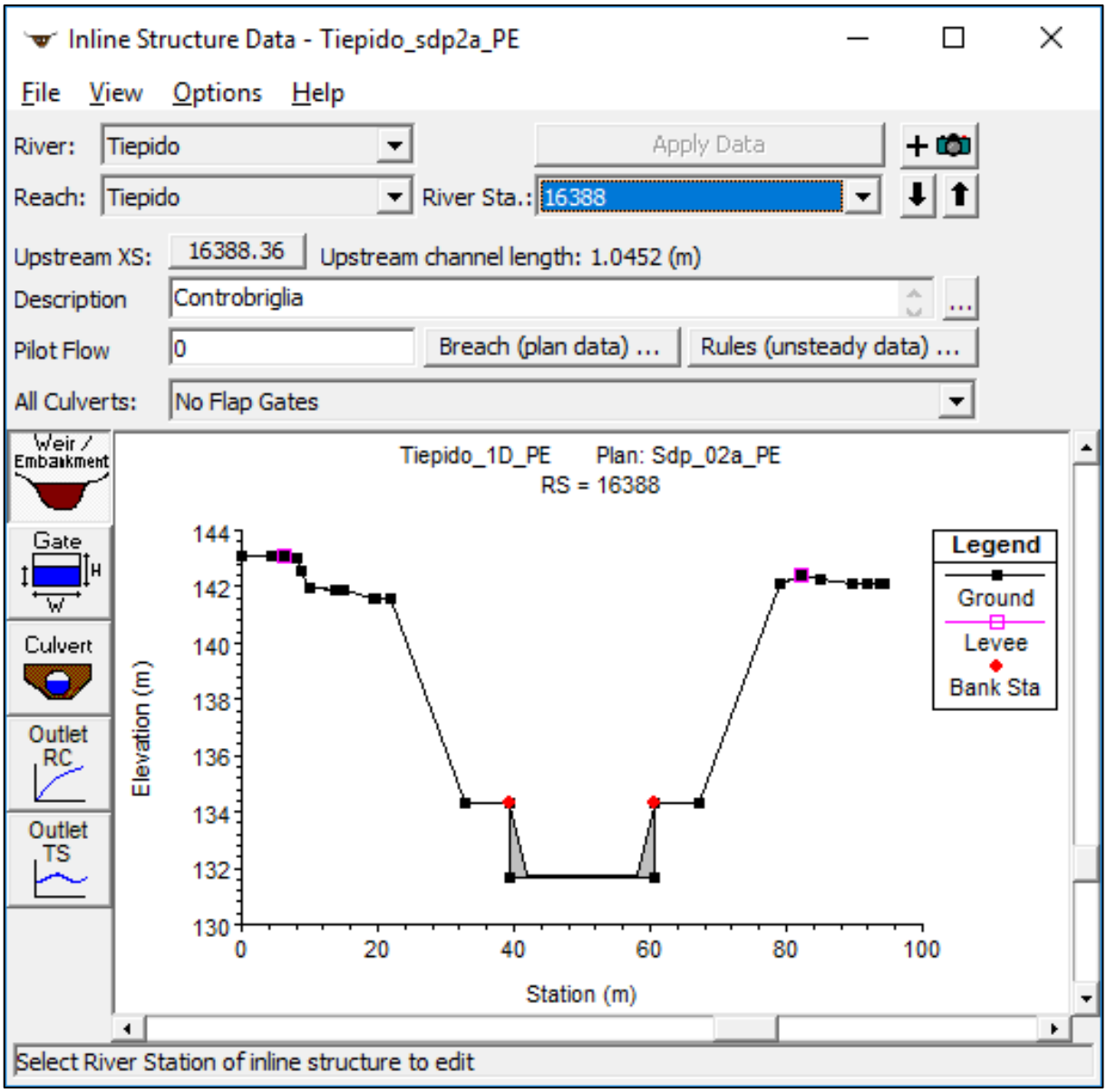


Figura 6.9 – Implementazione della controbriglia di progetto nel modello idraulico.

L'intervento prevede, oltre alla ricostruzione delle strutture danneggiate, il risezionamento del tratto di torrente Tiepido compreso tra la briglia di monte fino alla briglia di valle, posta al km 16+328, in modo da regolarizzare sia la sezione trasversale del torrente che la livelletta del fondo alveo, fortemente compromessa dai fenomeni di erosione verificatesi come conseguenza del crollo della briglia. Si prevedono inoltre protezioni del fondo e di sponda al fine di limitare l'erosione dovuta alla velocità della corrente. Il dimensionamento delle protezioni è riportato nella Relazione generale.

L'intervento di risezionamento può essere suddiviso nei seguenti tratti (Figura 6.10):

1. tratto compreso tra la briglia di monte e la briglia di progetto;
2. tratto compreso tra la briglia e la controbriglia di progetto;
3. tratto compreso tra la controbriglia di progetto e la briglia al km 16+328.

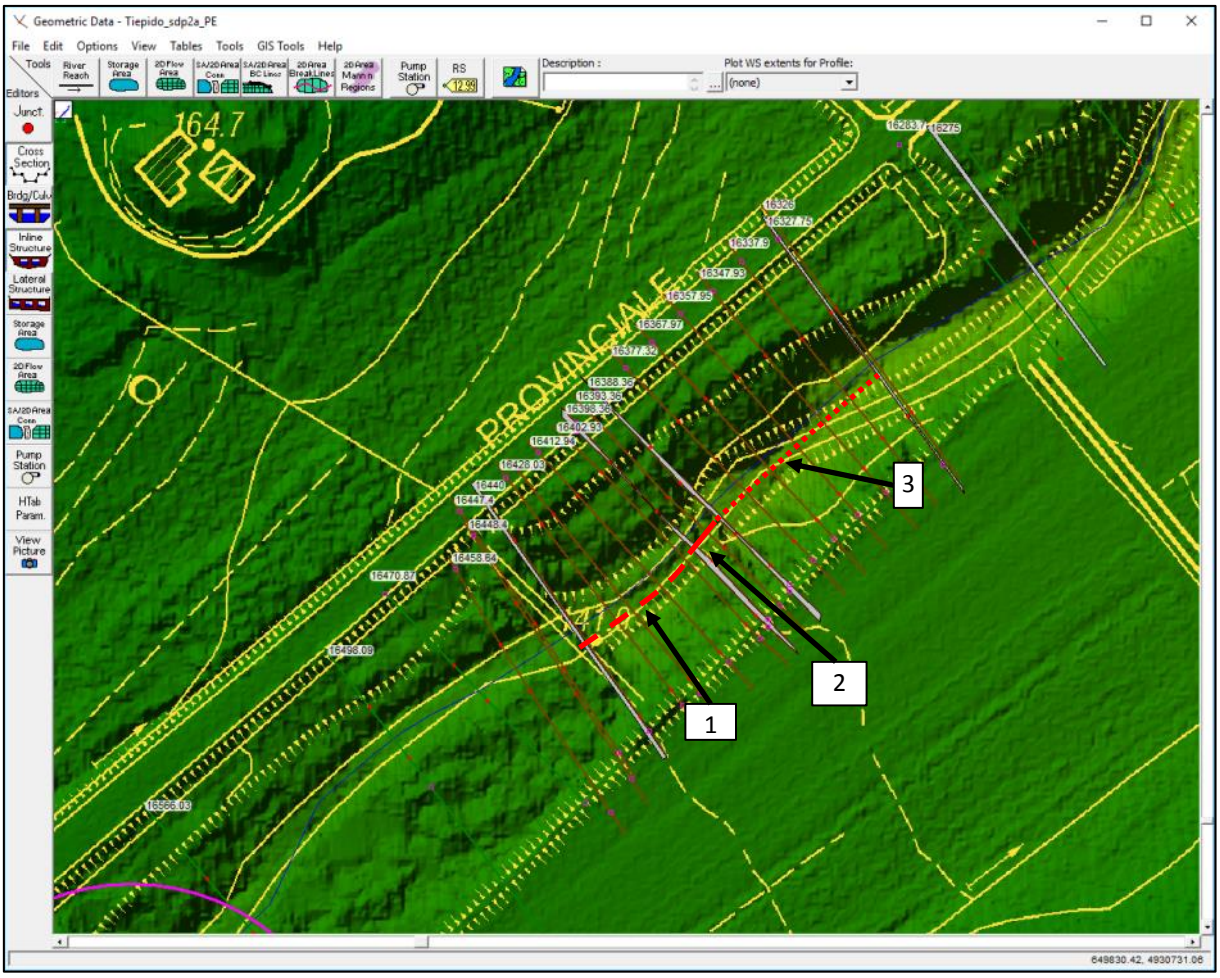


Figura 6.10 – Planimetria del modello idraulico con suddivisione in tratti di intervento per il risezionamento del torrente Tiepido.

Il tratto 1, lungo circa 39 m, prevede la regolarizzazione del fondo con quota della sezione di monte pari a 136.20 m s.m.m. e quota della sezione di valle coincidente con la quota di sfioro della briglia di progetto (135.90 m s.m.m.). La sezione trasversale prevista ha una base minore di 23 m con ali di altezza pari a 2.5 me pendenza 3:2. Le ali si estendono lateralmente per poi andarsi a raccordare alla sezione esistente con un profilo con pendenza 3:2. In Figura 6.11 si riporta l'implementazione di una delle sezioni trasversali di progetto previste nel tratto 1.

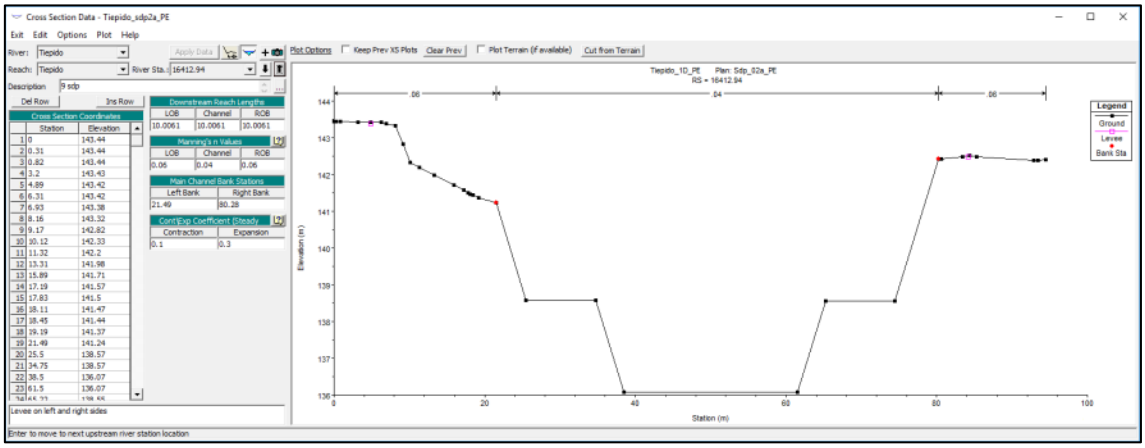


Figura 6.11 – Implementazione di una sezione trasversale di progetto prevista nel tratto 1 di intervento.

Il tratto 2, compreso tra la briglia e la controbriglia di progetto, si estende per 10 m e consiste in una sezione trasversale rettangolare in calcestruzzo di larghezza pari a 21 m e altezza variabile da 6.30 m immediatamente a valle della briglia fino a 3.0 m a ridosso della controbriglia. In corrispondenza della sommità della sezione rettangolare, la sezione trasversale si prolunga orizzontalmente fino a incontrare le sponde con pendenza 3:2 che permettono di raccordarsi al terreno esistente. In Figura 6.12 si riporta l'implementazione di una delle sezioni trasversali di progetto previste nel tratto 2.

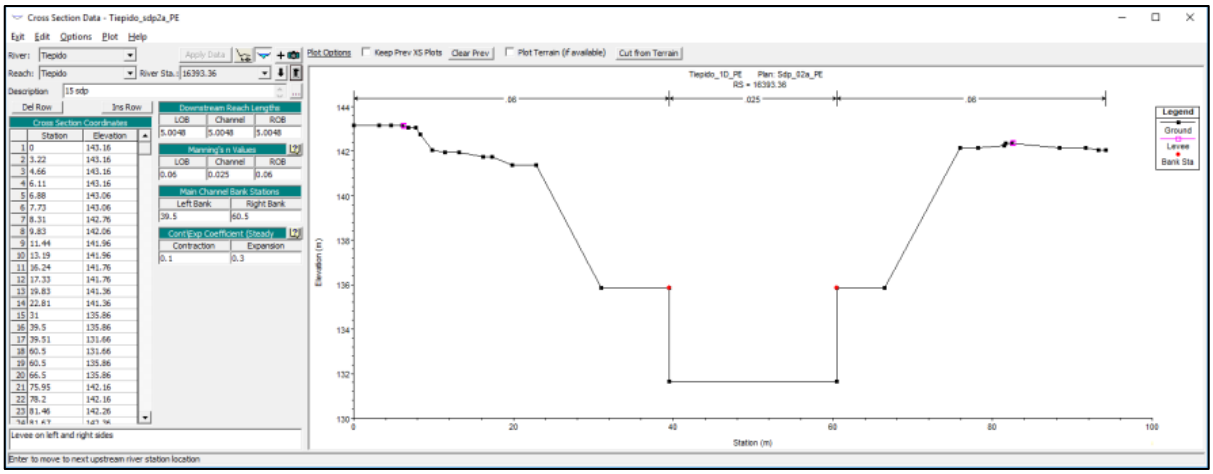


Figura 6.12 – Implementazione di una sezione trasversale di progetto prevista nel tratto 2 di intervento.

Il tratto 3 si estende per circa 59 m. Si prevede la regolarizzazione del fondo a partire dalla quota di sfioro della controbriglia (131.75 m s.m.m.) fino alla quota di sfioro della briglia posta al km 16+328 (131.44 m s.m.m.).

La sezione trasversale di progetto consiste in una sezione trapezia che permette di raccordarsi alla sezione esistente a monte della briglia di valle. Un esempio di sezione di progetto del tratto 3 è riportato in Figura 6.13.

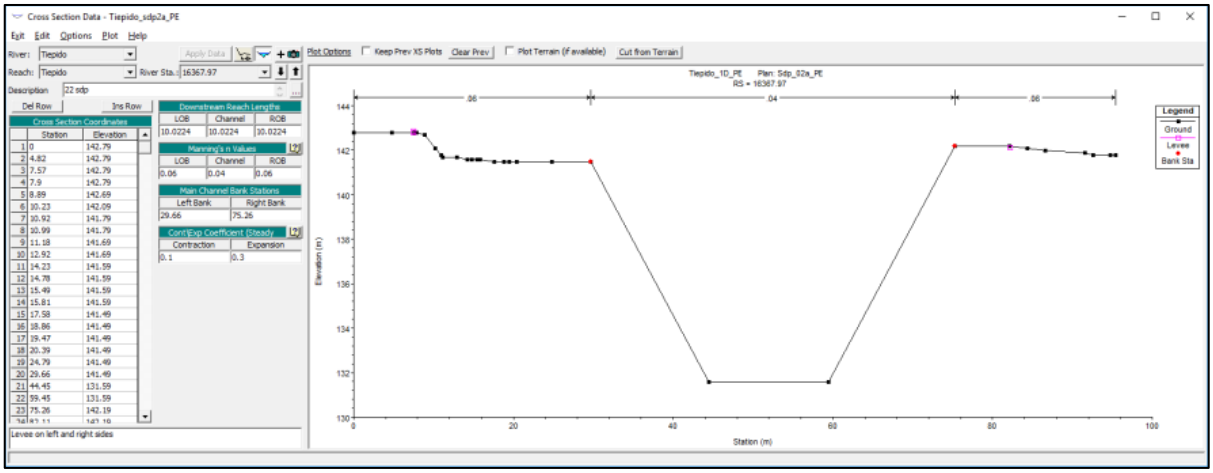


Figura 6.13 – Implementazione di una sezione trasversale di progetto prevista nel tratto 3 di intervento.

6.2 Risultati delle simulazioni idrauliche

I risultati delle simulazioni idrauliche sono riportati in forma tabellare in Appendice B.

In Figura 6.14 si riporta il profilo longitudinale del torrente Tiepido con i livelli ottenuti per le simulazioni effettuate (eventi con tempo di ritorno di 20, 100 e 200 anni) nella configurazione di progetto.

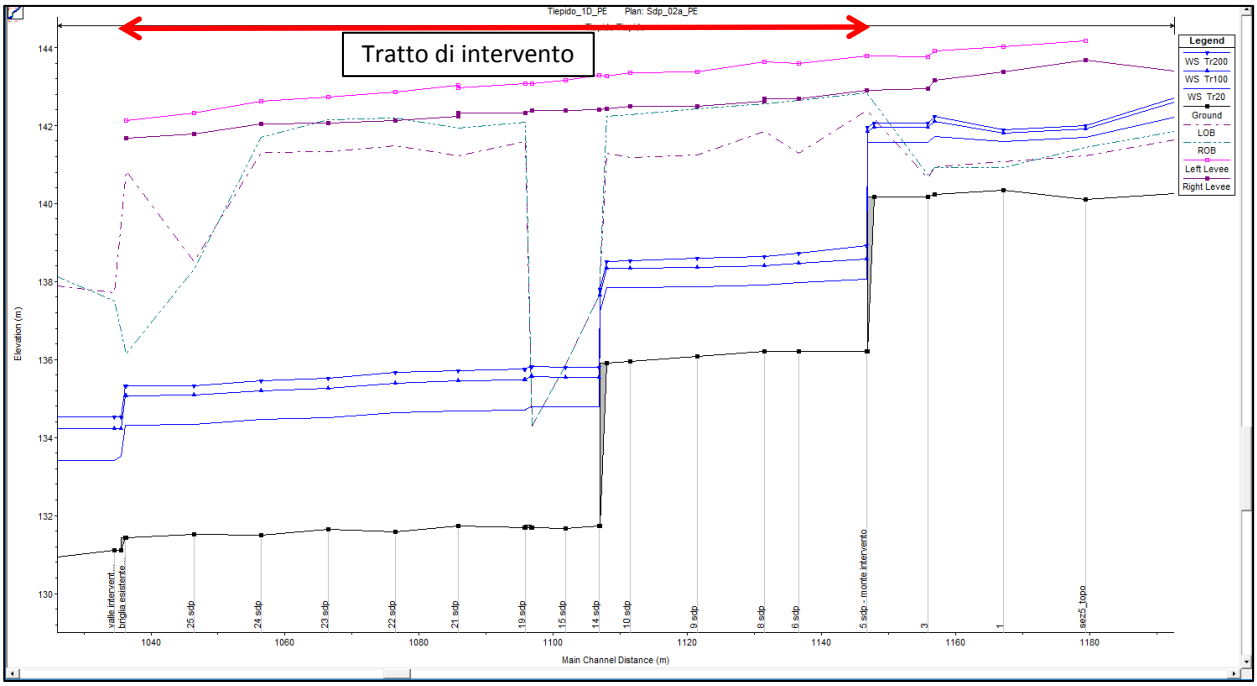


Figura 6.14 – Profili idraulici ottenuti dalla simulazione degli eventi considerati nella configurazione di progetto.

Nel tratto oggetto di intervento si evidenzia che i profili idraulici che si instaurano per tutti gli eventi di progetto sono contenuti ampiamente all'interno della sezione del torrente Tiepido e garantiscono il deflusso in condizioni di sicurezza, con un franco idraulico ampiamente superiore a 1.0 m.

La sezione trasversale trapezia prevista nel tratto 1 permette di contenere completamente le portate con tempo di ritorno di 100 anni, mentre la portata duecentennale in alcuni tratti non viene contenuta totalmente e interessa i tratti laterali orizzontali della sezione con un tirante massimo di circa 20 cm (Figura 6.15).

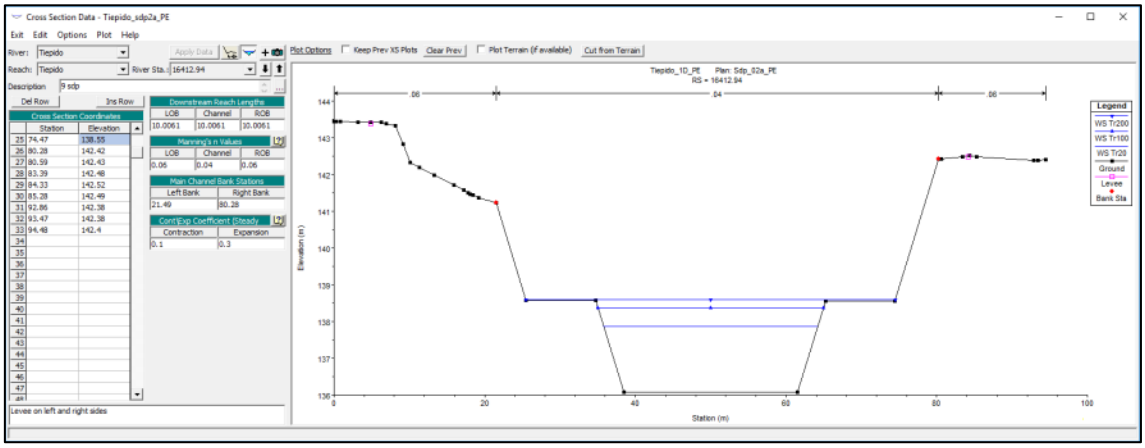


Figura 6.15 – Livelli idraulici in una sezione trasversale del tratto 1 ottenuti dalla simulazione degli eventi considerati nella configurazione di progetto.

La sezione rettangolare prevista nel tratto 2 permette di contenere le portate per tutti i tempi di ritorno fino a circa 5 m a valle della briglia di progetto (sezione di progetto n. 15 - Figura 6.16). Nella sezione immediatamente a monte della controbriglia nessuno degli eventi considerati è contenuto all'interno della sezione rettangolare ed in particolare il livello dell'evento duecentennale supera la quota superiore della sezione rettangolare di circa 1.55 m (Figura 6.17).

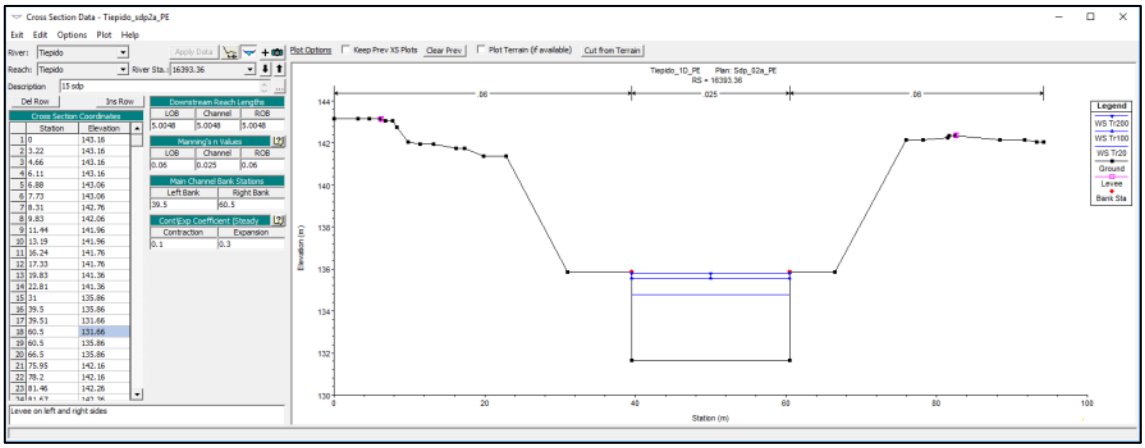


Figura 6.16 – Livelli idraulici nella sezione trasversale del tratto 2, posta circa 5 m a valle della briglia di progetto, ottenuti dalla simulazione degli eventi considerati nella configurazione di progetto.

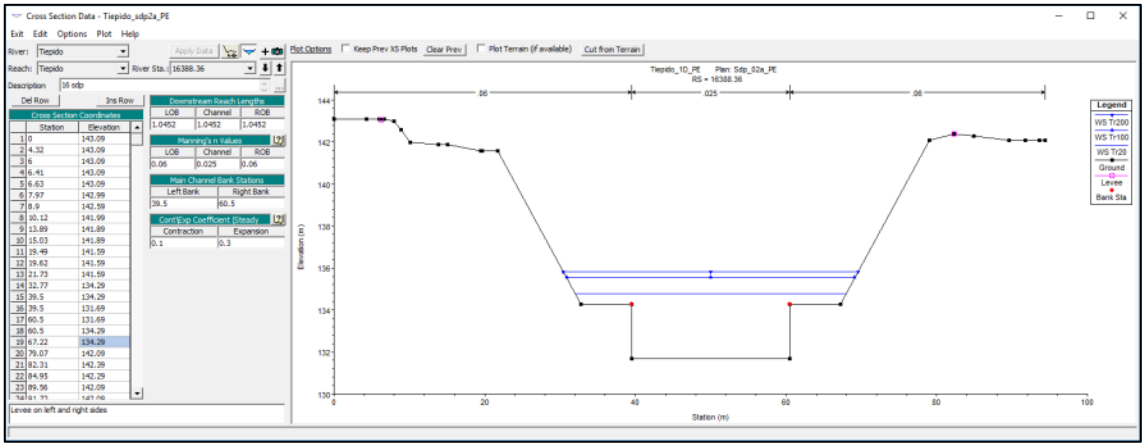


Figura 6.17 – Livelli idraulici nella sezione trasversale, posta immediatamente a monte della controbriglia, ottenuti dalla simulazione degli eventi considerati nella configurazione di progetto.

Nel tratto di intervento n. 3, a valle della controbriglia, i livelli idrometrico simulati sono ampiamente contenuti all'interno delle sezioni trasversali di progetto, come riportato a titolo esemplificativo in Figura 6.18.

Figura 6.18 – Livelli idraulici in una sezione trasversale del tratto 3 ottenuti dalla simulazione degli eventi considerati nella configurazione di progetto.

La briglia di progetto (Figura 6.20) permette di far defluire l'intera portata centennale all'interno della gaveta (tirante pari a 2.43 m), mentre la portata duecentennale eccede la quota massima della gaveta di circa 12 cm, avendo un tirante rispetto al fondo della gaveta di 2.62 m.

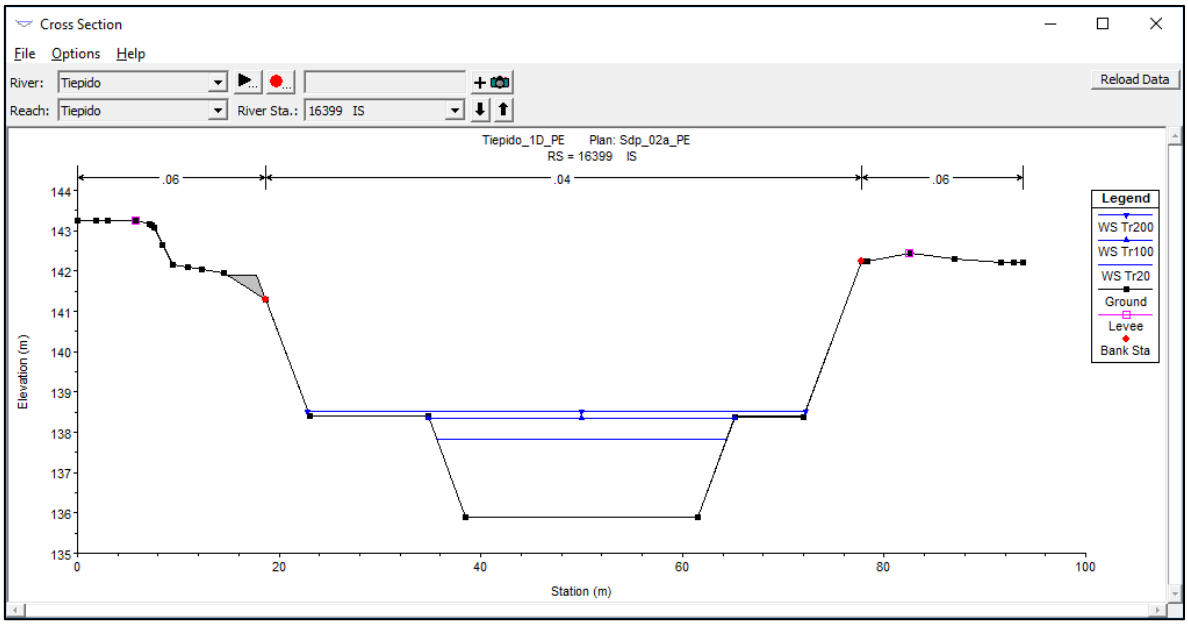


Figura 6.19 – Livelli idraulici in corrispondenza della briglia di progetto ottenuti dalla simulazione degli eventi considerati nella configurazione di progetto.

In corrispondenza della controbriglia (Figura 6.20) si instaurano dei tiranti pari a 3.03, 3.81 e 4.08 m, rispettivamente per gli eventi con tempo di ritorno di 20, 100 e 200 anni. Il livello idraulico che si instaura supera sempre la quota delle ali della controbriglia ma rimane ampiamente contenuta nella sezione trasversale del torrente Tiepido.

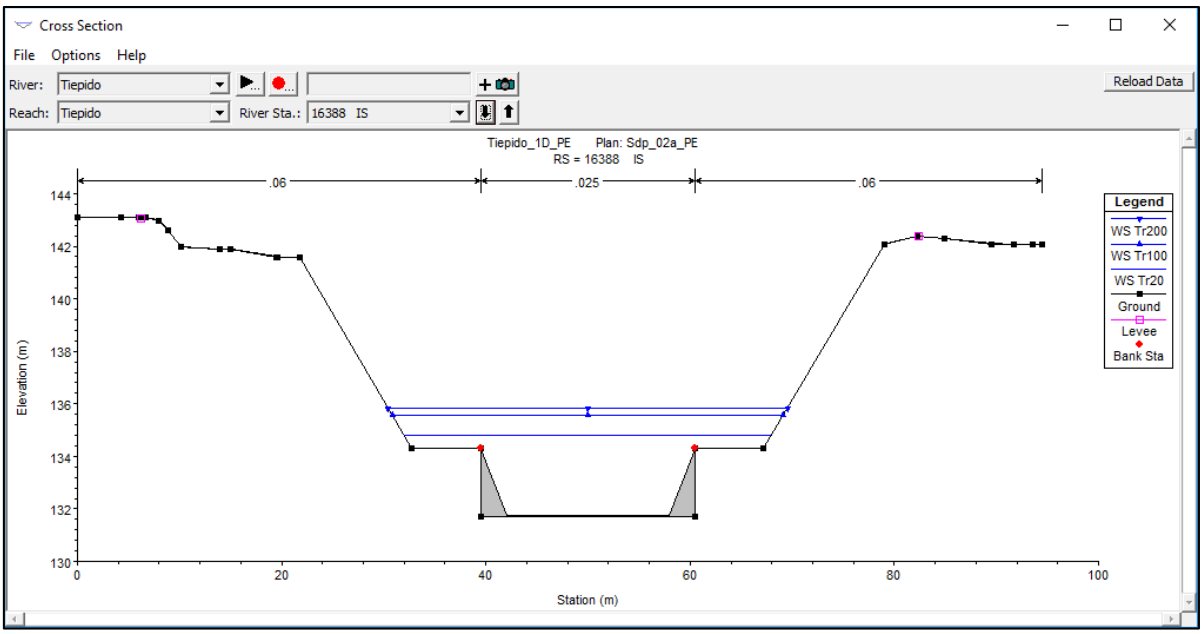


Figura 6.20 – Livelli idraulici in corrispondenza della controbriglia di progetto ottenuti dalla simulazione degli eventi considerati nella configurazione di progetto.

Per quanto riguarda le velocità e il numero di Froude che si instaurano nei tratti di intervento, con riferimento all'evento più gravoso considerato (tempo di ritorno di 200 anni) si ottengono i seguenti risultati:

- tratto 1: velocità comprese tra 2.6 m/s e 3.15 m/s – numero di Froude inferiore a 1, corrente lenta;
- tratto 2: velocità attorno a 2.20 - 2.40 m/s – numero di Froude inferiore a 1, corrente lenta;
- tratto 3: velocità comprese tra 2.15 m/s e 3.15 m/s – numero di Froude inferiore a 1, corrente lenta.

In Relazione generale si riporta il dimensionamento delle protezioni al fondo e di sponda previste a seguito della valutazione dei risultati idraulici ottenuti.

6.3 Confronto tra situazione attuale e quella di progetto

Nel presente paragrafo si riporta il confronto tra i risultati ottenuti dalle simulazioni idrauliche nella situazione esistente (intesa prima del crollo della briglia) e la configurazione di progetto.

In Figura 6.21, Figura 6.22 e Figura 6.23 è rappresentato il confronto tra i livelli idrometrici simulati nella situazione esistente e nella configurazione di progetto per gli eventi analizzati. Dal confronto si evidenzia che le variazioni di comportamento idraulico introdotte dalla realizzazione dei nuovi interventi si localizzano solamente nel tratto oggetto di intervento e non hanno alcun influenza sul tratto di monte o di valle del torrente Tiepido.

Gli interventi di ricostruzione della briglia e della controbriglia e i conseguenti interventi di risezionamento e regolarizzazione della livelletta hanno come effetto un consistente abbassamento del livello idrometrico nel tratto 1, per tutti gli eventi di progetto, mentre nei tratti 2 e 3 si assiste ad un lieve aumento del livello idrometrico, in particolare nel tratto 2, dove era localizzato un risalto nella situazione attuale.

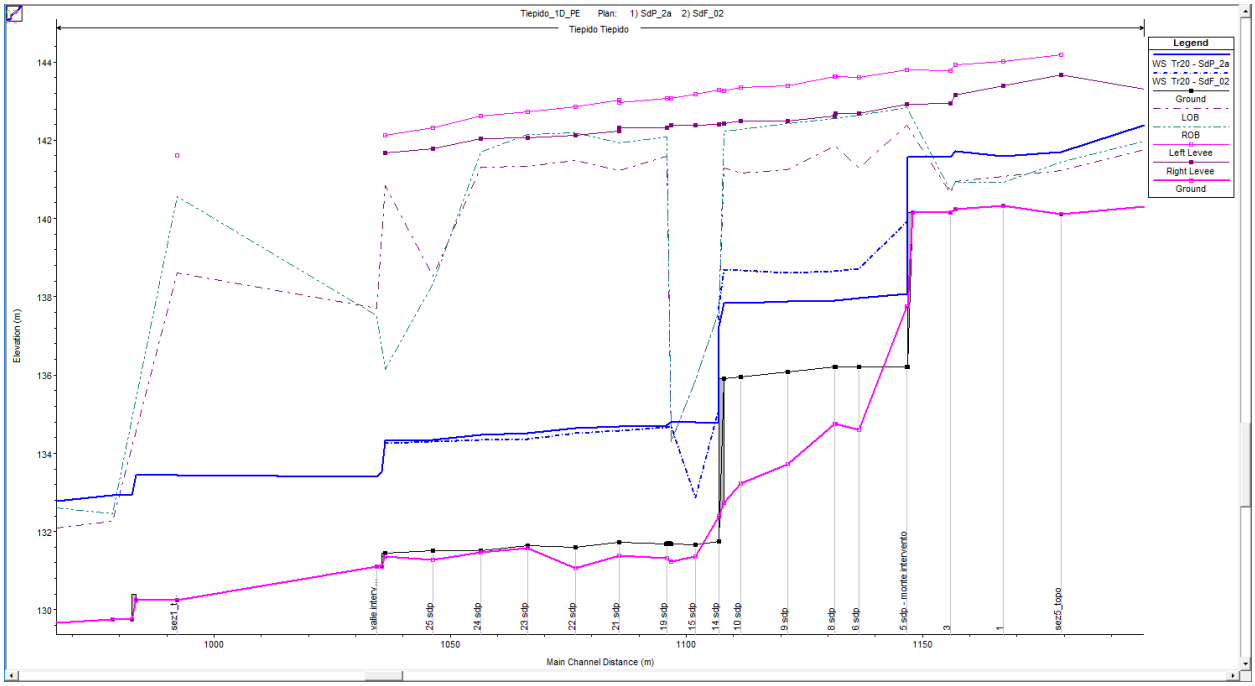


Figura 6.21 – Profilo idraulico nella situazione esistente e nella configurazione di progetto per un evento con tempo di ritorno di 20 anni.

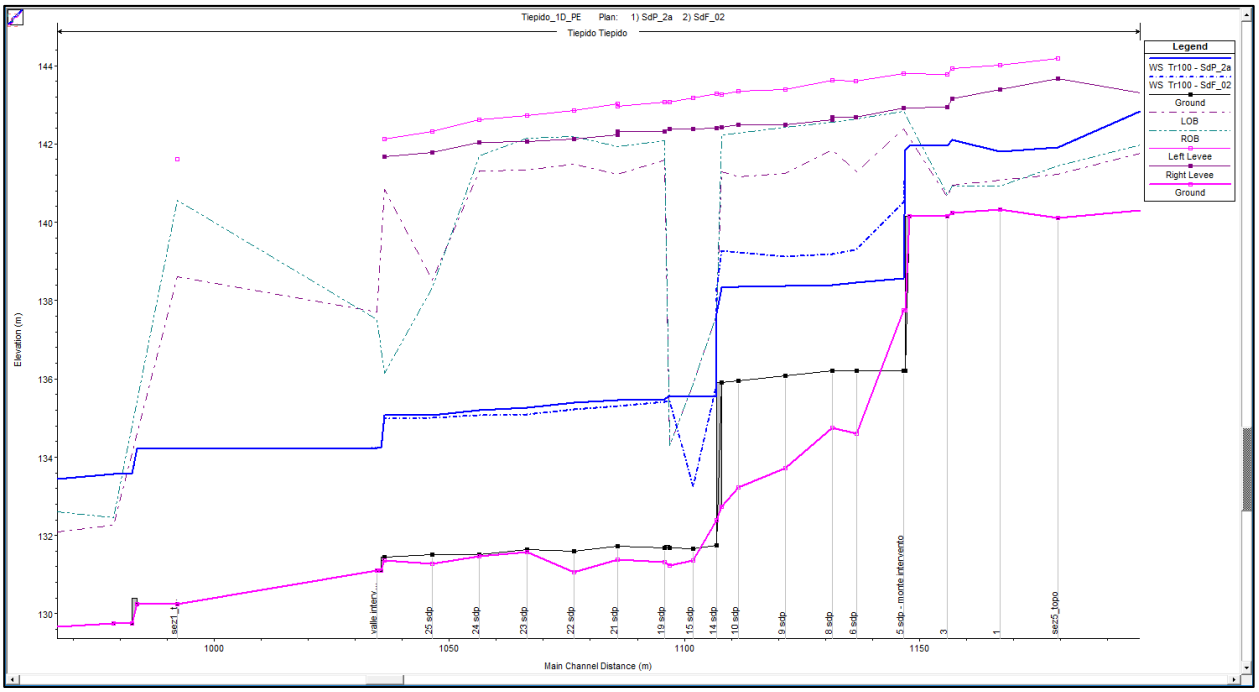


Figura 6.22 – Profilo idraulico nella situazione esistente e nella configurazione di progetto per un evento con tempo di ritorno di 100 anni.

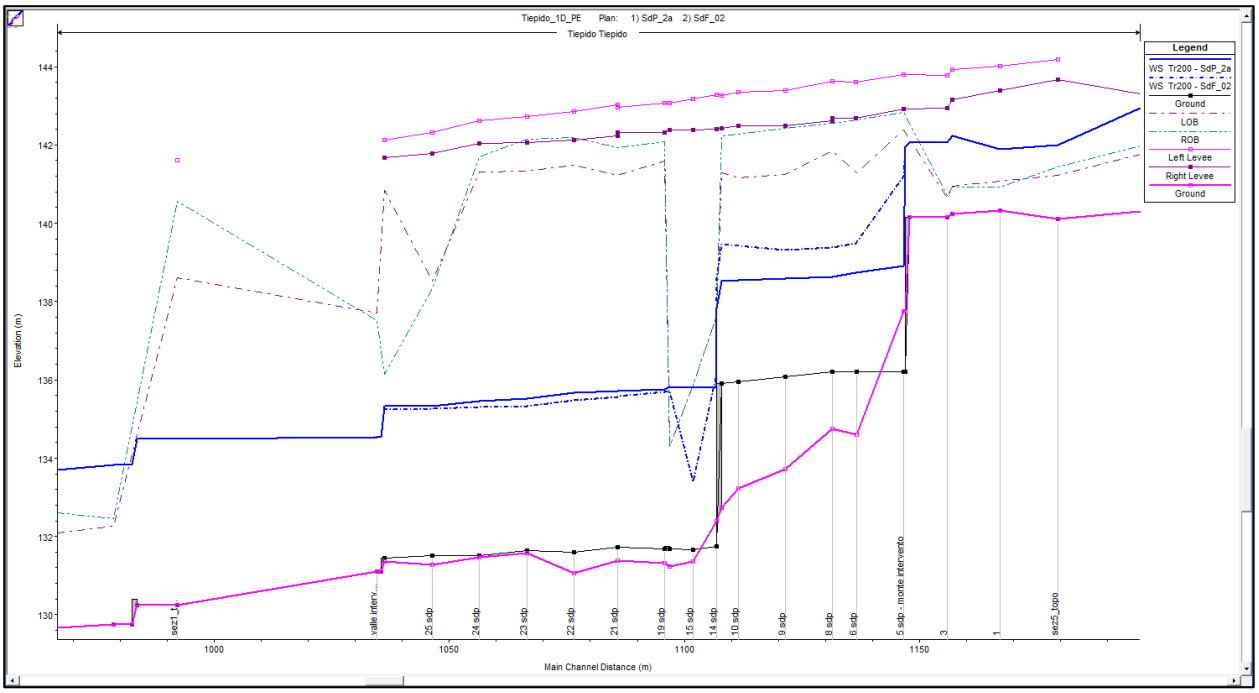


Figura 6.23 – Profilo idraulico nella situazione esistente e nella configurazione di progetto per un evento con tempo di ritorno di 200 anni.

Il funzionamento della briglia nella configurazione di progetto rispetto alla situazione attuale migliora in quanto il livello idrometrico assoluto si abbassa di circa 95 cm, per l'evento duecentennale (Figura 6.24), e si regolarizza essendo contenuto all'interno della gaveta per eventi fino ad un tempo di ritorno di 100 anni, al contrario del comportamento nella situazione esistente (Figura 6.25).

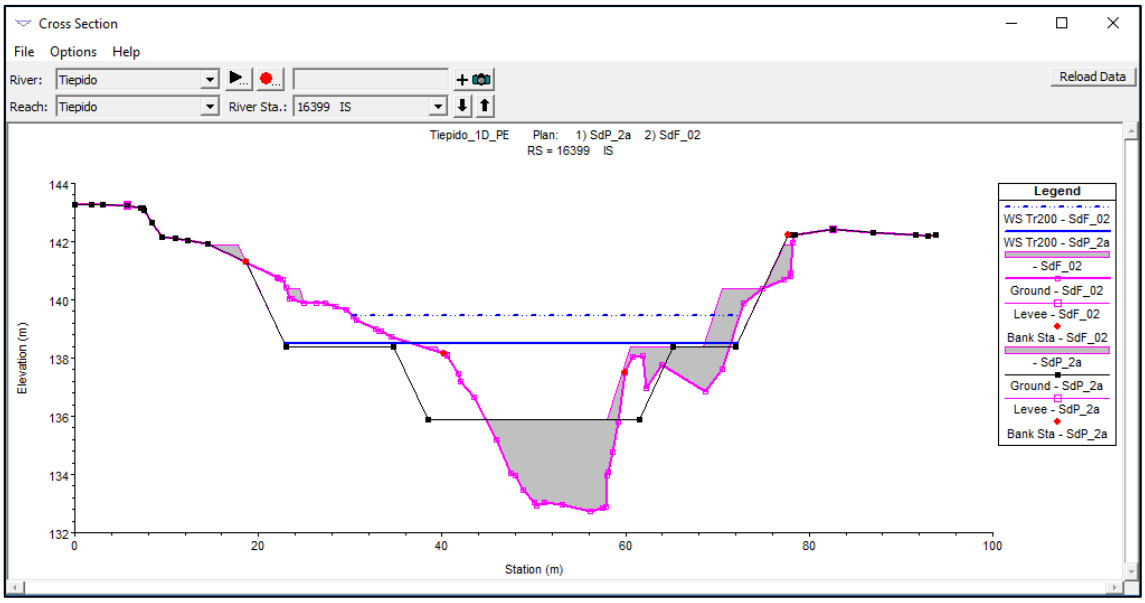


Figura 6.24 – Briglia oggetto di intervento nella situazione esistente e nella configurazione di progetto per un evento con tempo di ritorno di 200 anni.

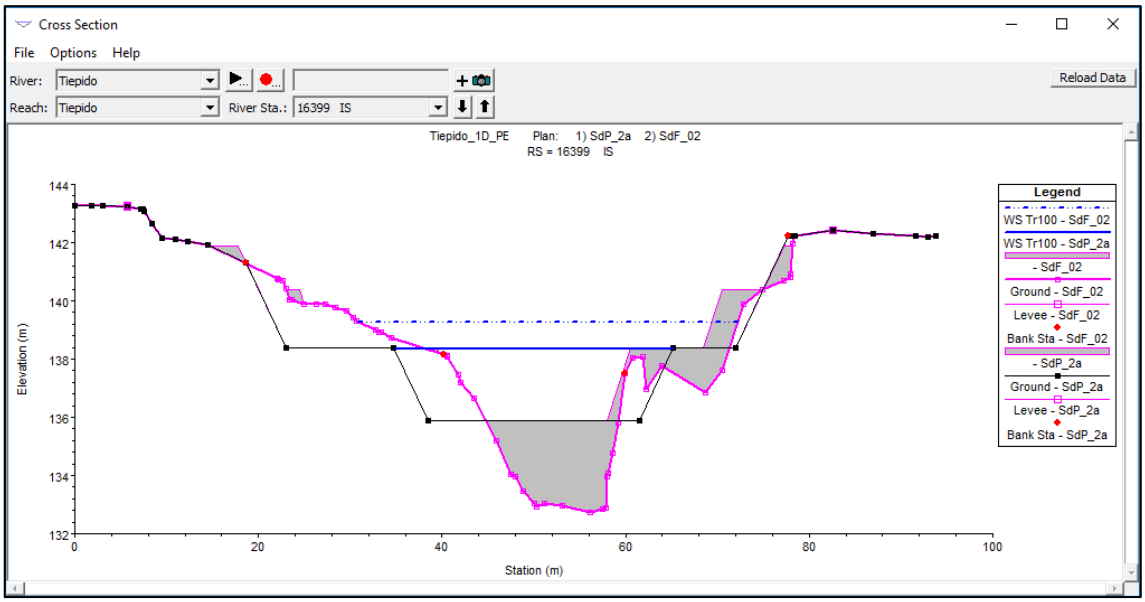


Figura 6.25 – Briglia oggetto di intervento nella situazione esistente e nella configurazione di progetto per un evento con tempo di ritorno di 100 anni.

7. Conclusioni

La presente relazione illustra l'analisi idraulica dell'intervento da realizzare in corrispondenza del Km 16+400 circa del Torrente Tiepido, costituito dalla realizzazione di una briglia e controbriglia unitamente alla ricalibratura ed alla protezione a scogliera di un tratto fluviale a monte ed a valle delle opere predette.

Per la realizzazione dello studio idraulico sono stati reperiti dati topografici e idrometrici e sono stati consultati studi pregressi realizzati nell'ambito di studio.

L'analisi idraulica è stata condotta mediante l'implementazione della soluzione progettuale nel modello monodimensionale a moto permanente che copre tutta l'asta fluviale, integrato, nel tratto terminale del torrente, a partire dalla SP 623 – Vignolese, con un modello bidimensionale a moto vario dell'area considerando anche il contributo del torrente Grizzaga, affluente sinistro del Tiepido. La necessità di un modello accoppiato mono - bidimensionale è stata dettata dai risultati dell'analisi comparata dei dati di eventi di piena del Tiepido e del Panaro e della chiusura del ponte sulla strada Curtatona e dall'analisi degli effetti del livello del Panaro sul comportamento del Tiepido condotta con il modello monodimensionale implementato.

I modelli matematici implementati hanno permesso di analizzare il funzionamento idraulico dell'opera in progetto, per mezzo dello studio dei livelli idrometrici del torrente Tiepido per eventi con tempo di ritorno di 20, 100 e 200 anni, considerando differenti condizioni di valle, imposte come livello nel fiume Panaro.

Grazie all'attività di modellazione idraulica è stato da un lato dimensionato l'intervento in progetto e dall'altro è stata analizzata la funzionalità del Torrente Tiepido nel suo complesso sulla scorta della soluzione progettuale.

Le analisi condotte nei precedenti capitoli hanno pertanto evidenziato che il comportamento idraulico nella configurazione di progetto viene modificato rispetto alla situazione esistente solo nel tratto oggetto di intervento, senza ripercussioni nel tratto di monte e di valle del torrente Tiepido.

Il funzionamento delle strutture di progetto, cioè briglia e controbriglia, migliora rispetto alla situazione esistente in quanto le portate con tempo di ritorno fino a 100 anni vengono contenute all'interno della gaveta della briglia e per portate superiori si ha un tirante sulle ali limitato a 20 cm. Questa situazione è migliorativa rispetto a quella attuale nella quale nemmeno la portata con tempo di ritorno di 20 anni risulta essere contenuta all'interno della gaveta della briglia esistente, prima del crollo.

Dal confronto con le simulazioni nella situazione esistente, si evidenzia che gli interventi di progetto abbassano sensibilmente il tirante idraulico nel tratto compreso tra la briglia di monte e la briglia di progetto, mentre nel tratto a valle si verifica una regolarizzazione del comportamento idraulico con scomparsa del risalto, nonostante in questo tratto vi sia un leggero aumento del livello rispetto alla situazione esistente.

Gli interventi di progetto prevedono anche la regolarizzazione delle sezioni d'alveo e della livelletta, fortemente erosa a seguito del crollo della briglia esistente, con protezione del fondo e delle sponde al fine di prevenire eventuali fenomeni di erosione, pericolosi per la stabilità delle sponde e delle strutture stesse.

Riferimenti bibliografici

AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO (2017): *Progetto di fattibilità tecnico-economica – Fiume Panaro (provincia di Modena) – Adeguamento strutturale e funzionale del sistema arginale tramite interventi di sistemazione morfologica dell'alveo, adeguamento in quota e in sagoma a valle della cassa al confine provinciale*

AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO (2016): *PGRA - Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni*

AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO (1996): *Sottoprogetto SP1 "Piene e naturalità alvei fluviali" – Progetto Po - Area Assetto Idrogeologico – Attività di studio e di ricerca a supporto della redazione del Piano di Bacino*

DA DEPPO L., DATEI C., SALANDIN P. (2004): Da Deppo L. Datei C., Salandin P. (2004): *Sistemazione dei corsi d'acqua*, Libreria Internazionale Cortina, Padova.

FLOOD ESTIMATION HANDBOOK (FEH), (1999): Institute of Hydrology, Wallingford, U.K.

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA – DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA (2016-2017): *Realizzazione del modello idrologico-idraulico dell'area compresa tra la pedecollina modenese a sud della città di Modena e la cassa di laminazione dei prati di San Clemente (MO)*

App. A Il modello HEC-RAS

Il modello di simulazione HEC-RAS (River Analysis System) è stato inizialmente sviluppato dall'US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, di Davis (USA) per lo studio idrodinamico nelle reti di canali aperti, attraverso la ricostruzione dei profili idraulici di moto permanente in regime subcritico e supercritico, operando nell'ipotesi di monodimensionalità del flusso. Fino alla versione 2.x HEC-RAS rappresentava l'evoluzione del noto modello HEC-2 (HEC, 1991) con l'aggiunta di numerose funzioni e strumenti di analisi nonché di una sofisticata interfaccia grafica operante in ambiente Windows.

In seguito, a partire dalla versione 3.0 (HEC, 2001), HEC-RAS è stato integrato con gli algoritmi di calcolo del modello idraulico *UNET One-Dimensional Unsteady Flow Through a Full Network of Open Channels* (Robert L. Barkau, 1992 and HEC, 1997) che consentono di simulare il comportamento della corrente in moto vario per il solo regime subcritico.

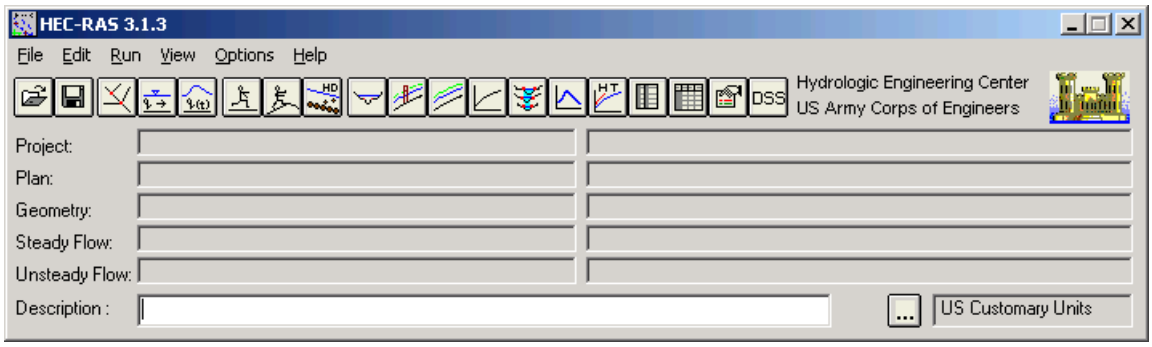


Figura A.7.1 - Finestra principale del modello HEC-RAS (vers. 3.1.3 Maggio 2005)

L'integrazione dei due modelli è avvenuta previa realizzazione di una particolare versione del modello UNET capace di condividere i medesimi algoritmi di analisi delle strutture idrauliche presenti nella libreria di HEC-RAS. In questo modo è stato possibile unificare la struttura dei dati che provvede alla definizione geometrica del corso d'acqua rendendo condivisibile la stessa interfaccia grafica sia per l'inserimento dati che per la visualizzazione dei risultati.

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

A.1 Ipotesi di funzionamento e capacità di calcolo

Obiettivo principale del modello, utilizzato ipotizzando un regime di moto permanente, è quello di correlare l'entità della portata liquida in arrivo dal bacino di monte con le velocità e con l'altezza idrometrica raggiunta nell'alveo principale e nelle golene. Il suo utilizzo nell'ipotesi di moto vario aggiunge la capacità di analizzare i

fenomeni di propagazione di un'onda di piena e valutare gli effetti di laminazione dovuti alla naturale conformazione del corso d'acqua o alla presenza di dispositivi artificiali.

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

- moto gradualmente vario;
- moto monodimensionale;
- perdite di fondo mediamente costanti fra due sezioni trasversali adiacenti;
- arginature e geometria del fondo fisse;

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

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

Il modello è dotato di ulteriori algoritmi che permettono di indagare in dettaglio alcuni fenomeni di interesse nell'ingegneria idraulica. Possono essere studiati i fenomeni erosivi intorno alle pile e alle spalle dei ponti non plateati, valutati gli effetti della parziale ostruzione di una sezione di deflusso a causa dei depositi alluvionali (ipotizzati costanti durante una simulazione) e può essere considerata l'eventuale formazione di ghiaccio sulla superficie liquida valutando i suoi effetti sul profilo idraulico. Inoltre, pur operando nell'ipotesi di monodimensionalità, il modello consente la ricostruzione dell'andamento della velocità all'interno di una stessa sezione di deflusso, distinguendo tra zone spondali e canale centrale, in funzione della variazione di scabrezza e di tirante idraulico.

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

A.2 Definizione dei parametri fondamentali

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

A.2.1 Moto permanente e vario

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

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

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

A.2.2 Moto uniforme e vario

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

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

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

A.2.3 Moto subcritico e supercritico

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

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

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

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

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

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}} \qquad \textit{(Eq.1)}$$

dove:

V = velocità media Q/A [m/s]

g = accelerazione di gravità [m/s^2]

D = raggio idraulico [m]

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

Questa definizione del numero di Froude ipotizza che ci sia una distribuzione uniforme di velocità nella sezione. Per un canale simmetrico, rettangolare, triangolare, trapezoidale, ecc., questo presupposto si realizza, ma nel caso

di un canale naturale, con sezioni irregolari e aree golenali, l'espressione data non è più valida e non può essere rigorosamente utilizzata per determinare il tipo di moto; in questo caso sarebbe più corretto utilizzare dei numeri di Froude particolari, che tengano conto delle variazioni geometriche, di velocità e di portata.

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

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

A.2.4 Altezza critica

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

A.3 Procedure di calcolo per simulazioni in moto permanente

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

La determinazione del profilo idraulico avviene risolvendo l'equazione del bilancio dell'energia espresso secondo la formulazione di Manning:

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

S_f = pendenza relativa alle perdite di carico distribuite;

R = raggio idraulico;

n = coefficiente di scabrezza di Manning.

L'equazione (4) viene risolta per ogni tratto delimitato da due sezioni trasversali consecutive utilizzando lo "standard step method", tecnica numerica che, una volta nota l'energia in corrispondenza di una sezione, permette il calcolo della velocità e del tirante idraulico della sezione adiacente.

A.3.1 Determinazione della distribuzione del moto in una sezione trasversale

E' stato precedentemente introdotto il significato del coefficiente di Coriolis utilizzato per tener conto della non uniforme distribuzione spaziale della velocità all'interno di una stessa sezione trasversale d'alveo. Per la determinazione del suo valore nel caso di una sezione naturale, o comunque irregolare, è necessario conoscere come si suddivide la portata, ossia quanta fluisce nel canale propriamente detto e quanta nelle zone golenali. Viene a questo scopo utilizzata l'equazione di Manning:

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

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

Ponendo quindi:

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

si ha che:

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

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

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

Tramite alcuni passaggi si trova che:

$$\alpha = \frac{\left(\sum A_i\right)^2 \left(\sum K_i^3 / A_i^2\right)}{\left(\sum K_i\right)^3} \qquad \textit{(Eq.9)}$$

A.3.2 Distribuzione delle pressioni in una sezione trasversale

Come già detto, una delle ipotesi di base nel calcolo del profilo da parte di HEC-RAS è la distribuzione idrostatica delle pressioni. Si può assumere che la pressione sia idrostatica in un fluido in movimento se le linee di corrente

sono essenzialmente dritte e parallele. La maggior parte dei canali naturali con moto gradualmente vario rispetta queste condizioni, non rispettate invece nel caso di moto rapidamente vario.

A.3.3 Calcolo dei profili idraulici

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

A.3.3.A Bilancio dell'energia

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

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

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

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

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

o in altri termini:

$$E_1 = E_2 + h_e \qquad \textit{(Eq.12)}$$

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

A.3.3.B Perdite di energia

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

Il programma determina se il flusso è in contrazione o espansione sottraendo il termine cinetico $V^2/2g$ alla sezione a valle dal termine cinetico alla sezione a monte. Se la differenza risulta un numero negativo, il moto è di contrazione, se positivo è di espansione. Il programma, sulla base di questo controllo, applica un coefficiente appropriato.

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

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

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

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

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

$$\overline{S_f} = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2}\right)^2 \qquad \textit{trasporto medio} \qquad (Eq.14)$$

$$\overline{S_f} = \frac{\sqrt{S_{f_1} + S_{f_2}}}{2} \qquad \textit{attrito specifico medio} \qquad (Eq.15)$$

$$\overline{S_f} = \sqrt{S_{f_1} * S_{f_2}} \qquad \textit{media geometrica attrito specifico} \qquad (Eq.16)$$

$$\overline{S_f} = \frac{2\, S_{f_1} * S_{f_2}}{S_{f_1} + S_{f2}} \qquad \textit{media armonica attrito specifico} \qquad (Eq.17)$$

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

A.3.4 Standard step method

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

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

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

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

$$WS_u = Z_u + y_u \qquad (Eq.19)$$

$$WS_d = Z_d + y_d \qquad (Eq.20)$$

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

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

I passi attraverso cui avviene il calcolo sono i seguenti.

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

distanza dalla sezione a monte;

- Sulla base della quota di pelo libero assunta e della geometria della sezione, vengono determinati i termini cinetico e il trasporto totale per la sezione a monte;
- Con i valori calcolati del termine cinetico e di trasporto del passo 2, viene calcolato il valore di h_e;
- Con il valore calcolato di h_e, viene calcolata l'altezza di pelo libero della sezione a monte utilizzando l'equazione dell'energia;
- Viene fatto un confronto fra il valore calcolato al passo 4 e il valore impostato al passo 1. Se la differenza non è inferiore a una prefissata tolleranza, il ciclo riprende cambiando il valore al passo 1.

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

App. B Risultati del modello idraulico 1D

B.1 Situazione attuale

B.1.1 Tempo di ritorno 20 anni

Reach	River Sta	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
		(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
Tiepido	18414.53	117.1	167	169.04	168.97	169.32	0.008942	2.68	60.85	76.95	0.78
Tiepido	18304.53	117.1	166.3	167.72	167.72	168.18	0.011898	3.22	45.77	53.04	0.9
Tiepido	18256.5	117.1	165.4	166.78	167	167.45	0.019686	4.02	41.97	66.37	1.15
Tiepido	18255.5	Inl Struct									
Tiepido	18254.5	117.1	165.04	166.83	166.83	167.28	0.009355	3.24	51.31	67.04	0.82
Tiepido	18197.53	117.1	164.18	165.8	165.57	166.01	0.007262	2.63	69.45	68.42	0.7
Tiepido	18089.53	117.1	162.56	164.46	164.46	165.03	0.010633	3.42	39.72	41.07	0.87
Tiepido	18031.53	117.1	161.84	162.4	162.73	163.54	0.105708	4.73	24.74	55.2	2.26
Tiepido	18025	Inl Struct									
Tiepido	18021.53	117.1	160.5	161.71	161.38	161.9	0.005428	1.92	60.87	55.2	0.59
Tiepido	17927.53	117.1	159.59	160.7	160.67	161.07	0.015419	2.71	43.24	52.21	0.95
Tiepido	17926	Inl Struct									
Tiepido	17924.53	117.1	157.97	160.37		160.44	0.00097	1.19	98.26	51.24	0.27
Tiepido	17883.93	117.1	157.62	160	159.46	160.34	0.004357	2.68	51.44	39.52	0.58
Tiepido	17813.93	117.1	157	159.1	159.1	159.82	0.01242	3.81	33.29	26.58	0.94
Tiepido	17723.93	117.1	156.52	157.74	157.84	158.39	0.020909	3.56	32.9	32.74	1.13
Tiepido	17722	Inl Struct									
Tiepido	17720.93	117.1	153	155.78	154.72	156	0.002356	2.07	56.65	26.25	0.45
Tiepido	17635.93	117.1	152	155.04	154.71	155.56	0.014438	3.19	36.71	20.68	0.76
Tiepido	17519.93	117.1	151.83	153.4	153.37	154.09	0.010996	3.68	31.93	22.54	0.97
Tiepido	17474.83	117.1	150.79	153.36		153.68	0.004424	2.54	47.82	25.83	0.55
Tiepido	17378.96	117.1	149.44	152.3	152.06	153.01	0.011019	3.75	32.62	19.25	0.81
Tiepido	17279.43	117.1	148.87	151.65		152.06	0.006893	2.93	45.52	32.35	0.65
Tiepido	17127.65	117.1	147.52	149.96	149.96	150.57	0.014466	3.54	37.09	36.44	0.85
Tiepido	17021.18	117.1	146.61	148.78	148.86	149.39	0.009034	3.77	44.18	46.25	0.89
Tiepido	16951.01	117.1	145.83	148.3	148.07	148.63	0.006541	2.84	55.45	56.7	0.69
Tiepido	16841.01	117.1	145.23	147.4	147.4	147.83	0.008162	3.16	52.51	63.68	0.77
Tiepido	16765.66	117.1	143.86	146.23	146.46	146.99	0.013409	3.96	36.84	58.79	0.98
Tiepido	16703.35	117.1	143.44	146.33	145.83	146.55	0.003317	2.31	75.41	78.18	0.51
Tiepido	16677.37	117.1	143.35	146.43		146.47	0.0006	0.84	154.53	130.06	0.21
Tiepido	16654.38	117.1	143.47	145.79	145.79	146.38	0.009547	3.56	41.33	38.23	0.84
Tiepido	16647.77	Inl Struct									
Tiepido	16641.46	117.1	141.85	144.22	143.5	144.48	0.003342	2.28	54.63	39.56	0.51
Tiepido	16636.46	117.1	141.85	144.17		144.44	0.003635	2.34	52.8	36.32	0.53
Tiepido	16629.96	117.1	141.85	144.13	143.5	144.42	0.003892	2.39	51.43	35.42	0.55

Tiepido	16623.29	Culvert									
Tiepido	16605.99	117.1	141.42	143.77	143.59	144.37	0.009655	3.42	34.73	22.58	0.84
Tiepido	16566.03	117.1	140.54	143.72	143.12	144.04	0.004138	2.6	52.55	42.87	0.57
Tiepido	16498.09	117.1	140.43	142.77	142.77	143.54	0.013106	3.91	31.17	22.62	0.97
Tiepido	16470.87	117.1	140.1	141.7	142.07	142.93	0.036576	5.44	32.2	57.7	1.53
Tiepido	16458.64	117.1	140.33	141.58	141.83	142.4	0.031461	4.67	37.55	57.5	1.41
Tiepido	16448.4	117.1	140.24	141.72	141.59	142.02	0.009322	2.63	54.45	57.25	0.78
Tiepido	16447.4	117.1	140.16	141.57	141.57	142	0.013391	3.49	48.81	51.92	0.96
Tiepido	16440	Inl Struct									
Tiepido	16438.17	117.1	137.75	139.92	139.92	140.84	0.016642	4.26	27.47	14.91	1
Tiepido	16428.03	117.1	134.6	138.71	136.85	138.87	0.001437	1.76	66.5	22.08	0.32
Tiepido	16423	117.1	134.74	138.64	137.25	138.85	0.001718	2.11	64.28	29.86	0.38
Tiepido	16422.98	117.1	134.74	138.64	137.25	138.85	0.001726	2.11	64.19	29.85	0.38
Tiepido	16412.94	117.1	133.72	138.61	137.13	138.83	0.001778	2.29	66.36	29.02	0.37
Tiepido	16402.93	117.1	133.23	138.66	136.02	138.79	0.000797	1.68	86.22	36.84	0.25
Tiepido	16399.4	117.1	132.74	138.69	135.4	138.78	0.000566	1.35	98.11	36.86	0.21
Tiepido	16399	Inl Struct									
Tiepido	16398.36	117.1	132.4	135.16	135.16	136.18	0.016159	4.47	26.21	12.86	1
Tiepido	16393.36	117.1	131.37	132.87	133.7	135.83	0.099439	7.61	15.38	15.39	2.43
Tiepido	16388.36	117.1	131.23	134.68	133.49	134.9	0.002374	2.06	56.93	23.95	0.42
Tiepido	16387.31	117.1	131.31	134.67	133.54	134.9	0.002582	2.1	55.73	24.26	0.44
Tiepido	16377.32	117.1	131.39	134.58	133.64	134.86	0.003395	2.36	49.66	22.14	0.5
Tiepido	16377.3	117.1	131.39	134.58	133.64	134.86	0.003398	2.36	49.65	22.14	0.5
Tiepido	16367.97	117.1	131.07	134.51	133.55	134.83	0.003509	2.47	47.35	20.07	0.51
Tiepido	16357.95	117.1	131.58	134.37	133.7	134.77	0.005242	2.82	41.6	19.92	0.62
Tiepido	16347.93	117.1	131.47	134.34	133.61	134.71	0.004763	2.71	43.18	20.45	0.6
Tiepido	16337.9	117.1	131.28	134.29	133.53	134.67	0.004726	2.71	43.17	20.28	0.59
Tiepido	16327.75	117.1	131.37	134.25	133.52	134.61	0.004699	2.67	43.91	21.08	0.59
Tiepido	16327	Inl Struct									
Tiepido	16326	117.1	131.1	133.4	133.36	134.18	0.013423	3.91	29.93	17.79	0.96
Tiepido	16283.7	117.1	130.24	133.44	132.45	133.78	0.003747	2.56	45.73	18.42	0.52
Tiepido	16275	Inl Struct									
Tiepido	16270.07	117.1	129.75	132.93	132.7	133.62	0.009954	3.7	31.92	17.11	0.84
Tiepido	16231.83	117.1	129.5	132.47	132.26	133.23	0.010376	3.85	30.68	15.53	0.85
Tiepido	16155.38	117.1	128.43	131.26	131.26	132.29	0.013804	4.52	26.5	13.66	0.98
Tiepido	16091.24	117.1	127.36	129.94	130.16	131.21	0.020104	4.99	23.55	13.57	1.18
Tiepido	16037.96	117.25	127.11	129.73	129.54	130.45	0.009807	3.74	31.57	17.16	0.86
Tiepido	15994.75	117.25	126.52	129.02	129.02	129.94	0.012954	4.27	28.1	16.43	0.98
Tiepido	15928.69	117.25	125.58	129.39	127.64	129.48	0.000787	1.34	88.26	32.53	0.25
Tiepido	15826.81	117.25	124.63	128.89		129.3	0.003444	2.85	42.75	17.15	0.51
Tiepido	15734.84	117.25	124.08	127.83	127.63	128.71	0.012403	4.15	28.28	13.09	0.9
Tiepido	15665.45	117.25	123.41	126.61	126.61	127.74	0.014975	4.71	25.05	11.78	1
Tiepido	15593.98	117.25	123.24	126.1	125.67	126.71	0.006764	3.49	34.95	17.15	0.72
Tiepido	15505.14	117.25	122.3	125.77		126.19	0.004133	2.87	41.21	15.81	0.55
Tiepido	15427.09	117.25	121.75	124.82	124.58	125.67	0.009861	4.09	29.19	13.34	0.84

Tiepido	15363.99	117.25	121.39	124.7		125.15	0.004441	2.97	40.34	16.76	0.57
Tiepido	15291.48	117.25	120.72	124	123.6	124.71	0.007405	3.76	32.7	15.22	0.75

B.1.2 Tempo di ritorno 100 anni

Reach	River Sta	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
		(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
Tiepido	18414.53	177.82	167	169.43	169.21	169.7	0.006808	2.69	91.97	83.64	0.7
Tiepido	18304.53	177.82	166.3	167.96	167.96	168.61	0.014141	3.93	58.76	56.51	1.01
Tiepido	18256.5	177.82	165.4	167.03	167.25	167.82	0.019832	4.55	59.47	73.84	1.19
Tiepido	18255.5	Inl Struct									
Tiepido	18254.5	177.82	165.04	167.18	167.18	167.66	0.008594	3.54	76.44	74.95	0.81
Tiepido	18197.53	177.82	164.18	166.23	165.81	166.45	0.00568	2.77	99.2	70.79	0.65
Tiepido	18089.53	177.82	162.56	164.79	164.79	165.55	0.011623	4.05	54.24	47.78	0.94
Tiepido	18031.53	177.82	161.84	162.55	162.97	164.02	0.092273	5.36	33.18	55.2	2.21
Tiepido	18025	Inl Struct									
Tiepido	18021.53	177.82	160.5	162.03	161.62	162.29	0.005348	2.25	78.92	55.2	0.6
Tiepido	17927.53	177.82	159.59	160.93	160.93	161.46	0.01609	3.22	55.18	52.87	1.01
Tiepido	17926	Inl Struct									
Tiepido	17924.53	177.82	157.97	160.89	159.39	160.99	0.001045	1.42	125.2	52.75	0.29
Tiepido	17883.93	177.82	157.62	160.33	160	160.86	0.005859	3.42	65.4	46.25	0.69
Tiepido	17813.93	177.82	157	159.8	159.8	160.4	0.007178	3.66	69.04	74.58	0.76
Tiepido	17723.93	177.82	156.52	157.82	158.33	159.1	0.038375	5.01	35.5	33.3	1.55
Tiepido	17722	Inl Struct									
Tiepido	17720.93	177.82	153	156.46	155.21	156.74	0.002536	2.36	75.39	29.11	0.47
Tiepido	17635.93	177.82	152	155.41	155.24	156.22	0.019462	4	44.41	22.1	0.9
Tiepido	17519.93	177.82	151.83	154.02	153.86	154.79	0.00838	3.88	47.64	45.65	0.87
Tiepido	17474.83	177.82	150.79	154.11		154.44	0.003162	2.63	81.79	56.12	0.49
Tiepido	17378.96	177.82	149.44	152.71	152.69	153.81	0.013712	4.7	41.15	22.26	0.93
Tiepido	17279.43	177.82	148.87	152.04		152.62	0.008095	3.56	58.74	36.54	0.73
Tiepido	17127.65	177.82	147.52	150.46	150.46	151.13	0.012143	3.83	56.66	45.71	0.81
Tiepido	17021.18	177.82	146.61	149.06	149.21	149.91	0.011123	4.59	57.12	47.81	1.01
Tiepido	16951.01	177.82	145.83	148.66	148.46	149.07	0.006577	3.24	78.08	63.28	0.71
Tiepido	16841.01	177.82	145.23	147.69	147.69	148.22	0.008961	3.68	71.47	66.32	0.83
Tiepido	16765.66	177.82	143.86	147	146.8	147.27	0.004054	2.8	111.95	109.9	0.58
Tiepido	16703.35	177.82	143.44	146.95	146.33	147.07	0.001635	1.93	167.44	136.33	0.37
Tiepido	16677.37	177.82	143.35	146.99		147.03	0.000457	0.9	234.37	147.83	0.19
Tiepido	16654.38	177.82	143.47	146.15	146.15	146.92	0.010631	4.23	55.39	41.71	0.91
Tiepido	16647.77	Inl Struct									
Tiepido	16641.46	177.82	141.85	144.88	143.95	145.16	0.002594	2.43	92.14	68.31	0.47
Tiepido	16636.46	177.82	141.85	144.84		145.13	0.002758	2.48	89.46	67	0.49
Tiepido	16629.96	177.82	141.85	144.81	143.95	145.11	0.002892	2.52	87.45	66.18	0.5
Tiepido	16623.29	Culvert									
Tiepido	16605.99	177.82	141.42	144.15	144.15	145.04	0.011086	4.19	45.63	35.49	0.93
Tiepido	16566.03	177.82	140.54	143.47	143.73	144.51	0.014997	4.57	42.93	36.88	1.06

Tiepido	16498.09	177.82	140.43	143.33	143.33	143.86	0.007416	3.57	73.33	71.87	0.77
Tiepido	16470.87	177.82	140.1	141.91	142.3	143.38	0.039535	6.24	44.21	58.68	1.63
Tiepido	16458.64	177.82	140.33	141.8	142.09	142.8	0.032705	5.34	49.78	57.74	1.48
Tiepido	16448.4	177.82	140.24	142.1	141.85	142.44	0.007696	2.88	75.82	57.69	0.74
Tiepido	16447.4	177.82	140.16	141.95	141.85	142.42	0.011128	3.75	68.76	53.21	0.91
Tiepido	16440	Inl Struct									
Tiepido	16438.17	177.82	137.75	140.52	140.52	141.73	0.01621	4.87	36.51	15.04	1
Tiepido	16428.03	177.82	134.6	139.28	137.37	139.54	0.001902	2.23	81.61	30.42	0.38
Tiepido	16423	177.82	134.74	139.2	137.86	139.52	0.002178	2.64	82.25	35.67	0.44
Tiepido	16422.98	177.82	134.74	139.2	137.86	139.52	0.002186	2.65	82.15	35.64	0.44
Tiepido	16412.94	177.82	133.72	139.13	137.8	139.49	0.002475	2.94	82.77	34.29	0.44
Tiepido	16402.93	177.82	133.23	139.22	136.7	139.43	0.001117	2.15	108.04	41.03	0.31
Tiepido	16399.4	177.82	132.74	139.26	136.09	139.41	0.000796	1.74	120.58	41.39	0.25
Tiepido	16399	Inl Struct									
Tiepido	16398.36	177.82	132.4	135.87	135.87	137.12	0.015662	4.96	35.83	14.24	1
Tiepido	16393.36	177.82	131.37	133.26	134.26	136.75	0.082689	8.28	21.49	16.28	2.3
Tiepido	16388.36	177.82	131.23	135.43	134	135.71	0.002346	2.35	76.19	27.49	0.44
Tiepido	16387.31	177.82	131.31	135.42	134.05	135.71	0.002469	2.38	75.34	27.85	0.45
Tiepido	16377.32	177.82	131.39	135.31	134.16	135.68	0.003344	2.66	66.73	24.18	0.51
Tiepido	16377.3	177.82	131.39	135.31	134.16	135.68	0.003346	2.67	66.72	24.18	0.51
Tiepido	16367.97	177.82	131.07	135.23	134.11	135.64	0.003751	2.84	62.71	22.52	0.54
Tiepido	16357.95	177.82	131.58	135.08	134.28	135.58	0.005089	3.14	56.69	22.39	0.63
Tiepido	16347.93	177.82	131.47	135.06	134.18	135.52	0.00468	3.01	58.98	23.41	0.61
Tiepido	16337.9	177.82	131.28	135.01	134.13	135.48	0.004631	3.03	58.71	22.77	0.6
Tiepido	16327.75	177.82	131.37	134.98	134.09	135.42	0.004502	2.95	60.24	23.9	0.59
Tiepido	16327	Inl Struct									
Tiepido	16326	177.82	131.1	134.23	133.94	134.99	0.009348	3.87	45.97	21	0.83
Tiepido	16283.7	177.82	130.24	134.21	133.04	134.65	0.003936	2.94	60.55	20.33	0.54
Tiepido	16275	Inl Struct									
Tiepido	16270.07	177.82	129.75	133.58	133.28	134.47	0.008763	4.2	43.52	18.46	0.83
Tiepido	16231.83	177.82	129.5	133.13	132.88	134.11	0.009682	4.39	41.46	17.24	0.86
Tiepido	16155.38	177.82	128.43	131.96	131.96	133.26	0.012004	5.09	36.88	15.61	0.96
Tiepido	16091.24	177.82	127.36	130.44	130.83	132.22	0.020531	5.92	30.55	14.69	1.25
Tiepido	16037.96	176.72	127.11	130.21	130.11	131.24	0.010736	4.53	39.92	18.11	0.93
Tiepido	15994.75	176.72	126.52	129.78	129.62	130.81	0.009458	4.55	41.39	18.52	0.88
Tiepido	15928.69	176.72	125.58	130.3		130.42	0.000713	1.52	119.16	35.27	0.25
Tiepido	15826.81	176.72	124.63	129.67		130.23	0.003543	3.36	57.44	20.08	0.54
Tiepido	15734.84	176.72	124.08	128.51	128.36	129.64	0.011281	4.73	38.76	18.28	0.89
Tiepido	15665.45	176.72	123.41	127.37	127.37	128.78	0.012867	5.28	34.63	13.86	0.97
Tiepido	15593.98	176.72	123.24	126.89	126.28	127.63	0.005672	3.88	49.21	18.8	0.7
Tiepido	15505.14	176.72	122.3	126.62		127.16	0.003877	3.28	55.62	18.16	0.55
Tiepido	15427.09	176.72	121.75	125.48	125.26	126.64	0.00982	4.79	38.38	14.55	0.87
Tiepido	15363.99	176.72	121.39	125.47		126.07	0.004404	3.47	54.2	21.1	0.59
Tiepido	15291.48	176.72	120.72	124.68	124.22	125.63	0.007405	4.39	44.46	19.36	0.78

B.1.3 Tempo di ritorno 200 anni

Reach	River Sta	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
		(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
Tiepido	18414.53	203.33	167	169.53	169.29	169.82	0.006882	2.82	100.49	85.93	0.71
Tiepido	18304.53	203.33	166.3	168.13	168.13	168.79	0.01254	3.97	69.11	63.2	0.97
Tiepido	18256.5	203.33	165.4	167.07	167.34	167.99	0.022413	4.94	62.89	74.17	1.27
Tiepido	18255.5	Inl Struct									
Tiepido	18254.5	203.33	165.04	167.27	167.27	167.8	0.008942	3.73	83.56	75.63	0.83
Tiepido	18197.53	203.33	164.18	166.37	165.89	166.61	0.005819	2.94	108.74	73.89	0.67
Tiepido	18089.53	203.33	162.56	165.01	165.01	165.75	0.010004	4.04	66.05	59.53	0.88
Tiepido	18031.53	203.33	161.84	162.59	163.07	164.31	0.101688	5.82	34.95	55.2	2.34
Tiepido	18025	Inl Struct									
Tiepido	18021.53	203.33	160.5	162.15	161.72	162.44	0.005458	2.39	85.13	55.2	0.61
Tiepido	17927.53	203.33	159.59	161.03	161.03	161.6	0.015414	3.35	60.74	53.17	1
Tiepido	17926	Inl Struct									
Tiepido	17924.53	203.33	157.97	161.07	159.51	161.19	0.001081	1.51	134.96	53.29	0.3
Tiepido	17883.93	203.33	157.62	160.41	160.12	161.05	0.006744	3.75	69.17	47.55	0.75
Tiepido	17813.93	203.33	157	159.98	159.98	160.56	0.006605	3.69	83.02	82.43	0.74
Tiepido	17723.93	203.33	156.52	157.93	158.46	159.3	0.037302	5.19	39.2	34.07	1.54
Tiepido	17722	Inl Struct									
Tiepido	17720.93	203.33	153	156.72	155.4	157.03	0.002553	2.44	83.2	30.22	0.47
Tiepido	17635.93	203.33	152	155.5	155.45	156.47	0.022232	4.38	46.57	26.07	0.96
Tiepido	17519.93	203.33	151.83	154.23	154.23	155	0.007653	3.95	57.05	47.08	0.84
Tiepido	17474.83	203.33	150.79	154.02	153.33	154.49	0.004772	3.16	76.65	55.1	0.6
Tiepido	17378.96	203.33	149.44	153.31	153.31	153.94	0.006832	3.8	72.82	61.49	0.68
Tiepido	17279.43	203.33	148.87	152.18	151.95	152.82	0.008482	3.78	63.9	37.67	0.75
Tiepido	17127.65	203.33	147.52	150.61	150.61	151.31	0.01197	3.97	63.68	48.12	0.82
Tiepido	17021.18	203.33	146.61	149.18	149.36	150.09	0.011287	4.8	63.09	48.56	1.02
Tiepido	16951.01	203.33	145.83	148.78	148.57	149.22	0.00677	3.41	85.6	63.85	0.73
Tiepido	16841.01	203.33	145.23	147.81	147.81	148.37	0.008856	3.81	79.84	67.79	0.83
Tiepido	16765.66	203.33	143.86	147.06	146.89	147.38	0.004607	3.04	118.99	112.24	0.62
Tiepido	16703.35	203.33	143.44	146.44	146.44	146.98	0.007862	3.68	84.06	81.36	0.79
Tiepido	16677.37	203.33	143.35	146.5	145.66	146.6	0.001542	1.39	164.24	134.49	0.34
Tiepido	16654.38	203.33	143.47	146.34	146.34	146.54	0.003664	2.62	145.77	130.88	0.54
Tiepido	16647.77	Inl Struct									
Tiepido	16641.46	203.33	141.85	144.88	144.12	145.24	0.003391	2.77	92.15	68.31	0.54
Tiepido	16636.46	203.33	141.85	144.81		145.21	0.003757	2.87	87.72	66.27	0.57
Tiepido	16629.96	203.33	141.85	144.76	144.14	145.18	0.004099	2.96	84.12	64.98	0.59
Tiepido	16623.29	Culvert									
Tiepido	16605.99	203.33	141.42	144.46	144.46	145.07	0.00718	3.7	75.31	68.16	0.76
Tiepido	16566.03	203.33	140.54	143.77	143.85	144.69	0.011208	4.36	55.08	43.27	0.94
Tiepido	16498.09	203.33	140.43	143.45	143.45	144.01	0.007519	3.73	81.96	73.76	0.78
Tiepido	16470.87	203.33	140.1	141.99	142.48	143.52	0.039385	6.46	49.09	58.85	1.65
Tiepido	16458.64	203.33	140.33	141.88	142.19	142.94	0.032249	5.54	54.82	57.83	1.48

Tiepido	16448.4	203.33	140.24	142.23	141.95	142.6	0.007433	2.99	83.52	57.91	0.74
Tiepido	16447.4	203.33	140.16	142.05	141.95	142.58	0.011384	3.95	74.59	53.58	0.93
Tiepido	16440	Inl Struct									
Tiepido	16438.17	203.33	137.75	141.2	141.2	141.99	0.008311	4.07	62	50.82	0.74
Tiepido	16428.03	203.33	134.6	139.49	137.57	139.78	0.002057	2.4	88.48	35.21	0.4
Tiepido	16423	203.33	134.74	139.39	138.04	139.76	0.002349	2.84	89.47	38.55	0.46
Tiepido	16422.98	203.33	134.74	139.39	138.05	139.76	0.002358	2.84	89.35	38.53	0.46
Tiepido	16412.94	203.33	133.72	139.31	138.07	139.73	0.002763	3.19	89.14	36.74	0.47
Tiepido	16402.93	203.33	133.23	139.42	136.97	139.66	0.001236	2.32	116.26	42.14	0.32
Tiepido	16399.4	203.33	132.74	139.47	136.34	139.63	0.000883	1.88	129.02	42.22	0.27
Tiepido	16399	Inl Struct									
Tiepido	16398.36	203.33	132.4	136.16	136.16	137.47	0.015348	5.07	40.07	15.23	1
Tiepido	16393.36	203.33	131.37	133.41	134.47	137.08	0.078117	8.49	23.94	16.63	2.26
Tiepido	16388.36	203.33	131.23	135.7	134.19	136.01	0.002357	2.46	83.71	28.75	0.44
Tiepido	16387.31	203.33	131.31	135.69	134.25	136.01	0.002459	2.48	82.99	29.13	0.45
Tiepido	16377.32	203.33	131.39	135.57	134.36	135.97	0.00337	2.78	73.12	24.9	0.52
Tiepido	16377.3	203.33	131.39	135.57	134.36	135.97	0.003371	2.78	73.11	24.91	0.52
Tiepido	16367.97	203.33	131.07	135.48	134.32	135.93	0.00381	2.97	68.42	22.99	0.55
Tiepido	16357.95	203.33	131.58	135.33	134.49	135.88	0.005098	3.26	62.45	23.31	0.64
Tiepido	16347.93	203.33	131.47	135.32	134.39	135.81	0.004673	3.12	65.1	24.44	0.61
Tiepido	16337.9	203.33	131.28	135.26	134.34	135.77	0.004635	3.15	64.5	23.48	0.61
Tiepido	16327.75	203.33	131.37	135.23	134.29	135.71	0.004494	3.06	66.45	24.89	0.6
Tiepido	16327	Inl Struct									
Tiepido	16326	203.33	131.1	134.54	134.15	135.3	0.008428	3.87	52.6	22.19	0.8
Tiepido	16283.7	203.33	130.24	134.5	133.25	134.98	0.003981	3.05	66.57	21.2	0.55
Tiepido	16275	Inl Struct									
Tiepido	16270.07	203.33	129.75	133.82	133.5	134.79	0.008456	4.38	48.13	19.03	0.82
Tiepido	16231.83	203.33	129.5	133.39	133.12	134.44	0.009284	4.57	45.99	18.15	0.85
Tiepido	16155.38	203.33	128.43	132.22	132.22	133.62	0.011674	5.31	40.89	16.15	0.96
Tiepido	16091.24	203.33	127.36	130.64	131.09	132.59	0.02014	6.21	33.59	15.14	1.25
Tiepido	16037.96	202.36	127.11	130.45	130.32	131.57	0.01016	4.69	44.41	18.53	0.92
Tiepido	15994.75	202.36	126.52	130.09	129.86	131.15	0.008491	4.63	47.27	19.37	0.85
Tiepido	15928.69	202.36	125.58	130.63		130.76	0.000701	1.59	130.83	35.79	0.25
Tiepido	15826.81	202.36	124.63	129.94		130.57	0.003653	3.57	62.96	20.93	0.56
Tiepido	15734.84	202.36	124.08	128.83	128.66	129.99	0.010167	4.82	44.74	19.36	0.86
Tiepido	15665.45	202.36	123.41	127.64	127.64	129.17	0.012497	5.52	38.56	14.82	0.97
Tiepido	15593.98	202.36	123.24	127.2	126.53	127.99	0.005352	4.01	55.16	19.33	0.69
Tiepido	15505.14	202.36	122.3	126.95		127.53	0.003743	3.42	61.77	18.88	0.55
Tiepido	15427.09	202.36	121.75	125.7	125.53	127.01	0.010125	5.1	41.66	15	0.9
Tiepido	15363.99	202.36	121.39	125.75		126.41	0.004392	3.65	60.7	24.05	0.59
Tiepido	15291.48	202.36	120.72	124.93	124.61	125.97	0.007403	4.62	49.36	19.96	0.79

B.2 Configurazione di progetto

B.2.1 Tempo di ritorno 20 anni

Reach	River Sta	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
		(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
Tiepido	18414.53	117.1	167	169.04	168.97	169.32	0.008942	2.68	60.85	76.95	0.78
Tiepido	18304.53	117.1	166.3	167.72	167.72	168.18	0.011898	3.22	45.77	53.04	0.9
Tiepido	18256.5	117.1	165.4	166.78	167	167.45	0.019686	4.02	41.97	66.37	1.15
Tiepido	18255.5	Inl Struct									
Tiepido	18254.5	117.1	165.04	166.83	166.83	167.28	0.009355	3.24	51.31	67.04	0.82
Tiepido	18197.53	117.1	164.18	165.8	165.57	166.01	0.007262	2.63	69.45	68.42	0.7
Tiepido	18089.53	117.1	162.56	164.46	164.46	165.03	0.010633	3.42	39.72	41.07	0.87
Tiepido	18031.53	117.1	161.84	162.4	162.73	163.54	0.105708	4.73	24.74	55.2	2.26
Tiepido	18025	Inl Struct									
Tiepido	18021.53	117.1	160.5	161.71	161.38	161.9	0.005428	1.92	60.87	55.2	0.59
Tiepido	17927.53	117.1	159.59	160.7	160.67	161.07	0.015419	2.71	43.24	52.21	0.95
Tiepido	17926	Inl Struct									
Tiepido	17924.53	117.1	157.97	160.37		160.44	0.00097	1.19	98.26	51.24	0.27
Tiepido	17883.93	117.1	157.62	160	159.46	160.34	0.004357	2.68	51.44	39.52	0.58
Tiepido	17813.93	117.1	157	159.1	159.1	159.82	0.01242	3.81	33.29	26.58	0.94
Tiepido	17723.93	117.1	156.52	157.74	157.84	158.39	0.020909	3.56	32.9	32.74	1.13
Tiepido	17722	Inl Struct									
Tiepido	17720.93	117.1	153	155.78	154.72	156	0.002356	2.07	56.65	26.25	0.45
Tiepido	17635.93	117.1	152	155.04	154.71	155.56	0.014438	3.19	36.71	20.68	0.76
Tiepido	17519.93	117.1	151.83	153.4	153.37	154.09	0.010996	3.68	31.93	22.54	0.97
Tiepido	17474.83	117.1	150.79	153.36		153.68	0.004424	2.54	47.82	25.83	0.55
Tiepido	17378.96	117.1	149.44	152.3	152.06	153.01	0.011019	3.75	32.62	19.25	0.81
Tiepido	17279.43	117.1	148.87	151.65		152.06	0.006893	2.93	45.52	32.35	0.65
Tiepido	17127.65	117.1	147.52	149.96	149.96	150.57	0.014466	3.54	37.09	36.44	0.85
Tiepido	17021.18	117.1	146.61	148.78	148.86	149.39	0.009034	3.77	44.18	46.25	0.89
Tiepido	16951.01	117.1	145.83	148.3	148.07	148.63	0.006541	2.84	55.45	56.7	0.69
Tiepido	16841.01	117.1	145.23	147.4	147.4	147.83	0.008162	3.16	52.51	63.68	0.77
Tiepido	16765.66	117.1	143.86	146.23	146.46	146.99	0.013409	3.96	36.84	58.79	0.98
Tiepido	16703.35	117.1	143.44	146.33	145.83	146.55	0.003317	2.31	75.41	78.18	0.51
Tiepido	16677.37	117.1	143.35	146.43		146.47	0.0006	0.84	154.53	130.06	0.21
Tiepido	16654.38	117.1	143.47	145.79	145.79	146.38	0.009547	3.56	41.33	38.23	0.84
Tiepido	16647.77	Inl Struct									
Tiepido	16641.46	117.1	141.85	144.22	143.5	144.48	0.003342	2.28	54.63	39.56	0.51
Tiepido	16636.46	117.1	141.85	144.17		144.44	0.003635	2.34	52.8	36.32	0.53
Tiepido	16629.96	117.1	141.85	144.13	143.5	144.42	0.003892	2.39	51.43	35.42	0.55
Tiepido	16623.29	Culvert									
Tiepido	16605.99	117.1	141.42	143.77	143.59	144.37	0.009655	3.42	34.73	22.58	0.84
Tiepido	16566.03	117.1	140.54	143.72	143.12	144.04	0.004138	2.6	52.55	42.87	0.57
Tiepido	16498.09	117.1	140.43	142.77	142.77	143.54	0.013106	3.91	31.17	22.62	0.97
Tiepido	16470.87	117.1	140.1	141.7	142.07	142.93	0.036576	5.44	32.2	57.7	1.53

Tiepido	16458.64	117.1	140.33	141.58	141.83	142.4	0.031461	4.67	37.55	57.5	1.41
Tiepido	16448.4	117.1	140.24	141.72	141.59	142.02	0.009322	2.63	54.45	57.25	0.78
Tiepido	16447.4	117.1	140.16	141.57	141.57	142	0.013391	3.49	48.81	51.92	0.96
Tiepido	16440	Inl Struct									
Tiepido	16438.17	117.1	136.2	138.06	137.54	138.37	0.004998	2.44	48.08	28.59	0.6
Tiepido	16428.03	117.1	136.2	137.97	137.54	138.31	0.005994	2.58	45.31	28.3	0.65
Tiepido	16423	117.1	136.2	137.9	137.54	138.27	0.006788	2.69	43.51	28.11	0.69
Tiepido	16422.98	117.1	136.2	137.9	137.54	138.27	0.006791	2.69	43.51	28.11	0.69
Tiepido	16412.94	117.1	136.07	137.87	137.41	138.2	0.005624	2.53	46.26	28.4	0.63
Tiepido	16402.93	117.1	135.94	137.85	137.28	138.13	0.004632	2.38	49.28	28.71	0.58
Tiepido	16399.4	117.1	135.9	137.84	137.24	138.11	0.004382	2.33	50.19	28.81	0.56
Tiepido	16399	Inl Struct									
Tiepido	16398.36	117.1	131.74	134.78	133.21	134.95	0.000671	1.84	63.81	21	0.34
Tiepido	16393.36	117.1	131.66	134.78	133.13	134.94	0.000619	1.79	65.53	21	0.32
Tiepido	16388.36	117.1	131.69	134.78	133.16	134.94	0.00059	1.78	71.88	35.94	0.32
Tiepido	16388	Inl Struct									
Tiepido	16387.31	117.1	131.68	134.71	133.29	134.87	0.001667	1.8	65.14	26.03	0.36
Tiepido	16377.32	117.1	131.73	134.68	133.34	134.85	0.001823	1.85	63.22	25.87	0.38
Tiepido	16377.3	117.1	131.73	134.68	133.34	134.85	0.001823	1.85	63.21	25.87	0.38
Tiepido	16367.97	117.1	131.59	134.64	133.32	134.83	0.002043	1.97	59.56	24.1	0.4
Tiepido	16357.95	117.1	131.64	134.52	133.52	134.8	0.003216	2.35	49.85	21.64	0.49
Tiepido	16347.93	117.1	131.5	134.47	133.45	134.77	0.003308	2.4	48.82	20.84	0.5
Tiepido	16337.9	117.1	131.52	134.34	133.62	134.72	0.004848	2.72	42.98	20.49	0.6
Tiepido	16327.75	117.1	131.44	134.31	133.53	134.66	0.00439	2.61	44.92	21.25	0.57
Tiepido	16327	Inl Struct									
Tiepido	16326	117.1	131.1	133.4	133.35	134.18	0.013423	3.91	29.93	17.79	0.96
Tiepido	16283.7	117.1	130.24	133.44	132.45	133.78	0.003747	2.56	45.73	18.42	0.52
Tiepido	16275	Inl Struct									
Tiepido	16270.07	117.1	129.75	132.93	132.7	133.62	0.009954	3.7	31.92	17.11	0.84
Tiepido	16231.83	117.1	129.5	132.47	132.26	133.23	0.010376	3.85	30.68	15.53	0.85
Tiepido	16155.38	117.1	128.43	131.26	131.26	132.29	0.013804	4.52	26.5	13.66	0.98
Tiepido	16091.24	117.1	127.36	129.94	130.16	131.21	0.020104	4.99	23.55	13.57	1.18
Tiepido	16037.96	117.25	127.11	129.73	129.54	130.45	0.009807	3.74	31.57	17.16	0.86
Tiepido	15994.75	117.25	126.52	129.02	129.02	129.94	0.012954	4.27	28.1	16.43	0.98
Tiepido	15928.69	117.25	125.58	129.39	127.64	129.48	0.000787	1.34	88.26	32.53	0.25
Tiepido	15826.81	117.25	124.63	128.89		129.3	0.003444	2.85	42.75	17.15	0.51
Tiepido	15734.84	117.25	124.08	127.83	127.63	128.71	0.012403	4.15	28.28	13.09	0.9
Tiepido	15665.45	117.25	123.41	126.61	126.61	127.74	0.014975	4.71	25.05	11.78	1
Tiepido	15593.98	117.25	123.24	126.1	125.67	126.71	0.006764	3.49	34.95	17.15	0.72
Tiepido	15505.14	117.25	122.3	125.77		126.19	0.004133	2.87	41.21	15.81	0.55
Tiepido	15427.09	117.25	121.75	124.82	124.58	125.67	0.009861	4.09	29.19	13.34	0.84
Tiepido	15363.99	117.25	121.39	124.7		125.15	0.004441	2.97	40.34	16.76	0.57
Tiepido	15291.48	117.25	120.72	124	123.6	124.71	0.007405	3.76	32.7	15.22	0.75

B.2.2 Tempo di ritorno 100 anni

Reach	River Sta	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
		(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
Tiepido	18414.53	177.82	167	169.43	169.21	169.7	0.006808	2.69	91.97	83.64	0.7
Tiepido	18304.53	177.82	166.3	167.96	167.96	168.61	0.014141	3.93	58.76	56.51	1.01
Tiepido	18256.5	177.82	165.4	167.03	167.25	167.82	0.019832	4.55	59.47	73.84	1.19
Tiepido	18255.5	Inl Struct									
Tiepido	18254.5	177.82	165.04	167.18	167.18	167.66	0.008594	3.54	76.44	74.95	0.81
Tiepido	18197.53	177.82	164.18	166.23	165.81	166.45	0.00568	2.77	99.2	70.79	0.65
Tiepido	18089.53	177.82	162.56	164.79	164.79	165.55	0.011623	4.05	54.24	47.78	0.94
Tiepido	18031.53	177.82	161.84	162.55	162.97	164.02	0.092273	5.36	33.18	55.2	2.21
Tiepido	18025	Inl Struct									
Tiepido	18021.53	177.82	160.5	162.03	161.62	162.29	0.005348	2.25	78.92	55.2	0.6
Tiepido	17927.53	177.82	159.59	160.93	160.93	161.46	0.01609	3.22	55.18	52.87	1.01
Tiepido	17926	Inl Struct									
Tiepido	17924.53	177.82	157.97	160.89	159.39	160.99	0.001045	1.42	125.2	52.75	0.29
Tiepido	17883.93	177.82	157.62	160.33	160	160.86	0.005859	3.42	65.4	46.25	0.69
Tiepido	17813.93	177.82	157	159.8	159.8	160.4	0.007178	3.66	69.04	74.58	0.76
Tiepido	17723.93	177.82	156.52	157.82	158.33	159.1	0.038375	5.01	35.5	33.3	1.55
Tiepido	17722	Inl Struct									
Tiepido	17720.93	177.82	153	156.46	155.21	156.74	0.002536	2.36	75.39	29.11	0.47
Tiepido	17635.93	177.82	152	155.41	155.24	156.22	0.019462	4	44.41	22.1	0.9
Tiepido	17519.93	177.82	151.83	154.02	153.86	154.79	0.00838	3.88	47.64	45.65	0.87
Tiepido	17474.83	177.82	150.79	154.11		154.44	0.003162	2.63	81.79	56.12	0.49
Tiepido	17378.96	177.82	149.44	152.71	152.69	153.81	0.013712	4.7	41.15	22.26	0.93
Tiepido	17279.43	177.82	148.87	152.04		152.62	0.008095	3.56	58.74	36.54	0.73
Tiepido	17127.65	177.82	147.52	150.46	150.46	151.13	0.012143	3.83	56.66	45.71	0.81
Tiepido	17021.18	177.82	146.61	149.06	149.21	149.91	0.011123	4.59	57.12	47.81	1.01
Tiepido	16951.01	177.82	145.83	148.66	148.46	149.07	0.006577	3.24	78.08	63.28	0.71
Tiepido	16841.01	177.82	145.23	147.69	147.69	148.22	0.008961	3.68	71.47	66.32	0.83
Tiepido	16765.66	177.82	143.86	147	146.8	147.27	0.004054	2.8	111.95	109.9	0.58
Tiepido	16703.35	177.82	143.44	146.95	146.33	147.07	0.001635	1.93	167.44	136.33	0.37
Tiepido	16677.37	177.82	143.35	146.99		147.03	0.000457	0.9	234.37	147.83	0.19
Tiepido	16654.38	177.82	143.47	146.15	146.15	146.92	0.010631	4.23	55.39	41.71	0.91
Tiepido	16647.77	Inl Struct									
Tiepido	16641.46	177.82	141.85	144.88	143.95	145.16	0.002594	2.43	92.14	68.31	0.47
Tiepido	16636.46	177.82	141.85	144.84		145.13	0.002758	2.48	89.46	67	0.49
Tiepido	16629.96	177.82	141.85	144.81	143.95	145.11	0.002892	2.52	87.45	66.18	0.5
Tiepido	16623.29	Culvert									
Tiepido	16605.99	177.82	141.42	144.15	144.15	145.04	0.011086	4.19	45.63	35.49	0.93
Tiepido	16566.03	177.82	140.54	143.47	143.73	144.51	0.014997	4.57	42.93	36.88	1.06
Tiepido	16498.09	177.82	140.43	143.33	143.33	143.86	0.007416	3.57	73.33	71.87	0.77
Tiepido	16470.87	177.82	140.1	141.91	142.3	143.38	0.039535	6.24	44.21	58.68	1.63

Tiepido	16458.64	177.82	140.33	141.8	142.09	142.8	0.032705	5.34	49.78	57.74	1.48
Tiepido	16448.4	177.82	140.24	142.1	141.85	142.44	0.007696	2.88	75.82	57.69	0.74
Tiepido	16447.4	177.82	140.16	141.95	141.85	142.42	0.011128	3.75	68.76	53.21	0.91
Tiepido	16440	Inl Struct									
Tiepido	16438.17	177.82	136.2	138.56	137.96	138.97	0.005122	2.83	62.79	30.09	0.63
Tiepido	16428.03	177.82	136.2	138.46	137.96	138.91	0.005977	2.98	59.66	29.78	0.67
Tiepido	16423	177.82	136.2	138.39	137.96	138.88	0.006617	3.08	57.69	29.58	0.7
Tiepido	16422.98	177.82	136.2	138.39	137.96	138.88	0.006619	3.08	57.68	29.58	0.7
Tiepido	16412.94	177.82	136.07	138.36	137.83	138.8	0.005679	2.93	60.68	29.88	0.66
Tiepido	16402.93	177.82	135.94	138.34	137.7	138.74	0.004858	2.78	63.89	30.19	0.61
Tiepido	16399.4	177.82	135.9	138.33	137.66	138.72	0.004646	2.74	64.85	30.3	0.6
Tiepido	16399	Inl Struct									
Tiepido	16398.36	177.82	131.74	135.53	133.68	135.79	0.000794	2.23	79.68	21	0.37
Tiepido	16393.36	177.82	131.66	135.54	133.6	135.78	0.000744	2.18	81.42	21	0.35
Tiepido	16388.36	177.82	131.69	135.56	133.63	135.77	0.000602	2.09	100.66	38.29	0.34
Tiepido	16388	Inl Struct									
Tiepido	16387.31	177.82	131.68	135.48	133.77	135.7	0.001714	2.06	86.22	28.34	0.38
Tiepido	16377.32	177.82	131.73	135.45	133.83	135.68	0.001841	2.11	84.17	28.2	0.39
Tiepido	16377.3	177.82	131.73	135.45	133.83	135.68	0.001842	2.11	84.15	28.2	0.39
Tiepido	16367.97	177.82	131.59	135.4	133.83	135.66	0.002116	2.26	78.83	26.38	0.42
Tiepido	16357.95	177.82	131.64	135.26	134.06	135.62	0.003238	2.66	66.76	23.87	0.51
Tiepido	16347.93	177.82	131.5	135.21	134.02	135.59	0.00342	2.74	64.88	23.02	0.52
Tiepido	16337.9	177.82	131.52	135.08	134.19	135.54	0.004596	3	59.2	23.25	0.6
Tiepido	16327.75	177.82	131.44	135.06	134.1	135.48	0.004159	2.87	61.95	24.19	0.57
Tiepido	16327	Inl Struct									
Tiepido	16326	177.82	131.1	134.23		134.99	0.009348	3.87	45.97	21	0.83
Tiepido	16283.7	177.82	130.24	134.21	133.04	134.65	0.003936	2.94	60.55	20.33	0.54
Tiepido	16275	Inl Struct									
Tiepido	16270.07	177.82	129.75	133.58	133.28	134.47	0.008763	4.2	43.52	18.46	0.83
Tiepido	16231.83	177.82	129.5	133.13	132.88	134.11	0.009682	4.39	41.46	17.24	0.86
Tiepido	16155.38	177.82	128.43	131.96	131.96	133.26	0.012004	5.09	36.88	15.61	0.96
Tiepido	16091.24	177.82	127.36	130.44	130.83	132.22	0.02041	5.91	30.61	14.7	1.24
Tiepido	16037.96	176.72	127.11	130.21	130.11	131.24	0.010736	4.53	39.92	18.11	0.93
Tiepido	15994.75	176.72	126.52	129.78	129.62	130.81	0.009458	4.55	41.39	18.52	0.88
Tiepido	15928.69	176.72	125.58	130.3		130.42	0.000713	1.52	119.16	35.27	0.25
Tiepido	15826.81	176.72	124.63	129.67		130.23	0.003543	3.36	57.44	20.08	0.54
Tiepido	15734.84	176.72	124.08	128.51	128.36	129.64	0.011281	4.73	38.76	18.28	0.89
Tiepido	15665.45	176.72	123.41	127.37	127.37	128.78	0.012867	5.28	34.63	13.86	0.97
Tiepido	15593.98	176.72	123.24	126.89	126.28	127.63	0.005672	3.88	49.21	18.8	0.7
Tiepido	15505.14	176.72	122.3	126.62		127.16	0.003877	3.28	55.62	18.16	0.55
Tiepido	15427.09	176.72	121.75	125.48	125.26	126.64	0.00982	4.79	38.38	14.55	0.87
Tiepido	15363.99	176.72	121.39	125.47		126.07	0.004404	3.47	54.2	21.1	0.59
Tiepido	15291.48	176.72	120.72	124.68	124.22	125.63	0.007405	4.39	44.46	19.36	0.78

B.2.3 Tempo di ritorno 200 anni

Reach	River Sta	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
		(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
Tiepido	18414.53	203.33	167	169.53	169.29	169.82	0.006882	2.82	100.49	85.93	0.71
Tiepido	18304.53	203.33	166.3	168.13	168.13	168.79	0.01254	3.97	69.11	63.2	0.97
Tiepido	18256.5	203.33	165.4	167.07	167.34	167.99	0.022413	4.94	62.89	74.17	1.27
Tiepido	18255.5	Inl Struct									
Tiepido	18254.5	203.33	165.04	167.27	167.27	167.8	0.008942	3.73	83.56	75.63	0.83
Tiepido	18197.53	203.33	164.18	166.37	165.89	166.61	0.005819	2.94	108.74	73.89	0.67
Tiepido	18089.53	203.33	162.56	165.01	165.01	165.75	0.010004	4.04	66.05	59.53	0.88
Tiepido	18031.53	203.33	161.84	162.59	163.07	164.31	0.101688	5.82	34.95	55.2	2.34
Tiepido	18025	Inl Struct									
Tiepido	18021.53	203.33	160.5	162.15	161.72	162.44	0.005458	2.39	85.13	55.2	0.61
Tiepido	17927.53	203.33	159.59	161.03	161.03	161.6	0.015414	3.35	60.74	53.17	1
Tiepido	17926	Inl Struct									
Tiepido	17924.53	203.33	157.97	161.07	159.51	161.19	0.001081	1.51	134.96	53.29	0.3
Tiepido	17883.93	203.33	157.62	160.41	160.12	161.05	0.006744	3.75	69.17	47.55	0.75
Tiepido	17813.93	203.33	157	159.98	159.98	160.56	0.006605	3.69	83.02	82.43	0.74
Tiepido	17723.93	203.33	156.52	157.93	158.46	159.3	0.037302	5.19	39.2	34.07	1.54
Tiepido	17722	Inl Struct									
Tiepido	17720.93	203.33	153	156.72	155.4	157.03	0.002553	2.44	83.2	30.22	0.47
Tiepido	17635.93	203.33	152	155.5	155.45	156.47	0.022232	4.38	46.57	26.07	0.96
Tiepido	17519.93	203.33	151.83	154.23	154.23	155	0.007653	3.95	57.05	47.08	0.84
Tiepido	17474.83	203.33	150.79	154.02	153.33	154.49	0.004772	3.16	76.65	55.1	0.6
Tiepido	17378.96	203.33	149.44	153.31	153.31	153.94	0.006832	3.8	72.82	61.49	0.68
Tiepido	17279.43	203.33	148.87	152.18	151.95	152.82	0.008482	3.78	63.9	37.67	0.75
Tiepido	17127.65	203.33	147.52	150.61	150.61	151.31	0.01197	3.97	63.68	48.12	0.82
Tiepido	17021.18	203.33	146.61	149.18	149.36	150.09	0.011287	4.8	63.09	48.56	1.02
Tiepido	16951.01	203.33	145.83	148.78	148.57	149.22	0.00677	3.41	85.6	63.85	0.73
Tiepido	16841.01	203.33	145.23	147.81	147.81	148.37	0.008856	3.81	79.84	67.79	0.83
Tiepido	16765.66	203.33	143.86	147.06	146.89	147.38	0.004607	3.04	118.99	112.24	0.62
Tiepido	16703.35	203.33	143.44	146.44	146.44	146.98	0.007862	3.68	84.06	81.36	0.79
Tiepido	16677.37	203.33	143.35	146.5	145.66	146.6	0.001542	1.39	164.24	134.49	0.34
Tiepido	16654.38	203.33	143.47	146.34	146.34	146.54	0.003664	2.62	145.77	130.88	0.54
Tiepido	16647.77	Inl Struct									
Tiepido	16641.46	203.33	141.85	144.88	144.12	145.24	0.003391	2.77	92.15	68.31	0.54
Tiepido	16636.46	203.33	141.85	144.81		145.21	0.003757	2.87	87.72	66.27	0.57
Tiepido	16629.96	203.33	141.85	144.76	144.14	145.18	0.004099	2.96	84.12	64.98	0.59
Tiepido	16623.29	Culvert									
Tiepido	16605.99	203.33	141.42	144.46	144.46	145.07	0.00718	3.7	75.31	68.16	0.76
Tiepido	16566.03	203.33	140.54	143.77	143.85	144.69	0.011208	4.36	55.08	43.27	0.94
Tiepido	16498.09	203.33	140.43	143.45	143.45	144.01	0.007519	3.73	81.96	73.76	0.78
Tiepido	16470.87	203.33	140.1	141.99	142.48	143.52	0.039385	6.46	49.09	58.85	1.65
Tiepido	16458.64	203.33	140.33	141.88	142.19	142.94	0.032249	5.54	54.82	57.83	1.48

Tiepido	16448.4	203.33	140.24	142.23	141.95	142.6	0.007433	2.99	83.52	57.91	0.74
Tiepido	16447.4	203.33	140.16	142.05	141.95	142.58	0.011384	3.95	74.59	53.58	0.93
Tiepido	16440	Inl Struct									
Tiepido	16438.17	203.33	136.2	138.92	138.11	139.27	0.006289	2.62	77.73	49.65	0.67
Tiepido	16428.03	203.33	136.2	138.73	138.11	139.18	0.009474	2.97	68.37	49.08	0.8
Tiepido	16423	203.33	136.2	138.64	138.11	139.14	0.006032	3.13	65	30.32	0.68
Tiepido	16422.98	203.33	136.2	138.64	138.11	139.14	0.006034	3.13	65	30.31	0.68
Tiepido	16412.94	203.33	136.07	138.6	137.98	139.05	0.00947	2.97	68.38	49.08	0.8
Tiepido	16402.93	203.33	135.94	138.54	137.85	138.95	0.008119	2.83	71.75	49.28	0.75
Tiepido	16399.4	203.33	135.9	138.52	137.81	138.92	0.007735	2.79	72.85	49.36	0.73
Tiepido	16399	Inl Struct									
Tiepido	16398.36	203.33	131.74	135.8	133.86	136.09	0.00085	2.39	85.2	21	0.38
Tiepido	16393.36	203.33	131.66	135.8	133.78	136.08	0.000801	2.34	86.95	21	0.37
Tiepido	16388.36	203.33	131.69	135.83	133.81	136.06	0.000613	2.2	111.21	39.12	0.35
Tiepido	16388	Inl Struct									
Tiepido	16387.31	203.33	131.68	135.75	133.96	135.99	0.001753	2.16	93.99	29.14	0.38
Tiepido	16377.32	203.33	131.73	135.72	134.01	135.97	0.001875	2.21	91.87	29.02	0.4
Tiepido	16377.3	203.33	131.73	135.72	134.01	135.97	0.001876	2.21	91.85	29.01	0.4
Tiepido	16367.97	203.33	131.59	135.66	134.03	135.95	0.002169	2.37	85.91	27.17	0.43
Tiepido	16357.95	203.33	131.64	135.52	134.27	135.91	0.003301	2.79	72.94	24.63	0.52
Tiepido	16347.93	203.33	131.5	135.45	134.24	135.88	0.003515	2.88	70.72	23.77	0.53
Tiepido	16337.9	203.33	131.52	135.33	134.41	135.83	0.004614	3.12	65.16	24.19	0.61
Tiepido	16327.75	203.33	131.44	135.32	134.31	135.77	0.004175	2.98	68.2	25.18	0.58
Tiepido	16327	Inl Struct									
Tiepido	16326	203.33	131.1	134.54		135.3	0.008428	3.87	52.6	22.19	0.8
Tiepido	16283.7	203.33	130.24	134.5	133.25	134.98	0.003981	3.05	66.57	21.2	0.55
Tiepido	16275	Inl Struct									
Tiepido	16270.07	203.33	129.75	133.82	133.5	134.79	0.008456	4.38	48.13	19.03	0.82
Tiepido	16231.83	203.33	129.5	133.39	133.12	134.44	0.009284	4.57	45.99	18.15	0.85
Tiepido	16155.38	203.33	128.43	132.22	132.22	133.62	0.011674	5.31	40.89	16.15	0.96
Tiepido	16091.24	203.33	127.36	130.64	131.09	132.59	0.020128	6.21	33.6	15.14	1.25
Tiepido	16037.96	202.36	127.11	130.45	130.32	131.57	0.01016	4.69	44.41	18.53	0.92
Tiepido	15994.75	202.36	126.52	130.09	129.86	131.15	0.008491	4.63	47.27	19.37	0.85
Tiepido	15928.69	202.36	125.58	130.63		130.76	0.000701	1.59	130.83	35.79	0.25
Tiepido	15826.81	202.36	124.63	129.94		130.57	0.003653	3.57	62.96	20.93	0.56
Tiepido	15734.84	202.36	124.08	128.83	128.66	129.99	0.010167	4.82	44.74	19.36	0.86
Tiepido	15665.45	202.36	123.41	127.64	127.64	129.17	0.012497	5.52	38.56	14.82	0.97
Tiepido	15593.98	202.36	123.24	127.2	126.53	127.99	0.005352	4.01	55.16	19.33	0.69
Tiepido	15505.14	202.36	122.3	126.95		127.53	0.003743	3.42	61.77	18.88	0.55
Tiepido	15427.09	202.36	121.75	125.7	125.53	127.01	0.010125	5.1	41.66	15	0.9
Tiepido	15363.99	202.36	121.39	125.75		126.41	0.004392	3.65	60.7	24.05	0.59
Tiepido	15291.48	202.36	120.72	124.93	124.61	125.97	0.007403	4.62	49.36	19.96	0.79