

Commissario:



Contraente:



Progettista:



Project & Construction Management & Quality Assurance: Rina Consulting SpA



VIADOTTO POLCEVERA

EMISSIONE PER ENTI

PROGETTO ESECUTIVO di 1° LIVELLO

RELAZIONE IDRAULICA

STUDIO IDRAULICO DEL TORRENTE POLCEVERA

Contraente	Project & Construction Management & Quality Assurance	Direttore Lavori
Data: _____	Data: _____	Data: _____

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC OPERA/DISCIPLINA PROGR REV

N	G	1	2	0	0	E	1	1	R	I	I	D	0	0	0	2	C	0	1	A
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

PROGETTAZIONE								IL PROGETTO
Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Progettista Integratore	Data	
A	Emissione esecutiva di 1° livello	C. CESALI	25/02/19	F. CABAS	25/02/19	A. PEREGO	25/02/19	A. VITTOZI
B								
C								

ITALFERR S.p.A.
 U.O. Opere Civili e Assistenza Clienti
 Dott. Ing. Andrea Vittozzi
 Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
 N° AZ0783

CONTRAENTE

PERGENOVA

PROGETTISTA



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
2 di 37

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
3 di 37

INDICE

1. PREMESSA.....	5
2. INQUADRAMENTO GENERALE E OBIETTIVO DELLO STUDIO.....	6
2.1. PERICOLOSITÀ IDRAULICA NELL'AREA DI STUDIO.....	6
2.2. VERIFICHE IDRAULICHE CONDOTTE NELL'AMBITO DEL PIANO DI BACINO.....	8
2.3. OBIETTIVI DELLO STUDIO IDRAULICO	13
3. STUDIO IDRAULICO.....	14
3.1. DATI DI BASE	14
3.2. IMPLEMENTAZIONE DEI MODELLI IDRAULICI.....	14
3.2.1. <i>Modello monodimensionale</i>	14
3.2.1.1. <i>Risultati</i>	18
3.2.2. <i>Modello bidimensionale</i>	22
3.2.2.1. <i>Geometria del modello</i>	24
3.2.2.2. <i>Scabrezze</i>	25
3.2.2.3. <i>Condizioni al contorno</i>	25
3.2.2.4. <i>Scenari simulati</i>	26
3.2.2.5. <i>Risultati delle simulazioni numeriche 2D</i>	26
4. VERIFICA DELLA FASE DI CANTIERE	32
5. VERIFICA ALLO SCALZAMENTO.....	33
6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	37

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
4 di 37

INDICE DELLE FIGURE

<i>Figura 2.1 – Inquadramento dell’area di studio.</i>	6
<i>Figura 2.2 – Mappe di pericolosità idraulica (Piano di bacino, aggiornamento 2015).</i>	7
<i>Figura 2.3 – Modello idraulico del T. Polcevera: tratto “Torbella/Fegino - ponte Pieragostini” (fonte: Piano di Bacino).</i>	9
<i>Figura 2.4 – Modello idraulico del T. Polcevera: profilo di rigurgito da sezione POL-45 a POL-33 (fonte: Piano di Bacino).</i>	10
<i>Figura 2.5 – Modello idraulico del T. Polcevera: profilo di rigurgito da sezione POL-32 a POL-26 (fonte: Piano di Bacino).</i>	10
<i>Figura 2.6 – Modello idraulico del T. Polcevera: profilo di rigurgito da sezione POL-25 a POL-17 (fonte: Piano di Bacino).</i>	11
<i>Figura 2.7 – Modello idraulico del T. Polcevera: livelli idrici alla sezione POL-27.5 (fonte: Piano di Bacino).</i>	11
<i>Figura 2.8 – Modello idraulico del T. Polcevera: livelli idrici alla sezione POL-26 (fonte: Piano di Bacino).</i>	12
<i>Figura 2.9 – Modello idraulico del T. Polcevera: livelli idrici alla sezione POL-20 (fonte: Piano di Bacino).</i>	12
<i>Figura 3.1 – Schema di calcolo per la determinazione del profilo del pelo libero nei corsi d’acqua.</i>	15
<i>Figura 3.2 – Sezione schematica di un corso d’acqua.</i>	16
<i>Figura 3.3 – Modello idraulico monodimensionale del T. Polcevera: profilo di rigurgito da sezione POL-46 a POL-32.</i>	19
<i>Figura 3.4 – Modello idraulico monodimensionale del T. Polcevera: profilo di rigurgito da sezione POL-31 a POL-21.</i>	19
<i>Figura 3.5 – Modello idraulico monodimensionale del T. Polcevera: profilo di rigurgito da sezione POL-25 a POL-12.</i>	20
<i>Figura 3.6 – Modello idraulico monodimensionale del T. Polcevera: livelli idrici alla sezione POL-27.5.</i>	20
<i>Figura 3.7 – Modello idraulico monodimensionale del T. Polcevera: livelli idrici alla sezione POL-26.</i>	21
<i>Figura 3.8 – Modello idraulico monodimensionale del T. Polcevera: livelli idrici alla sezione POL-20.</i>	21
<i>Figura 3.9 – Modello idraulico bidimensionale del T. Polcevera: dominio di calcolo.</i>	24
<i>Figura 3.10 – Torrente Polcevera: idrogrammi di piena per differenti periodi di ritorno.</i>	26
<i>Figura 3.11 – Torrente Polcevera: aree potenzialmente inondabili, Tr 200 anni.</i>	27
<i>Figura 3.12 – Torrente Polcevera: aree potenzialmente inondabili, Tr 500 anni.</i>	28
<i>Figura 3.13 – Torrente Polcevera: aree potenzialmente inondabili, Tr 1000 anni.</i>	29
<i>Figura 3.14 – Torrente Polcevera: aree potenzialmente inondabili, Tr 2000 anni.</i>	30
<i>Figura 3.15 – Torrente Polcevera: sequenza di immagini relative a differenti istanti della simulazione Tr 200 anni.</i>	31

INDICE DELLE TABELLE

<i>Tabella 2.1 – Torrente Polcevera: valori di portata al colmo per differenti tempi di ritorno, adottati nelle verifiche idrauliche condotte nell’ambito della redazione del Piano di Bacino.</i>	8
<i>Tabella 5.1 - Formulazione CSU: valori dei fattori correttivi K1, K2, K3.</i>	34
<i>Figura 5.2 - Differenti tipologie di pile non uniformi dotate di fondazioni.</i>	36

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
5 di 37

1. PREMESSA

Il presente elaborato è parte integrante del Progetto Esecutivo delle opere di costruzione necessarie al ripristino strutturale e funzionale del Viadotto sul Torrente Polcevera, in Genova.

Sono illustrate le simulazioni idrauliche condotte secondo un modello bidimensionale (in regime di moto vario), finalizzate alla valutazione del comportamento del Torrente Polcevera nell'area di intervento, con riferimento alle portate al colmo di piena determinate nello studio idrologico annesso, allo studio idraulico condotto dall'Autorità di Bacino della Regione Liguria nell'ambito della redazione del PIANO DI BACINO STRALCIO PER LA TUTELA DAL RISCHIO IDROGEOLOGICO (ai sensi dell'art. 1, comma 1, del D.L. 180/1998 convertito in L. 267/1998), approvato con D.C.M. n. 26 del 25/06/2015, nonché delle relative mappe di pericolosità idraulica.

E' stata effettuata inoltre la verifica idraulica del T. Polcevera, secondo un modello monodimensionale, finalizzata alla determinazione dei livelli idrici corrispondenti alle cosiddette "portate di cantiere", dipendenti dalla durata della fase di cantierizzazione dell'opera in progetto.

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
6 di 37

2. INQUADRAMENTO GENERALE E OBIETTIVO DELLO STUDIO

2.1. Pericolosità idraulica nell'area di studio

Il viadotto autostradale "Polcevera" attraversa l'omonimo torrente nei pressi dei quartieri di Sampierdarena e Cornigliano, nella città di Genova.



Figura 2.1 – Inquadramento dell'area di studio.

Il bacino sottende una superficie complessiva pari a circa 140 kmq, e l'asta principale, dopo un percorso di circa 19 km, sfocia in mare, in prossimità della delegazione genovese di Cornigliano.

L'inquadramento geografico, morfologico e idrografico del bacino del T. Polcevera è riportato nell'elaborato annesso NG1200E11RIID0001C01A – "Relazione idrologica: studio idrologico del bacino del T. Polcevera". Di seguito, sono riportate le mappe di pericolosità idraulica nell'area di intervento, definite nell'ambito del Piano di Bacino.

In particolare, sono individuate 3 classi di pericolosità idraulica (H - elevata, M- media, L - bassa).

La classe di pericolosità elevata (H) fa riferimento ad eventi caratterizzati da una probabilità di accadimento $T_r = 50$ anni ("Aree allagabili frequenti").

La classe di pericolosità media (M) fa riferimento invece ad un evento caratterizzato da un tempo di ritorno T_r inferiore o uguale a 200 anni ("Aree allagabili poco frequenti"); mentre la classe di pericolosità bassa (L) fa riferimento ad un evento di piena raro, caratterizzato da un tempo di ritorno T_r di 500 anni ("Aree allagabili rare").

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
7 di 37

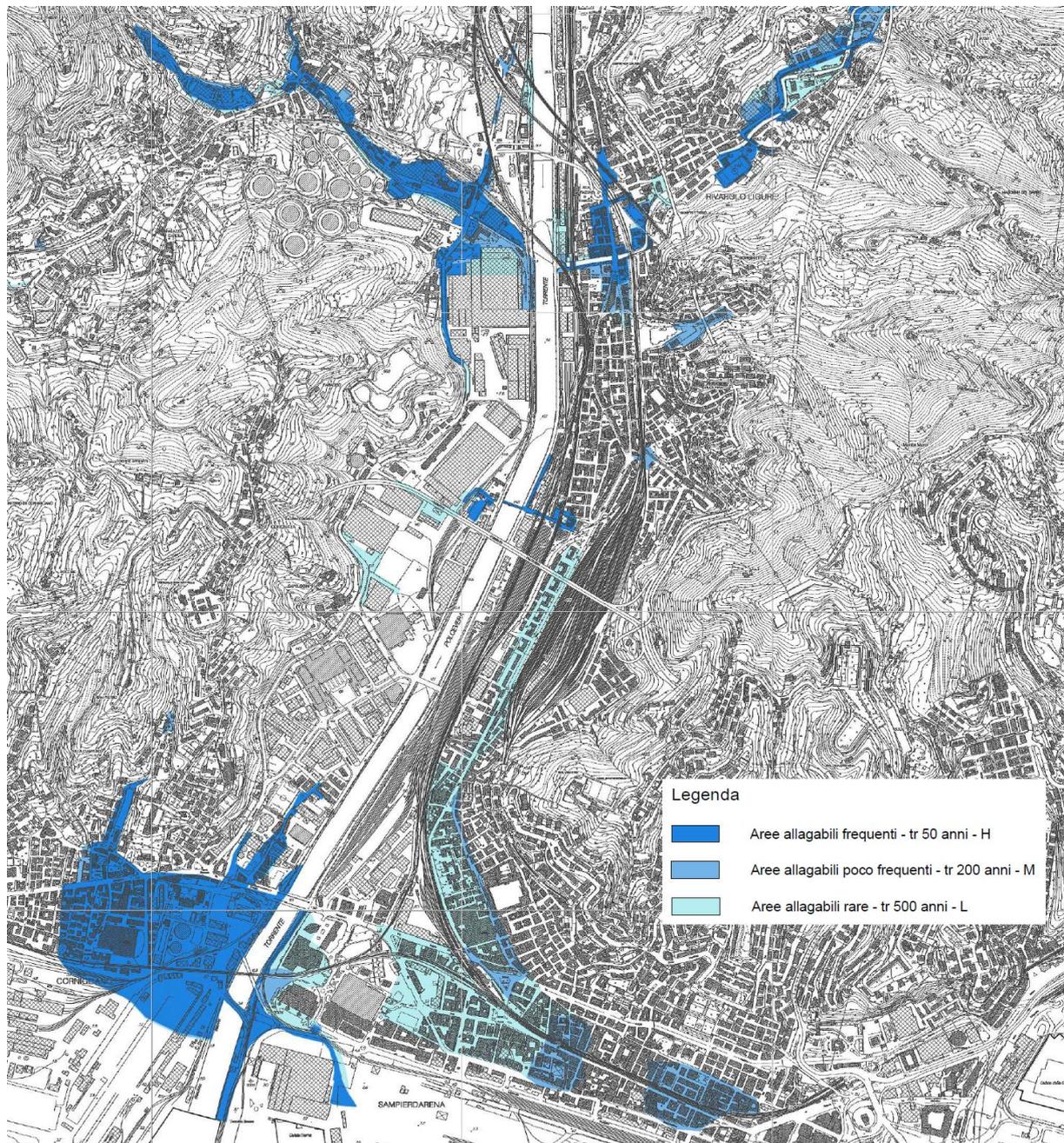


Figura 2.2 – Mappe di pericolosità idraulica (Piano di bacino, aggiornamento 2015).

Nell'area di intervento non sono evidenziate particolari criticità idrauliche, eccetto il ponte pedonale di Via Campi, unitamente ai limitrofi sottopassi ferroviari (classificati come "Aree allagabili frequenti – Tr 50 anni – H"), ed alcune zone lungo Via N. Lorenzi e Via W. Fillak, individuate come "Aree allagabili rare – Tr 500 anni – L", a causa dell'insufficienza idraulica delle rogge e della rete fognaria esistente.

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
8 di 37

2.2. Verifiche idrauliche condotte nell'ambito del Piano di Bacino

L'analisi idraulica dell'asta principale del Torrente Polcevera ha subito, nella recente fase di aggiornamento del Piano di Bacino (2015-2017), una profonda revisione globale che ha portato ad avere un unico tratto studiato interamente, da valle della confluenza tra Riccò e Verde fino al ponte Pieragostini a Sampierdarena, secondo un modello monodimensionale, in regime di moto permanente, tramite il software Hec Ras.

Per ottenere tale risultato, oltre ad avere ricontrollato le sezioni provenienti da progetti e pratiche presentate all'Amministrazione provinciale, sono state rilevate in proprio molte nuove sezioni del corso d'acqua ad integrazione di quelle già esistenti.

Nel tratto di interesse, all'incirca dal nodo Torbella-Fegino fino al ponte Pieragostini, le simulazioni idrauliche sono state condotte assegnando un valore medio del coefficiente di scabrezza di Manning pari a $0.025\text{s/m}^{1/3}$.

Le portate simulate per i vari tempi di ritorno considerati (50, 200, 500 anni) sono riportati nella tabella seguente.

$Q \text{ (mc/s)} - TR50$	$Q \text{ (mc/s)} - TR200$	$Q \text{ (mc/s)} - TR500$
1377	1763	2006

Tabella 2.1 – Torrente Polcevera: valori di portata al colmo per differenti tempi di ritorno, adottati nelle verifiche idrauliche condotte nell'ambito della redazione del Piano di Bacino.

Come condizione di valle è stata imposta quella di altezza idrica nota (*'Known Depth'*), rispettivamente pari a +5.9 m s.l.m., +7.2 m s.l.m., +8.4 m s.l.m., per i tre tempi di ritorno considerati.

Di seguito, si riportano il tratto di interesse per l'opera in progetto del modello idraulico sopra descritto, unitamente ai risultati ottenuti in termini di profili di rigurgito e di livelli idrici in alcune sezioni significative, per i differenti tempi di ritorno considerati.

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
9 di 37

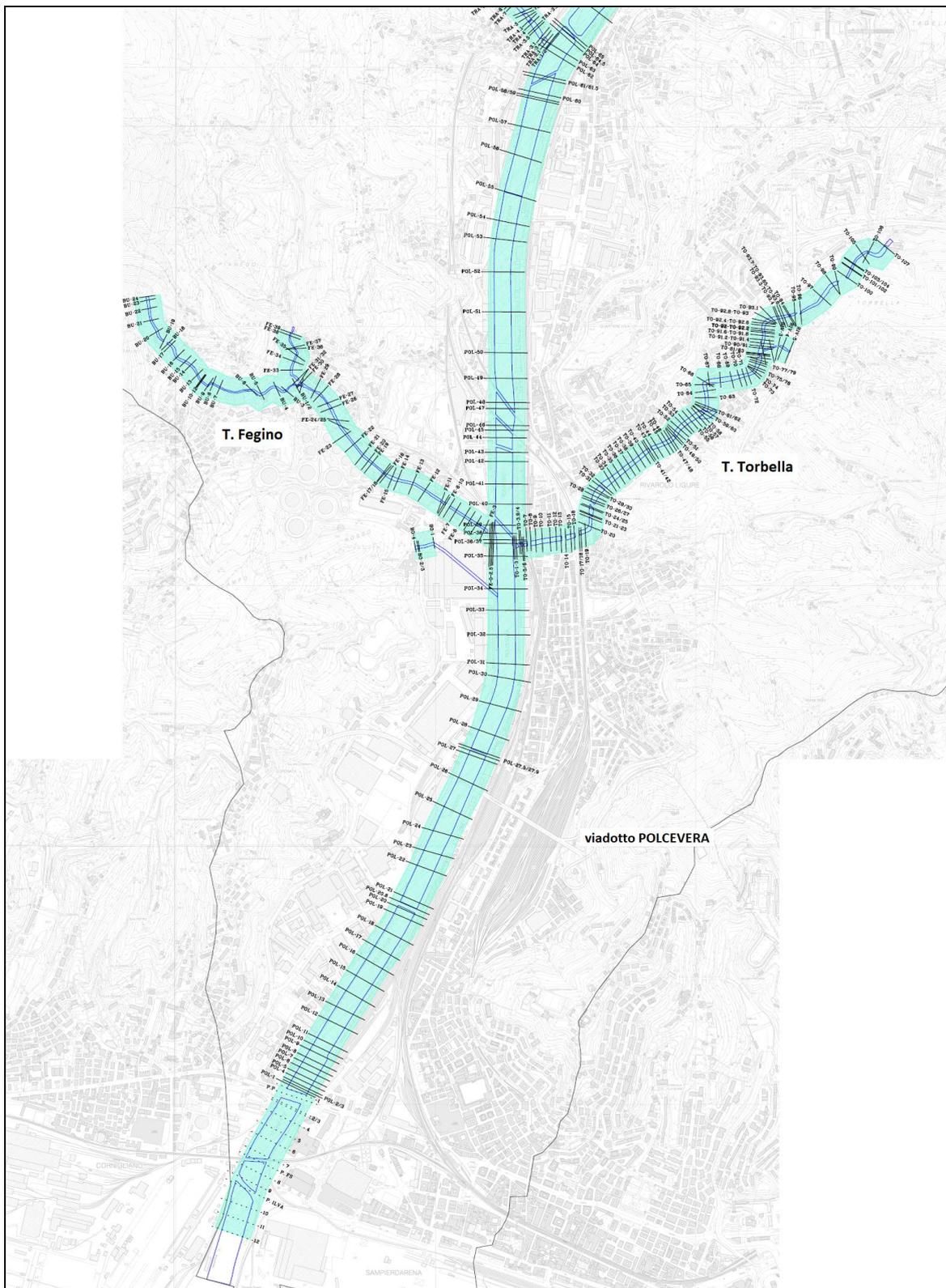


Figura 2.3 – Modello idraulico del T. Polcevera: tratto “Torbella/Fegino- ponte Pieragostini” (fonte: Piano di Bacino).

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
10 di 37

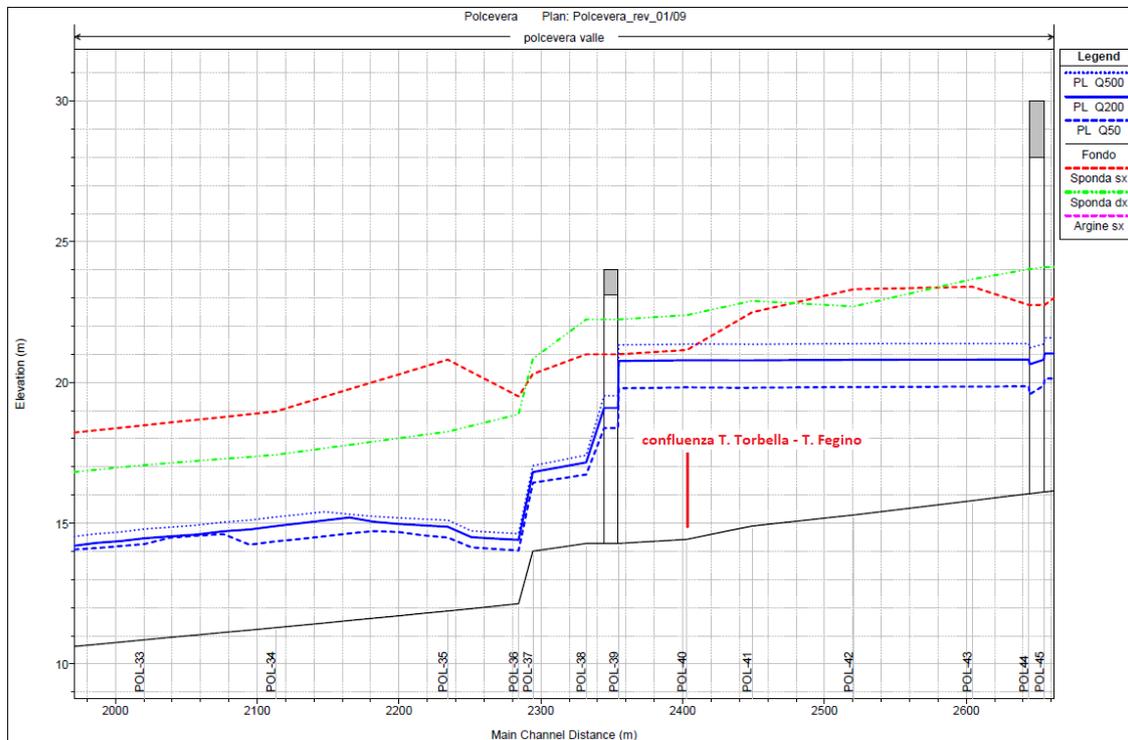


Figura 2.4 – Modello idraulico del T. Polcevera: profilo di rigurgito da sezione POL-45 a POL-33 (fonte: Piano di Bacino).

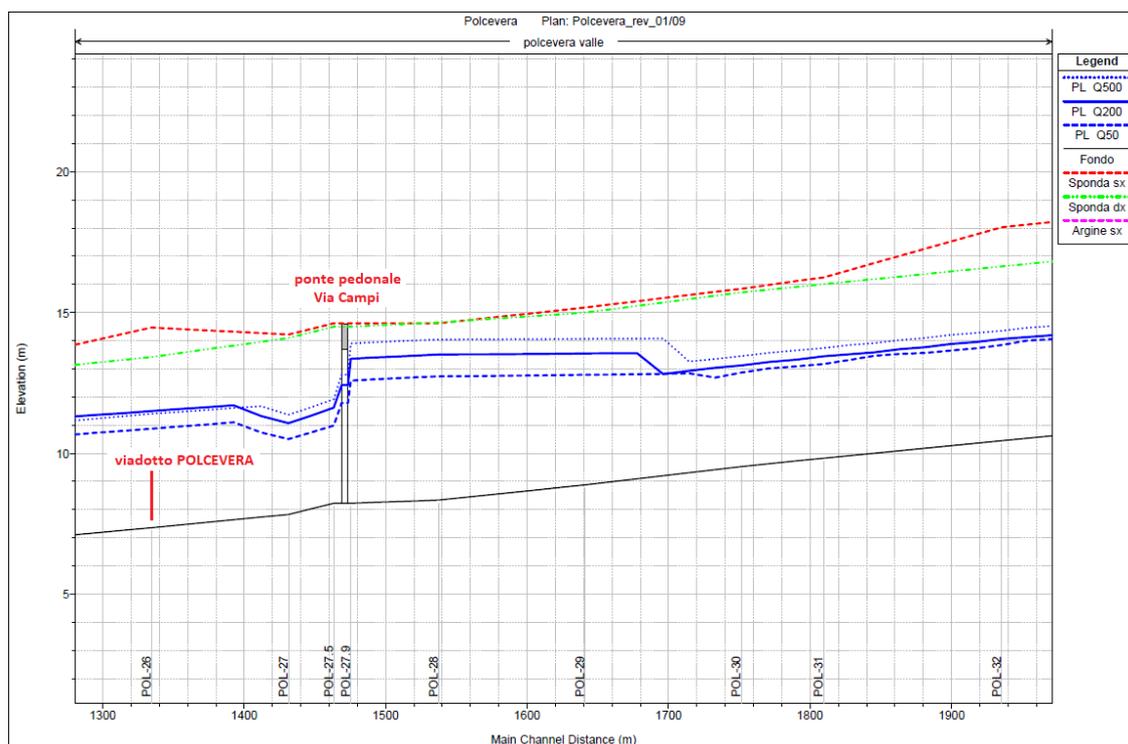


Figura 2.5 – Modello idraulico del T. Polcevera: profilo di rigurgito da sezione POL-32 a POL-26 (fonte: Piano di Bacino).

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
11 di 37

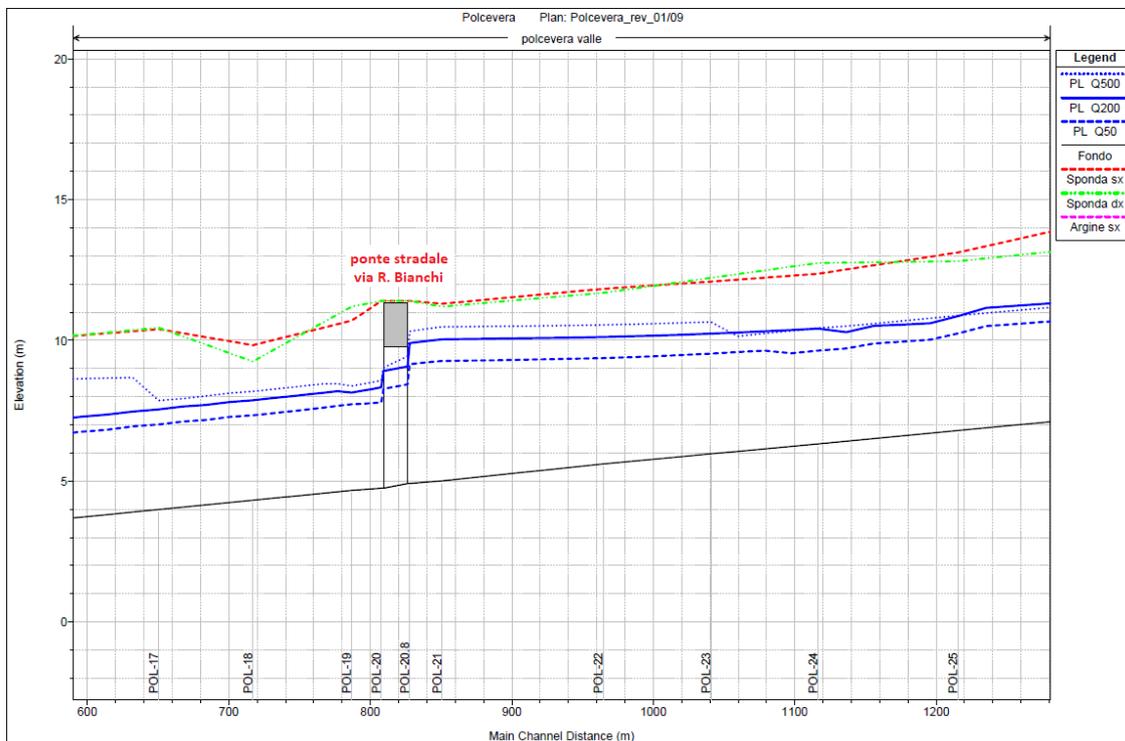


Figura 2.6 – Modello idraulico del T. Polcevera: profilo di rigurgito da sezione POL-25 a POL-17 (fonte: Piano di Bacino).

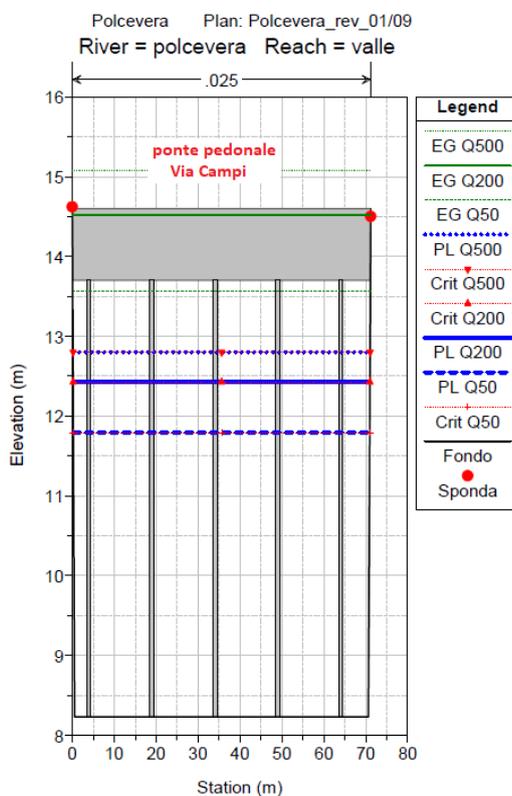


Figura 2.7 – Modello idraulico del T. Polcevera: livelli idrici alla sezione POL-27.5 (fonte: Piano di Bacino).

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
13 di 37

Relativamente al tratto di studio considerato, i risultati ottenuti non evidenziano la possibilità di esondazione delle piene con tempi di ritorno di 50, 200, 500 anni. Considerazioni specifiche sul modello idraulico del T. Polceverasviluppato dalla Regione Liguria sono riportati nei capitoli successivi.

2.3. Obiettivi dello studio idraulico

Vista l'elevazione del viadotto in progetto, le prescrizioni in materia di franco idraulico, i.e. franco minimo di 1,50 m rispetto al livello idrico corrispondente alla piena duecentennale ($Tr = 200$) e distanza minima di 6 - 7 m tra il fondo alveo e la quota di sottotrave, in ragione di eventuali fenomeni di trasporto solido di fondo e/o di materiale galleggiante, riportate nelle NTC2018, sono già ampiamente rispettate e non risultano "dimensionanti" per il nuovo impalcato e la sua quota di intradosso.

Le pile e le relative opere di fondazione potrebbero invece avere una non trascurabile influenza sui deflussi di esondazione in occasione degli eventi più estremi.

Obiettivo del presente studio idraulico è quindi quello di valutare il comportamento del Torrente Polcevera nella zona di intervento, nelle configurazioni ante e post operam, per vari tempi di ritorno (200, 500, 1000, 2000 anni), ovvero per differenti scenari di rischio, con riferimento al viadotto stesso, alle opere provvisorie che verranno realizzate nella fase di cantierizzazione dell'opera in progetto, nonché ad eventuali fenomeni di erosione localizzata attorno alle pile.

In particolare, richiamando la definizione di rischio (R), inteso come probabilità di superamento di un determinato evento durante la vita utile (VU) dell'opera (200 anni per il viadotto in progetto), sono stati analizzati i seguenti scenari di rischio:

- 1) $R = 63,3 \%$ ($VU = 200$ anni, $Tr = 200$ anni)
- 2) $R = 33 \%$ ($VU = 200$ anni, $Tr = 500$ anni)
- 3) $R = 18 \%$ ($VU = 200$ anni, $Tr = 1000$ anni)
- 4) $R = 9.5 \%$ ($VU = 200$ anni, $Tr = 2000$ anni)

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
14 di 37

3. STUDIO IDRAULICO

In analogia allo studio condotto dalla Regione Liguria nell'ambito della redazione del Piano di Bacino (2015-2017), è stato dapprima implementato un modello idraulico monodimensionale(1D) del Torrente Polcevera, in regime di moto permanente, tramite il software HecRas; successivamente, a seguito dell'analisi dei risultati ottenuti con il modello 1D e ai fini della valutazione del rischio accettabile durante la vita utile dell'opera in progetto, con riferimento alle portate al colmo con tempo di ritorno $Tr \geq 500$ anni, è stato sviluppato un modello idraulico bidimensionale, in regime di moto vario, tramite il software Infoworks ICM 9.0.

3.1. Dati di base

I dati topografici a disposizione per l'implementazione dei modelli idraulici sopra introdotti sono:

- rilievo laseraltimetrico (LiDAR), risoluzione 1x1 m, fornito dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare;
- sezioni trasversali dell'alveo e delle opere di attraversamento esistenti sul T. Polcevera, riportate nello studio della Regione Liguria;
- rilievo celerimetrico dell'area di intervento.

Il confronto tra le diverse informazioni topografiche ed in particolare tra le sezioni trasversali dell'alveo riportate nello studio della Regione Liguria ed i rilievi LiDAR e celerimetrico ha evidenziato alcune differenze. Questo ha permesso, nell'implementazione dei modelli idraulici, di utilizzare le informazioni topografiche più recenti e aggiornate.

3.2. Implementazione dei modelli idraulici

3.2.1. Modello monodimensionale

Come anticipato, per lo sviluppo del modello idraulico monodimensionale del T. Polcevera è stato impiegato il software Hec Ras 5.0.6., sviluppato dall'Hydrologic Center del Corpo degli Ingegneri dell'Esercito degli Stati Uniti d'America.

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
15 di 37

Il calcolo del profilo di corrente in condizioni di moto permanente fra due sezioni successive è effettuato dal software HEC-RAS mediante la soluzione dell'equazione dell'energia, attraverso un processo iterativo denominato '*standard step method*'. Indicate con 1 e 2 rispettivamente le sezioni di valle e di monte (Figura 3.1), l'equazione dell'energia è espressa dalla seguente relazione:

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

dove Y_1 , Y_2 sono i tiranti idrici di monte e di valle; Z_1 , Z_2 le quote topografiche; v_1 , v_2 le velocità medie (portata totale/area di flusso totale); α_1 , α_2 i coefficienti di ragguglio delle altezze cinetiche o di Coriolis; g l'accelerazione di gravità; h_e la perdita di carico totale nel tratto.

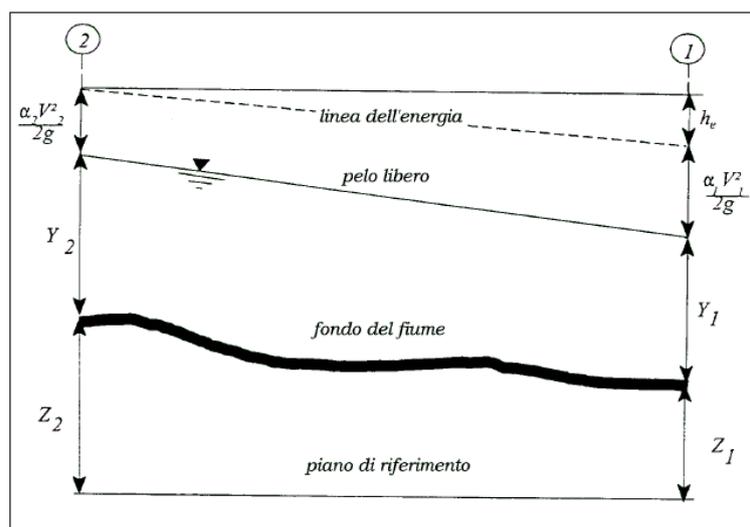


Figura 3.1 – Schema di calcolo per la determinazione del profilo del pelo libero nei corsi d'acqua.

Le perdite di energia complessive h_e tra le due sezioni sono dovute alle perdite distribuite per attrito ed a quelle localizzate dovute a fenomeni di espansione e contrazione della vena fluida; in particolare si ha:

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

dove L è la distanza tra le due sezioni; \bar{j} è la perdita di carico media distribuita tra le due sezioni e C è il coefficiente che correla le perdite, dovute all'espansione ed alla contrazione della vena, in funzione dell'andamento piano – altimetrico del corso d'acqua, alla differenza dei carichi cinetici delle due sezioni. La distanza L tra le due sezioni è calcolata mediante la relazione:

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
16 di 37

$$L = \frac{L_{lob} \bar{Q}_{lob} + L_{ch} \bar{Q}_{ch} + L_{rob} \bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}}$$

in cui L_{lob}, L_{ch}, L_{rob} sono le lunghezze del tratto relative all'area golenale sinistra, al canale principale e all'area golenale destra rispettivamente; $\bar{Q}_{lob}, \bar{Q}_{ch}, \bar{Q}_{rob}$ sono le portate medie attraverso la sezione rispettivamente in golena sinistra, canale principale e golena destra.

Per la valutazione delle perdite di carico è utilizzata la formula di Manning:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} \sqrt{j}$$

dove Q rappresenta la portata, A la sezione bagnata, R il raggio idraulico, n il coefficiente di scabrezza secondo Manning. Nel caso di sezioni composte, tipiche dei corsi d'acqua naturali, è necessario suddividere la sezione in parti in modo da trattare separatamente sezioni in cui la velocità media può essere ritenuta, ai fini pratici, costante (Figura 3.2).

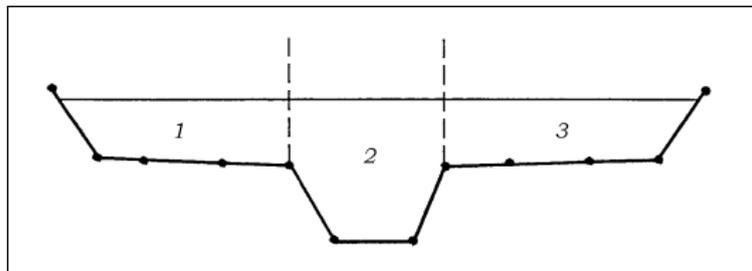


Figura 3.2 –Sezione schematica di un corso d'acqua.

Con riferimento alla figura precedente, definito $K_i = Q_i / \sqrt{j}$ la capacità di portata di ogni singola parte i -esima in cui è stata suddivisa la sezione, in accordo alla formula di Manning, è:

$$\bar{j} = \left(\frac{Q}{\sum_i K_i} \right)^2$$

Questo risultato può essere facilmente ricavato osservando che la portata di ogni singola area $Q_i = K_i \sqrt{j} \sqrt{j}$ è proporzionale al rispettivo coefficiente di portata e che la portata totale vale $Q = \sum_i Q_i$.

Il programma HEC-RAS implementa quattro modalità distinte per valutare \bar{j} ; in particolare:

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
17 di 37

- $\bar{j} = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \bar{j} = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2$ (*average conveyance equation*)
- $\bar{j} = \frac{j_1 + j_2}{2} \bar{j} = \frac{j_1 + j_2}{2}$ (*average friction slope equation*)
- $\bar{j} = \sqrt{j_1 \cdot j_2} \bar{j} = \sqrt{j_1 \cdot j_2}$ (*geometric mean friction slope equation*)
- $\bar{j} = \frac{2j_1 \cdot j_2}{j_1 + j_2} \bar{j} = \frac{2j_1 j_2}{j_1 + j_2}$ (*harmonic mean friction slope equation*)

Il programma utilizza per default la prima delle quattro opzioni proposte, per quanto sia possibile adottare automaticamente la formula che meglio si adatta a ciascun tipo di profilo (corrente lenta o veloce). Calcolata la capacità di portata di ogni singola sezione, è possibile, da queste, valutare il coefficiente di Coriolis. Questo coefficiente è pari al rapporto tra l'energia cinetica reale della corrente, proporzionale a $\sum_i Q_i^3 / A_i^2$, e l'energia cinetica calcolata facendo uso del valore medio della velocità, proporzionale a Q^3 / A^2 . Espresse le portate delle singole parti *i*-esime in funzione del rispettivo coefficiente di portata si perviene con qualche semplice passaggio alla seguente espressione:

$$\alpha_k = \left(\frac{\sum_{i=1}^3 K_i^3}{\sum_{i=1}^3 A_i^2} \right) \frac{\left(\sum_{i=1}^3 A_i \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^3 K_i \right)^3} \quad (k = 1, 2)$$

Calcolate tramite le rispettive equazioni le perdite di energia h_e ed i coefficienti di Coriolis α_k , l'equazione

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

associata all'equazione di continuità, permette di calcolare, mediante un procedimento iterativo, l'altezza idrica alla sezione di calcolo. La procedura è la seguente:

1) Si assume un valore di tentativo per il livello idrico sulla sezione di monte (o di valle nel caso in cui si ipotizzi una corrente di tipo veloce).

2) Si calcola il valore della capacità di portata totale $K (= \sum_{i=1}^3 K_i)$ e l'altezza cinetica per il livello di tentativo.

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
18 di 37

3) In base ai valori calcolati al passo 2, si calcola \bar{j} e si risolve l'equazione $h_e = L\bar{j} + C \left| \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} - \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} \right|$ per il valore di h_e .

4) Con i valori calcolati ai passi 2 e 3, si calcola $Y_2 + Z_2$ mediante la

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

5) Si confronta il valore calcolato $Y_2 + Z_2$ con quello di tentativo del passo 1.

Si ripetono i passi dall'1 al 5 fino a che i due valori non differiscono per meno di 0.003 m o di una soglia specificata dall'utente.

3.2.1.1. Risultati

Si riportano di seguito i risultati, in termini di profili di rigurgito e livelli idrici in alcune sezioni significative, delle simulazioni idrauliche, nella situazione attuale (per confronto con i risultati dello studio della Regione Liguria), effettuate avendo assunto le seguenti ipotesi:

- condizioni di moto permanente;
- regime di corrente mista;
- condizioni al contorno;
 - con riferimento ai tempi di ritorno di 50, 200 e 500 anni (adottati per il Piano di Bacino): condizione di altezza idrica critica nella sezione di monte ('*Critical Depth*') e di altezza idrica nota nella sezione di valle ('*Known Depth*'), imposta rispettivamente pari a +5.9 m s.l.m., +7.2 m s.l.m., +8.4 m s.l.m., così come riportato nello studio del Piano di Bacino;
- coefficiente di Manning pari a $0.035 \text{ s/m}^{1/3}$ per l'alveo inciso e $0.045 \text{ s/m}^{1/3}$ per le sponde/golene (Chow V.T., 1959), valori più cautelativi rispetto a quelli adottati nello studio della Regione Liguria e meglio rappresentativi delle attuali/reali (e future) condizioni di manutenzione del Torrente Polcevera.

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
19 di 37

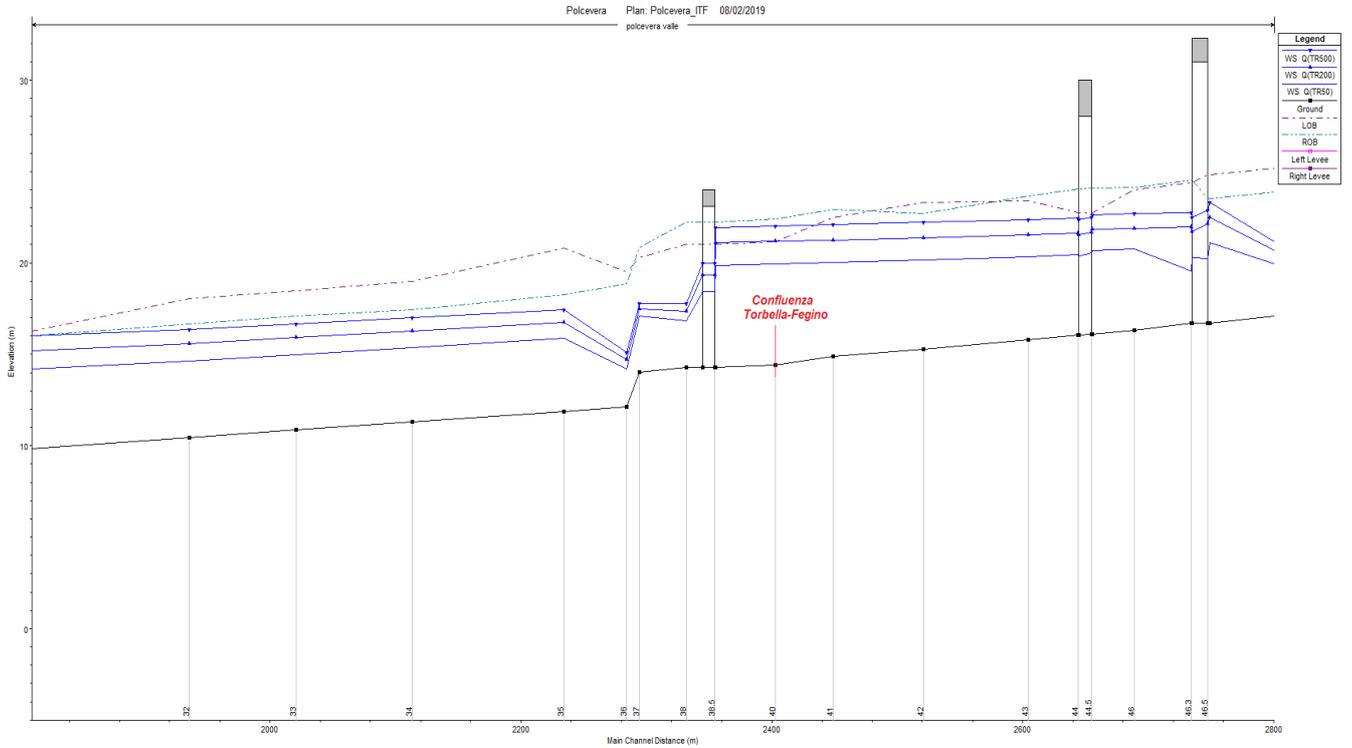


Figura 3.3 – Modello idraulico monodimensionale del T. Polcevera: profilo di rigurgito da sezione POL-46 a POL-32.

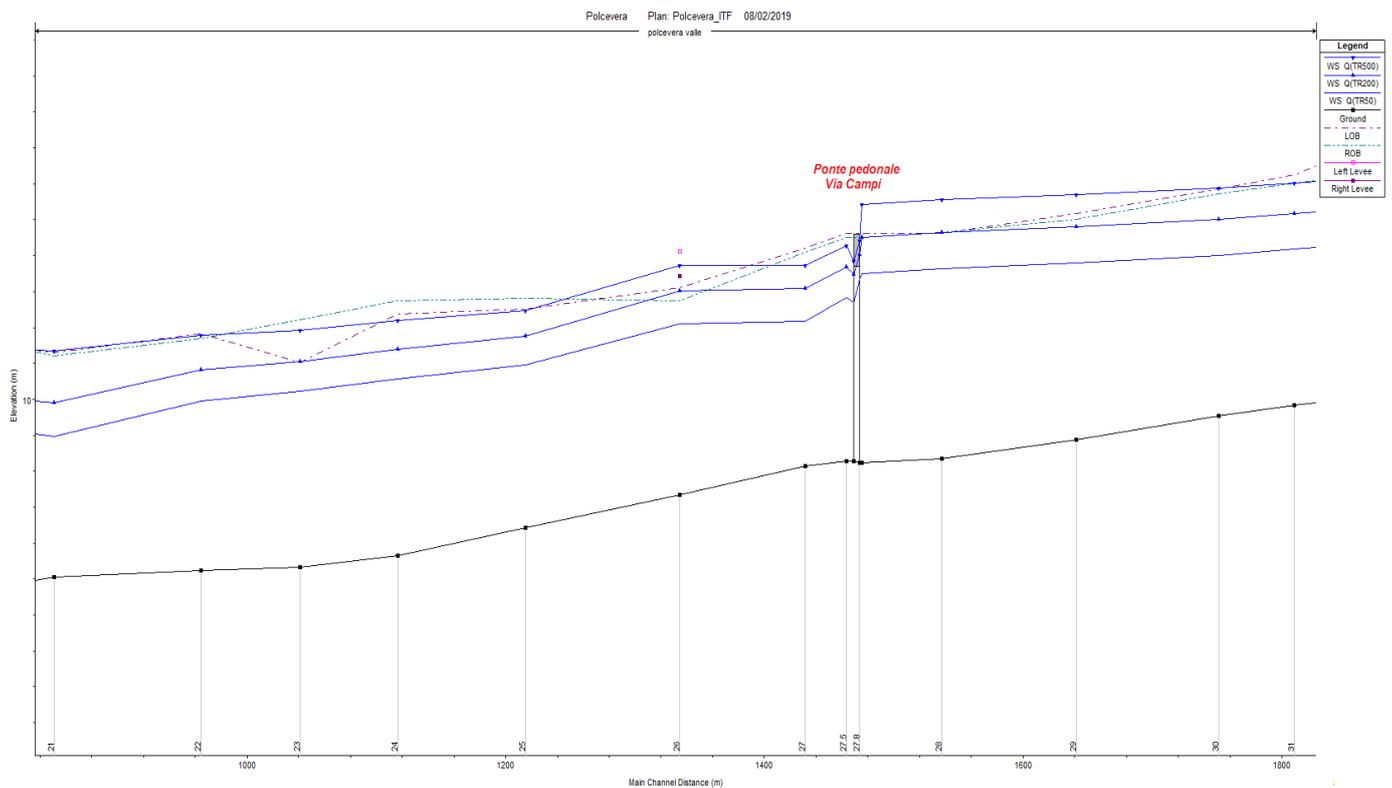


Figura 3.4 – Modello idraulico monodimensionale del T. Polcevera: profilo di rigurgito da sezione POL-31 a POL-21.

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
20 di 37

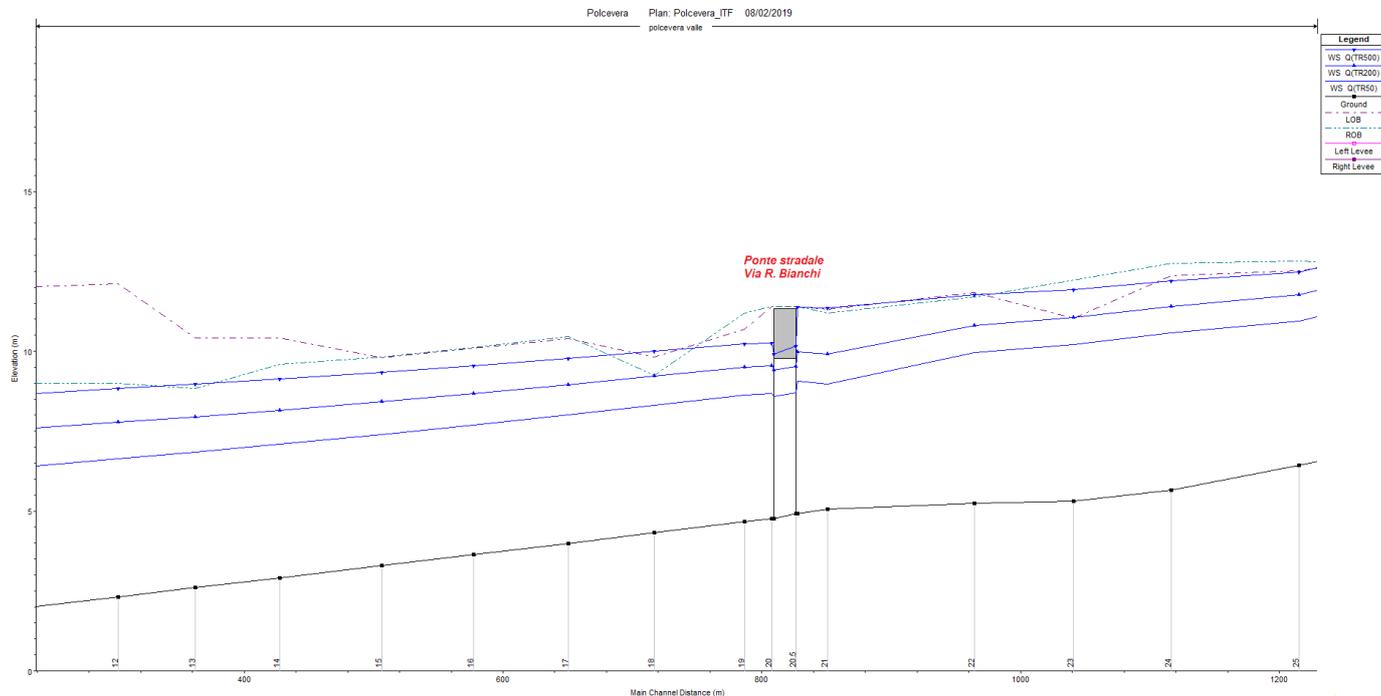


Figura 3.5 – Modello idraulico monodimensionale del T. Polcevera: profilo di rigurgito da sezione POL-25 a POL-12.

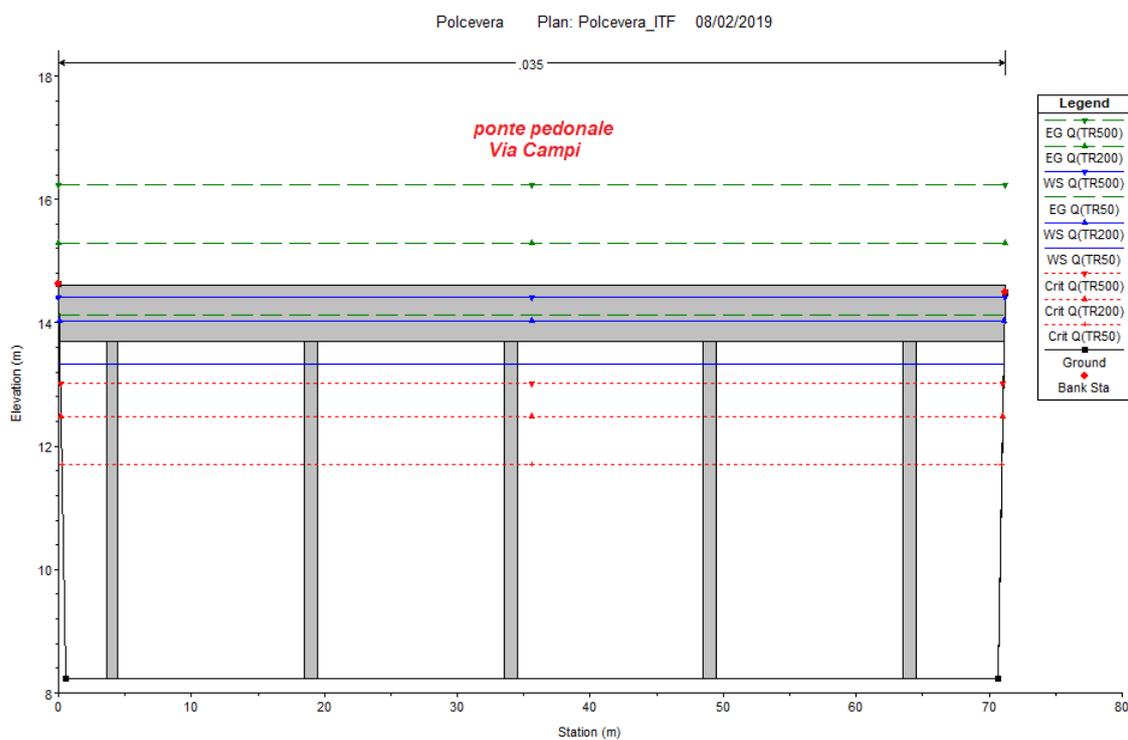


Figura 3.6 – Modello idraulico monodimensionale del T. Polcevera: livelli idrici alla sezione POL-27.5.

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
21 di 37

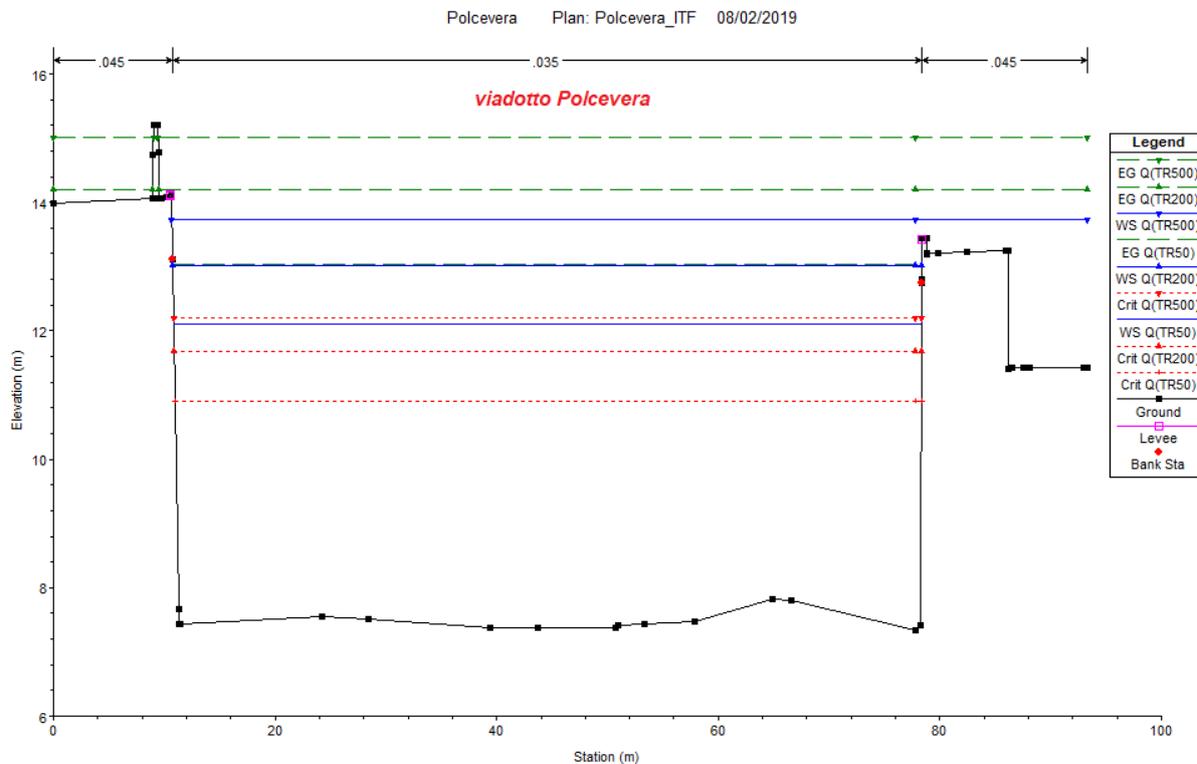


Figura 3.7 – Modello idraulico monodimensionale del T. Polcevera: livelli idrici alla sezione POL-26.

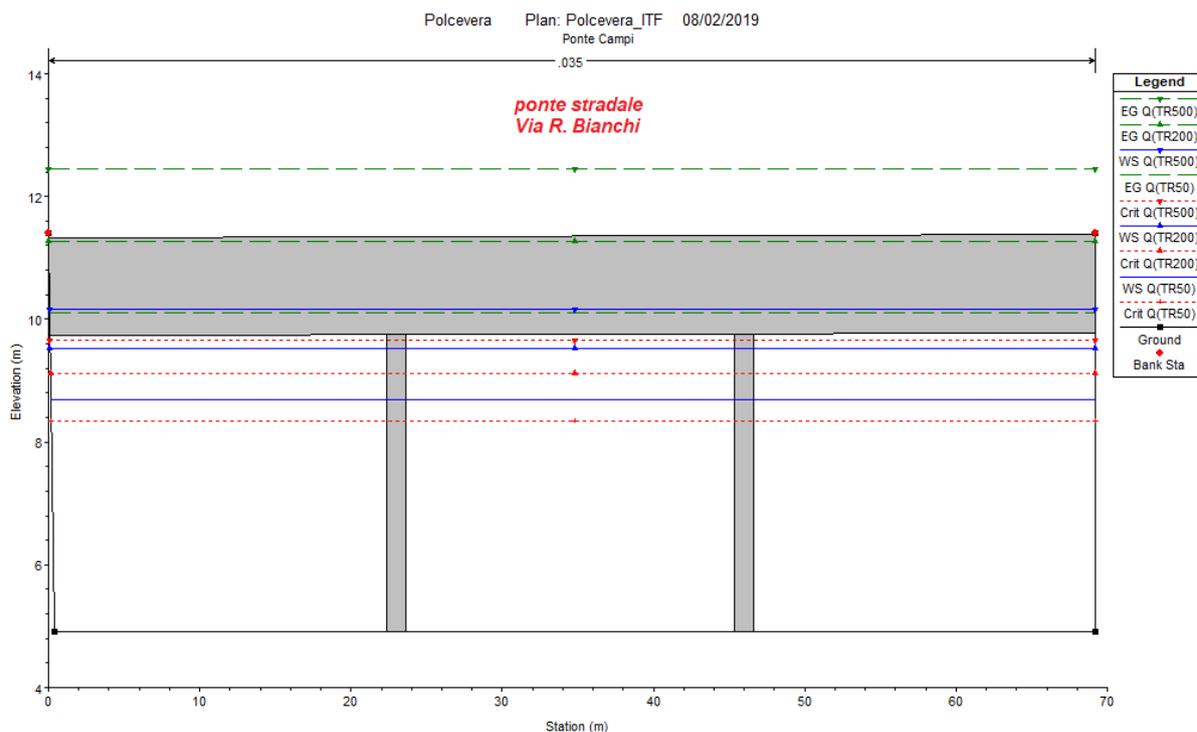


Figura 3.8 – Modello idraulico monodimensionale del T. Polcevera: livelli idrici alla sezione POL-20.

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
22 di 37

A differenza del modello idraulico sviluppato dalla Regione Liguria, i risultati delle simulazioni implementate nel presente studio evidenziano, nel tratto esaminato, possibili esondazioni del T. Polcevera per piene con tempo di ritorno (Tr) di 200-500 anni, dovute principalmente a fenomeni di rigurgito innescati dai due ponti (pedonale e stradale) di Via Campi e Via R. Bianchi.

Si è proceduto quindi all'elaborazione di un modello bidimensionale del T. Polcevera, ai fini della determinazione delle aree potenzialmente inondabili per $Tr = 200, 500, 1000, 2000$ anni, ossia per i vari scenari di rischio considerati.

3.2.2. *Modello bidimensionale*

Il codice di calcolo utilizzato per lo sviluppo del modello bidimensionale del T. Polcevera è il software InfoWorks ICM 9.0, sviluppato dalla software house Innovyze con sede a Wallingford nel Regno Unito (UK). La modellazione bidimensionale di un corso d'acqua permette di rappresentare con accuratezza la propagazione delle onde di piena nell'asta fluviale e nelle aree ripariali attigue con la riuscendo a modellare il comportamento della corrente in prossimità di bruschi restringimenti/allargamenti e forti curvature; è possibile inoltre rappresentare con un elevato grado di dettaglio la propagazione del moto in prossimità di attraversamenti o di eventuali interferenze presenti lungo lo sviluppo del tratto fluviale verso valle.

Allo stesso tempo la rappresentazione in termini bidimensionali del campo di velocità consente di analizzare l'evoluzione degli allagamenti indotti dal propagarsi delle onde di piena all'interno dell'area esaminata.

Il software impiegato è in grado di contenere all'interno dello stesso modello numerico elementi di tipo bidimensionale e monodimensionale. Il modello numerico utilizzato risolve le equazioni in condizioni di moto vario.

Per valutare il campo di moto, il modello numerico implementato in InfoWorks ICM è basato sulla procedura proposta da *Alcrudo and Mullet-Marti (2005), Urban inundation models based upon the Shallow Water Equations*. La rappresentazione bidimensionale del moto si basa sulla risoluzione delle shallow water equations (o SWE). Le ipotesi alla base per la soluzione delle SWE sono che il flusso sia orizzontale e che la variazione della velocità nella verticale rispetto alla direzione del moto sia trascurabile. Inoltre, le equazioni sono sviluppate accettando a priori l'ipotesi di idrostaticità del gradiente delle pressioni lungo la direzione verticale. La formulazione delle SWE utilizzate nel software InfoWorks ICM è riassunta di seguito:

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

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
23 di 37

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

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

I termini citati rappresentano rispettivamente: h , il tirante idrico della corrente; u e v , rispettivamente le componenti della velocità lungo le direzioni x e y ; t , il tempo; g , l'accelerazione di gravità; $S_{0,x}$, $S_{0,y}$ le componenti dovute alle tensioni tangenziali al fondo, rispettivamente in direzione x e y ; $S_{f,x}$, $S_{f,y}$, le componenti dovute alla pendenza del fondo, rispettivamente in direzione x e y ; q_{1D} , la portata immessa per unità di superficie; u_{1d} e v_{1d} , le componenti di velocità relative alla portata immessa rispettivamente in direzione x e y .

Il contributo degli effetti turbolenti viene considerato limitatamente alla turbolenza localizzata alla parete (wallfriction), mentre gli effetti turbolenti legati alle fluttuazioni di velocità nelle regioni più interne del fluido vengono trascurate. In genere si ingloba quest'ultimo effetto dissipativo nel termine che rappresenta la dissipazione localizzazione alla parete.

La formulazione conservativa delle SWE è essenziale al fine di preservare la massa e la quantità di moto. Questo tipo di formulazione permette di rappresentare le discontinuità nel flusso e i cambiamenti tra moto gradualmente e rapidamente vario (*gradually varied flow* e *rapidly varied flow*).

Le SWE, applicate in forma conservativa, sono discretizzate usando lo schema esplicito di primo ordine ai volumi finiti. Gli schemi ai volumi finiti utilizzano volumi di controllo per rappresentare le aree di interesse. Il dominio di calcolo è suddiviso in forme geometriche in grado di interpretare le caratteristiche peculiari del campo di moto stesso sulle quali vengono integrate le SWE.

Lo schema che risolve le SWE è basato sullo schema numerico di Gudonov con i flussi numerici attraverso i contorni dei volumi di controllo calcolati. La metodologia secondo i volumi finiti è considerata essere vantaggiosa in termini di flessibilità della geometria e semplicità concettuale.

Per ciascun elemento di calcolo il timestep richiesto è calcolato utilizzando le condizioni di Courant-Friedrichs-Lewy al fine di raggiungere la stabilità numerica. La formulazione della condizione di Courant-Friedrichs-Lewy è la seguente:

$$c \frac{\Delta x}{\Delta t} \leq 1$$

dove: c è il numero di Courant (il valore di default è 0.95).

Inoltre, InfoWorks ICM utilizza mesh non strutturate per rappresentare il dominio di calcolo bidimensionale.

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
24 di 37

3.2.2.1. Geometria del modello

Le caratteristiche geometriche della zona di interesse (in seguito definita dominio di calcolo) sono riportate all'interno del modello idraulico tramite una discretizzazione del territorio attraverso elementi generalmente poligonali, nota come mesh. La mesh di calcolo possiede una risoluzione variabile spazialmente tale per cui l'andamento plano altimetrico del territorio è riprodotto con un livello di accuratezza adeguato a rappresentare il corso d'acqua, alvei e golene, sia i canali secondari e le aree ripariali potenzialmente allagabili.

In particolare, è stato simulato il Torrente Polcevera per un tratto di lunghezza totale pari a circa 8 km, dalla confluenza del T. Ricco' fino alla foce. Nella figura seguente è riportata l'estensione del dominio di calcolo (superficie = 10 km² circa).

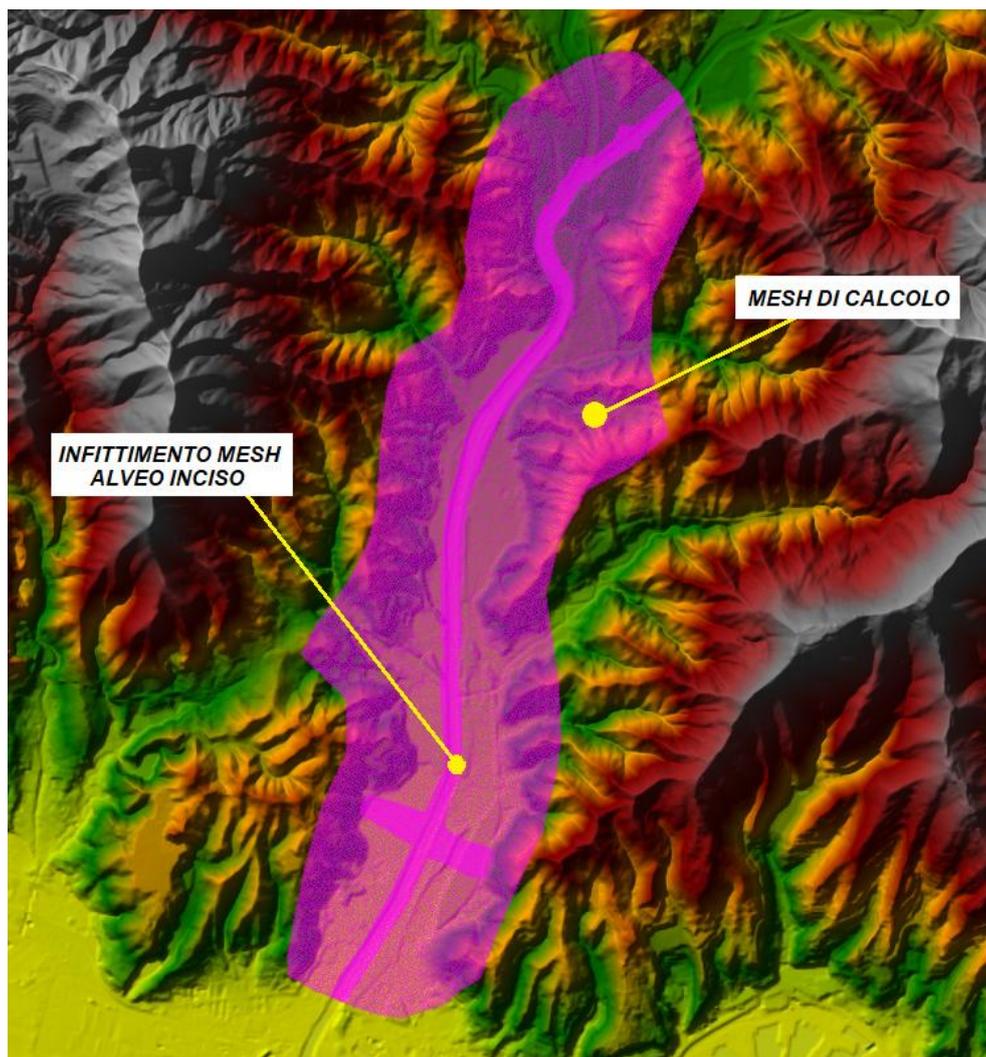


Figura 3.9 – Modello idraulico bidimensionale del T. Polcevera: dominio di calcolo.

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
25 di 37

La geometria del modello è stata implementata utilizzando i dati LIDAR (risoluzione 1x1 m) disponibili per l'area in esame e da rilievo celerimetrico, precedentemente descritti. La rete di calcolo bidimensionale interessa sia l'alveo inciso sia le aree golenali di espansione esterne; questa è stata definita utilizzando le opzioni di discretizzazione automatica del dominio di calcolo presenti in InfoWorks ICM, definendo opportune aree di infittimento della maglia in corrispondenza di elementi morfologicamente ed idraulicamente significativi, quali strade, corsi d'acqua, rilevati, etc.

La creazione della mesh è stata sviluppata in modo tale che le dimensioni massime degli elementi non fossero superiori a valori di 100 m² e che le dimensioni minime non fossero inferiori ad un area di 25 m². Gli infittimenti della mesh (alveo e opere esistenti in alveo) sono stati sviluppati imponendo una dimensione massima degli elementi è pari a 25 m² e una dimensione minima di 10 m².

3.2.2.2. Scabrezze

I coefficienti di scabrezza n di Manning sono stati fissati sulla base di valori di letteratura.

In particolare, per l'alveo e le golene è stato assunto $n = 0.035$ (s/m^{1/3}); il coefficiente di scabrezza per le aree esterne, potenzialmente inondabili, è stato assegnato pari a $n = 0.045$ (s/m^{1/3}).

3.2.2.3. Condizioni al contorno

Gli idrogrammi di riferimento (imposti come condizione al contorno di monte), di seguito riportati, sono quelli ricavati nello studio idrologico, elaborato NG1200E11RIID0001C01A – *Relazione Idrologica: studio idrologico del Bacino del Torrente Polcevera*, al quale si rimanda.

A valle, è stata imposta la condizione di livello idrico noto pari a +7.2 m slm, +8.4 m slm, +9.3 m slm, +10.3 m slm, per $Tr = 200, 500, 1000, 2000$ anni, rispettivamente. Gli ultimi due valori (per $Tr = 1000, 2000$ anni) sono ricavati per interpolazione dei valori noti per gli altri tempi ritorno ($Tr = 50, 200, 500$ anni), adottati nello studio della Regione Liguria.

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
26 di 37

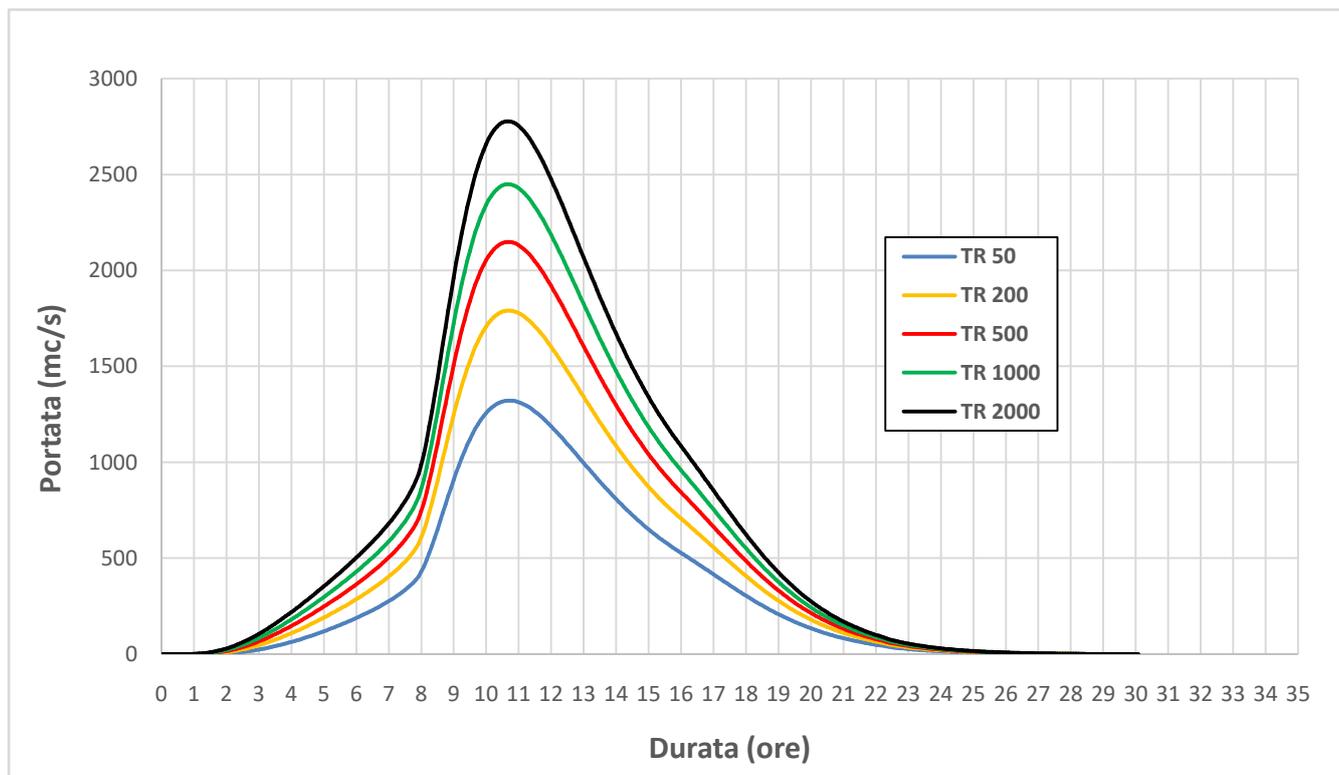


Figura 3.10 –TorrentePolcevera: idrogrammi di piena per differenti periodi di ritorno.

3.2.2.4. Scenari simulati

Come precedentemente introdotto, sono stati simulati differenti scenari di rischio riferiti ai tempi di ritorno scelti, con riferimento alle seguenti configurazioni geometriche:

- *ante operam*: si intende la geometria ottenuta dal modello del terreno nello stato di fatto;
- *post operam*: si intende la geometria ottenuta dall'inserimento delle opere in progetto che possono modificare l'attuale espansione delle piene, nonché di interventi di risoluzione di eventuali criticità di natura idraulica.

3.2.2.5. Risultati delle simulazioni numeriche 2D

Viste le caratteristiche dell'opera in progetto, non si riscontrano differenze, in termini di livelli idrici e valori di velocità, tra le due configurazioni ante e post operam. Di seguito, per semplicità si riportano le aree potenzialmente inondabili, per i differenti tempi di ritorno considerati, nella situazione post operam. Per maggiori dettagli, si rimanda agli elaborati grafici annessi al presente studio.

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
27 di 37

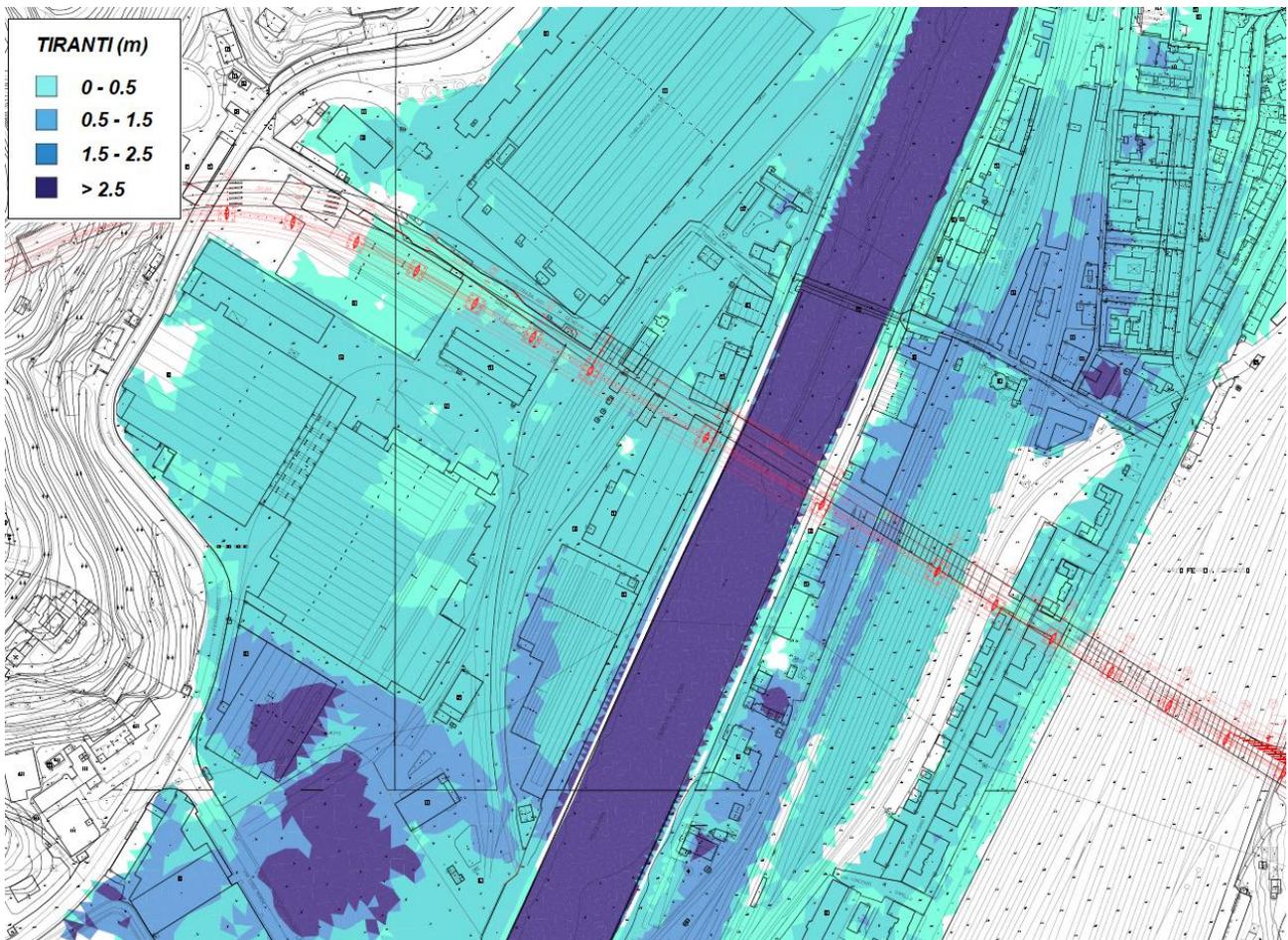


Figura 3.11 –TorrentePolcevera: aree potenzialmente inondabili, Tr 200 anni.

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
28 di 37

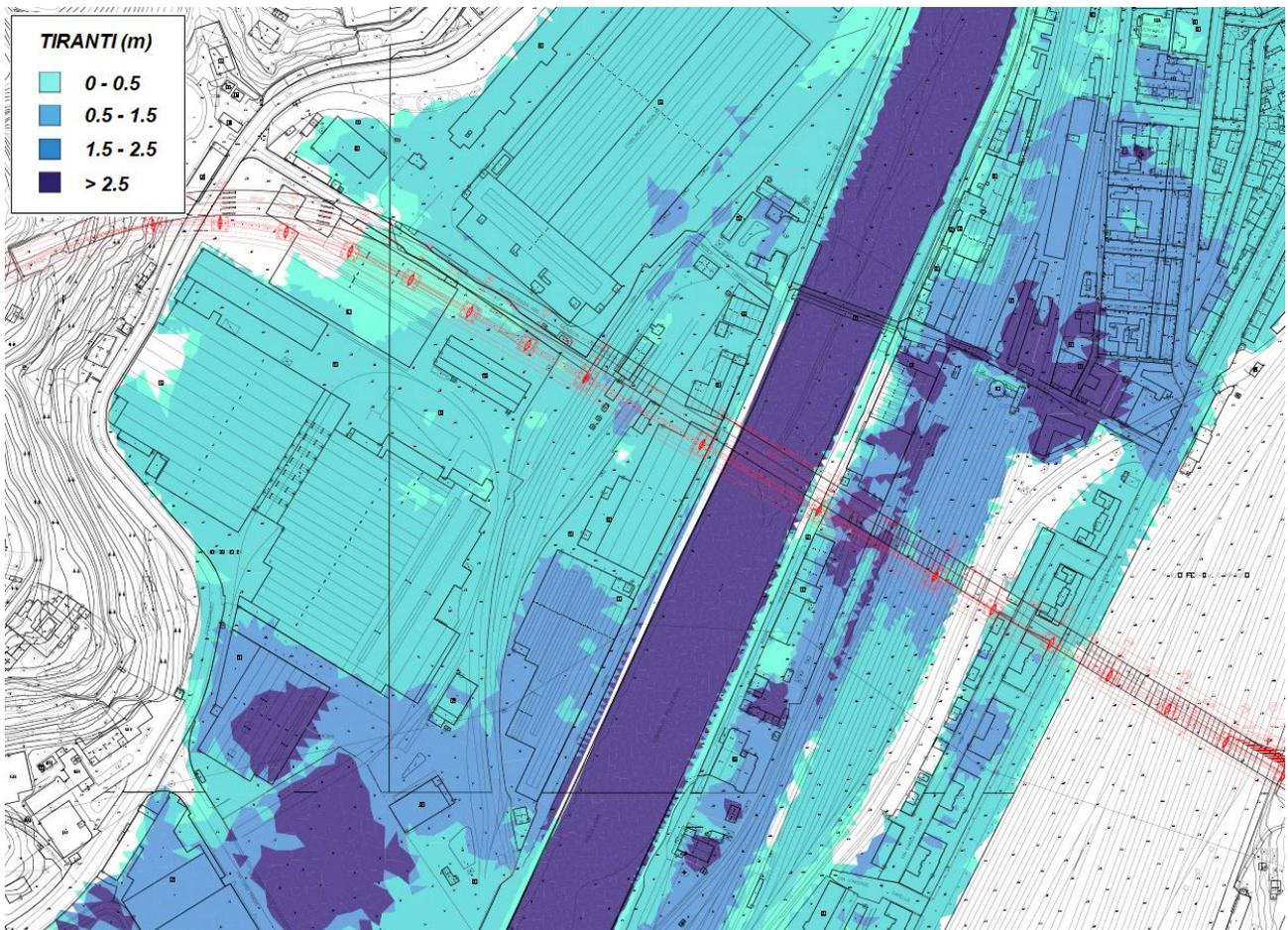


Figura 3.12 –TorrentePolcevera: aree potenzialmente inondabili, Tr 500 anni.

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
29 di 37

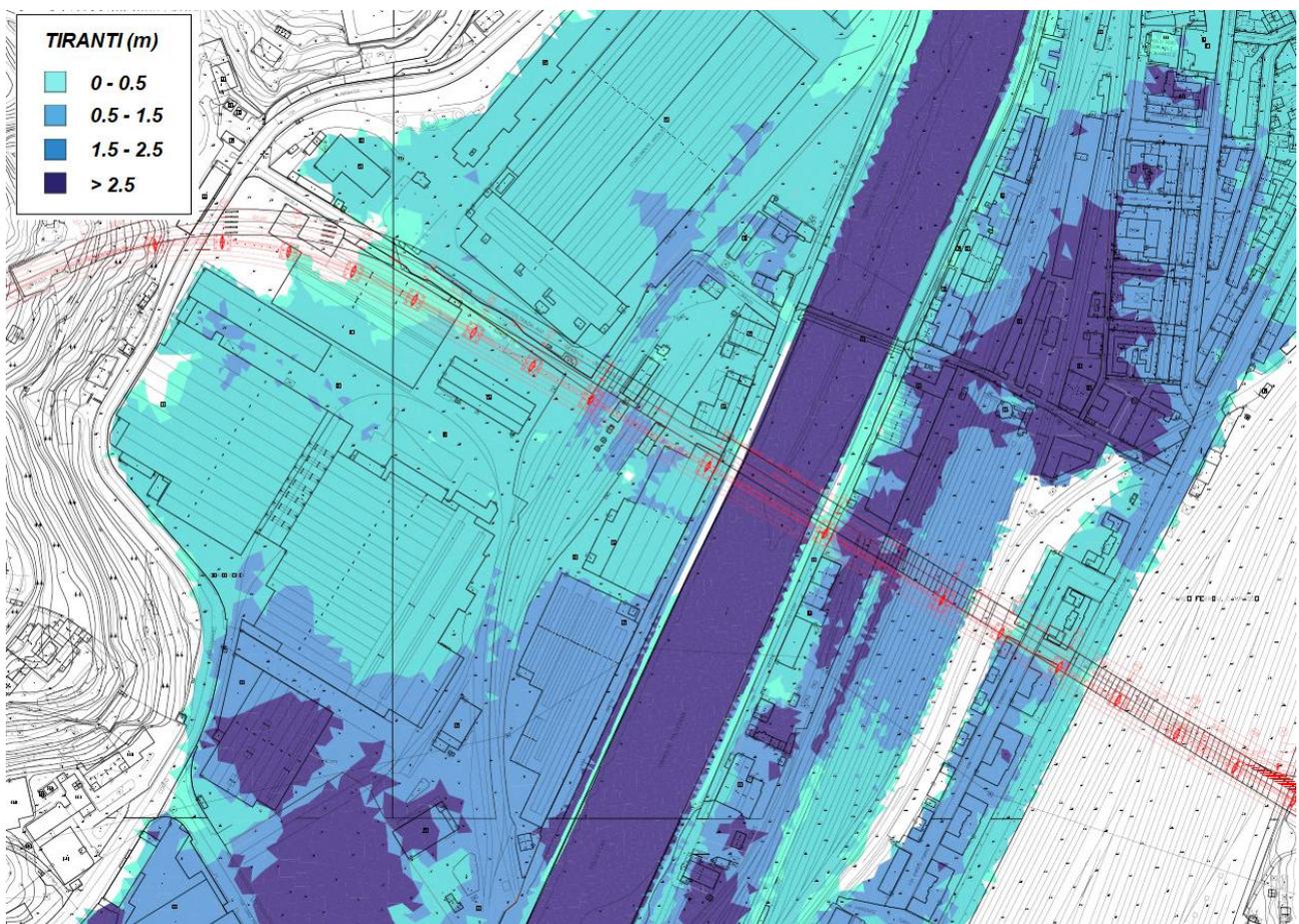


Figura 3.13 – Torrente Polcevera: aree potenzialmente inondabili, Tr 1000 anni.

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
30 di 37

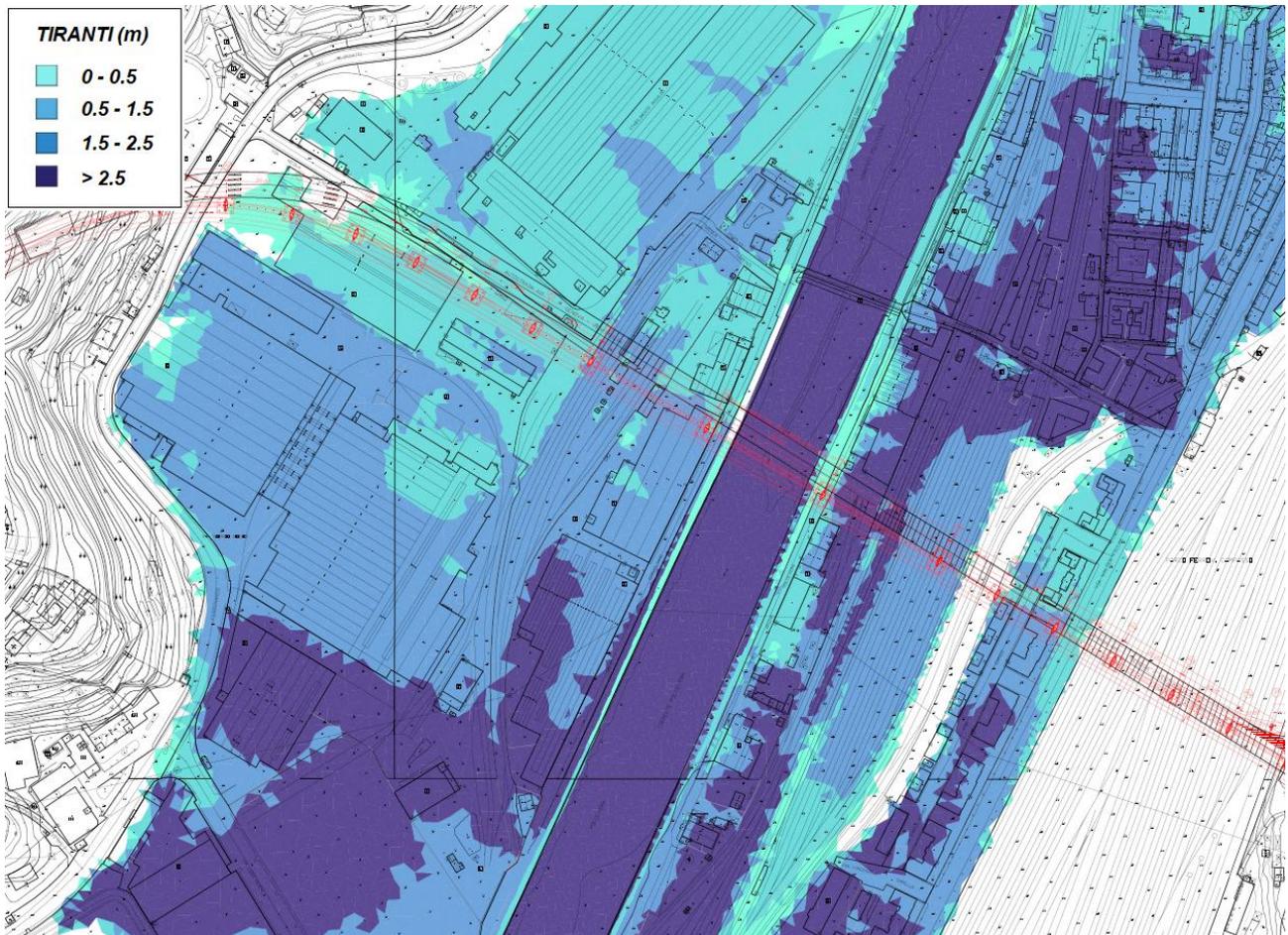


Figura 3.14 –TorrentePolcevera: aree potenzialmente inondabili, Tr 2000 anni.

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
31 di 37

La modellazione bidimensionale ha evidenziato che le pile del nuovo viadotto in progetto potrebbero essere interessate dal deflusso delle acque esondate anche già in occasione della piena con tempo di ritorno di 200 anni. Come riscontrato già nella modellazione monodimensionale, allo stato attuale le esondazioni delle piene del T. Polcevera sono causate da fenomeni di rigurgito in corrispondenza dei due ponti (pedonale e stradale) di Via Campi e Via W. Fillak. Di seguito, una sequenza di immagini, relative a diversi istanti della simulazione della portata Tr 200 del T. Polcevera, in corrispondenza del colmo di piena.

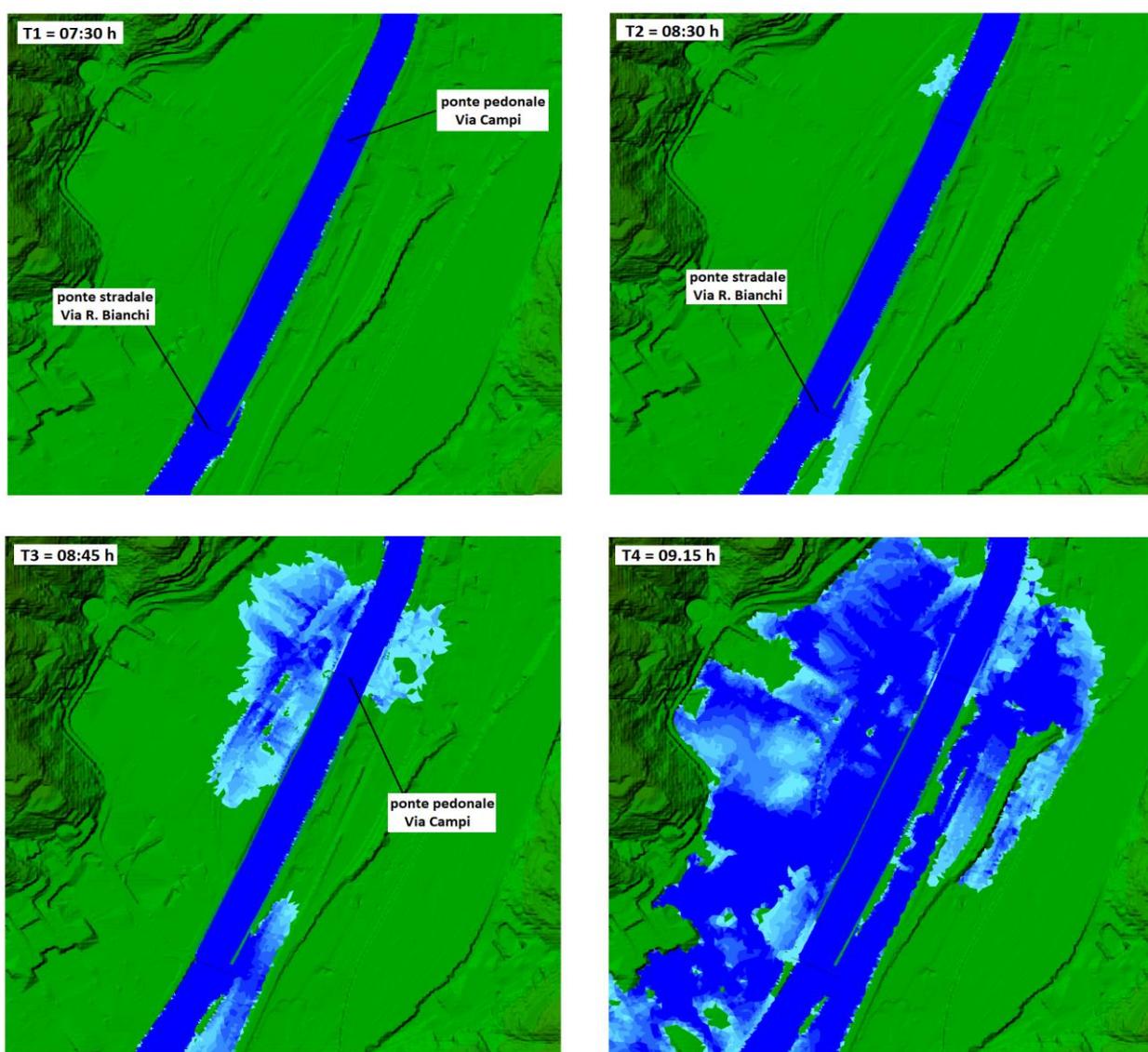


Figura 3.15 –TorrentePolcevera: sequenza di immagini relative a differenti istanti della simulazione Tr 200 anni.

Per completezza si riportano anche le quote di intradosso (q_v) del nuovo viadotto e del livello idrico atteso corrispondente alla piena Tr 200 ($q_{l,200}$); in particolare, $q_v = +50.80$ m slm; $q_{l,200} = +12.07$ m slm.

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
32 di 37

4. VERIFICA DELLA FASE DI CANTIERE

Per la realizzazione del nuovo viadotto, in particolare delle fondazioni delle pile, si prevede la realizzazione di opere provvisoriale, il cui dimensionamento necessita della determinazione del livello idrico corrispondente alla cosiddetta 'portata di cantiere', così come calcolata nello studio idrologico annesso, in dipendenza della durata della fase di cantierizzazione e del livello di rischio accettabile durante la fase di costruzione (R) o della probabilità di danneggiamento dell'opera, P_f , a seconda della metodologia adottata (Autorità di bacino del Fiume Po e Consiglio Superiore dei lavori Pubblici).

Le simulazioni idrauliche dei differenti valori di portata, determinati nello studio idrologico, sono state condotte secondo il modello monodimensionale Hec Ras descritto nel capitolo precedente (in regime di moto permanente), imponendo come condizioni al contorno di monte e di valle, la condizione *Critical Depth*. Di seguito, i corrispondenti livelli idrici (**rispetto alla quota media di fondo alveo +7.45 m slm**), alla sezione di intervento, secondo le due metodologie adottate.

Metodologia Autorità di Bacino del Fiume Po

Rischio (%)	63.3		
Durata cantiere (mesi)	3	6	12
Tirante (m)	1.17	1.65	2.01

Rischio (%)	33		
Durata cantiere (mesi)	3	6	12
Tirante (m)	1.65	2.12	2.53

Rischio (%)	18.1		
Durata cantiere (mesi)	3	6	12
Tirante (m)	2.12	2.53	2.94

Rischio (%)	9.5		
Durata cantiere (mesi)	3	6	12
Tirante (m)	2.53	2.94	3.36

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
33 di 37

Metodologia Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici

P_f (prob. danneggiamento)	0.20		
Durata cantiere (mesi)	3	6	12
Tirante (m)	1.47	2.29	2.81

P_f (prob. danneggiamento)	0.15		
Durata cantiere (mesi)	3	6	12
Tirante (m)	1.95	2.53	3.02

P_f (prob. danneggiamento)	0.10		
Durata cantiere (mesi)	3	6	12
Tirante (m)	2.35	2.85	3.3

P_f (prob. danneggiamento)	0.05		
Durata cantiere (mesi)	3	6	12
Tirante (m)	2.87	3.32	3.75

5. VERIFICA ALLO SCALZAMENTO

Per il calcolo dell'erosione localizzata attorno ad una pila sono state utilizzate le formulazioni riportate di seguito.

Formulazione CSU

La profondità di scalzamento attesa può essere stimata mediante la seguente relazione:

$$\frac{Y_s}{Y_1} = 2 \cdot K_1 K_2 K_3 \left(\frac{a}{Y_1} \right)^{0.65} FR^{0.43}$$

in cui

- K_1, K_2, K_3 sono fattori correttivi legati alla forma delle pile, all'angolo di attacco e alle condizioni del fondo alveo (Tabella 5.1);
- Y_s , la profondità di scalzamento;
- Y_1 , l'altezza della corrente;
- a , la larghezza della pila;
- FR , il numero di Froude ($FR = V_0 / (gh_m)^{1/2}$).

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
34 di 37

Correction Factor, K ₁		Correction Factor, K ₂			
Shape of Pier Nose	K ₁	Angle	L/a=4	L/a=8	L/a=12
(a) Square nose	1.1	0	1.0	1.0	1.0
(b) Round nose	1.0	15	1.5	2.0	2.5
(c) Circular cylinder	1.0	30	2.0	2.75	3.5
(d) Group of cylinders	1.0	45	2.3	3.3	4.3
(e) Sharp nose	0.9	90	2.5	3.9	5.0

Angle = skew angle of flow
L = length of pier

Bed Condition	Dune Height ft	K ₃
Clear-Water Scour	N/A	1.1
Plane bed and Antidune flow	N/A	1.1
Small Dunes	10 > H ≥ 2	1.1
Medium Dunes	30 > H ≥ 10	1.2 to 1.1
Large Dunes	H ≥ 30	1.3

Tabella 5.1 - Formulazione CSU: valori dei fattori correttivi K₁, K₂, K₃

Formulazione di Sheppard – Melville

La profondità di scalmamento attesa può essere valutata come:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{y_s}{a^*} = 2.5f_1f_2f_3 \quad \text{for } 0.4 < \frac{V_1}{V_c} < 1.0 \\ \frac{y_s}{a^*} = f_1 \left[2.2 \left(\frac{\frac{V_1}{V_c} - 1}{\frac{V_{1p}}{V_c} - 1} \right) + 2.5f_3 \left(\frac{\frac{V_{1p}}{V_c} - \frac{V_1}{V_c}}{\frac{V_{1p}}{V_c} - 1} \right) \right] \quad \text{for } 1 < \frac{V_1}{V_c} < \frac{V_{1p}}{V_c} \\ \frac{y_s}{a^*} = 2.2f_1 \quad \text{for } \frac{V_1}{V_c} > \frac{V_{1p}}{V_c} \end{array} \right.$$

con

- $V_{1p} = \max(V_{1p1}; V_{1p2})$
- $V_{1p1} = 5V_c; \quad V_{1p2} = 0.6\sqrt{gy_1}$
- $V_c = \begin{cases} 2.5 \cdot u^* \ln \left(\frac{73.5y_1}{d_{50} [Re(2.85 - 0.58 \ln(Re) + 0.002Re) + \frac{111}{Re} - 6]} \right) & \text{for } 5 \leq Re \leq 70 \\ 2.5 \cdot u^* \ln \left(\frac{2.21y_1}{d_{50}} \right) & \text{for } Re > 70 \end{cases}$
- $Re = \frac{u^* d_{50}}{2.32 \cdot 10^{-7}}; \quad u^* = \left[16.2 \cdot d_{50} \left(\frac{9.09 \cdot 10^{-6}}{d_{50}} - d_{50} (38.76 + 9.6 \ln(d_{50})) - 0.005 \right) \right]^{0.5}$
- $y_1 = \text{tirante idrico (m)}$

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
35 di 37

- $f_1 = \tanh \left[\left(\frac{y_1}{a^*} \right)^{0.4} \right]$
 - $f_2 = \left\{ 1 - 1.2 \left[\ln \left(\frac{V_1}{V_c} \right) \right]^2 \right\}$
 - $f_3 = \left[\frac{\left(\frac{a^*}{d_{50}} \right)}{0.4 \left(\frac{a^*}{d_{50}} \right)^{1.2} + 10.6 \left(\frac{a^*}{d_{50}} \right)^{-0.13}} \right]$
 - $a^* = K_s a_p$; $a_p = a \cdot \cos \theta + L \cdot \sin \theta$; $K_s = \begin{cases} 1 & (\text{pilacircolare}) \\ 0.86 + 0.97 \left(\left| \frac{\pi \theta}{180} - \frac{\pi}{4} \right| \right)^4 & (\text{pilarettangolare}) \end{cases}$
- (a = larghezza della pila; L = lunghezza della pila; θ = angolo di attacco [°])

Secondo gli studi condotti da Sheppard et al. (2013), riguardanti il confronto tra i valori di scalzamento osservati in laboratorio e in sito e quelli valutati secondo le più comuni ed utilizzate formule per il calcolo dello scalzamento (tra cui anche quelle di Melville, Froehlich, Breusers e CSU), **la formulazione SM** fornisce valori più attendibili (e prossimi a quelli misurati) rispetto alle altre, per i seguenti campi di valori:

$$\frac{V_1}{V_c} = 0.4 \div 7.6 \quad \frac{y_1}{a} = 0.05 \div 10 \quad \frac{a}{d_{50}} = 3.65 \div 65047 \quad FR = 0.03 \div 1.95$$

In generale, è possibile riscontrare quattro differenti scenari di erosione localizzata:

- CASO I: la fondazione della pila rimane al di sotto della buca erosiva;
- CASO II: la sommità della fondazione è esposta al flusso della corrente all'interno della buca erosiva;
- CASO III: la sommità della fondazione giace al di sopra del fondo alveo;
- CASO IV: la sommità della fondazione si trova al di sotto o in prossimità del pelo libero.

Nel CASO I l'erosione localizzata viene calcolata facendo riferimento alla larghezza della pila b in quanto la presenza della fondazione risulta essere ininfluenza nel processo erosivo.

Nei CASI II e III invece occorre fare riferimento alla procedura di calcolo proposta da Melville e Raudkivi (1996) che utilizza una larghezza della pila equivalente ben definita come:

$$b_e = b \cdot \left(\frac{h_0 + Y}{h_0 + b^*} \right) + b^* \cdot \left(\frac{b^* - Y}{h_0 + b^*} \right)$$

dove h_0 : profondità media della corrente rispetto al fondo alveo; Y : altezza massima della buca erosiva; b^* : larghezza della fondazione.

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
36 di 37

Per quanto riguarda il CASO IV, infine, l'erosione localizzata può venire calcolata utilizzando come larghezza equivalente della pila la larghezza della fondazione b^* dal momento che il fenomeno interessa maggiormente la fondazione stessa.

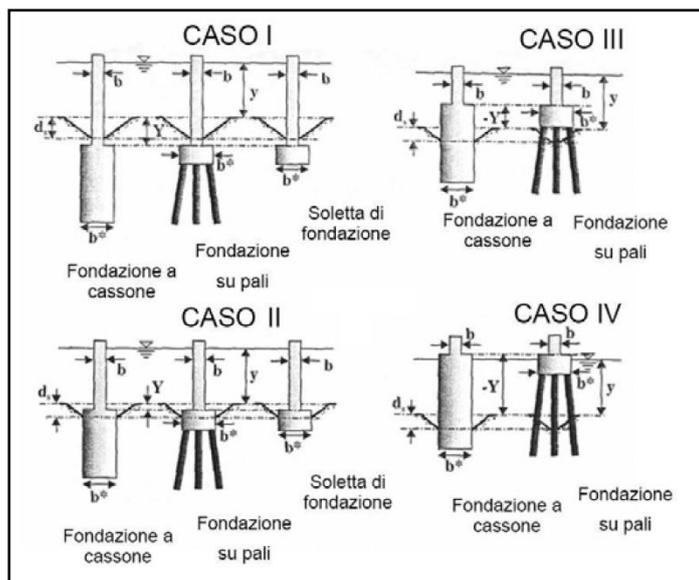


Figura5.2 - Differenti tipologie di pile non uniformi dotate di fondazioni

Contraente



Progettista



Doc. N.

Progetto
NG12

Lotto
00

Codifica Documento
E 11 RI ID0002 C01

Rev.
A

Foglio
37 di 37

6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

AA. VV. Manuale di Ingegneria Civile e Ambientale, Zanichelli ESAC, Bologna, 2003.

Autorità di Bacino della Regione Liguria, PIANO DI BACINO STRALCIO PER LA TUTELA DAL RISCHIO IDROGEOLOGICO (approvato con Delibera del Consiglio Provinciale di Genova n.14 del 02/04/2003 ed entrato in vigore con BURL n. 18 del 03/05/2017 – parte II).

Autorità di Bacino della Regione Liguria, PIANO DI BACINO STRALCIO PER LA TUTELA DAL RISCHIO IDROGEOLOGICO – *Relazione generale Torrente Polcevera* (2017).

Ferro V., La sistemazione dei bacini idrografici, McGraw-Hill, Milano, 2006.

Maione U., Appunti di idrologia 3. Le piene fluviali, La Goliardica Pavese, 1977.

Marani M., Processi e modelli dell'Idrometeorologia, Dispense, 2005.

Nuove Norme Tecniche per le costruzioni 2018, DECRETO 17 gennaio 2018 . Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni», MINISTRO DELLE INFRASTRUTTURE.

Rossi F., Fiorentino M., Versace P., Two component extreme value distribution for Flood Frequency Analysis, Water Resources Research, Vol. 20, N.7, 1984.

Surendra, K. M., Vijay., P. S. Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology. Springer, pp. 84-146, 2003.