

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



U.O. OPERE CIVILI

PROGETTO DEFINITIVO

RADDOPPIO DELLA LINEA GENOVA – VENTIMIGLIA

TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA

IDROLOGIA E IDRAULICA

Torrente Merula - pk 97+000

Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula

SCALA:

-

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

I V 0 I 0 0 D 0 9 R I I D 0 0 0 2 0 0 4 B

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	D. Polverelli	Dic. 2021	C. Cesali	Dic. 2021	G. Fadda	Dic. 2021	ITALFERR S.p.A. U.O. Opere Civili e Gestione delle Caratteristiche Dott. Ing. Roberto Vittozzi Ordine degli Ingegneri della Provincia di Genova N° A20783 A. Vittozzi 10/01/2022
B	Emissione esecutiva	D. Polverelli	Gen. 2022	C. Cesali	Gen. 2022	G. Fadda	Gen.2022	

File: IV0100D09RIID0002004B.doc

n. Elab.:

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B	FOGLIO 2 di 59

INDICE

1	PREMESSA	5
1.1	RIFERIMENTI NORMATIVI.....	6
2	INQUADRAMENTO GENERALE E OBIETTIVI DELLO STUDIO.....	13
2.1	OBIETTIVI DELLO STUDIO.....	14
2.2	ELENCO ELABORATI DI PROGETTO DI RIFERIMENTO.....	14
3	STUDIO IDRAULICO.....	15
3.1	GENERALITÀ.....	15
3.2	DATI DI BASE.....	16
3.2.1	DATI TOPOGRAFICI.....	16
3.2.1	DATI IDROLOGICO-IDRAULICI.....	16
3.3	IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO NUMERICO.....	21
3.3.1	APPROCCIO MATEMATICO (2D).....	21
3.3.2	GENERAZIONE DEL MODELLO DIGITALE DEL TERRENO.....	25
3.3.3	DEFINIZIONE DEL DOMINIO E DELLA GRIGLIA DI CALCOLO.....	27
3.3.4	STRUTTURE IDRAULICHE ALL'INTERNO DEL MODELLO 2D.....	30
3.3.5	CONDIZIONI AL CONTORNO.....	32
3.3.6	CALIBRAZIONE.....	33
3.4	RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE.....	35
3.4.1	SCENARIO "ANTE OPERAM".....	36
3.4.2	SCENARIO "POST OPERAM".....	37
4	VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO DI PROGETTO.....	40
5	VERIFICA ALLO SCALZAMENTO.....	41
6	OPERE DI SISTEMAZIONE/PROTEZIONE IDRAULICA.....	47
7	VERIFICA DELLE FASI DI REALIZZAZIONE DI OPERE IN ALVEO.....	49
8	EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SULLE OPERE IN PROGETTO.....	57
9	COMPATIBILITÀ IDRAULICA DELLE OPERE IN PROGETTO.....	58

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1 – INQUADRAMENTO GENERALE DELL’AREA DI STUDIO.....	13
FIGURA 2: INFORMAZIONI TOPOGRAFICHE A DISPOSIZIONE.....	17
FIGURA 3: IDROGRAMMA DI PIENA DEL TORRENTE MERULA ALL’INTERSEZIONE CON LA FERROVIA PER TR 50,200 E 500 ANNI	18
FIGURA 4: ESTRATTO DELLE MAPPE DELLE AREE DI PERICOLOSITÀ IDRAULICA DEL TORRENTE MERULA IN QUEL DI ANDORA (FONTE: PIANO DI GESTIONE DEL RISCHIO ALLUVIONI, AUTORITÀ DI BACINO DISTRETTUALE DELL’APPENNINO SETTENTRIONALE).	20
FIGURA 5 – SOFTWARE HEC RAS 6.0: SISTEMA DI RIFERIMENTO.	23
FIGURA 6 – SOFTWARE HEC RAS: IN GRIGIO IL DATO DELLA GRIGLIA DTM, IN ROSSO LA CELLA DI CALCOLO DEL MODELLO IDRAULICO. A DESTRA LA SCHEMATIZZAZIONE EFFETTUATA DA HEC RAS SULLE FACCE DEL BORDO DELLA CELLA.	25
FIGURA 7: ESTRATTO DEL DTM OTTENUTO INTEGRANDO IL DTM ORIGINARIO CON LE SEZIONI TRASVERSALI; IL RIQUADRO DI DETTAGLIO MOSTRA IL PASSAGGIO AL TRATTO INTERPOLATO	27
FIGURA 8: ESTENSIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO.....	28
FIGURA 9: DETTAGLIO DELLA MESHIN PROSSIMITÀ DELL’ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO ESISTENTE	29
FIGURA 10: ESEMPIO DI DEM A SINISTRA ESTRAZIONE DEI PROFILI LUNGO I CONFINI DELLE CELLE, A DESTRA CURVA LIVELLO-VOLUME INVASATO	30
FIGURA 11: STRUTTURE IDRAULICHE INSERITE ALL’INTERNO DEL MODELLO.....	31
FIGURA 12: SCHEMATIZZAZIONE DELL’ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO ESISTENTE ALL’INTERNO DEL MODELLO.....	32
FIGURA 13: CONDIZIONI AL CONTOURNO IMPOSTE AL MODELLO.....	33
FIGURA 14: CONFRONTO TRA GLI ALLAGAMENTI OTTENUTI CON IL MODELLO E QUELLI DEFINITI DAL PAI.....	34
FIGURA 15: MODELLO NUMERICO 2D, T. MERULA: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, ANTE OPERAM, TR = 200 ANNI.	36
FIGURA 16: STRALCIO DELLA PLANIMETRIA DI PROGETTO IN QUEL DI ANDORA.	38
FIGURA 17: STRALCIO DEL PROFILO DI PROGETTO, NUOVO VIADOTTO VI08.	38
FIGURA 18: MODELLO NUMERICO 2D, T. MERULA: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, POST OPERAM, TR = 200 ANNI.....	39
FIGURA 19 - DIFFERENTI TIPOLOGIE DI PILE NON UNIFORMI DOTATE DI FONDAZIONI.....	44
FIGURA 20 – PARTICOLARE/DETTAGLIO DELLA MODALITÀ DI LEGATURA DEI MASSI.....	48
FIGURA 21: CORRELAZIONE TRA TEMPO DI RITORNO DI VERIFICA DELLE OPERE PROVVISORIALI E VITA NOMINALE DELL’OPERA IN FUNZIONE DELLA DURATA DEL CANTIERE, FISSATO UN TEMPO DI RITORNO DI RIFERIMENTO PARI A 200 ANNI.....	51
FIGURA 22: TORRENTE MERULA, REALIZZAZIONE DI PILA E SPALLE DEL VI08: FASE 1	53
FIGURA 23: VI08, LIVELLI IDRICI FASE 1.....	54
FIGURA 24: TORRENTE MERULA, REALIZZAZIONE DI PILA E SPALLE DEL VI08: FASE 2	55
FIGURA 25: VI08, LIVELLI IDRICI FASE 2.....	56

	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B	FOGLIO 4 di 59

INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 1 – ELENCO ELABORATI ANNESSI.....	15
TABELLA 2 – VALORI DI PICCO DEGLI EVENTI ESTREMI CONSIDERATI	18
TABELLA 3: SCABREZZE ADOTTATE NEL MODELLO	35
TABELLA 4: LIVELLI MASSIMI A MONTE DELL'ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO PER VARI TEMPI DI RITORNO (ANTE OPERAM).....	37
TABELLA 5 – VIADOTTO VI08 (TORRENTE MERULA): VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO DI PROGETTO.	40
TABELLA 6- FORMULAZIONE CSU: VALORI DEI FATTORI CORRETTIVI K1, K2, K3.....	42
TABELLA 7- VIADOTTO VI08 (TORRENTE MERULA): VALORI DI SCALZAMENTO ATTESI ATTORNO ALLE PILE, PER Tr200.....	45
TABELLA 8- VIADOTTO VI08 (TORRENTE MERULA): VALORI DI SCALZAMENTO ATTESI ATTORNO ALLE PILE, PER Tr 1,001.....	45
TABELLA 9- VIADOTTO VI08 (TORRENTE MEURLA): VALORI DI SCALZAMENTO ATTESI ATTORNO AL SISTEMA “PILA-FONDAZIONE” (PILA P1), PER Tr200.	46
TABELLA 10- VIADOTTO VI08 (TORRENTE MEURLA): VALORI DI SCALZAMENTO ATTESI ATTORNO AL SISTEMA “PILA-FONDAZIONE” (PILA P1), PER Tr 1,001.	46

	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B	FOGLIO 5 di 59

1 PREMESSA

Il presente studio idraulico è stato redatto nell'ambito del progetto definitivo degli interventi di raddoppio della linea Genova-Ventimiglia, nella tratta *Finale Ligure - Andora*.

Nello specifico, in quel di Andora, la nuova linea ferroviaria attraversa il Torrente Merula. Inoltre, in tale area è prevista la realizzazione della nuova stazione di Andora, in destra idraulica al Torrente Merula.

Lo studio idraulico in oggetto ha lo scopo quindi di definire l'idrodinamica del tratto investigato per i più rilevanti tempi di ritorno di interesse tecnico (50, 200 e 500 anni), ponendo particolare attenzione all'interferenza tra il Torrente Merula e la linea ferroviaria in progetto nel suo complesso.

	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IVOI	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B	FOGLIO 6 di 59

1.1 RIFERIMENTI NORMATIVI

Per quanto riguarda la normativa relativa alla definizione del rischio allagamenti, il riferimento normativo principale è costituito dal Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA), introdotto dalla Direttiva europea 2007/60/CE (recepita nel diritto italiano con D.Lgs. 49/2010 per ogni distretto idrografico). Lo scopo del PGRA è quello di orientare, nel modo più efficace, l'azione sulle aree a rischio significativo organizzate e gerarchizzate rispetto all'insieme di tutte le aree a rischio, definire gli obiettivi di sicurezza e le priorità di intervento a scala distrettuale, in modo concertato fra tutte le amministrazioni e gli enti gestori, con la partecipazione dei portatori di interesse e il coinvolgimento del pubblico in generale. Allo stato attuale, sia a livello nazionale che all'interno del distretto dell'Appennino Settentrionale, non sussiste completa uniformità relativamente alla valenza dei PGRA quali strumenti tecnico-normativi di riferimento per l'indirizzo e la regolazione delle trasformazioni del territorio e la gestione del rischio idraulico nei confronti dell'attività edilizia e dell'urbanistica. In particolare vario è il rapporto tra PGRA e Piani per l'Assetto Idrogeologico (PAI) a suo tempo approvati – e in parte ancora vigenti – alla scala dei bacini idrografici della legge 183/1989, oggi abrogata. Con riferimento a questo importante aspetto, per il territorio del distretto idrografico Appennino Settentrionale, negli ex bacini regionali liguri il PAI si applica sia per la parte relativa alla pericolosità da frana e da dissesti di natura geomorfologica che per la parte di pericolosità idraulica, sia come norme che come perimetrazioni.

Per quanto riguarda il torrente Merula, il Piano di bacino stralcio per l'assetto idrogeologico è stato approvato con Delibera del Consiglio Provinciale di Savona n. 47 del 25/11/2003; l'ultima modifica del piano è relativa al Decreto digitale del Direttore Generale n. 436 del 28/01/2021.

Altri riferimenti normativi includono:

- Direttiva Quadro Acque 2000/60/CE;
- Direttiva Alluvioni 2007/60/CE;
- D.Lgs. n. 152/2006 - T.U. Ambiente;
- R.D. 25/07/1904, N. 523 "Testo unico delle disposizioni di legge intorno alle opere idrauliche delle diverse categorie";
- Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 17 gennaio 2018);
- "*Manuale di Progettazione delle Opere Civili*" della Rete Ferroviaria Italiana (RFI);

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IVOI	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B	FOGLIO 7 di 59

- Piani stralcio di assetto idrogeologico, Regione Liguria e relative Norme Tecniche di Attuazione;
- Piano di Gestione del Rischio Alluvioni 2015-2021, Autorità di bacino distrettuale dell'Appennino Settentrionale.

Nello specifico, in materia di compatibilità idraulica degli attraversamenti fluviali, e in generale di una nuova infrastruttura lineare, al Cap. 5 delle NTC 2018 si asserisce:

“.....Deve in ogni caso essere definita una piena di progetto caratterizzata da un tempo di ritorno Tr pari a 200 anni ($Tr=200$)..... Il manufatto non dovrà interessare con spalle, pile e rilevati la sezione del corso d'acqua interessata dalla piena di progetto e, se arginata, i corpi arginali. Qualora fosse necessario realizzare pile in alveo, la luce netta minima tra pile contigue, o fra pila e spalla del ponte, non deve essere inferiore a 40 m misurati ortogonalmente al filone principale della corrente..... Nel caso di pile e/o spalle in alveo, cura particolare è da dedicare al problema delle escavazioni in corrispondenza delle fondazioni e alla protezione delle fondazioni delle pile e delle spalle tenuto anche conto del materiale galleggiante che il corso d'acqua può trasportare. In tali situazioni, una stima anche speditiva dello scalzamento è da sviluppare fin dai primi livelli di progettazione. Il franco idraulico, definito come la distanza fra la quota liquida di progetto immediatamente a monte del ponte e l'intradosso delle strutture, è da assumersi non inferiore a 1.50 m, e comunque dovrà essere scelto tenendo conto di considerazioni e previsioni sul trasporto solido di fondo e sul trasporto di materiale galleggiante, garantendo una adeguata distanza fra l'intradosso delle strutture e il fondo alveo. Quando l'intradosso delle strutture non sia costituito da un'unica linea orizzontale tra gli appoggi, il franco idraulico deve essere assicurato per una ampiezza centrale.”

Nella relativa circolare applicativa n.7 del 21 gennaio 2019, si asserisce inoltre:

“Ai fini dell'applicazione del punto 5.1.2.3 della Norma, s'intende per alveo la sezione occupata dal deflusso della portata di piena di progetto. Quest'ultima e a sua volta caratterizzata da un tempo di ritorno pari a $Tr = 200$ anni, dovendosi intendere tale valore quale il più appropriato da scegliere, non escludendo tuttavia valori anche maggiori che devono però essere adeguatamente motivati e giustificati. Quando, per caratteristiche del territorio e del corso d'acqua, si possa verificare nella sezione oggetto dell'attraversamento il transito di tronchi di rilevanti dimensioni, in aggiunta alla prescrizione di un franco normale minimo di 1,50 m, e da raccomandare che il dislivello tra fondo e sottotrave sia indicativamente non inferiore a 6÷7 m. Nel caso di corsi di acqua arginati, la quota di sottotrave sarà comunque non inferiore alla quota della sommità arginale per l'intera luce. Per tutti gli attraversamenti è opportuno che sia garantito il transito dei mezzi di manutenzione delle sponde e/o delle arginature.”

Relativamente al Manuale di progettazione ferroviaria (RFI),

Per gli attraversamenti principali (ponti e viadotti), relativamente ai requisiti idraulici nei confronti dei livelli di massima piena, si specifica quanto segue:

	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IVOI	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

- *il franco idraulico tra la quota di intradosso del manufatto ed il livello idrico corrispondente alla piena di progetto ($Tr = 200$ anni) non deve essere inferiore a 1,5 m nella sezione immediatamente a monte dell'attraversamento;*
- *il franco minimo tra la quota di intradosso del manufatto e la quota di carico idraulico totale deve essere almeno pari a 50 cm.*

Inoltre, nel caso di rilevati vulnerabili per esondazione di corsi d'acqua, "dovrà essere garantito un franco non inferiore a 1 m tra la quota della piattaforma ferroviaria (piano di regolamento) e la massima altezza raggiungibile dalla quota di massima piena di progetto; le scarpate dovranno essere protette da apposite opere di difesa progettate sulla base dei parametri indicati nei piani di bacino o negli studi idraulici di progetto."

Con riferimento alle Norme Tecniche di Attuazione (NTA) del Piano stralcio di assetto idrogeologico per gli ambiti regionali di bacino di interesse (Provincia di Savona),

Art. 15 – Fasce di inondabilità

1. *Nelle fasce di inondabilità di cui alla lett. a), comma 2, dell'art. 12, vigono le seguenti norme. Resta fermo che qualsiasi intervento realizzato nelle aree inondabili non deve pregiudicare la sistemazione idraulica definitiva del corso d'acqua, aumentare la pericolosità di inondazione ed il rischio connesso, sia localmente, sia a monte e a valle, costituire significativo ostacolo al deflusso delle acque di piena, ridurre significativamente la capacità di invaso delle aree stesse.*
2. *Nella fascia A ($Tr < 50$ anni), fermo restando che gli interventi ammessi sul patrimonio edilizio esistente non devono comunque aumentarne la vulnerabilità rispetto ad eventi alluvionali, anche attraverso l'assunzione di misure e accorgimenti tecnico-costruttivi di cui all'allegato 5, e non devono comportare cambi di destinazione d'uso, che aumentino il carico insediativo anche temporaneo, non sono consentiti:*

.....

- c) *la realizzazione di nuove infrastrutture non inquadrabili tra le opere di attraversamento, fatti salvi gli interventi necessari ai fini della tutela della pubblica incolumità e quelli relativi a nuove infrastrutture pubbliche connesse alla mobilità, previo parere favorevole della Provincia, purché progettate sulla base di uno specifico studio di compatibilità idraulica, non aumentino le condizioni di rischio, e risultino assunte le azioni e le misure di protezione civile di cui al presente Piano e ai piani comunali di protezione civile. Tale studio di compatibilità idraulica è finalizzato a valutare se l'intervento è compatibile con le condizioni dell'area, in termini di pericolosità e di rischio.....*
- d) *interventi di manutenzione, ampliamento o ristrutturazione di infrastrutture pubbliche connesse alla mobilità esistenti, fatti salvi quelli che non aumentano le condizioni di rischio, ed in relazione ai quali*

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

risultano assunte le azioni e misure di protezione civile di cui al presente Piano e ai piani comunali di protezione civile.

3. *Nella fascia B ($50 < Tr < 200$ anni) non sono consentiti:*

.....

c) gli interventi di realizzazione di nuove infrastrutture connesse alla mobilità non inquadrabili tra le opere di attraversamento, salvi quelli progettati sulla base di uno specifico studio di compatibilità idraulica (i cui contenuti corrispondano a quanto previsto al precedente punto 2, lett. c), che non aumentino le condizioni di rischio ed in relazione ai quali risultino assunte le azioni e le misure di protezione civile di cui al presente Piano e ai piani comunali di protezione civile.

.....

4. *Nella fascia C ($200 < Tr < 500$ anni) è consentito ogni tipo di intervento purché realizzato con tipologie costruttive finalizzate alla riduzione della vulnerabilità delle opere e, quindi, del rischio per la pubblica incolumità, e coerenti con le azioni e misure di protezione civile previste dal presente Piano e dai piani di protezione civile comunali.*

Art. 15bis - Derogabilità alla disciplina delle fasce di inondabilità per opere pubbliche

1. *In deroga alla disciplina relativa alle fasce A e B, ivi inclusi gli eventuali ambiti normativi, di cui ai commi 2, 3 e 3bis dell'art.15, possono essere assentite opere pubbliche strategiche indifferibili ed urgenti, riferite a servizi essenziali e non diversamente localizzabili, previa acquisizione di parere obbligatorio e vincolante della Provincia, a condizione che:*

- a) non pregiudichino la possibilità di sistemazione idraulica definitiva;*
- b) non si producano effetti negativi nei sistemi geologico ed idrogeologico;*
- c) non costituiscano significativo ostacolo al deflusso, non riducano in modo significativo la capacità di invaso, e non concorrano ad incrementare le condizioni di rischio, né in loco né in aree limitrofe;*
- d) siano realizzate con tipologie progettuali e costruttive compatibili con la loro collocazione, prevedendo in particolare accorgimenti tecnico-costruttivi o altre misure, anche con riferimento all'allegato 5 al presente piano, che consentano l'adeguata protezione dell'opera dagli allagamenti rispetto alla portata duecentennale senza aggravio di condizioni di pericolosità e rischio in altre aree. In particolare:*
 - la quota del piano di calpestio e tutte le aperture, soglie di accesso e prese d'aria delle edificazioni devono essere poste ad un livello adeguatamente superiore a quello del tirante idrico associato alla portata duecentennale;*

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IVOI	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B	FOGLIO 10 di 59

- non sono ammesse in ogni caso strutture interrato, a meno di locali tecnici di servizio adeguatamente protetti;

- e) sia garantito il mantenimento della funzionalità ed operatività proprie della struttura in casi di evento alluvionale;
- f) sia prevista nel progetto la messa in opera di tutte le adeguate misure ed azioni di protezione civile, comprese quelle di autoprotezione locale.

.....

2. Ai fini della dichiarazione di indifferibilità ed urgenza di cui al comma 1, deve essere motivato il carattere di impellenza, improrogabilità e non diversa ubicabilità delle opere e deve essere accertata la copertura finanziaria dell'intera opera.
3. La verifica della sussistenza dei presupposti di applicabilità della deroga di cui al comma 1 viene effettuata in sede di Comitato Tecnico di Bacino, su istanza della Provincia.
4. La Provincia esprime il parere previsto sulla base di adeguata documentazione tecnica a corredo della progettazione delle opere in questione e valuta, in particolare, caso per caso, l'effettiva possibilità di messa in opera di misure ed accorgimenti tali da proteggere adeguatamente l'elemento dalle inondazioni e dai connessi possibili danni, nonché l'efficacia e l'affidabilità delle misure di protezione progettate in funzione delle grandezze idrauliche di riferimento. Valuta, inoltre, la possibile influenza sulla dinamica dell'inondazione sia dell'intervento edilizio richiesto sia degli accorgimenti costruttivi proposti, garantendo che non vengano aumentate le condizioni di pericolosità e di rischio nelle aree limitrofe.
5. Il suddetto parere, che ha efficacia per un periodo massimo di 3 anni, viene espresso sulla base del quadro conoscitivo del piano nonché, laddove necessario, di un adeguato studio di compatibilità idraulica che consenta di valutare il rispetto delle condizioni di cui sopra, con particolare riferimento alla compatibilità dell'intervento con le condizioni di inondabilità dell'area, in termini di pericolosità e di rischio, e all'assenza di effetti di incremento dell'esposizione al rischio della popolazione.

Inoltre, all'Allegato 3 delle NTA (*Indirizzi tecnici per la redazione di studi idraulici*), si asserisce:

4) Parametri di scabrezza. Nella modellazione di moto permanente monodimensionale il parametro di scabrezza rappresenta, per il tronco fluviale compreso fra due sezioni di calcolo, oltre alla natura e alle condizioni dell'alveo e delle sponde, macroresistenze dovute alla variabilità longitudinale della geometria o a possibili variazioni brusche del perimetro bagnato al crescere della portata; ciò assume particolare rilevanza nei casi in cui il rilievo delle sezioni disponibile non sia fitto lungo il corso d'acqua. In questi casi, il parametro di scabrezza deve tener conto di molteplici processi di resistenza e dovrebbe essere assunto superiore (inferiore in termini di Gauckler-Strickler) a quanto

	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

detterebbero condizioni solo locali dell'alveo. I parametri di scabrezza da utilizzare nel calcolo idraulico devono tenere conto delle reali e documentabili condizioni di manutenzione del corso d'acqua, anche prevedibili per le condizioni di futuro esercizio. I valori di parametro di scabrezza individuati dalla tabella seguente (per semplicità riportati solo in termini di scabrezza di Gauckler-Strickler), devono essere considerati come valori massimi non superabili. Nel caso dei corsi d'acqua con trasporto solido influenzato da fenomeni franosi, devono essere utilizzati i parametri di scabrezza più cautelativi.

Descrizione corso d'acqua	Coeff. di scabrezza di Gauckler-Strickler K_s ($m^{1/3}s^{-1}$)
Tratti di corsi d'acqua naturali con salti, rocce o vegetazione anche arbustiva-arborea in alveo	25-30
Corsi d'acqua naturali con vegetazione e movimento di materiale sul fondo	30-35
Tratti urbanizzati di corsi d'acqua naturali con argini cementati (e/o platee) in buono stato	35-40
Corsi d'acqua con fondo ed argini totalmente cementati in ottimo stato ed assenza di manufatti (tubi, cavi, ecc.) o discontinuità interferenti con le acque	40-45

La scelta del coefficiente di scabrezza in un alveo naturale deve essere effettuata a seguito di un'accurata ricognizione dei luoghi, considerando le caratteristiche specifiche dei materiali che compongono l'alveo e la copertura vegetale delle sponde e delle aree golenali adiacenti interessate al deflusso.

5) Franchi idraulici. Tutte le opere devono avere franchi adeguati rispetto al livello di piena previsto per la portata duecentennale, portata di riferimento per la progettazione di opere idrauliche od opere interferenti con l'alveo. La previsione di adeguati franchi tra la sommità arginale o l'intradosso delle strutture in progetto ed il previsto livello della piena di riferimento, è necessaria per garantire il corretto funzionamento delle opere in questione ed assicurare il deflusso della portata di progetto con un adeguato coefficiente di sicurezza, tenendo conto di tutte le incertezze legate alla modellazione idrologico idraulica (concettuale, matematica e numerica) e ai vari fenomeni che possono occorrere durante l'evento di piena, dei quali la modellazione non può tenere solitamente conto.

Alla loro valutazione devono concorrere considerazioni sia relative alla tipologia di opera e alla sua rilevanza determinata anche in funzione della vulnerabilità delle zone limitrofe, sia relative alle caratteristiche cinetiche della corrente, con la fondamentale distinzione dei casi di correnti lente e di correnti veloci. I franchi idraulici non devono

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

essere inferiori ai valori indicati nella tabella seguente, assumendo come riferimento il valore maggiore tra quelli contrassegnati con le lettere (a) e con (b).

In particolare, il termine $U^2/2g$ rappresenta il carico cinetico della corrente con U velocità media della corrente (m/s) e g accelerazione di gravità (m/s^2). i due valori estremi per il reticolo principale e secondario corrispondono rispettivamente a bacini poco dissestati con previsione di modesto trasporto solido ed a bacini molto dissestati con previsione di forte trasporto solido in caso di piena, e/o a bacini di maggiore o minore estensione. Per le opere di cui al punto III, nel caso di modesta rilevanza dell'opera stessa e di bacini ben sistemati, il valore minimo del franco come sopra indicato può essere derogato dall'amministrazione competente fino a 100 cm, sulla base di adeguate valutazioni come riportato nel seguito. Per estensione longitudinale si intende l'estensione dell'opera misurata parallelamente alla direzione della corrente. Per opere non ortogonali alla direzione della corrente si valuta come estensione la distanza, sempre misurata in senso parallelo alla corrente, tra il lembo più a monte e quello più a valle dell'opera stessa. Nel caso di ponti ad arco o comunque con intradosso non rettilineo, il valore del franco deve essere assicurato per almeno 2/3 della luce e comunque per almeno 40 m, nel caso di luci superiori a tale valore.

Franco idraulico: valore maggiore tra (a) e (b)			
		Reticolo principale e secondario	Reticolo minore
(a)		$U^2/2g,$	$0,5 U^2/2g,$
(b)	I) argini e difese spondali	cm. 50/100	cm 50
	II) ponti e strutture di attraversamento fino a estensioni longitudinali di m. 12	cm. 100/150	cm 75
	III) coperture o tombinate (ove ammesse), ponti e strutture di attraversamento di estensione oltre m. 12	cm. 150/200	cm 100

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

2 INQUADRAMENTO GENERALE E OBIETTIVI DELLO STUDIO

La zona di studio è ubicata nel comune di Andora (SV) tra la frazione di Pian Grande e lo sbocco a mare del Torrente Merula in corrispondenza dell'abitato di Andora. In questo tratto del corso d'acqua sono presenti diversi attraversamenti sul Torrente Merula; da monte verso valle si susseguono: un ponte romano, il ponte di via Santa Caterina, il viadotto autostradale della A10, l'attuale ponte ferroviario, il ponte di via Europa Unita, ponte Italia, e l'attraversamento della Via Aurelia.



Figura 1 – Inquadramento generale dell'area di studio

NOTA: il sistema di riferimento adottato per le coordinate indicate nelle mappe presentate nel presente rapporto è Gauss Boaga Fuso Ovest.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV0I	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

2.1 OBIETTIVI DELLO STUDIO

L'obiettivo principale dello studio è quello di valutare allo stato attuale i processi idrodinamici che caratterizzano gli eventi estremi relativi al Torrente Merula, in particolare all'intersezione con la linea ferroviaria.

L'obiettivo sopra riportato è stato raggiunto articolando lo studio secondo le seguenti attività principali, descritte nella presente relazione:

- studio delle normative di riferimento;
- reperimento di analisi idrauliche esistenti nell'area di studio;
- analisi dei dati idrologico-idraulici;
- implementazione di un modello numerico bidimensionale per l'analisi dello stato attuale.

2.2 ELENCO ELABORATI DI PROGETTO DI RIFERIMENTO

ELABORATO	SCALA	CODIFICA
Relazione idrologica generale	-	IV0I00D09RIID0001001
Planimetria livelli idrici Torrente Merula - Modello 2D - ante operam - Tr 50 anni	1:1000	IV0I00D09P7ID0002017
Planimetria livelli idrici Torrente Merula - Modello 2D - ante operam - Tr 200 anni	1:1000	IV0I00D09P7ID0002018
Planimetria livelli idrici Torrente Merula - Modello 2D - ante operam - Tr 500 anni	1:1000	IV0I00D09P7ID0002019
Planimetria valori velocità Torrente Merula - Modello 2D - ante operam - Tr 200 anni	1:1000	IV0I00D09P7ID0002023
Sezioni significative con livelli idrici (Modello 2D) - Tr 50, 200, 500 anni - Torrente Merula - ante operam	varie	IV0I00D09WZID0002007
Profili di rigurgito (Modello 2D) - Tr 50, 200, 500 anni - Torrente Merula - ante operam	varie	IV0I00D09FZID0002007
Planimetria livelli idrici Torrente Merula - Modello 2D - post operam - Tr 50 anni	1:1000	IV0I00D09P7ID0002020

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV0I	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

ELABORATO	SCALA	CODIFICA
Planimetria livelli idrici Torrente Merula - Modello 2D - post operam - Tr 200 anni	1:1000	IV0I00D09P7ID0002021
Planimetria livelli idrici Torrente Merula - Modello 2D - post operam - Tr 500 anni	1:1000	IV0I00D09P7ID0002022
Planimetria valori velocità Torrente Merula - Modello 2D - post operam - Tr 200 anni	1:1000	IV0I00D09P7ID0002024
Sezioni significative con livelli idrici (Modello 2D) - Tr 50, 200, 500 anni - Torrente Merula -post operam	varie	IV0I00D09WZID0002008
Profili di rigurgito (Modello 2D) - Tr 50, 200, 500 anni - Torrente Merula - post operam	varie	IV0I00D09FZID0002008
Planimetria sistemazione idraulica Torrente Merula – Pianta e sezioni	varie	IV0I00D09PZID0002004

Tabella 1 – Elenco elaborati annessi.

3 STUDIO IDRAULICO

3.1 GENERALITÀ

Lo studio idraulico è stato basato sull'implementazione di un modello numerico atto a rappresentare le dinamiche idrauliche durante gli eventi di piena del corso d'acqua in fase di studio.

L'approccio metodologico seguito è partito dall'integrazione ed elaborazione di dati di base, fondamentalmente di natura topografica per poter correttamente implementare la geometria del sistema. Una volta elaborata la base topografica è stato possibile sviluppare un modello idraulico con il software HEC-RAS¹(ver. 6.1), con schema puramente bidimensionale.

La taratura dei modelli è stata effettuata in riferimento a quanto riportato nel Piano stralcio di assetto idrogeologico.

¹<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV0I	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B	FOGLIO 16 di 59

3.2 DATI DI BASE

I dati di base utilizzati per lo sviluppo dello studio idraulico includono:

- dati topografici;
- dati idrologico-idraulici.

3.2.1 Dati topografici

I dati topografici utilizzati per la ricostruzione della geometria del sistema comprendono diverse tipologie di informazione, provenienti da fonti differenti:

- Rilievo delle sezioni trasversali del 2010;
- Rilievo delle sezioni trasversali del 2021;
- Modello Digitale del Terreno del Ministero dell’Ambiente con risoluzione a 1 m.

La Figura 2 fornisce la mappa con il dettaglio dell’estensione delle informazioni topografiche a disposizione.

3.2.1 Dati idrologico-idraulici

Le informazioni di base di carattere idrologico-idraulico includono i dati utilizzati per la definizione delle condizioni al contorno dei modelli e per la loro calibrazione.

Per quanto riguarda l’idrologia, si è fatto riferimento all’elaborato IV0I00D09RIID0001001, che ha portato alla definizione degli idrogrammi di piena per assegnato tempo di ritorno immediatamente a monte del tratto di asta analizzato.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

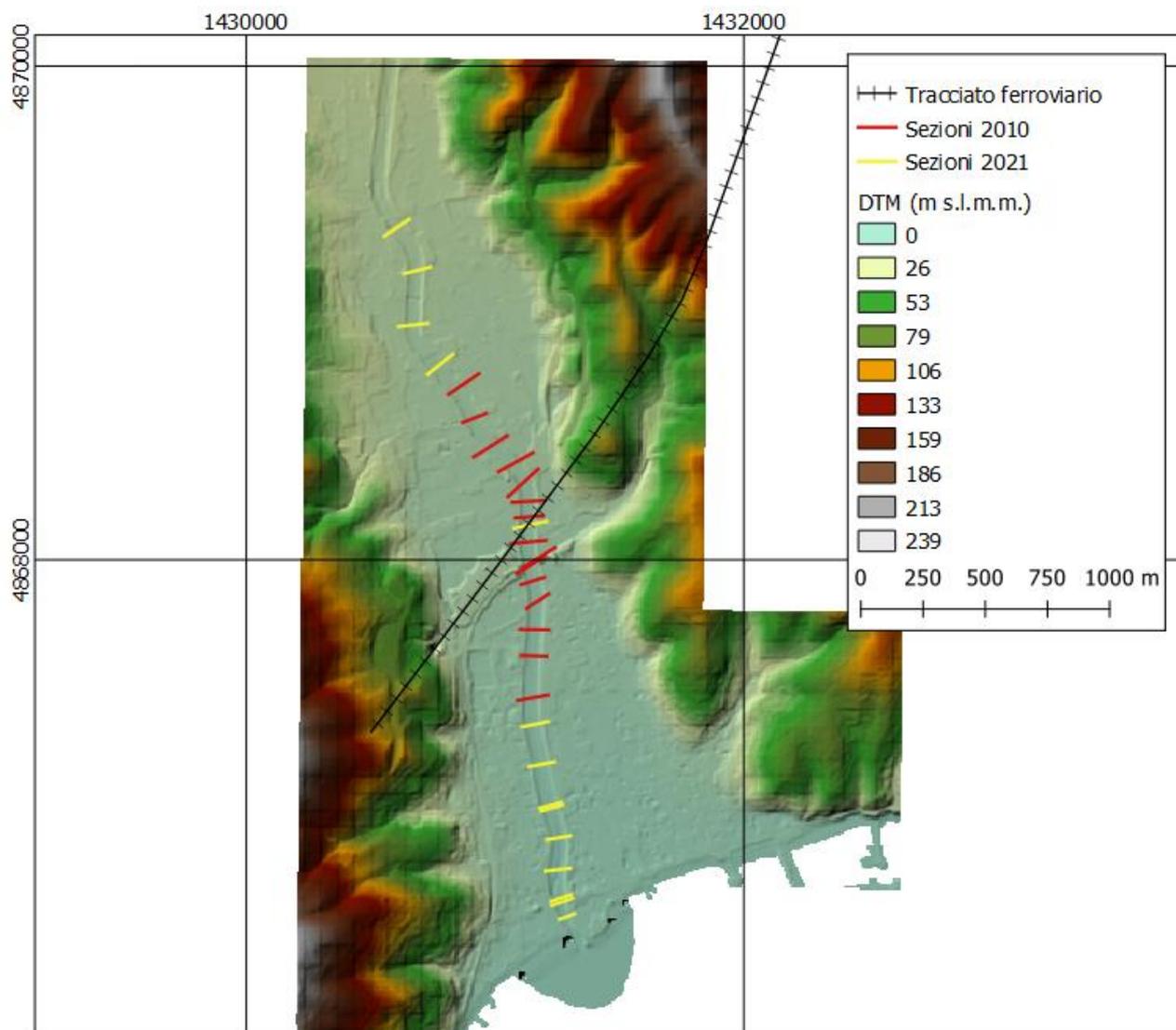


Figura 2: Informazioni topografiche a disposizione

Tali idrogrammi sono stati determinati secondo diversi approcci statistici applicati ai dati di precipitazione, sia secondo Gumbel sia secondo VAPI, comunemente accettati in letteratura nella valutazione degli eventi estremi, implementando su tale base un modello di trasformazione afflussi-deflussi e scegliendo poi i valori più cautelativi per la condizione al contorno del modello idraulico.

 ITALFERR <small>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</small>	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

Gli idrogrammi ottenuti con il metodo VAPI sono risultati più cautelativi, rispetto a quelli ottenuti con il metodo di Gumbel, e sono stati utilizzati per la determinazione delle aree potenzialmente inondabili di riferimento.

TEMPO DI RITORNO	VALORE AL COLMO (m ³ /s)
Tr 50	346
Tr 200	462
Tr 500	547

Tabella 2 – Valori di picco degli eventi estremi considerati

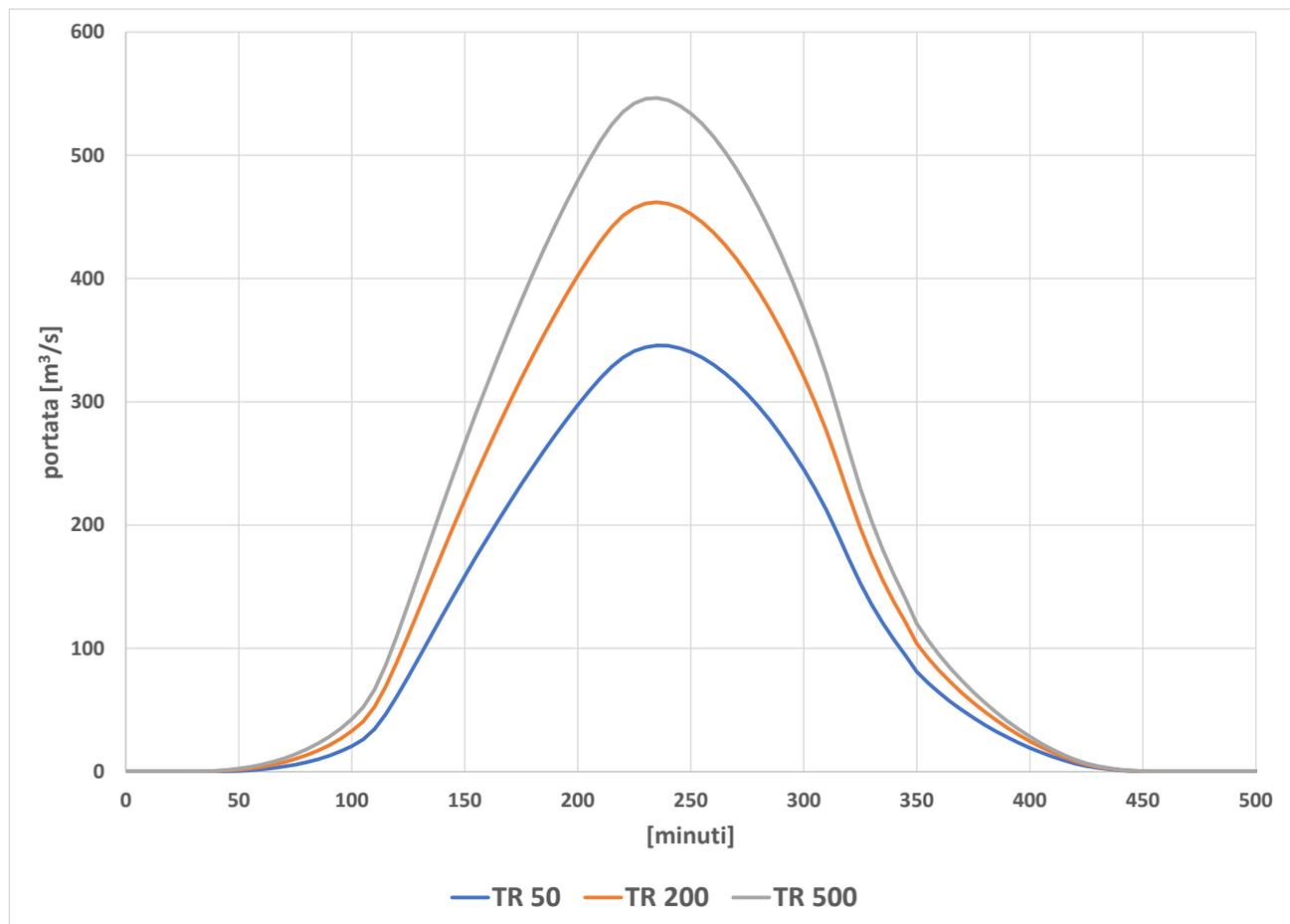


Figura 3: idrogramma di piena del Torrente Merula all'intersezione con la ferrovia per Tr 50,200 e 500 anni

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B	FOGLIO 19 di 59

Altra informazione utilizzata è costituita dalle aree di pericolosità idraulica, in particolare per il tempo di ritorno di progetto (200 anni), definite nell’ambito della pianificazione di bacino vigente (i.e. *Piano di Gestione del Rischio Alluvioni 2015-2021, Autorità di bacino distrettuale dell'Appennino Settentrionale*).

Nello specifico, per la redazione delle mappature di pericolosità da alluvione da corso d’acqua, sono state definite e rappresentate le aree di possibile inondazione per dato tempo di ritorno secondo il seguente schema derivante dall’art. 6 del d.lgs. 49/2010, e in accordo con quanto già effettuato nei piani di bacino regionali vigenti:

- **classe P3 / scenario H**: elevata probabilità di accadimento, *TR= 50 anni*;
- **classe P2 / scenario M**: media probabilità di accadimento, *TR = 200 anni*;
- **classe P1 / scenario L**: bassa probabilità di accadimento; *TR= 500 anni*.

Si evidenzia inoltre che, nelle more di approfondimenti tecnici adeguati, sono state classificate nella classe di pericolosità più elevata *P3* le aree soggette ai più recenti eventi alluvionali, che hanno colpito molto pesantemente il territorio ligure. In particolare, sono state recepite, fin dalla prima mappatura, le perimetrazioni delle aree oggetto di inondazione negli eventi alluvionali del 2010 e 2011, e nella fase di aggiornamento sono state inserite anche le aree inondate negli eventi dell’autunno 2014.

La mappatura delle aree a pericolosità di inondazione da corsi d’acqua è stata recentemente aggiornata al fine di recepire le modifiche ed integrazioni avvenute con gli aggiornamenti ai piani di bacino vigenti, oltre alle aree interessate dagli eventi 2014.

Nella figura seguente, è riportata la sovrapposizione del tracciato di progetto con le aree di pericolosità idraulica riportate nella pianificazione di bacino.

La nuova linea attraversa aree a pericolosità P1, P2, P3, in corrispondenza del nuovo attraversamento sul T. Merula. Le opere “accessorie”, come la nuova stazione di Andora e le relative nuove viabilità di accesso, ricadono parzialmente in area di pericolosità idraulica bassa P1 (*scenario L - Low*).

PROGETTO DEFINITIVO

**Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale del Torrente Merula**

COMMESSA

LOTTO

CODIFICA

DOCUMENTO

REV.

FOGLIO

IV01

00

D 09 RI

ID 0002 004

B

20 di 59

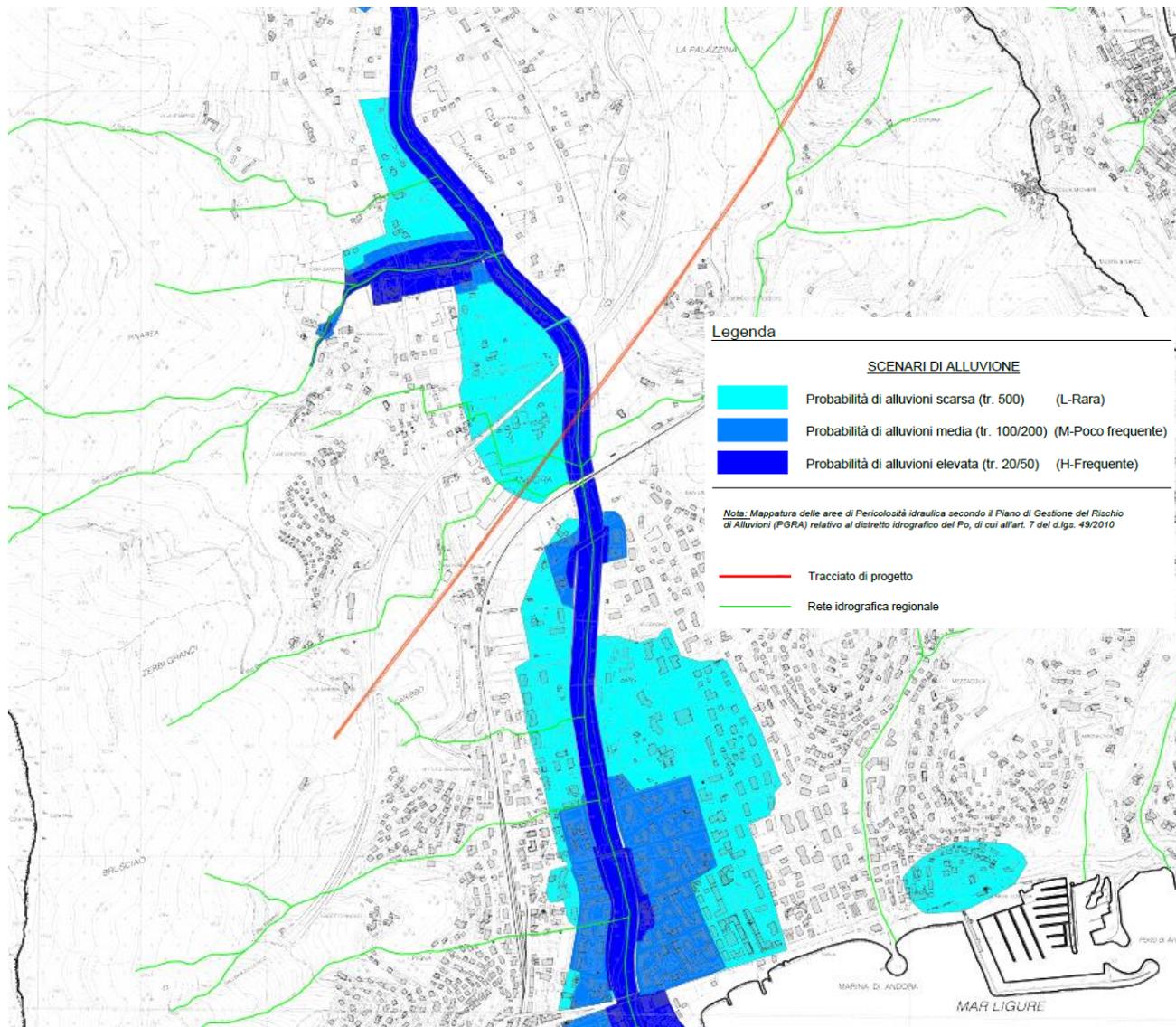


Figura 4: Estratto delle mappe delle aree di pericolosità idraulica del Torrente Merula in quel di Andora (fonte: Piano di Gestione del Rischio Alluvioni, Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale).

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

3.3 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO NUMERICO

3.3.1 Approccio matematico (2D)

Il codice di calcolo utilizzato per l'implementazione del modello bidimensionale del tratto di Torrente Merula in fase di studio è il software HEC-RAS6.1 sviluppato dall'Hydrologic Center del Corpo degli Ingegneri dell'Esercito degli Stati Uniti d'America.

Le caratteristiche principali dell'algoritmo di modellazione del software HEC-RAS sono:

- Modellazione combinata 1D e 2D che prevede la possibilità di eseguire una simulazione combinata 1D e 2D all'interno dello stesso modello in regime di moto vario che permettendo di lavorare su schemi fluviali più complessi, utilizzando come sopra descritto la modellazione 1D per l'alveo, e la modellazione 2D aree inondabili esterne.
- Equazioni complete di Saint Venant o di diffusione dell'onda in 2D: Il programma risolve sia le equazioni 2D di diffusione dell'onda o quelle complete di Saint Venant. Questa opzione è selezionabile dall'utente, offrendo quindi una maggiore flessibilità. In generale, le equazioni di diffusione dell'onda in 2D consentono al software di funzionare più velocemente garantendo inoltre una maggiore stabilità. Le equazioni 2D in forma completa di Saint Venant sono applicabili a una gamma più ampia di problemi, ma la grande maggioranza delle situazioni può essere modellata con sufficiente precisione con le equazioni di diffusione dell'onda.
- Algoritmo di soluzione ai volumi finiti: Il risolutore delle equazioni di moto bidimensionale utilizza un algoritmo implicito ai volumi finiti. L'algoritmo di soluzione consente di utilizzare step temporali di calcolo maggiori rispetto ai metodi espliciti. L'approccio ai volumi finiti fornisce una misura dei miglioramenti in termini di stabilità e robustezza rispetto alle tradizionali tecniche differenziali di soluzione basate su metodi agli elementi finiti.
- Algoritmo per la soluzione accoppiata dei modelli 1D e 2D: Gli algoritmi di soluzione 1D e 2D sono strettamente accoppiati nello stesso passo temporale di calcolo permettendo una perfetta coerenza a ogni step tra i modelli 1D e 2D. Ad esempio, se un fiume è modellato in

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B	FOGLIO 22 di 59

1D, ma l'area dietro un argine è modellata in 2D, il deflusso al di sopra dell'argine o eventualmente attraverso una breccia nell'argine è valutato utilizzando come carico di monte il livello nel fiume 1D e come carico di valle il livello nell'area 2D. L'equazione dello stramazzo è utilizzata per calcolare il deflusso al di sopra dell'argine o attraverso la breccia.

- Maglie computazionali strutturate e non strutturate: Il software è stato progettato per utilizzare mesh computazionali strutturati o non strutturati. Ciò significa che le cellule computazionali possono essere triangoli, quadrati, rettangoli o anche elementi a cinque e sei facce. La maglia può essere una miscela di forme e dimensioni delle celle. Il contorno esterno della maglia computazionale è definito con un poligono.
- Tabella dettagliata delle proprietà idrauliche per le celle di calcolo: All'interno di HEC-RAS le celle e le facce delle celle si basano sui dati del terreno sottostante (DTM). Ogni cella della maglia computazionale è pre-elaborato per sviluppare dei grafici dettagliati sulle proprietà idrauliche basate sul terreno sottostante che vengono utilizzati nella modellazione di HEC. Inoltre, ogni faccia delle celle viene valutata come una sezione trasversale dove vengono elaborate in tabelle che descrivono le proprietà idrauliche. Il flusso si muove in tutta la faccia (tra le celle) basandosi su questi dati. Questo permette agli utenti di utilizzare delle celle molto grandi senza però perdere troppo il dettaglio del terreno sottostante che governa il movimento del flusso. Il vantaggio è un minor numero di calcoli e quindi tempi di esecuzione molto più veloci.
- Dettagliata mappatura dello scenario degli allagamenti con animazioni: La perimetrazione delle aree allagabili così come le animazioni dello scenario degli allagamenti in funzione del tempo può essere fatta all'interno di HEC-RAS utilizzando le funzionalità di RAS-Mapper. La mappatura delle aree allagate si basa sul DTM, ciò significa che la reale superficie bagnata sarà basata sui dettagli della morfologia del terreno sottostante e non sulla dimensione della cella di calcolo. Le celle quindi possono anche essere parzialmente bagnate/asciutte.
- Algoritmo di calcolo basato su sistemi Multi-Processore: Il modello di calcolo 2D è stato programmato per sfruttare i sistemi multi-processore presenti sui computer moderni

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

(architettura parallela). In questo l'algoritmo di soluzione presenta una maggiore velocità e quindi i computer dotati di più processori saranno in grado di eseguire la modellazione 2D più velocemente rispetto ai computer a singolo processore.

- Motori di calcolo a 64 e 32 bit: *HEC-RAS* è dotato di motori di calcolo sia a 64 bit che a 32 bit. Il software utilizzerà automaticamente i motori di calcolo a 64 bit se si installa su un sistema operativo a 64 bit.

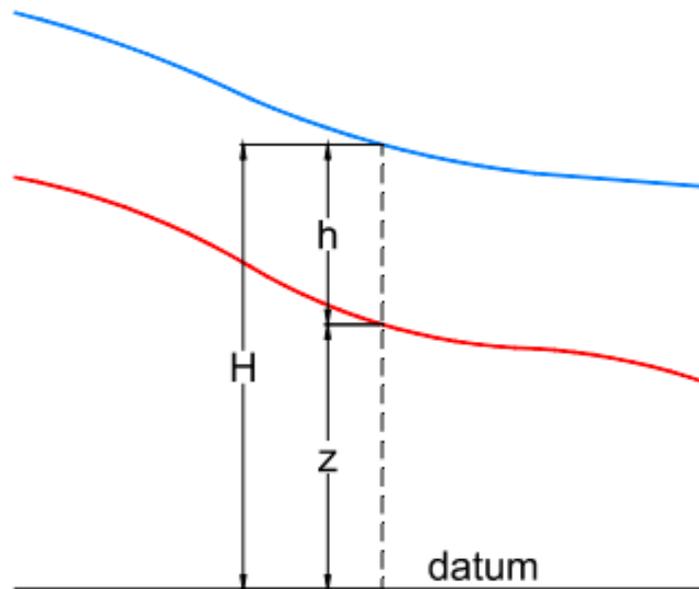


Figura 5 – Software Hec Ras 6.0: sistema di riferimento.

Il modello matematico bidimensionale utilizza le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto, che vengono risolte con uno schema ai volumi finiti. Si riporta di seguito il sistema di riferimento di HEC-RAS 2D, ove la quota del terreno è indicata con $z(x,y)$, l'altezza idrica con $h(x,y,t)$ e l'altezza del pelo libero con $H(x,y,t) = z(x,y) + h(x,y,t)$.

Conservazione della massa: assumendo il fluido incompressibile, l'equazione differenziale della conservazione della massa (continuità) in moto vario è:

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B	FOGLIO 24 di 59

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(h \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(h \cdot v)}{\partial y} + q = 0$$

in cui t è il tempo, u e v sono rispettivamente le componenti di velocità lungo le direzioni x e y , e q è la portata in ingresso ed in uscita dovuta a immissioni od uscite di acqua.

Conservazione della quantità di moto: quando la dimensione orizzontale caratteristica dell'area di studio è molto maggiore della dimensione verticale, gli effetti legati alla componente verticale della velocità possono essere trascurati e si può assumere una distribuzione idrostatica delle pressioni, a partire dalle equazioni di Navier-Stokes. In tali ipotesi e nell'ipotesi di densità del fluido costante, l'equazione di conservazione della quantità di moto assume la seguente forma:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = -g \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f \cdot u + f \cdot v$$

in cui oltre ai simboli già illustrati, g è l'accelerazione di gravità, ν_t è il coefficiente di viscosità turbolenta, c_f è il coefficiente di attrito al fondo, ed f è il coefficiente di Coriolis.

Utilizzando la formula di Chézy il coefficiente di scabrezza sul fondo è dato da:

$$c_f = \frac{g \cdot |V|}{C^2 \cdot R}$$

in cui g è l'accelerazione di gravità, $|V|$ è il modulo del vettore velocità, C è il coefficiente di Chézy e R è il raggio idraulico. Utilizzando la formula di Manning $C = R^{1/6}/n$, in cui n è il coefficiente di scabrezza di Manning, pertanto si ha:

$$c_f = \frac{n^2 \cdot g \cdot |V|}{R^{4/3}}$$

Per la modellazione del campo di moto HEC-RAS utilizza l'approccio batimetrico sub-grid sviluppato da Casulli.

 ITALFERR <small>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</small>	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

Con tale approccio si riesce a sfruttare informazioni topografiche ad alta risoluzione (ad esempio dati Lidar con passo della griglia pari ad 1m) pur utilizzando celle di calcolo a dimensione caratteristica maggiore rispetto alla risoluzione dei dati in ingresso. Per ogni singola cella di calcolo infatti in fase di pre-processing viene ricavata la legge di variazione con la quota del pelo libero delle grandezze idrauliche caratteristiche, basandosi sui dati topografici ad alta risoluzione relativi alla cella stessa.

Vengono così determinate: curva di invaso della cella, area, contorno bagnato e raggio idraulico su ogni bordo della cella. Tale schema di risoluzione consente di sfruttare al massimo il dettaglio dei dati in ingresso.

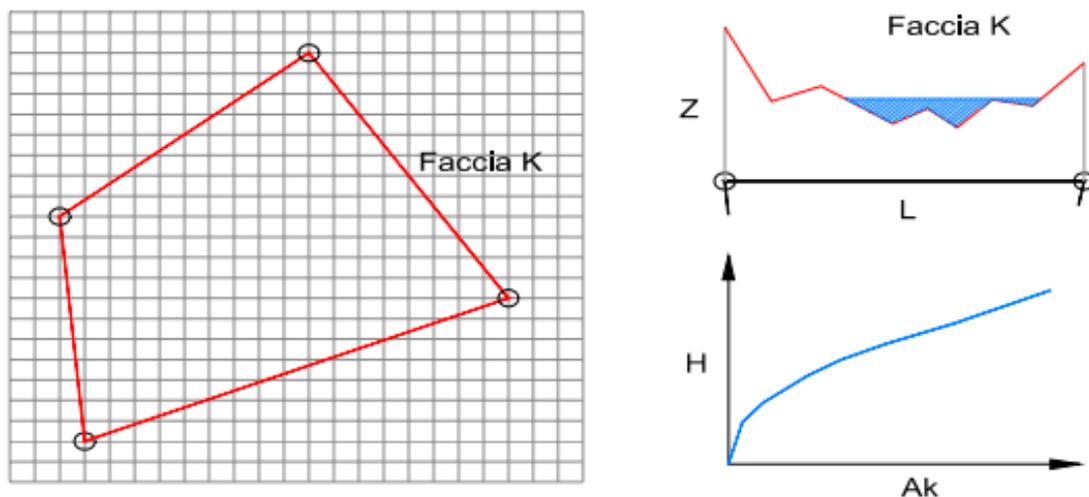


Figura 6 – Software Hec Ras: in grigio il dato della griglia DTM, in rosso la cella di calcolo del modello idraulico. A destra la schematizzazione effettuata da Hec Ras sulle facce del bordo della cella.

3.3.2 Generazione del Modello Digitale Del Terreno

Il primo passo per l'implementazione della geometria del modello prevede la definizione delle quote del terreno dell'alveo e della pianura alluvionale tramite la generazione di un Modello Digitale del Terreno (DTM). Tali informazioni sono state estratte dai dati topografici disponibili descritti nel paragrafo 3.2.1, avendo cura di integrare le informazioni derivate dalle sezioni trasversali rilevate in alveo con quelle relative al piano campagna provenienti dal modello digitale del terreno.

	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B	FOGLIO 26 di 59

Effettivamente si è scelto di sostituire il dato in alveo fornito dal DTM con quello ottenibile dall'interpolazione tra le sezioni, nel tratto in cui il confronto tra le due tipologie di dati ha evidenziato una non corretta definizione dell'alveo nel DTM; tale discrepanza è dovuta principalmente alla presenza di acqua nella fase di acquisizione dei dati lidar, ossia nell'ultimo tratto di fiume, a valle del Ponte di Via Europa Unita.

Infatti, benché generalmente la sezione trasversale battuta fornisca valori puntuali più precisi del DTM, dove possibile si è preferito mantenere il DTM che fornisce una rappresentazione continua dell'alveo, considerata più rappresentativa di quella ottenibile da interpolazione dei dati puntuali forniti dalle sezioni.

Nel tratto di valle, dove i valori ottenibili dal DTM appaiono maggiormente influenzati dalla presenza dell'acqua in alveo e dove quindi si discostano maggiormente dalle sezioni, si è scelto di interpolare queste ultime, integrando la morfologia in alveo ricostruita con il DTM al di fuori dell'alveo.

Pertanto, a tale scopo è stata effettuata una interpolazione geospaziale delle sezioni rilevate, in ambiente GIS tramite il software XS Interpolator², in modo da poter prendere in considerazione le variazioni puntuali presenti tra due sezioni rilevate, siano esse dovute a restringimenti, allargamenti o cambiamenti di direzione del corso d'acqua; il risultato di tale interpolazione è costituito da un modello digitale dell'alveo, integrato con il DTM per le quote del terreno di piano campagna.

La figura che segue fornisce un esempio dell'interpolazione effettuata, mostrando l'integrazione tra il DTM e il modello digitale dell'alveo; in figura sono indicati anche i profili delle sezioni trasversali rilevate, per meglio apprezzare la ricostruzione della geometria in alveo.

²<https://shop.m3eweb.com/home/32-xs-interpolator.html>

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B	FOGLIO 27 di 59

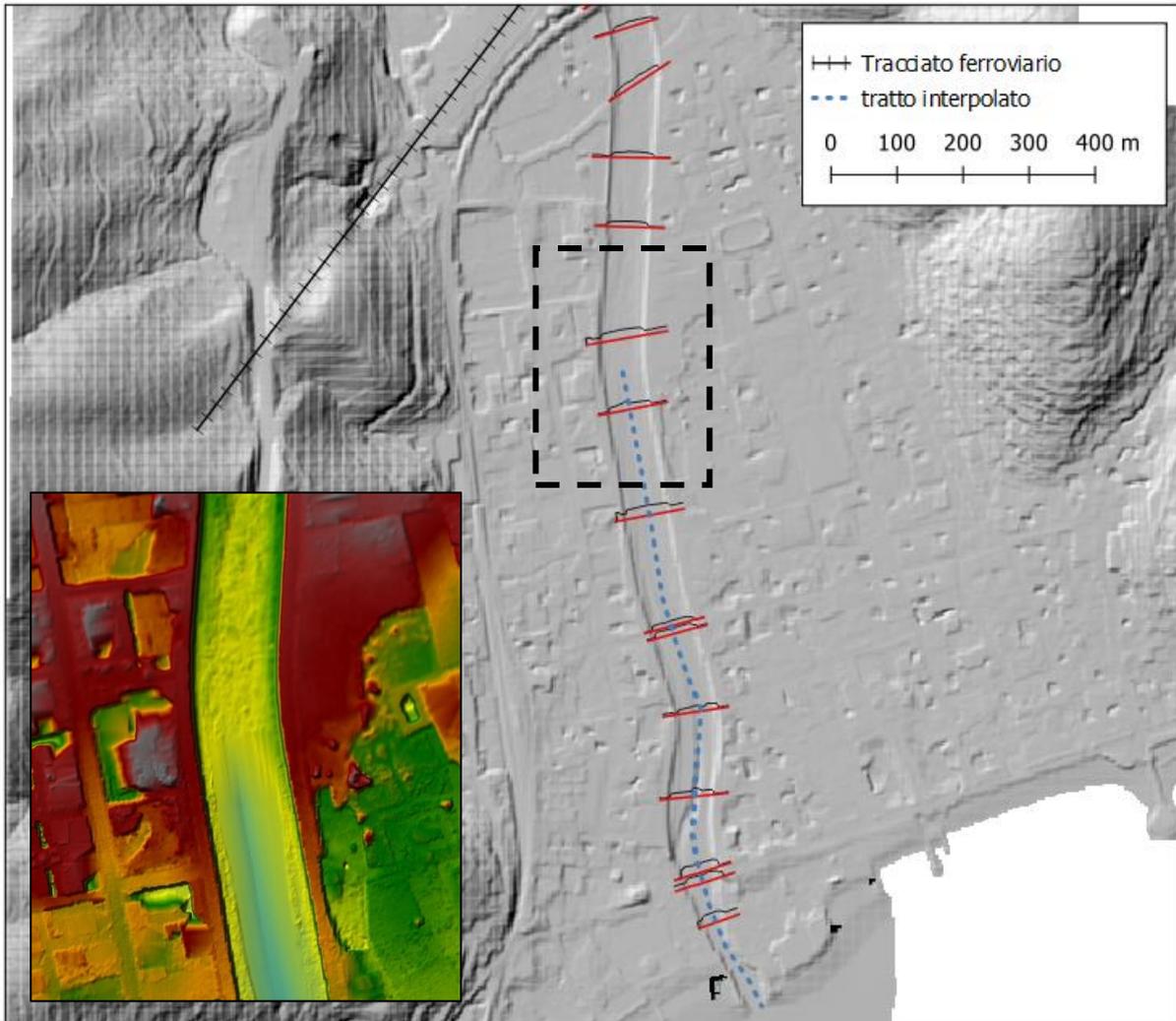


Figura 7: Estratto del DTM ottenuto integrando il DTM originario con le sezioni trasversali; il riquadro di dettaglio mostra il passaggio al tratto interpolato

3.3.3 Definizione del dominio e della griglia di calcolo

Per l'implementazione del modello si è in prima battuta identificato un dominio di calcolo che fosse coperto dalle informazioni topografiche disponibili e che fosse sufficientemente esteso a monte e a valle del nodo di interesse, in modo che il calcolo non risenta delle condizioni al contorno imposte. In particolare, a valle, si è scelto di chiudere il modello alla foce, considerando anche un tratto di mare prospiciente per schematizzare correttamente la condizione al contorno di valle.

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</p>					
<p>PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula</p>	<p>COMMESSA IV01</p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA D 09 RI</p>	<p>DOCUMENTO ID 0002 004</p>	<p>REV. B</p>	<p>FOGLIO 28 di 59</p>

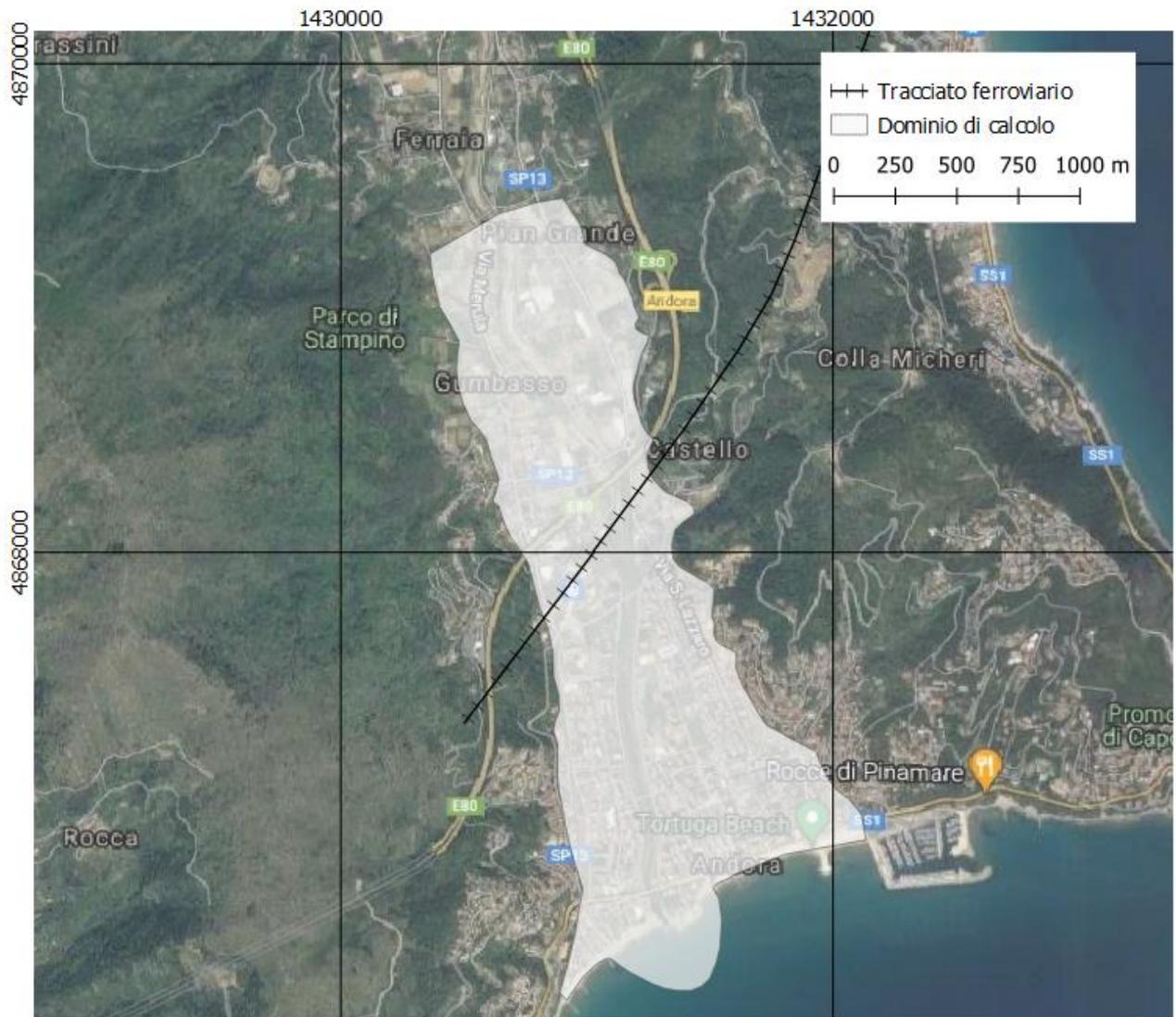


Figura 8: Estensione del dominio di calcolo

Per quanto riguarda la griglia di calcolo, HEC-RAS 2D utilizza uno schema di soluzioni a volumi finiti, che consente l'utilizzo di una griglia di calcolo (mesh) strutturata o non strutturata. Ciò significa che la mesh può essere costituita da celle di calcolo da 3 a 8 lati.

A partire dal modello digitale del terreno finale implementato come descritto sopra, è stata selezionata una risoluzione nominale della griglia pari a 10 m e sono stati utilizzati gli strumenti automatizzati all'interno di HEC-RAS per la costruzione della griglia di calcolo nel piano

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

campagna, imponendo la posizione dei rilevati, in modo da adattare gli elementi della griglia ai principali ostacoli al deflusso.

L'alveo del Merula è stato interamente schematizzato con griglia a 5 m.

La griglia così definita è costituita da 32'679 celle, di estensione media pari a 72.4 m², con una variazione da 10.39 m² a 301.61 m².

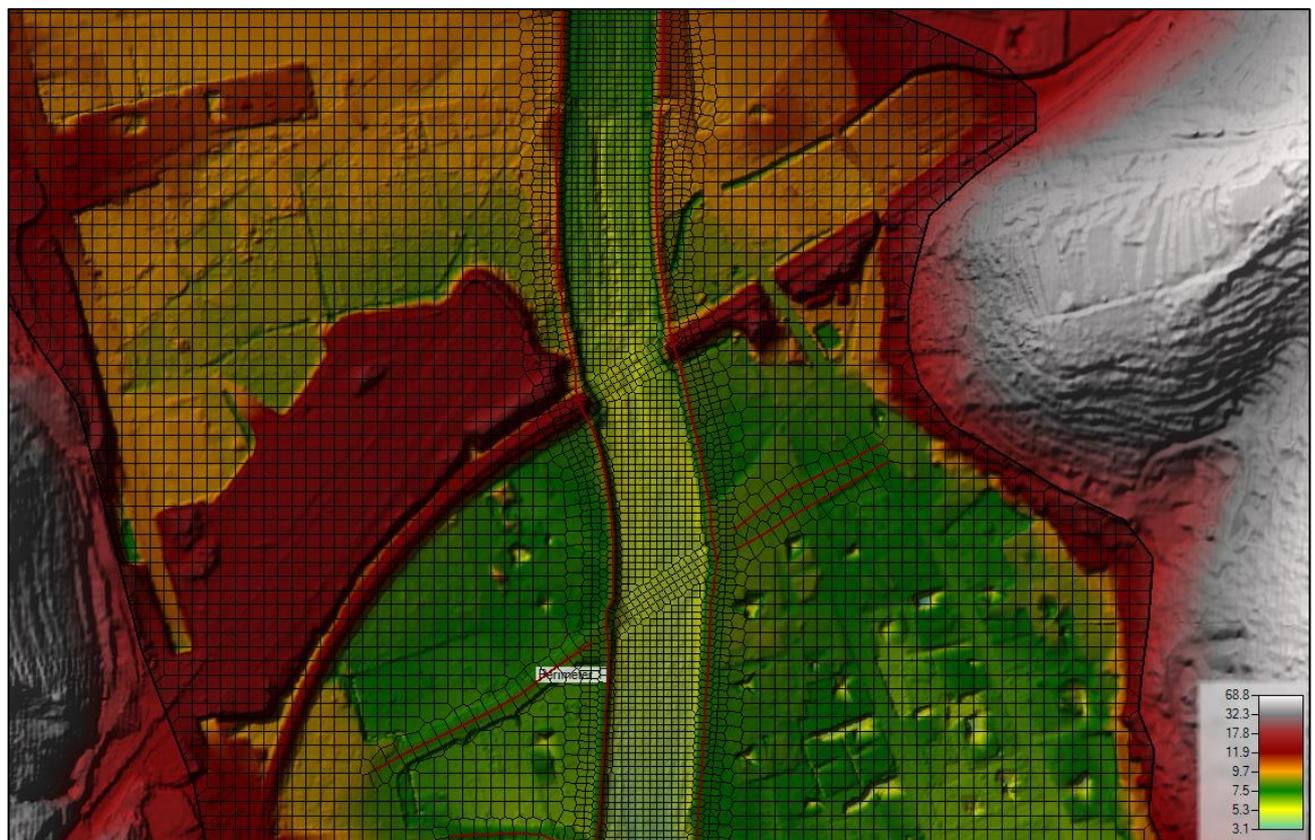


Figura 9: Dettaglio della mesh in prossimità dell'attraversamento ferroviario esistente

La discretizzazione delle celle è stata ritenuta sufficientemente dettagliata per rappresentare la dinamica di allagamento; tuttavia, è opportuno considerare che, in realtà, il livello di dettaglio del modello HEC-RAS non dipende solo dalle dimensioni della cella. La specificità della modellazione in RAS 2D è legata al fatto che il software è in grado di considerare nel calcolo un'informazione topografica più dettagliata rispetto alla griglia di calcolo che utilizza.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

Questa prerogativa lo differenzia in maniera netta rispetto a tutti gli altri software di modellazione 2D, dove l'informazione topografica è al più sui nodi di calcolo.

Infatti, pur mantenendo un solo punto di calcolo all'interno di ogni cella della griglia e quindi calcolando un solo livello, il pre-processore del software per ogni cella determina, sulla base del DEM sotteso dalla cella:

- la relazione livello-volume invasato nella cella, che utilizza nella soluzione dell'equazione di continuità,
- la relazione livello area di deflusso per ogni contorno di scambio tra 2 celle, che utilizza nella soluzione dell'equazione del moto.

Questa tecnica permette quindi di considerare dettagli topografici non legati alla dimensione delle celle di calcolo, ma legati alla definizione del DEM di base.

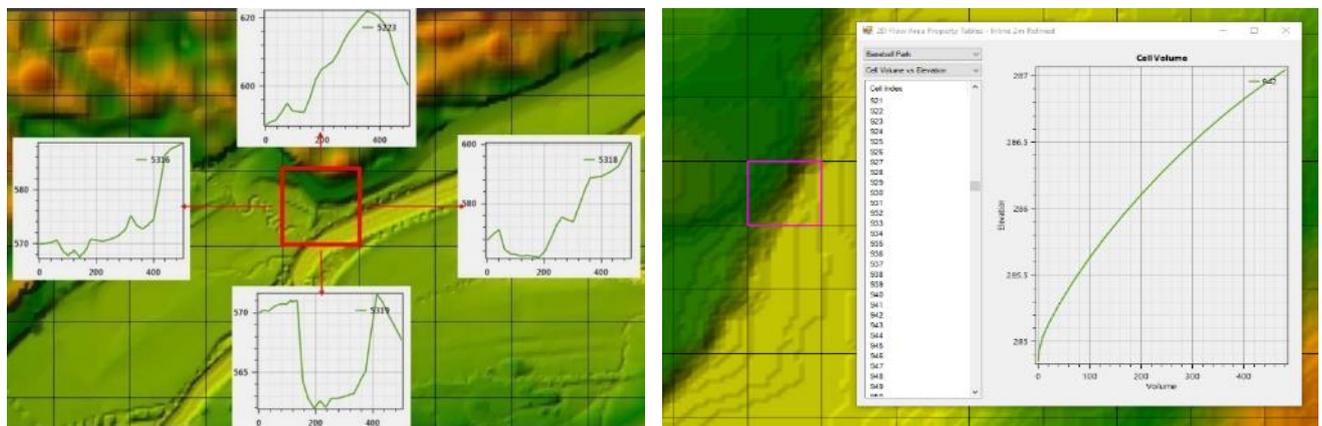


Figura 10: Esempio di DEM a sinistra estrazione dei profili lungo i confini delle celle, a destra curva livello-volume invasato

Anche il post-processore del software per identificare le aree allagate utilizza il DEM, quindi all'interno di una cella di calcolo considera allagati solo i pixel del DEM che hanno una quota inferiore a quella del livello idrico calcolato per la cella stessa.

3.3.4 Strutture idrauliche all'interno del modello 2D

Tutti gli attraversamenti individuati nel dominio di calcolo sono stati inseriti nella geometria del modello come ponti, secondo le informazioni geometriche disponibili.

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</p>					
<p>PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula</p>	<p>COMMESSA IV01</p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA D 09 RI</p>	<p>DOCUMENTO ID 0002 004</p>	<p>REV. B</p>	<p>FOGLIO 31 di 59</p>

In aggiunta agli attraversamenti, sono poi stati inseriti anche i rilevati significativi presenti nel dominio di calcolo e che possono influire sulle dinamiche di allagamento; tali rilevati sono stati schematizzati come strutture di sfioro, alla quota definita dal modello del terreno.

Le figure seguenti mostrano le posizioni delle strutture e, a scopo esemplificativo, la schematizzazione dell'attraversamento ferroviario esistente all'interno del modello.

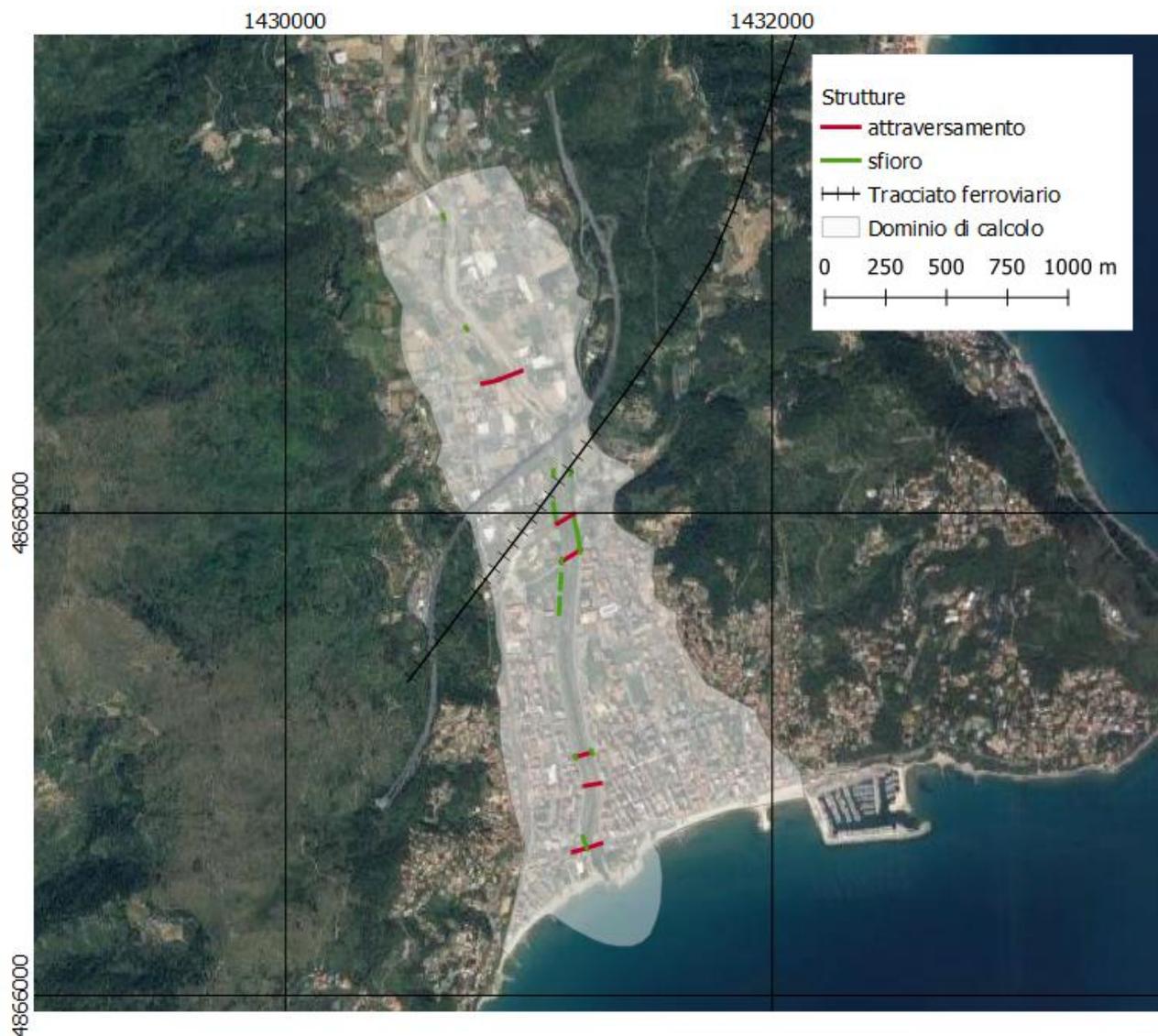


Figura 11: Strutture idrauliche inserite all'interno del modello

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV0I	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

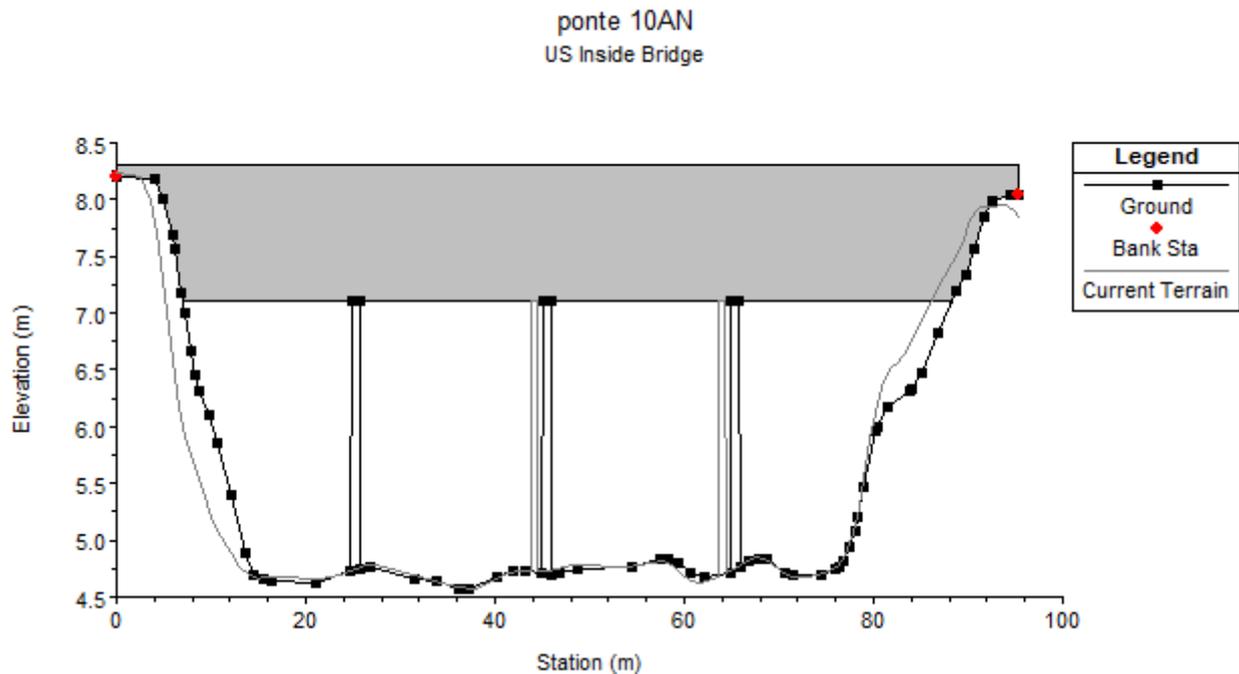


Figura 12: Schematizzazione dell'attraversamento ferroviario esistente all'interno del modello

3.3.5 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno imposte al modello includono:

- idrogrammi di piena di riferimento in input a monte;
- condizioni al contorno di valle lungo il contorno a mare: è stata imposta la condizione di livello pari a 2 m s.l.m. corrispondente ad una condizione estrema che prende in considerazione l'azione di *storm surge* e l'innalzamento del livello del mare al 2100 dovuto ai cambiamenti climatici, così come definito da studio ENEA disponibile basato sulla stazione di Imperia (rif. IV0I00D09RIID0001001).

La Figura 13 mostra la schematizzazione delle principali condizioni al contorno imposte.

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</p>					
<p>PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula</p>	<p>COMMESSA IV01</p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA D 09 RI</p>	<p>DOCUMENTO ID 0002 004</p>	<p>REV. B</p>	<p>FOGLIO 33 di 59</p>



Figura 13: Condizioni al contorno imposte al modello

3.3.6 Calibrazione

Non essendo disponibili informazioni relative a misurazioni idrometriche durante eventi specifici, si è potuto calibrare il modello unicamente sulla base delle aree di pericolosità idraulica definite nel PAI/PGRA dall’Autorità di Bacino per un evento duecentennale.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

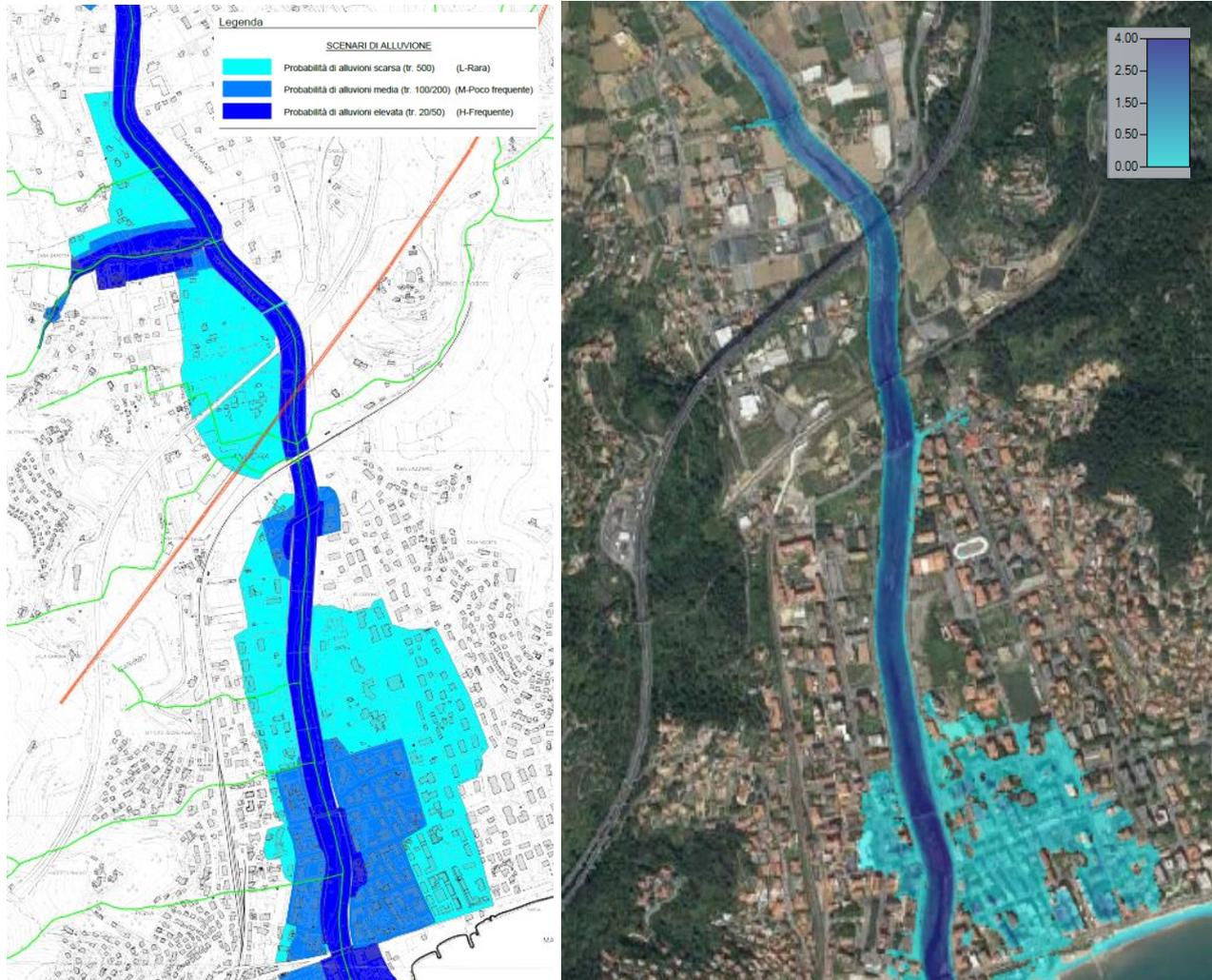


Figura 14: Confronto tra gli allagamenti ottenuti con il modello e quelli definiti dal PAI.

I risultati descritti nella figura precedente sono stati ottenuti con il seguente set di scabrezze, riportato nella tabella seguente secondo la notazione di Manning n [$s \cdot m^{-1/3}$].

In particolare, il valore assegnato in alveo è stato scelto sia secondo quanto suggerito dalla letteratura tecnica, sulla base della documentazione fotografica disponibile da sopralluogo e dalla fotointerpretazione di immagini satellitari, che in funzione dell'estensione degli allagamenti definiti dal PAI/PGRA; il valore assegnato all'area di piana alluvionale è stato invece valutato in modo da considerare la presenza degli edifici; tale scabrezza non appare tuttavia influenzare in modo significativo i livelli in alveo, che costituiscono l'oggetto dell'analisi condotta.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

Tabella 3: Scabrezze adottate nel modello

Copertura	n
Alveo	0.045
Pianura alluvionale	0.08

In linea generale i risultati ottenuti per l'evento duecentennale riproducono, in termini di estensione delle aree allagabili, quanto illustrato nelle carte degli allagamenti PAI/PGRA per lo stesso tempo di ritorno (200 anni). In particolare, per la portata di progetto nel tratto di attraversamento non si evidenziano esondazioni.

3.4 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE

Dopo le procedure di calibrazione, il modello 2D, così come descritto nel paragrafo 3.3, è stato utilizzato per condurre tre simulazioni sia per lo scenario relativo allo stato attuale sia per la configurazione di progetto, rispettivamente per i tempi di ritorno di 50, 200 e 500 anni, utilizzando gli idrogrammi definiti nel paragrafo 3.2.1.

Nello specifico, per la configurazione:

- *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 o di sistemazione idraulica dell'alveo.

I risultati ottenuti hanno portato all'identificazione del campo dei tiranti e delle velocità in tutto il dominio di calcolo, e in particolare dei livelli idrici che si instaurano durante gli eventi estremi presi in considerazione in corrispondenza dell'attraversamento ferroviario.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

3.4.1 Scenario “ante operam”

Di seguito, si riportano gli stralci delle aree potenzialmente inondabili, ottenute da modello 2D, per il tempo di ritorno di progetto ($Tr = 200$ anni). Si rimanda agli elaborati specifici per la restituzione grafica dettagliata dei risultati, come definiti nel paragrafo 2.2.

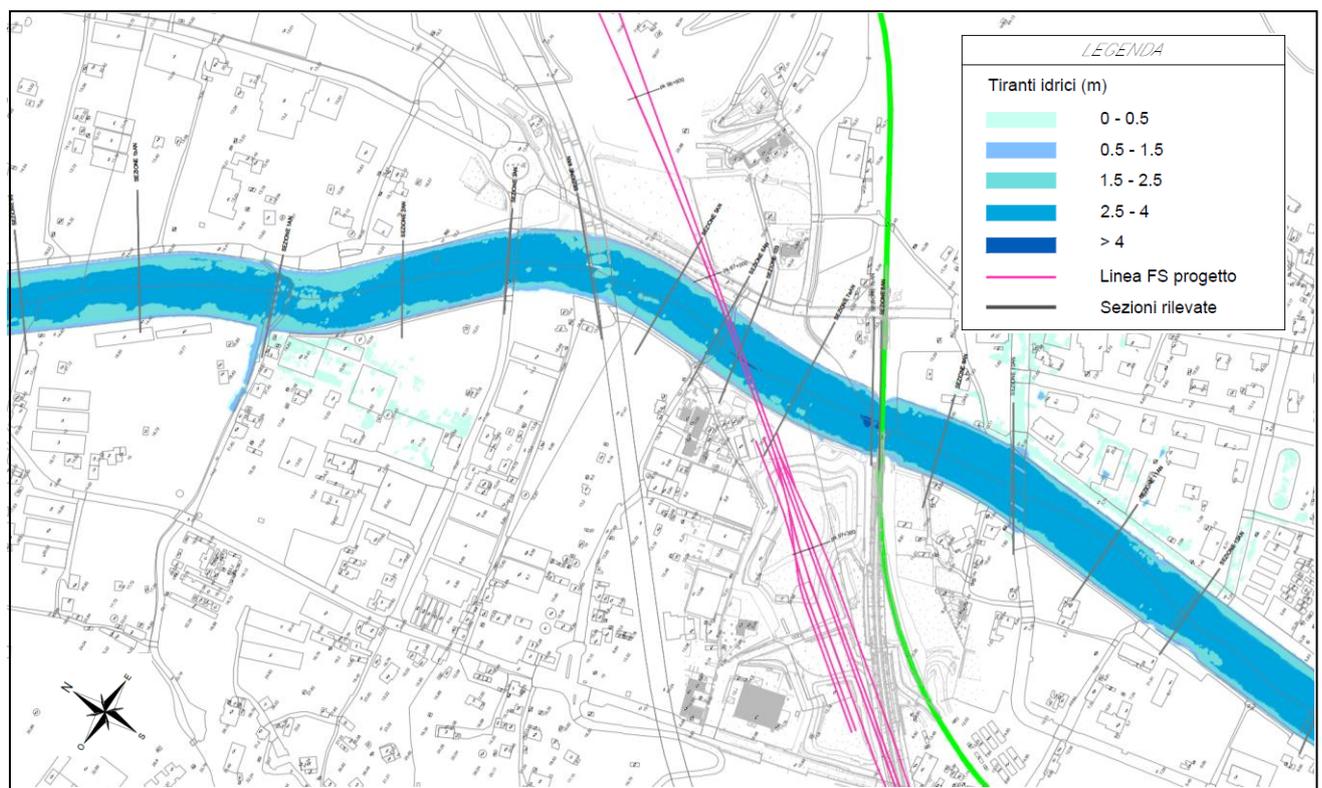


Figura 15: Modello numerico 2D, T. Merula: aree potenzialmente inondabili, ante operam, $Tr = 200$ anni.

Come evidenziato nella figura precedente, l’area di intervento non è soggetta alle esondazioni delle piene del Torrente Merula, a meno delle aree in destra idraulica a valle della linea ferroviaria esistente; l’estensione della zona potenzialmente inondabile riproduce, come già mostrato nell’ambito della calibrazione del modello, quella indicata nelle mappe di pericolosità idraulica del P.G.R.A. di riferimento.

Nella tabella seguente sono riportati i livelli idrici ($Tr = 50, 200, 500$ anni), allo stato attuale, in corrispondenza del futuro nuovo attraversamento ferroviario (VI08).

	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

Tabella 4: Livelli massimi a monte dell'attraversamento ferroviario per vari tempi di ritorno (ante operam)

	Livello (m s.l.m.m.)
Tr 50	8.87
Tr 200	9.54
Tr 500	9.90

3.4.2 Scenario “post operam”

Sulla base dei risultati ottenuti nello scenario “*ante operam*”, si è proceduto all’implementazione della configurazione “*post operam*”. Nello specifico, in quel di Andora, si prevede la realizzazione delle seguenti opere ed interventi:

- nuovo viadotto ferroviario VI08, per l’attraversamento del Torrente Merula;
- nuova stazione di Andora, con annesso parcheggio;
- nuove viabilità per l’accesso alla nuova stazione;
- opere di sistemazione/protezione idraulica in alveo atte a limitare fenomeni di erosione attorno alle pile del nuovo viadotto.

Nella figura seguente uno stralcio della planimetrica di progetto in quel di Andora.

Di seguito ancora uno stralcio del profilo di progetto della nuova linea ferroviaria, da cui si evince la configurazione/scansione del nuovo viadotto VI08 previsto per lo scavalco del T. Merula.

Nello specifico, il viadotto VI08 è costituito di due campate con luce pari a 75 m, con una pila al centro dell’alveo del T. Merula.

PROGETTO DEFINITIVO

Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula

COMMESSA

LOTTO

CODIFICA

DOCUMENTO

REV.

FOGLIO

IV01

00

D 09 RI

ID 0002 004

B

38 di 59

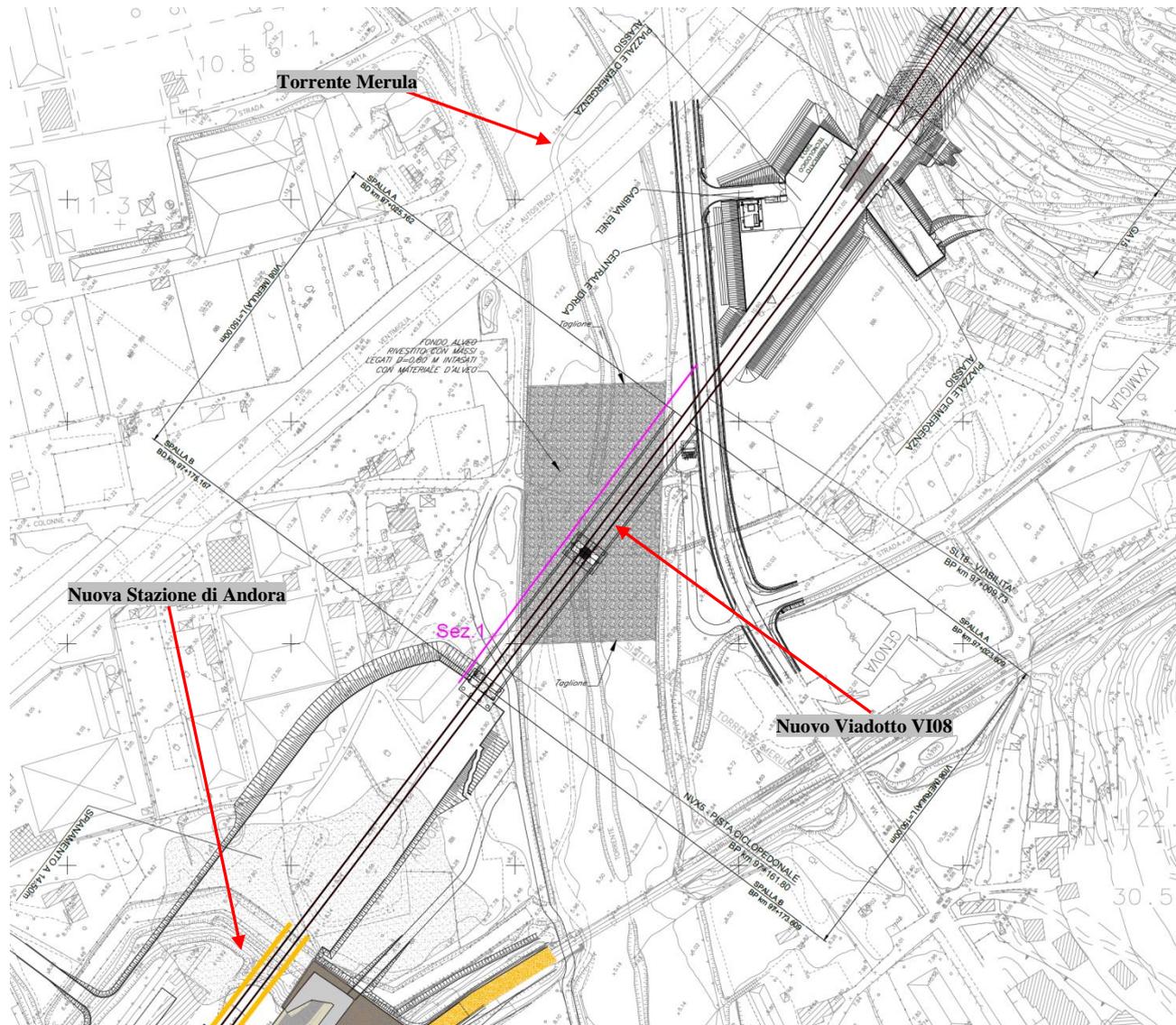


Figura 16: Stralcio della planimetria di progetto in quel di Andora.

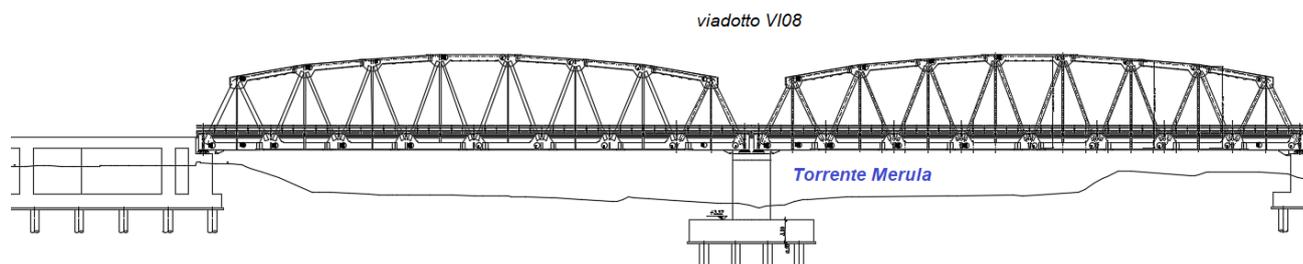


Figura 17: Stralcio del profilo di progetto, nuovo viadotto V108.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

Implementate le opere in progetto nel modello numerico 2D sviluppato, tramite appositi elementi presenti nel codice di calcolo Hec Ras (bridge/culvert) o modifiche locali del DTM di base, si è proceduto alla simulazione della propagazione delle piene del Torrente Merula, per i tre tempi di ritorno di riferimento, nello scenario “*post operam*”.

Nella figura seguente, si riportano i risultati ottenuti, in termini di aree potenzialmente inondabili, per il tempo di ritorno di progetto, $Tr = 200$ anni. Si rimanda comunque agli elaborati specifici per la restituzione grafica dettagliata dei risultati, come definiti nel paragrafo 2.2.

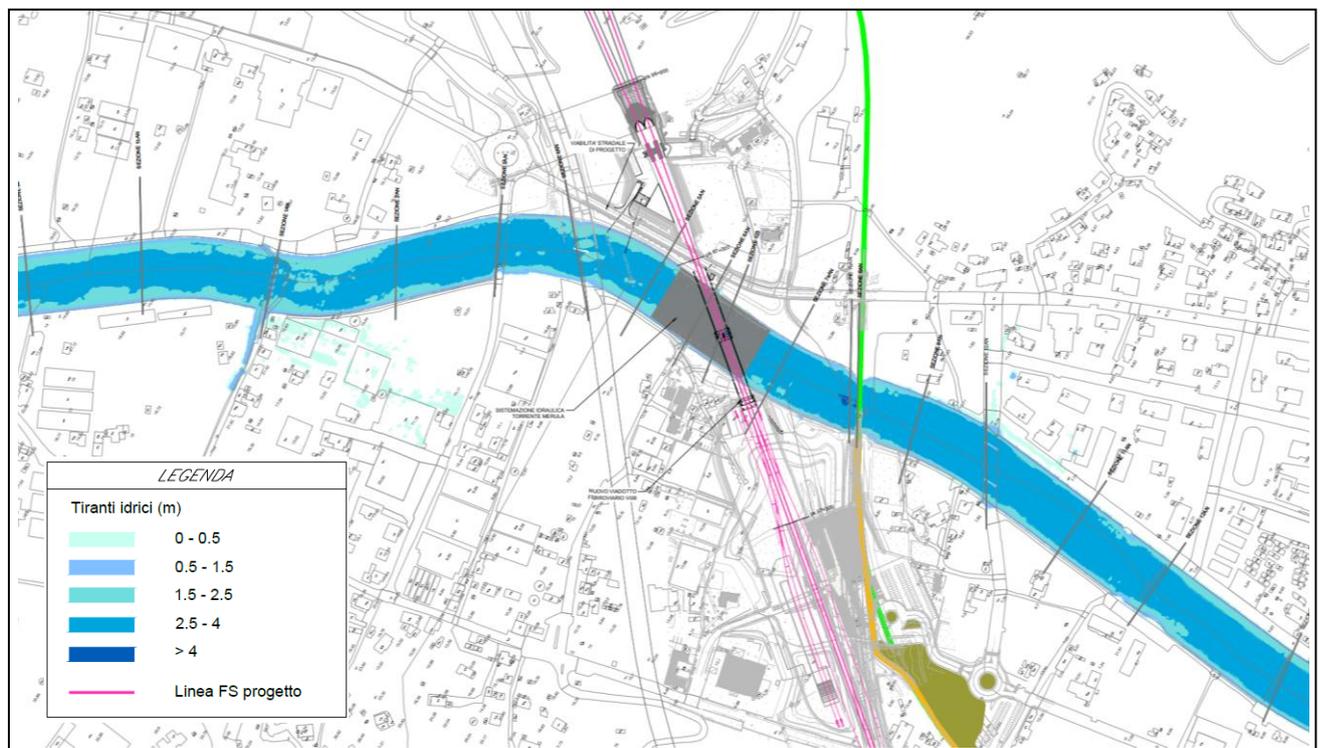


Figura 18: Modello numerico 2D, T. Merula: aree potenzialmente inondabili, post operam, $Tr = 200$ anni.

Nello scenario “*post operam*”, non si osservano variazioni sostanziali delle aree di esondazione rispetto allo stato attuale. Anche in termini di livelli idrici in alveo, in corrispondenza dei nuovi attraversamenti, non si osservano variazioni sostanziali rispetto allo scenario *ante operam*. Sulla base dei risultati, in termini di livelli idrici, relativi alla propagazione delle piene con tempo di ritorno di 200 anni, è stata verificata la compatibilità idraulica del nuovo viadotto VI08 sul Torrente Merula.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

4 VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO DI PROGETTO

Nella tabella seguente è riportata la verifica del franco idraulico di progetto delle nuove opere di attraversamento, in particolare del **VI08** sul T. Merula, eseguita secondo le normative vigenti (i.e. NTC2018, M.d.P. RFI, NTA Pianificazione di Bacino).

Tabella 5 – Viadotto VI08 (Torrente Merula): verifica del franco idraulico di progetto.

Quota minima impalcato [m slm]	Livello di piena Tr200 [m slm]	Carico Cinetico Tr200 [m]	Carico totale Tr200 [m slm]	Franco sul livello Idrico Tr200 [m]	Franco sul carico totale Tr200 [m]	Verifica NTC2018; MdP RFI	Verifica NTA-P.A.I.
+13.09	+9.75	0.49	+10.24	+3.34 (> 1.50 m)	+2.85 (> 0.50 m)	Franco idraulico > 1.5 m → OK Franco sul carico idraulico > 0.5 m → OK	Franco idraulico > max (carico cinetico; 1.5/2.0 m) → OK

È rispettata la prescrizione di distanza minima di 6-7 m tra quota di intradosso e fondo alveo così come indicato nella circolare n.7/2019 delle NTC2018, nel caso di transito di materiale galleggiante/flottante e trasporto solido.

Inoltre, la scansione scelta per il viadotto VI08 in progetto (2 campate con luce di 75 m) permette di rispettare la prescrizione di distanza minima di 40 metri, in direzione ortogonale alla corrente, così come indicato nelle NTC2018 (Cap. 5).

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

5 VERIFICA ALLO SCALZAMENTO

In ragione dei risultati delle simulazioni numeriche idrauliche condotte, si è proceduto alla valutazione della profondità massima di erosione attesa, in particolare attorno alla pila del *nuovo viadotto VI08* in progetto, collocata all'interno dell'alveo del *Torrente Merula*.

Nello specifico, si è fatto riferimento a quanto indicato nelle NTC2018:

“Lo scalzamento e le azioni idrodinamiche associate al livello idrico massimo che si verifica mediamente ogni anno (si assuma $Tr = 1,001$) devono essere combinate con le altre azioni variabili adottando valori del coefficiente $\Psi0$ unitario. Lo scalzamento e le azioni idrodinamiche associati all'evento di piena di progetto devono essere combinate esclusivamente con le altre azioni variabili da traffico, adottando per queste ultime i coefficienti di combinazione $\Psi1$.”

A tal proposito, sono state applicate le seguenti due formulazioni, disponibili nella letteratura tecnica. Come valore di progetto dello scalzamento è stato considerato il valore massimo ottenuto dalle due relazioni.

Formulazione CSU

La profondità di scalzamento attesa può essere stimata come:

$$\frac{Y_s}{Y_1} = 2 \cdot K_1 K_2 K_3 K_4 \left(\frac{a}{Y_1} \right)^{0.65} FR^{0.43}$$

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 (vedi tabella seguente)
- K_4 è un fattore correttiva legato al materiale di fondo alveo, valutabile come:

$$K_4 = [1 - 0.89(1 - V_r)^{0.053}]^{0.5}$$

dove $V_r = \frac{V_0 - V_i}{V_{c90} - V_i}$, $V_i = 0.645(d_{50}/a)^{0.053} V_{c50}$, $V_{c90} = 10.95(Y_1)^{1/6} d_{90}^{1/3}$, $V_{c50} =$

$10.95(Y_1)^{1/6} d_{50}^{1/3}$, d_{50}, d_{90} = diametro corrispondente al 50% e al 90 % di passante in peso

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

- Y_s , la profondità di scalzamento;
- Y_l , l'altezza della corrente;
- a , la larghezza della pila;
- FR , il numero di Froude ($FR = V_0/(gh_m)^{1/2}$)

Tabella 6- Formulazione CSU: valori dei fattori correttivi K_1 , K_2 , K_3 .

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	$10 > H \geq 2$	1.1
Medium Dunes	$30 > H \geq 10$	1.2 to 1.1
Large Dunes	$H \geq 30$	1.3

Formulazione di Sheppard – Melville

La profondità di scalzamento 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

- $V_{1p} = \max(V_{1p1}; V_{1p2})$

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

- $V_{1p1} = 5V_c; V_{1p2} = 0.6\sqrt{gy_1}$
- $$V_c = \begin{cases} 2.5 \cdot u^* \ln \left(\frac{73.5y_1}{d_{50} [Re(2.85 - 0.58 \ln(Re) + 0.002Re) + \frac{111}{Re} - 6]} \right) & \text{for } 5 \leq Re \leq 70 \\ 2.5 \cdot u^* \ln \left(\frac{2.21y_1}{d_{50}} \right) & \text{for } Re > 70 \end{cases}$$
- $Re = \frac{u^* d_{50}}{2.32 \cdot 10^{-7}}; u^* = \left[16.2 \cdot d_{50} \left(\frac{9.09 \cdot 10^{-6}}{d_{50}} - d_{50} (38.76 + 9.6 \ln(d_{50})) - 0.005 \right) \right]^{0.5}$
- $y_1 = \text{tirante idrico (m)}$
- $f_1 = \tanh \left[\left(\frac{y_1}{a^*} \right)^{0.4} \right]; f_2 = \left\{ 1 - 1.2 \left[\ln \left(\frac{V_1}{V_c} \right) \right]^2 \right\}; f_3 = \left[\frac{\left(\frac{a^*}{d_{50}} \right)}{0.4 \left(\frac{a^*}{d_{50}} \right)^{1.2} + 10.6 \left(\frac{a^*}{d_{50}} \right)^{-0.13}} \right]$
- $a^* = K_s a_p; a_p = a \cdot \cos \theta + L \cdot \sin \theta; K_s = \begin{cases} 1 & (\text{pila circolare}) \\ 0.86 + 0.97 \left(\left| \frac{\pi \theta}{180} - \frac{\pi}{4} \right| \right)^4 & (\text{pila rettangolare}) \end{cases}$
 $(a = \text{larghezza della pila}; L = \text{lunghezza della pila}; \theta = \text{angolo di attacco } [^\circ])$

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:

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

all'interno dei quali ricadono i valori dei parametri (tirante, velocità, d_{50}, \dots), relativi al corso d'acqua oggetto di studio.

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

- CASO I: la fondazione della pila rimane al di sotto della buca erosiva;

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</p>					
<p>PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula</p>	<p>COMMESSA IV01</p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA D 09 RI</p>	<p>DOCUMENTO ID 0002 004</p>	<p>REV. B</p>	<p>FOGLIO 44 di 59</p>

- 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.

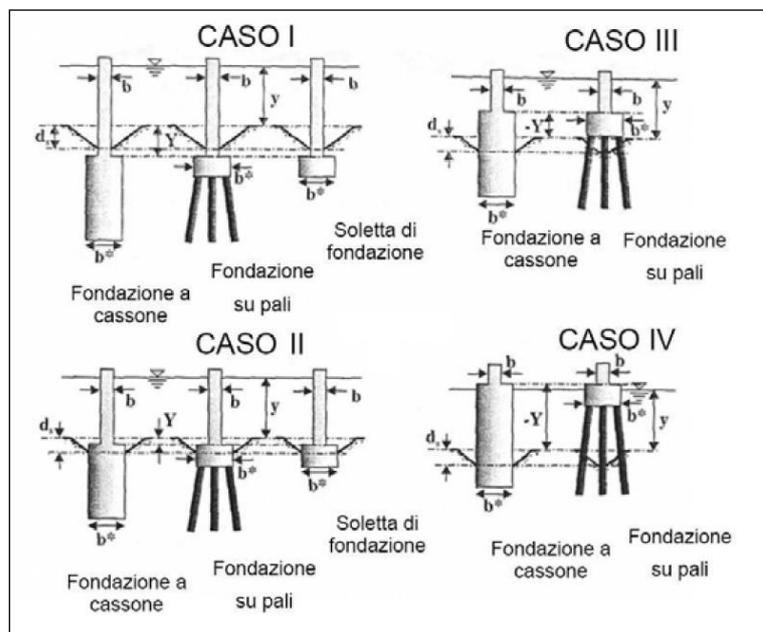


Figura 19 - Differenti tipologie di pile non uniformi dotate di fondazioni.

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.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV0I	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

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

E' stato effettuato dunque il calcolo dello scalzamento, relativo alla piena di progetto, $Tr = 200$ anni, e alla piena con $Tr = 1,001$ anni considerando dapprima le dimensioni delle pile.

Per quanto concerne il calcolo dello scalzamento per la piena $Tr = 1,001$ del T. Merula, si è fatto riferimento ad una simulazione numerica secondo modello numerico monodimensionale HECRAS (in regime di moto permanente), sviluppato appositamente per tale verifica sulla base dei dati topografici/cartografici disponibili e dei parametri di calcolo già adottati nelle simulazioni bidimensionali. La portata ($Tr = 1,001$) del torrente, determinata sulla base delle informazioni e delle analisi idrologiche condotte, ammonta a 62.7 mc/s.

Per quanto concerne il materiale potenzialmente erodibile sul fondo, si è fatto riferimento alle analisi granulometriche effettuate su campioni prelevati direttamente in alveo; in particolare, per il viadotto VI08 sul T. Merula, il materiale considerato è caratterizzato dalla seguente granulometria: $d_{50} = 9$ mm, $d_{90} = 20$ mm (rif. IV0I00D09RGID0002001A).

Nella tabella seguente si riportano i valori di scalzamento attesi per $Tr = 200$ e $1,001$ anni (i valori dei parametri tirante idrico, h , velocità della corrente, v , e angolo di attacco della corrente, "skew angle" sono dedotti dalle simulazioni numeriche 2D) in corrispondenza della pila in alveo del viadotto VI08 sul T. Merula.

Tabella 7- Viadotto VI08 (Torrente Merula): valori di scalzamento attesi attorno alle pile, per Tr200.

ID PILA	Forma pila	D (m) [pila]	L (m) [pila]	h (m)	v (m/s)	Skew Angle (°)	Fr ()	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU	Ys (m) Pila
P1	circolare	5	5	4	3	54	0.479	6.7	7.1	7.1

Tabella 8- Viadotto VI08 (Torrente Merula): valori di scalzamento attesi attorno alle pile, per Tr 1,001.

ID PILA	Forma pila	D (m) [pila]	L (m) [pila]	h (m)	v (m/s)	Skew Angle (°)	Fr ()	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU	Ys (m) Pila
P1	circolare	5	5	1.1	1.4	54	0.426	4.4	1.8	4.4

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

Confrontando i valori di scalzamento atteso con quelli di ricoprimento del plinto di fondazione (2 m) si evince che in corrispondenza della pila in alveo del VI08 i fenomeni di erosione (innescati dalle piene $Tr=200$ e $1,001$ anni) possono interessare anche la fondazione (scalzamento atteso maggiore del ricoprimento). Pertanto, il calcolo è stato ripetuto considerando le dimensioni equivalenti del sistema “pila – plinto”, valutate con la formulazione proposta da Melville e Raudkivi (1996), precedentemente introdotta (si prevede la realizzazione di fondazioni, circolari, “a pozzo”; nei calcoli è stato considerato anche l’ingombro delle opere provvisionali, paratie di pali, che saranno “scapitozzate” fino all’estradosso del plinto di fondazione).

Di seguito, i valori definitivi di scalzamento, per la pila in alveo del nuovo *viadotto VI08* sul T. Merula, da considerare nel dimensionamento delle relative fondazioni.

Tabella 9- Viadotto VI08 (Torrente Meurla): valori di scalzamento attesi attorno al sistema “pila-fondazione” (pila P1), per $Tr200$.

ID PILA	B (m) [plinto]	L (m) [plinto]	Deq (m)	Leq (m)	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU	Ys (m) Pila-Plinto
P1	19.00	19.00	15.35	15.35	12.9	14.8	14.80

Tabella 10- Viadotto VI08 (Torrente Meurla): valori di scalzamento attesi attorno al sistema “pila-fondazione” (pila P1), per $Tr 1,001$.

ID PILA	B (m) [plinto]	L (m) [plinto]	Deq (m)	Leq (m)	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU	Ys (m) Pila-Plinto
P1	19.00	19.00	16.84	16.84	7.6	6.4	7.60

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

6 OPERE DI SISTEMAZIONE/PROTEZIONE IDRAULICA

Come anticipato, si prevedono opere di sistemazione/protezione idraulica attorno alla pila in alveo del nuovo viadotto VI08 sul T. Merula.

Nello specifico, attorno alla pila in alveo si prevede la posa in opera di massi legati con funi di acciaio.

Per il dimensionamento dei massi di protezione attorno alle pile in alveo, si è fatto riferimento alla seguente formulazione (FHWA, 2009), che consente di tenere conto (tramite opportuni coefficienti correttivi) anche di eventuali vortici che possono generarsi, localmente, attorno agli “ostacoli” (rappresentati dalle pile stesse) presenti in alveo:

$$d_{50} = \frac{0.692 \cdot (V_{des})^2}{(S_g - 1)2g} \quad (*)$$

in cui d_{50} = diametro medio dei massi (m); V_{des} = velocità di progetto locale intorno alla pila (m/s); S_g = peso specifico dei massi (t/m^3). La velocità di progetto deve rappresentare le condizioni nelle immediate vicinanze delle pile. Qualora si dovesse adottare un valore medio di velocità, questo deve essere opportunamente moltiplicato per i fattori che sono funzione della forma della pila e della sua posizione rispetto all'alveo:

$$V_{des} = K_1 K_2 V_{avg}$$

Se si dispone di una distribuzione di velocità risultante da modello fisico o da calcolo idraulico 1D o 2D, allora si può utilizzare solamente il coefficiente della forma della pila. Sarebbe opportuno considerare il valore massimo della velocità nell'alveo attivo V_{max} , dal momento che l'alveo stesso può spostarsi nel tempo e la massima velocità impatterebbe le pile:

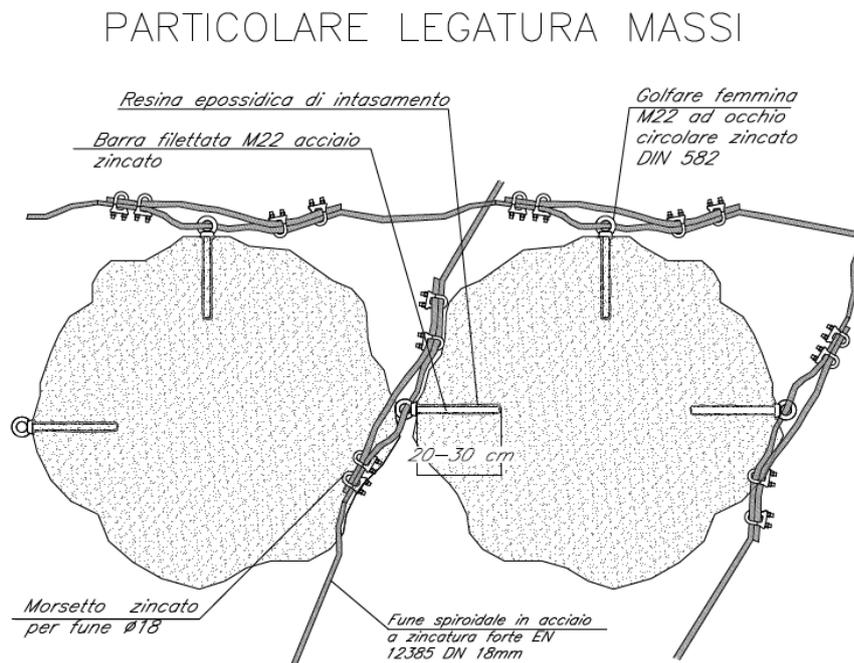
$$V_{des} = K_1 V_{max}$$

in cui V_{des} = velocità di progetto locale intorno alla pila (m/s); K_1 = fattore di forma pari a 1,5 per pile circolari “round-nose” o 1,7 per pile a spigoli vivi; K_2 = fattore di correzione della velocità per l'ubicazione nell'alveo (varia da 0,9 per pile vicino alle sponde in alveo rettilineo, fino a 1,7 per pile immerse nel filone principale della corrente); V_{avg} = velocità media nell'alveo in corrispondenza del ponte (m/s); V_{max} = velocità massima nell'alveo attivo (m/s).

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV0I	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

Considerando per la pila in alveo del **VI08** i parametri (formulazione ^(*)): $V_{max} = 4.0$ m/s (per $Tr = 200$ anni), $S_g = 2.6$ t/m³; $K_I = 1.5$, si ottiene un diametro medio dei massi pari a $d_{50} = 0.80$ m. A vantaggio di sicurezza, se ne prevede anche la legatura con funi di acciaio.

Per maggiori dettagli, si rimanda all'elaborato grafico annesso IV0I00D09PZID0002004.



N.B. Le congiunzioni mediante morsetti devono essere conformi alla norma UNI EN 13411

Figura 20 – Particolare/dettaglio della modalità di legatura dei massi.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

7 VERIFICA DELLE FASI DI REALIZZAZIONE DI OPERE IN ALVEO

Durante la costruzione delle opere di attraversamento fluviale, nel caso specifico del nuovo viadotto VI08 sul T. Merula, con pile di scavalco dell'alveo inciso in prossimità delle sponde (la cui costruzione richiede la realizzazione di rilevati provvisori in alveo), cioè prima che le stesse abbiano raggiunto il loro assetto definitivo, si pone il problema della definizione della portata di riferimento per il dimensionamento delle eventuali opere provvisorie del periodo transitorio, di costruzione.

Per quanto concerne le opere provvisorie, necessarie per la costruzione dei manufatti di attraversamento o delle sistemazioni dell'alveo, la Direttiva 2/99 dell'Autorità di Bacino del fiume Po (deliberazione 11 maggio 1999) stabilisce al paragrafo 4-8.3 - Condizioni fisiche di riferimento - che per le "fasi significative" di costruzione dell'opera, tenendo conto delle opere provvisorie eventualmente inserite, qualora comportino interazioni più severe con le condizioni di deflusso in piena rispetto alla condizione di opera realizzata [...] il tempo di ritorno della piena da assumere per le valutazioni è quello la cui probabilità di essere raggiunta o superata una volta nel periodo temporale corrispondente alle fasi di costruzione non è superiore alla probabilità che ha la portata di progetto di essere raggiunta o superata una volta nel periodo di vita dell'opera. Tale definizione richiama il concetto di "rischio idraulico", cioè la probabilità composta di non superamento che un determinato evento caratterizzato da tempo di ritorno assegnato, TR, si manifesti nel corso di un periodo temporale prefissato, N.

Lo sviluppo della formulazione di tempo di ritorno, associato alla probabilità composta per la quale l'evento si manifesti all'interno dell'orizzonte temporale stabilito, porta alla seguente formulazione del rischio idraulico:

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{TR}\right)^N$$

nella quale:

R = rischio idraulico, inteso come probabilità di non superamento;

TR = tempo di ritorno dell'evento di riferimento (anni);

N = orizzonte temporale di riferimento (anni).

 ITALFERR <small>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</small>	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

L'assunto della Direttiva sopraccitata viene inteso nella condizione per cui il rischio idraulico associato all'interferenza prodotta dalle opere provvisionali nel periodo di installazione del cantiere (periodo di costruzione dell'opera) deve essere uguale al rischio idraulico che l'evento di progetto si manifesti nel corso della vita dell'opera.

Stabilite quindi le seguenti variabili:

TR = tempo di ritorno di progetto (anni);

V = durata dell'opera (anni);

c = durata di costruzione (anni);

T_{pr} = tempo di ritorno per la verifica delle opere provvisionali (anni);

il concetto precedentemente esposto si trasforma nella seguente eguaglianza:

$$1 - \left(1 - \frac{1}{T_{pr}}\right)^c = 1 - \left(1 - \frac{1}{TR}\right)^V$$

dalla quale si ricava quindi il tempo di ritorno di calcolo per le opere provvisionali, T_{pr} :

$$T_{pr} = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{1}{TR}\right)^{\frac{V}{c}}}$$

La relazione così ottenuta può essere graficata fissato il tempo di ritorno di calcolo dell'opera, nella fattispecie $TR = 200$ anni, e il tempo di cantierizzazione, mettendo in relazione il tempo di ritorno di calcolo delle opere provvisionali con la vita nominale dell'opera; si ottengono le curve di riferimento al variare della durata del cantiere che consentono di definire un tempo minimo di ritorno di verifica delle opere provvisionali in funzione della vita dell'opera.

La Figura 21 riporta l'elaborazione condotta con riferimento specifico alla vita nominale delle opere pari a 75 anni e per durate variabili della cantierizzazione che ad ogni modo viene preventivamente stimata in 6 mesi.

PROGETTO DEFINITIVO
**Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale del Torrente Merula**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 004	B	51 di 59

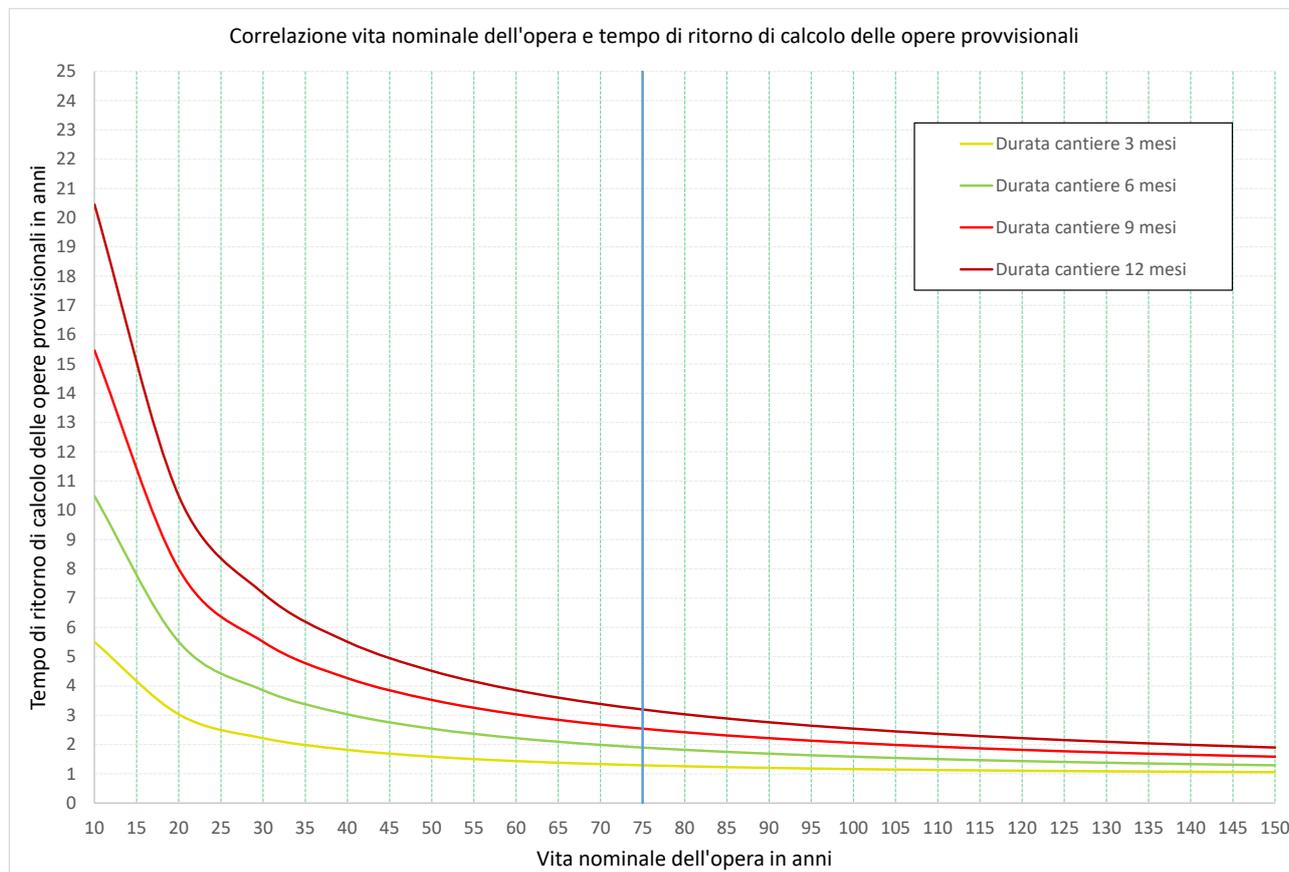


Figura 21: Correlazione tra tempo di ritorno di verifica delle opere provvisionali e vita nominale dell'opera in funzione della durata del cantiere, fissato un tempo di ritorno di riferimento pari a 200 anni

Con una vita nominale dell'opera pari a 75 anni e una durata del cantiere pari a 6 mesi, il tempo di ritorno per il calcolo delle opere provvisionali connesse alla realizzazione delle strutture di attraversamento è stimato in poco meno di 2 anni.

Tuttavia, vista la criticità idraulica del territorio ove si dovrà operare, nonché cambiamenti climatici che hanno interessato e influenzato il regime idrologico con particolare riferimento anche a recenti e frequenti episodi alluvionali che hanno colpito la zona ligure, nondimeno la possibile variabilità dei tempi di cantierizzazione in alveo, è auspicabile considerare eventi caratterizzati da tempi di ritorno più significativi e pari ad almeno 5 anni.

	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B	FOGLIO 52 di 59

In effetti, con riferimento anche alle indicazioni riportate nel testo “Sistemazione dei corsi d’acqua a cura di Luigi Da Deppo, Claudio Datei e Paolo Salandin dell’Università di Padova – Dipartimento di Ingegneria idraulica, marittima, ambientale e geotecnica” e in mancanza di una specifica analisi di rischio si ritiene opportuno considerare una probabilità di accadimento massima del 5-10%. Per la durata di 6 mesi, ammettendo una probabilità di accadimento del 10%, si perviene a $Tr = 5$ anni.

La portata di riferimento con $Tr = 5$ anni per la verifica delle fasi di realizzazione del nuovo viadotto VI08 sul T. Merula è stata calcolata con modello HEC HMS, ed è pari a $100.1 \text{ m}^3/\text{s}$.

La verifica idraulica della fase transitoria di cantiere è stata eseguita facendo riferimento al modello monodimensionale 1D (in regime di moto permanente) sviluppato (adottando le medesime impostazioni riguardanti scabrezze, regime della corrente, condizioni al contorno del modello 2D) per la simulazione della portata con $Tr = 1,001$ anni ai fini del calcolo dello scalzamento, descritto in precedenza. I rilevati provvisori in alveo sono stati simulati tramite l’opzione “*obstruction*”, presente nel codice di calcolo Hec Ras.

Per la realizzazione della pila in alveo e della spalla A in sinistra idraulica si prevedono le seguenti due fasi:

Fase 1 - realizzazione della spalla A

- costruzione del rilevato provvisorio sulla sponda in sinistra idraulica per la realizzazione del piano di lavoro
- realizzazione delle opere provvisionali (paratia di pali)
- costruzione dell'opera di fondazione
- costruzione della spalla A
- rimozione delle opere provvisorie (rilevato in alveo e paratia di pali)

Nella figura seguente, si riporta una schematizzazione grafica della fase sopra descritta.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

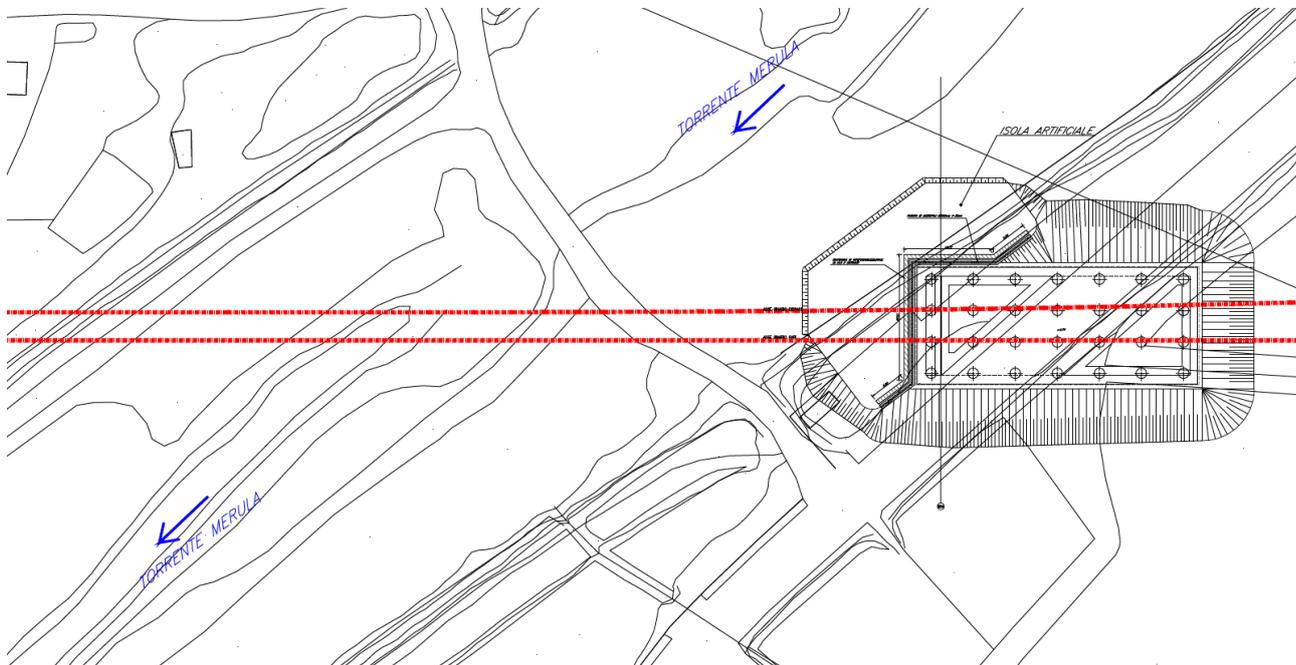
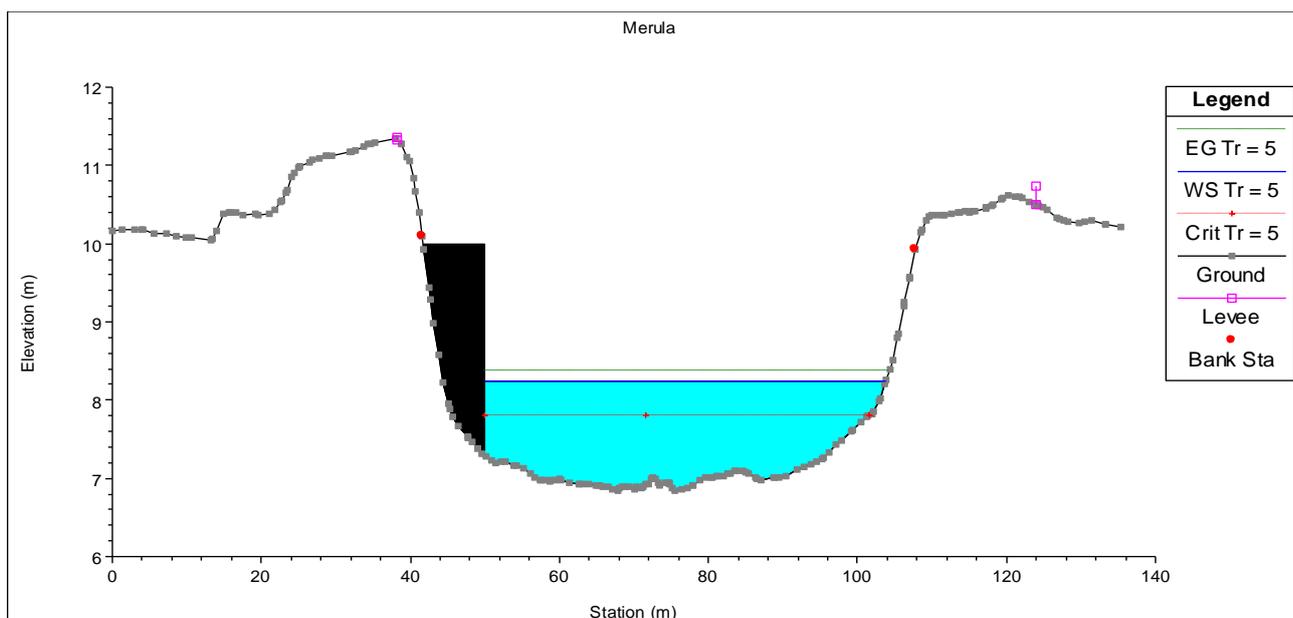


Figura 22: Torrente Merula, realizzazione di pila e spalle del VI08: fase 1

Di seguito, i risultati ottenuti (in termini di livelli) relativi alla fase 1.



 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

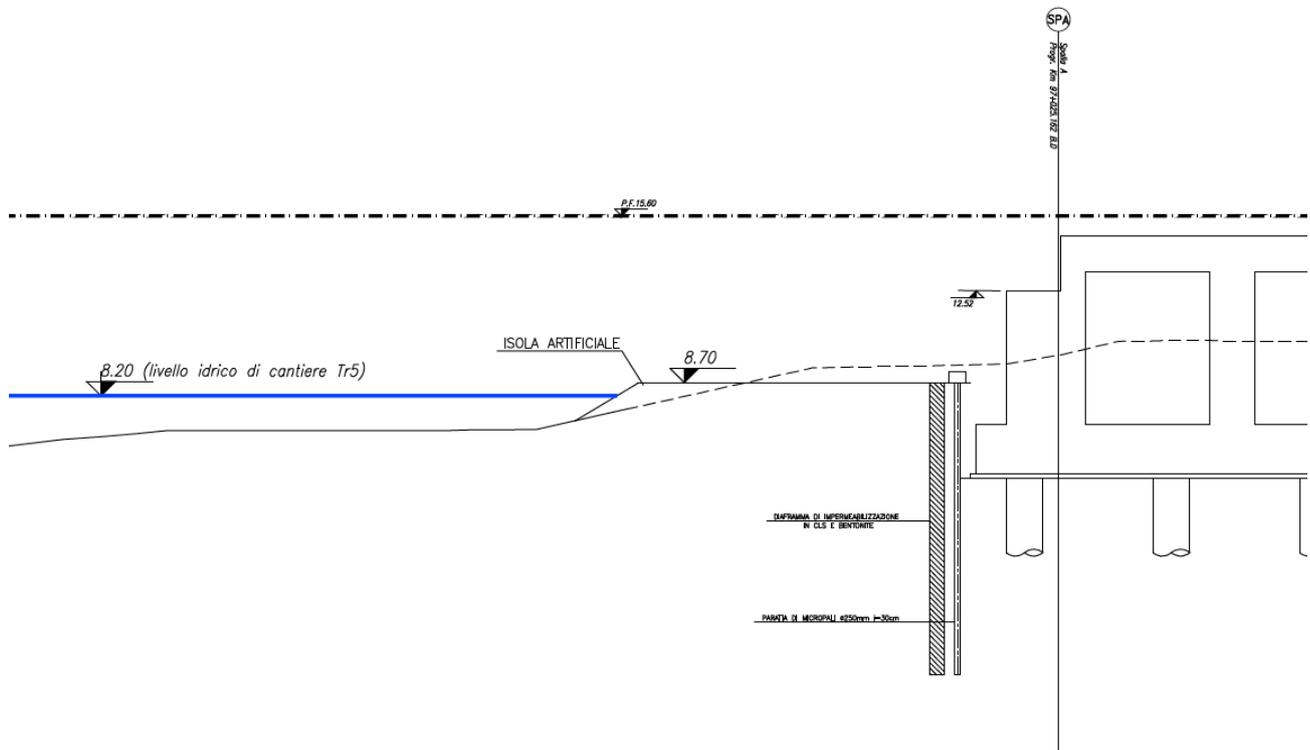


Figura 23: VI08, livelli idrici Fase 1

Il livello massimo a monte dell'opera si attesta a +8.20 m slm; la sommità del rilevato provvisorio sulla sponda sinistra si attesta a 8.70 m slm.

Fase 2 – realizzazione della pila

- costruzione del rilevato provvisorio sulla sponda in destra idraulica per la realizzazione del piano di lavoro
- posa di 3 tubi ARMCO circolari di diametro 1.5 m per favorire il deflusso al di sotto del piano di lavoro
- realizzazione delle opere provvisionali (paratia di pali)
- costruzione dell'opera di fondazione
- costruzione della pila

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

- rimozione delle opere provvisorie (rilevato in alveo e paratia di pali)
- posa in opera degli interventi di sistemazione/protezione idraulica previsti attorno alla pila/plinto di fondazione

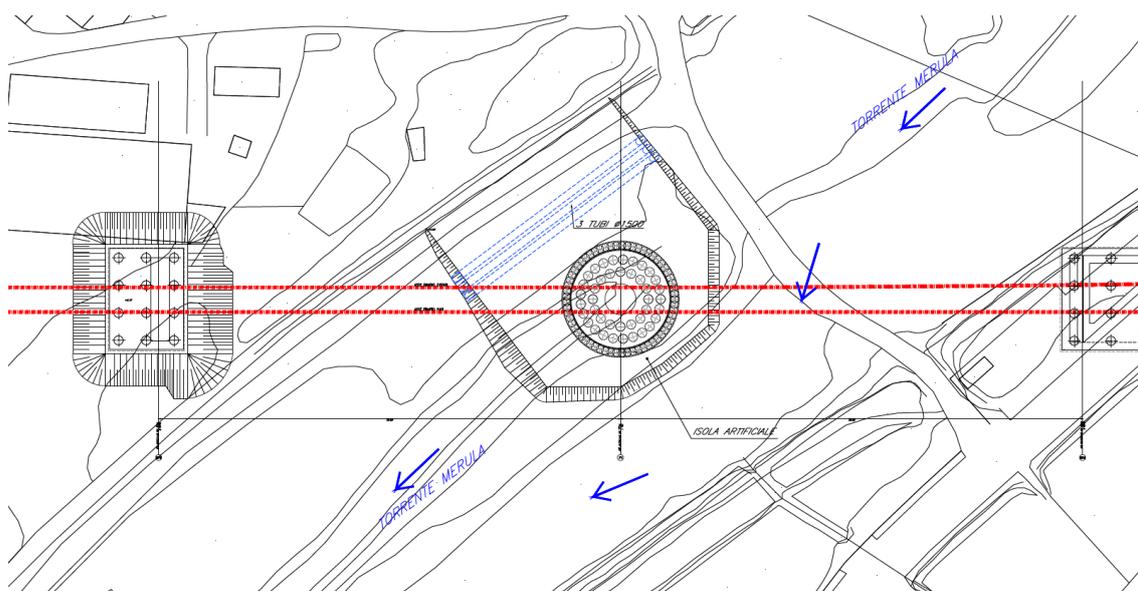
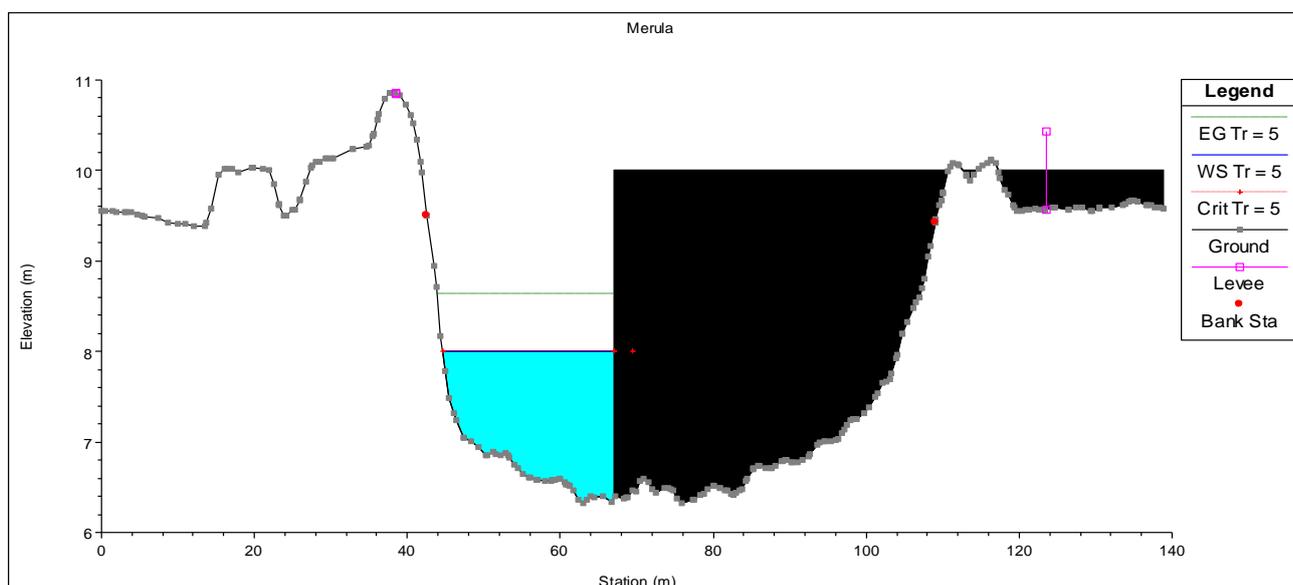


Figura 24: Torrente Merula, realizzazione di pila e spalle del VI08: fase 2

Di seguito, i risultati ottenuti (in termini di livelli attesi nella sezione lungo l'asse di tracciato) relativi alla fase 2.



 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV0I	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

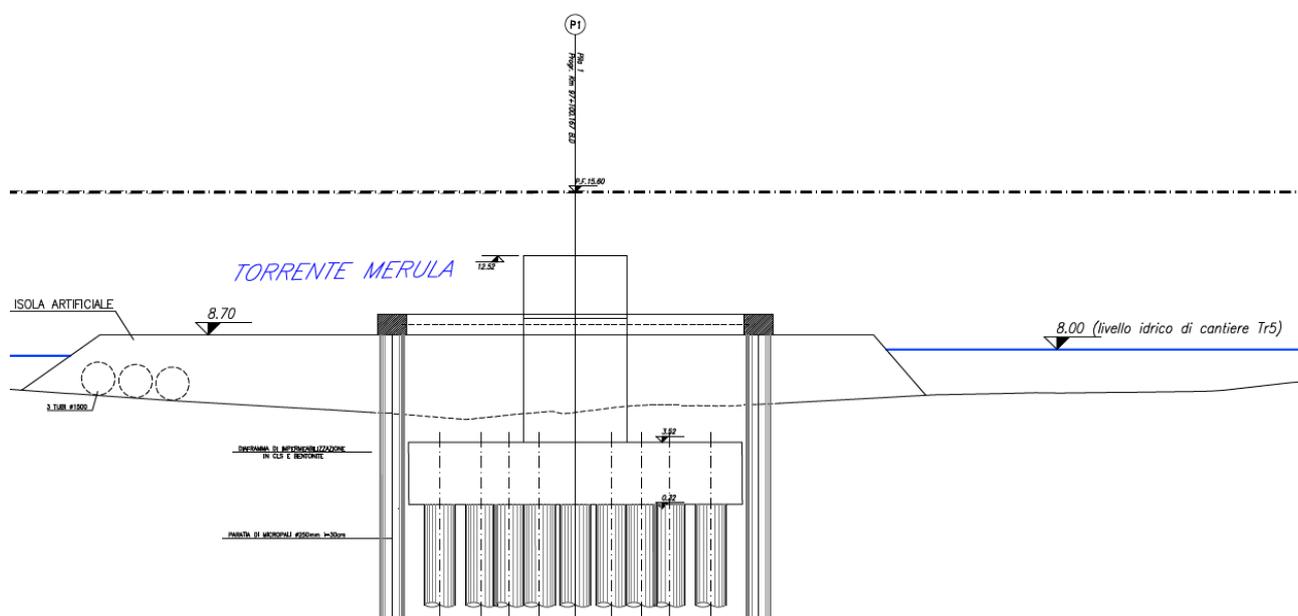


Figura 25: VI08, livelli idrici Fase 2

Il livello massimo a monte dell'opera si attesta a +8.00 m slm; la sommità del rilevato provvisorio sulla sponda destra si attesta a +8.70 m slm.

Infine, in generale, l'esecuzione delle attività lavorative dovrà avvenire durante il periodo estivo o comunque nei periodi di magra del Torrente Merula. Dovrà essere inoltre predisposto un sistema di allerta/allarme, sotto il coordinamento della Protezione Civile, per la necessaria interruzione preventiva delle lavorazioni, in caso di piena del corso d'acqua (rif. IV0I00D09PZID0002011A).

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

8 EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SULLE OPERE IN PROGETTO

Con riferimento allo studio idrologico annesso (rif. “IV0100D09RIID0001001”), ed in particolare ai dati di pioggia registrati presso le stazioni pluviometriche di riferimento, per effetto dei cambiamenti climatici nel periodo 2061-2090 si prevede (sulla base dell’elaborazione dei risultati dei modelli meteo-climatici sviluppati dall’IPCC) un incremento massimo delle precipitazioni, e quindi delle portate al colmo compreso tra il 9,2% e il 12,9%.

Applicando tali incrementi alla portata di progetto del T. Merula, ad oggi stimata per il $Tr = 200$ anni in 462 mc/s, si ottiene un valore della portata di progetto Tr_{200} proiettata nel periodo 2061-2090 pari a 522 mc/s circa, che è prossimo alla portata ad oggi stimata per il $Tr = 500$ anni (i.e. 547 mc/s).

Di seguito, si riportano inoltre i valori di livello idrico e franco idraulico relativo allo scenario $Tr = 500$ anni (di progetto al 2090), in corrispondenza del viadotto VI08 in progetto sul T. Merula, sopra analizzato.

	Quota minima impalcato [m slm]	Livello di piena Tr 500 [m slm]	Franco sul livello idrico Tr 500 [m]
VI08	+13.09	+10.18	+2.91

Sulla base delle proiezioni climatiche ad oggi disponibili, le opere previste in progetto garantirebbero comunque (al 2090) il passaggio a pelo libero di eventuali “portate incrementate” per effetto dei cambiamenti climatici, anche con un franco superiore a quello minimo (1.5 m), previsto dalle NTC 2018.

	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B

9 COMPATIBILITA' IDRAULICA DELLE OPERE IN PROGETTO

La modellazione numerica del T. Merula elaborata nell'ambito del presente studio ha permesso di fornire una valutazione dell'interferenza dell'opera di attraversamento in progetto con il corso d'acqua suddetto, interessato da nuove opere civili nell'ambito della progettazione definitiva del *“Raddoppio della Linea ferroviaria Genova-Ventimiglia, Tratta Finale Ligure - Andora”*.

Le verifiche idrauliche sono state condotte sulla base dei risultati ottenuti dalla modellazione numerica del tratto fluviale interessato dagli interventi. Le simulazioni numeriche sono state eseguite utilizzando il programma di calcolo HEC-RAS e sono state condotte sulla base delle portate di riferimento relative ai tempi di ritorno di 50, 200 e 500 anni.

La configurazione di progetto è costituita dal nuovo viadotto ferroviario VI08 sul T. Merula nonché dalla realizzazione delle opere connesse alla realizzazione della nuova stazione ferroviaria di Andora oltre che dalle opere di sistemazione/protezione idraulica in alveo, in corrispondenza della pila centrale del nuovo viadotto.

Dai risultati della modellazione bidimensionale (dello stato *“post operam”*) emerge come gli interventi in progetto non alterino le attuali condizioni di deflusso, né in termini di livelli idrici né di aree potenzialmente inondabili.

La verifica idraulica delle nuove opere di attraversamento ha evidenziato come la portata di piena di progetto, con tempo di ritorno pari a 200 anni, riesce a transitare in sicurezza al di sotto del ponte/viadotto in progetto, con franchi idraulici superiori ai valori minimi stabiliti nelle normative vigenti. Con riferimento alla pianificazione di bacino vigente, per il corso d'acqua in esame l'Autorità di Bacino prevede, nella zona di studio, la fascia di inondabilità denominata A (aree periferiali, inondabili al verificarsi dell'evento di piena con portata al colmo di piena corrispondente a periodo di ritorno T=50 anni). Nel testo integrato della normativa-tipo dei piani di bacino stralcio per la tutela dal rischio idrogeologico ex all. 2 DGR 357/01 e ss.mm all'Art. 15 *“Fasce di inondabilità”* è riportato:

“Nella fascia A...omissis...sono consentiti:...omissis...”

c) la realizzazione di nuove infrastrutture non inquadrabili tra le opere di attraversamento, fatti salvi gli interventi necessari ai fini della tutela della pubblica incolumità e quelli relativi a nuove infrastrutture pubbliche connesse alla mobilità, previo parere favorevole della Provincia, purchè progettate sulla base di

	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Merula	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 004	REV. B	FOGLIO 59 di 59

uno specifico studio di Compatibilità idraulica, non aumentino le condizioni di Rischio e risultino assunte le azioni e le misure di protezione civile di cui al presente Piano e ai piani comunali di protezione civile ...omissis...” Dopo l’intervento sull’alveo previsto in questo progetto, la fascia di inondabilità per le nuove strutture progettate si riduce da fascia A a fascia C (aree perifluviali esterne alle precedenti A e B, inondabili al verificarsi dell’evento di piena con portata al colmo di piena corrispondente a periodo di ritorno $Tr=500$ anni), per la quale al punto 4 del succitato Art. 15 è riportato: “Nella fascia C è consentito ogni tipo di intervento purchè realizzato con tipologie costruttive finalizzate alla riduzione della vulnerabilità delle opere e, quindi, del rischio per la pubblica incolumità...omissis...”

Riassumendo, gli interventi previsti:

- comprendono infrastrutture pubbliche a servizio della mobilità;
- non aumentano le condizioni di rischio, in quanto il nuovo attraversamento VI08 sul T. Merula e le altre opere connesse alla realizzazione della nuova stazione di Andora non alterano le attuali condizioni di deflusso;
- in corrispondenza del nuovo attraversamento in progetto i franchi idraulici risultano soddisfatti;
- non modificano le condizioni di deflusso idrico e solido nel tratto oggetto di studio.

Pertanto, le opere previste in progetto si possono definire idraulicamente compatibili.