

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



## S.O. IDRAULICA E IDROLOGIA

### PROGETTO DEFINITIVO

### RADDOPPIO DELLA LINEA GENOVA – VENTIMIGLIA

### TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA

### IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice

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 1 C

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	D. Polverelli	Nov.2021	C. Cesali	Nov.2021	G. Fadda	Nov.2021	F. Cabas Giugno 2024
B	Emissione esecutiva	D. Polverelli	Gen. 2022	C. Cesali	Gen. 2022	G.Fadda	Gen. 2022	ITALFERR S.p.A. Iscrizione all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma al n. 15744 Ing. Fabrizio Cabas
C	Emissione esecutiva	M. Angione	Giugno 2024	C. Cesali	Giugno 2024	M. Fippo	Giugno 2024	

File: IV0I00D09RIID0002001C.doc

n. Elab.:

 <b>ITALFERR</b> <small>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</small>	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C	<b>FOGLIO</b> 2 di 69

## INDICE

1	PREMESSA .....	5
1.1	RIFERIMENTI NORMATIVI.....	6
2	INQUADRAMENTO GENERALE E OBIETTIVI DELLO STUDIO .....	13
2.1	OBIETTIVI DELLO STUDIO.....	13
2.2	ELENCO ELABORATI DI PROGETTO DI RIFERIMENTO.....	14
3	STUDIO IDRAULICO.....	16
3.1	GENERALITÀ .....	16
3.2	DATI DI BASE .....	16
3.2.1	DATI TOPOGRAFICI.....	16
3.2.2	DATI IDROLOGICO-IDRAULICI .....	17
3.3	IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO NUMERICO .....	22
3.3.1	APPROCCIO MATEMATICO (2D).....	22
3.3.2	GENERAZIONE DEL MODELLO DIGITALE DEL TERRENO.....	26
3.3.3	DEFINIZIONE DEL DOMINIO E DELLA GRIGLIA DI CALCOLO .....	28
3.3.4	STRUTTURE IDRAULICHE ALL'INTERNO DEL MODELLO 2D .....	31
3.3.5	CONDIZIONI AL CONTORNO .....	33
3.3.6	CALIBRAZIONE.....	35
3.4	RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE .....	36
3.4.1	SCENARIO "ANTE OPERAM" .....	37
3.4.2	SCENARIO "POST OPERAM" .....	40
4	VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO DI PROGETTO .....	51
5	VERIFICA ALLO SCALZAMENTO.....	53
6	OPERE DI SISTEMAZIONE IDRAULICA.....	59
7	VERIFICA DELLE FASI DI REALIZZAZIONE DI OPERE IN ALVEO.....	60
8	EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SULLE OPERE IN PROGETTO .....	66
9	COMPATIBILITÀ IDRAULICA DELLE OPERE IN PROGETTO .....	67

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

## 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 MAREMOLA ALL’INTERSEZIONE CON LA FERROVIA IN PROGETTO PER Tr 50, 200 E 500 ANNI .....	19
FIGURA 4: IDROGRAMMA DI PIENA DEL TORRENTE GIUSTENICEALL’INTERSEZIONE CON LA FERROVIA PER Tr 50,200 E 500 ANNI .....	19
FIGURA 5: ESTRATTO DELLE MAPPE DELLE AREE DI PERICOLOSITÀ IDRAULICA DEI TORRENTI MAREMOLA E GIUSTENICE IN QUEL DI PIETRA LIGURE (FONTE: PIANO DI GESTIONE DEL RISCHIO ALLUVIONI, AUTORITÀ DI BACINO DISTRETTUALE DELL’APPENNINO SETTENTRIONALE).....	21
FIGURA 6 – SOFTWARE HEC RAS 6.0: SISTEMA DI RIFERIMENTO. ....	24
FIGURA 7 – 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. ....	26
FIGURA 8: ESTRATTO DEL DTM OTTENUTO INTEGRANDO IL DTM ORIGINARIO CON LE SEZIONI TRASVERSALI; IL RIQUADRO DI DETTAGLIO MOSTRA IL PASSAGGIO AL TRATTO INTERPOLATO .....	27
FIGURA 9: ESTENSIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO.....	28
FIGURA 10: DOMINIO DI CALCOLO E POSIZIONE DEI RILEVATI UTILIZZATI PER LA DEFINIZIONE DELLA MESH.....	29
FIGURA 11: DETTAGLIO DELLA MESHALLA CONFLUENZA TRA MAREMOLA E GIUSTENICE .....	30
FIGURA 12: ESEMPIO DI DEM A SINISTRA ESTRAZIONE DEI PROFILI LUNGO I CONFINI DELLE CELLE, A DESTRA CURVA LIVELLO-VOLUME INVASATO .....	31
FIGURA 13: STRUTTURE IDRAULICHE INSERITE ALL’INTERNO DEL MODELLO.....	32
FIGURA 14: SCHEMATIZZAZIONE DELL’ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO ESISTENTE SUL TORRENTE MAREMOLA.....	32
FIGURA 15: SCHEMATIZZAZIONE DEI MURETTI LUNGO IL TORRENTE MAREMOLA E DELL’ATTRAVERSAMENTO A MONTE DELLO SBOCCO IN MARE MEDIANTE LA DEFINIZIONE DELL’INGOMBRO DELLE PILE E DEI SETTI IN ALVEO .....	33
FIGURA 16: CONDIZIONI AL CONTORNO IMPOSTE AL MODELLO.....	34
FIGURA 17: CONFRONTO TRA GLI ALLAGAMENTI OTTENUTI CON IL MODELLO 2D E QUELLI DEFINITI NEL PGRA. PER IL TORRENTE MAREMOLA E GIUSTENICE .....	35
FIGURA 18: MODELLO NUMERICO 2D, T. MAREMOLA E GIUSTENICE: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, ANTE OPERAM, Tr = 50 ANNI. ....	37
FIGURA 19: MODELLO NUMERICO 2D, T. MAREMOLA E GIUSTENICE: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, ANTE OPERAM, Tr = 200 ANNI. ...	38
FIGURA 20: MODELLO NUMERICO 2D, T. MAREMOLA E GIUSTENICE: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, ANTE OPERAM, Tr = 500 ANNI. ...	39
FIGURA 21: STRALCIO DELLA PLANIMETRIA DI PROGETTO IN QUEL DI PIETRA LIGURE. ....	41
FIGURA 22: STRALCIO DEL PROFILO DI PROGETTO, VIO2: BINARIO DISPARI.....	41
FIGURA 23: STRALCIO DEL PROFILO DI PROGETTO, VIO2: BINARIO PARI. ....	42
FIGURA 24: MODELLO NUMERICO 2D, T. MAREMOLA E GIUSTENICE: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, POST OPERAM, Tr = 50 ANNI. ....	43
FIGURA 25: MODELLO NUMERICO 2D, T. MAREMOLA E GIUSTENICE: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, POST OPERAM, Tr = 200 ANNI. ..	44
FIGURA 26: MODELLO NUMERICO 2D, T. MAREMOLA E GIUSTENICE: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, POST OPERAM, Tr = 500 ANNI. ..	45

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

FIGURA 27: MODELLO NUMERICO 2D, T. MAREMOLA E GIUSTENICE: CONFRONTO IN TERMINI DI AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, ANTE OPERAM (A SINISTRA) VS POST OPERAM (A DESTRA), Tr = 50 ANNI. ....	46
FIGURA 28: MODELLO NUMERICO 2D, T. MAREMOLA E GIUSTENICE: CONFRONTO IN TERMINI DI AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, ANTE OPERAM (A SINISTRA) VS POST OPERAM (A DESTRA), Tr = 200 ANNI. ....	47
FIGURA 29: MODELLO NUMERICO 2D, T. MAREMOLA E GIUSTENICE: CONFRONTO IN TERMINI DI AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, ANTE OPERAM (A SINISTRA) VS POST OPERAM (A DESTRA), Tr = 500 ANNI. ....	47
FIGURA 30: MODELLO NUMERICO 2D, T. MAREMOLA E GIUSTENICE: CONFRONTO IN TERMINI DI LIVELLI IDRICI IN CORRISPONDENZA DI ALCUNE SEZIONI VALLIVE, (SDF = ANTE OPERAM VS SDP = POST OPERAM), 1 DI 3. ....	48
FIGURA 31: MODELLO NUMERICO 2D, T. MAREMOLA E GIUSTENICE: CONFRONTO IN TERMINI DI LIVELLI IDRICI IN CORRISPONDENZA DI ALCUNE SEZIONI VALLIVE, (SDF = ANTE OPERAM VS SDP = POST OPERAM), 2 DI 3. ....	49
FIGURA 32: MODELLO NUMERICO 2D, T. MAREMOLA E GIUSTENICE: CONFRONTO IN TERMINI DI LIVELLI IDRICI IN CORRISPONDENZA DI ALCUNE SEZIONI VALLIVE, (SDF = ANTE OPERAM VS SDP = POST OPERAM), 3 DI 3. ....	50
FIGURA 33: DIFFERENTI TIPOLOGIE DI PILE NON UNIFORMI DOTATE DI FONDAZIONI. ....	56
FIGURA 34: 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.....	62
FIGURA 35: LIVELLI IDRICI - VI02 SUL T. MAREMOLA .....	64
FIGURA 36: LIVELLI IDRICI - VI02 SUL T. GIUSTENICE.....	64
FIGURA 37: LIVELLI IDRICI – IV01 SUL T. GIUSTENICE .....	65
FIGURA 38: LIVELLI IDRICI – IV01 SUL T. GIUSTENICE .....	65

## 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 .....	36
TABELLA 4: LIVELLI MASSIMI IN PROSSIMITÀ DELL'ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO PER TEMPO DI RITORNO.....	40
TABELLA 5 – VIADOTTO VI02 (TORRENTE MAREMOLA): VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO DI PROGETTO.....	51
TABELLA 6 – VIADOTTO VI02 (TORRENTE GIUSTENICE): VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO DI PROGETTO. ....	51
TABELLA 7 – PONTE IV01 (TORRENTE GIUSTENICE): VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO DI PROGETTO. ....	51
TABELLA 8 – PONTE IV02 (TORRENTE GIUSTENICE): VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO DI PROGETTO. ....	51
TABELLA 9- FORMULAZIONE CSU: VALORI DEI FATTORI CORRETTIVI K1, K2, K3.....	53
TABELLA 10- VIADOTTO VI02 (TORRENTE MAREMOLA): VALORI DI SCALZAMENTO ATTESI ATTORNO ALLE PILE, PER Tr200. ....	57
TABELLA 11- VIADOTTO VI02 (TORRENTE MAREMOLA): VALORI DI SCALZAMENTO ATTESI ATTORNO AL SISTEMA “PILA-FONDAZIONE”, PER Tr200. ....	57

	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C	<b>FOGLIO</b> 5 di 69

## 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 Pietra Ligure, la nuova linea ferroviaria attraversa i torrenti Maremola e Giustenice poco prima della loro confluenza. Inoltre, in tale area è prevista la realizzazione della nuova fermata di Pietra Ligure e di una sottostazione elettrica.

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 i torrenti Maremola e Giustenice e la linea ferroviaria in progetto nel suo complesso.

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C	<b>FOGLIO</b> 6 di 69

## 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 i torrenti Maremola e Giustenice, vengono presi in esame nel Piano di bacino stralcio per l'assetto idrogeologico per il bacino del Torrente Maremola, 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. 7664 del 25/06/2018.

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);

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

- 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:

- 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;

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C	<b>FOGLIO</b> 8 di 69

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



 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C	<b>FOGLIO</b> 9 di 69

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

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C	<b>FOGLIO</b> 10 di 69

- 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, macro-resistenze 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 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.*

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

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 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,

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

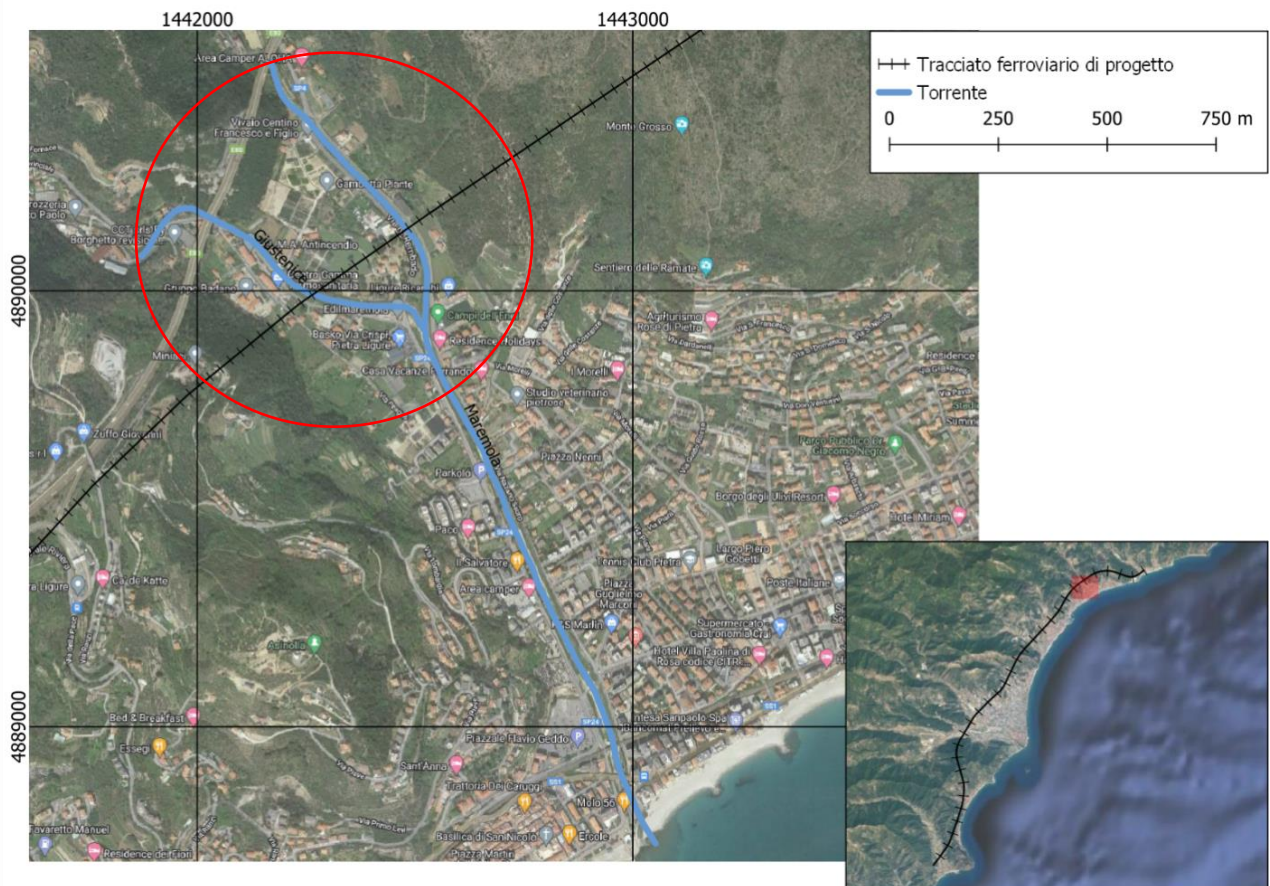
*sempre misurata in senso parallelo alla corrente, tra il lembo più a monte e quello più a valle dell'opera stessa. Nel caso di ponti ad arco o comunque con intradosso non rettilineo, il valore del franco deve essere assicurato per almeno 2/3 della luce e comunque per almeno 40 m, nel caso di luci superiori a tale valore.*

<b>Franco idraulico:            valore maggiore tra (a) e (b)</b>			
		<b>Reticolo            principale e            secondario</b>	<b>Reticolo minore</b>
<b>(a)</b>		<b><math>U^2/2g,</math></b>	<b><math>0,5 U^2/2g,</math></b>
<b>(b)</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 tombature (ove ammesse), ponti e strutture di attraversamento di estensione oltre m. 12	cm. 150/200	cm 100

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IVOI	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

## 2 INQUADRAMENTO GENERALE E OBIETTIVI DELLO STUDIO

La zona di studio è ubicata tra i comuni di Tovo San Giacomo e Pietra Ligure (SV), tra la frazione di Fornaci, poco a monte del viadotto autostradale della A10, e Pietra Ligure, dove il torrente Maremola sfocia in mare. Il torrente Giustenice confluisce nel Torrente Maremola 3.5 km a monte dello sbocco in mare. Entrambi i torrenti sono attraversati da vari ponti, tra cui si citano in prossimità dello sbocco in mare un ponte pedonale, l'attraversamento del tracciato ferroviario esistente, il ponte della SS1 e il ponte di via Matteotti.



**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.*

### 2.1 OBIETTIVI DELLO STUDIO

L'obiettivo principale dello studio è quello di valutare allo stato attuale e nella configurazione “*post operam*” i processi idrodinamici che caratterizzano gli eventi estremi relativi ai torrenti Maremola e Giustenice, in particolare all'intersezione con la linea ferroviaria in progetto.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV0I	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C


Nello specifico, lo studio articolato secondo le seguenti attività principali:

- 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 della configurazione di progetto.

è finalizzato alla verifica di compatibilità idraulica delle opere previste progetto e in generale dell'infrastruttura ferroviaria nel suo complesso, in quel di Pietra Ligure.

## 2.2 ELENCO ELABORATI DI PROGETTO DI RIFERIMENTO

ELABORATO	SCALA	CODIFICA
Relazione idrologica generale	-	IV0I00D09RIID0001001
Planimetria livelli idrici Torrenti Maremola e Giustenice - Modello 2D - ante operam - Tr 50 anni	1:2000	IV0I00D09P7ID0002001
Planimetria livelli idrici Torrenti Maremola e Giustenice - Modello 2D - ante operam - Tr 200 anni	1:2000	IV0I00D09P7ID0002002
Planimetria livelli idrici Torrenti Maremola e Giustenice - Modello 2D - ante operam - Tr 500 anni	1:2000	IV0I00D09P7ID0002003
Planimetria livelli idrici Torrenti Maremola e Giustenice - Modello 2D - post operam - Tr 50 anni	1:2000	IV0I00D09P7ID0002004
Planimetria livelli idrici Torrenti Maremola e Giustenice - Modello 2D - post operam - Tr 200 anni	1:2000	IV0I00D09P7ID0002005
Planimetria livelli idrici Torrenti Maremola e Giustenice - Modello 2D - post operam - Tr 500 anni	1:2000	IV0I00D09P7ID0002006
Planimetria valori velocità Torrenti Maremola e Giustenice - Modello 2D - ante operam - Tr 200 anni	1:2000	IV0I00D09P7ID0002007
Planimetria valori velocità Torrenti Maremola e Giustenice - Modello 2D - post operam - Tr 200 anni	1:2000	IV0I00D09P7ID0002008
Sezioni significative con livelli idrici (Modello 2D) - Tr 50, 200, 500 anni - Maremola e Giustenice - ante operam - Tav. 1 di 2	varie	IV0I00D09WZID0002001
Sezioni significative con livelli idrici (Modello 2D) - Tr 50, 200, 500 anni - Maremola e Giustenice - ante operam - Tav. 2 di 2	varie	IV0I00D09WZID0002002
Sezioni significative con livelli idrici (Modello 2D) - Tr 50, 200,	varie	IV0I00D09WZID0002003

 <b>ITALFERR</b> <small>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</small>	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV0I	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C	<b>FOGLIO</b> 15 di 69

ELABORATO	SCALA	CODIFICA
500 anni - .Maremola e Giustenice - post operam – Tav. 1 di 2		
Sezioni significative con livelli idrici (Modello 2D) - Tr 50, 200, 500 anni - Maremola e Giustenice - post operam – Tav. 2 di 2	varie	IV0I00D09WZID0002004
Profili di rigurgito (Modello 2D) - Tr 50, 200, 500 anni - Torrenti Maremola e Giustenice - ante operam	varie	IV0I00D09FZID0002001
Profili di rigurgito (Modello 2D) - Tr 50, 200, 500 anni - Torrenti Maremola e Giustenice – post operam	varie	IV0I00D09FZID0002002
Planimetria sistemazioni idrauliche – Torrenti Maremola e Giustenice – Pianta e sezioni	varie	IV0I00D09PZID0002001

**Tabella 1 – Elenco elaborati annessi.**

	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV0I	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C	<b>FOGLIO</b> 16 di 69

### 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 fiume 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-RAS<sup>1</sup>(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. Lo scenario analizzato è quello relativo allo stato di fatto.

#### 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;
- Batimetria di dettaglio della Regione Liguria con isobatimetriche ad 1 m.<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup><https://geoportal.regione.liguria.it/catalogo/mappe.html?typeEvent=detailFromSearch&idmap=2114;p-t-a-m-c-c04-sintesi-dei-processi-costieri>



 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV0I	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

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

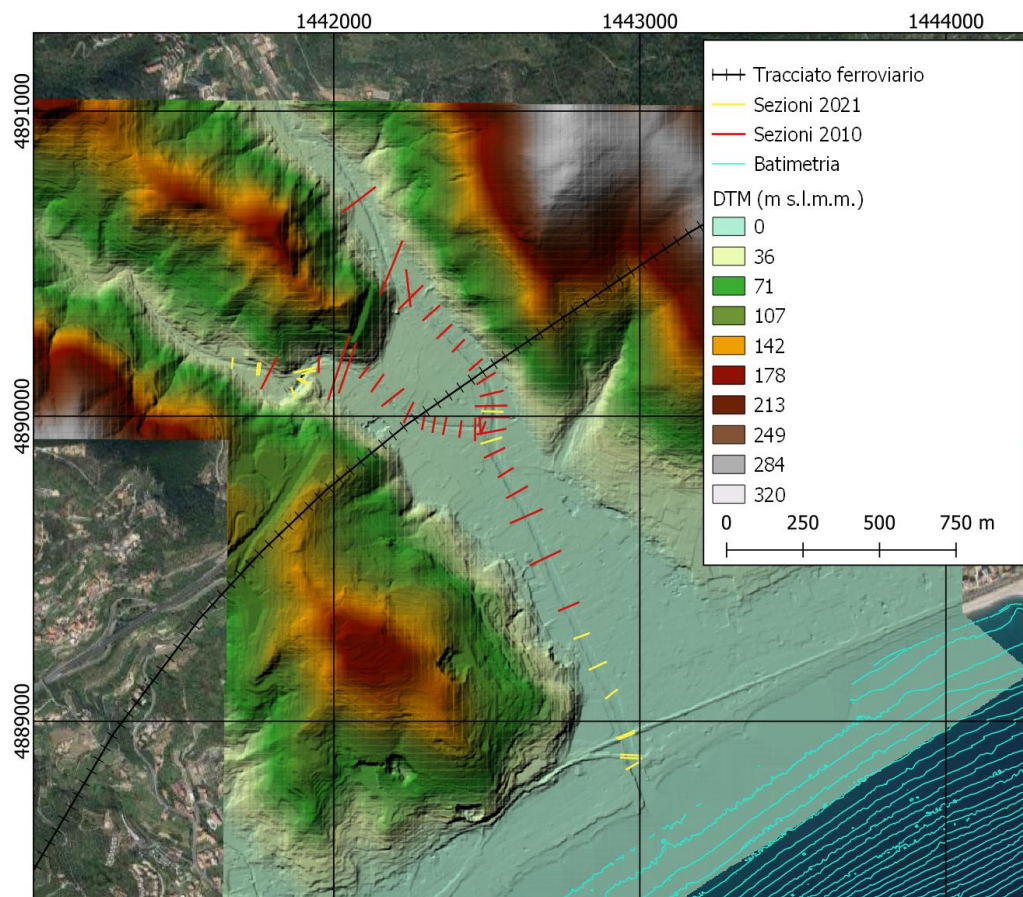


Figura 2: Informazioni topografiche a disposizione

### 3.2.2 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.

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.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice	<b>COMMESSA</b> IV0I	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

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

TEMPO DI RITORNO	VALORE AL COLMO (m <sup>3</sup> /s)
<b>Torrente Maremola</b>	
<i>Tr 50</i>	356
<i>Tr 200</i>	498
<i>Tr 500</i>	608
<b>Torrente Giustenice</b>	
<i>Tr 50</i>	122
<i>Tr 200</i>	157
<i>Tr 500</i>	181

Tabella 2 – Valori di picco degli eventi estremi considerati

**PROGETTO DEFINITIVO**

Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 001	C	19 di 69

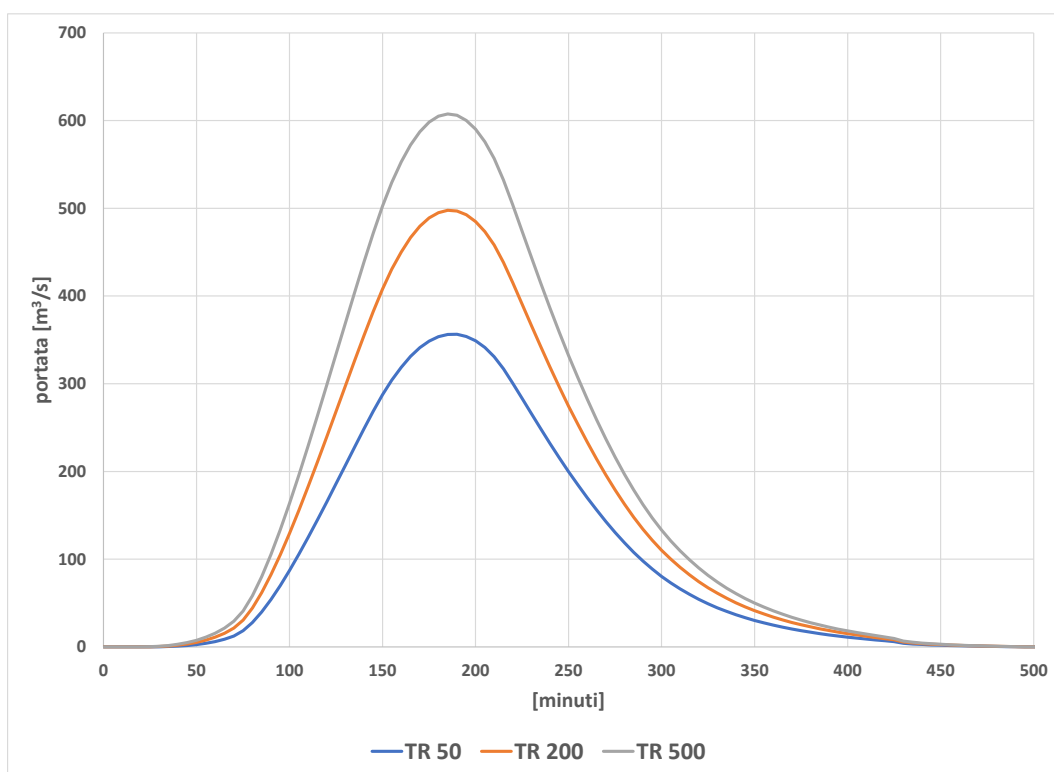


Figura 3: idrogramma di piena del Torrente Maremola all'intersezione con la ferrovia in progetto per Tr 50, 200 e 500 anni

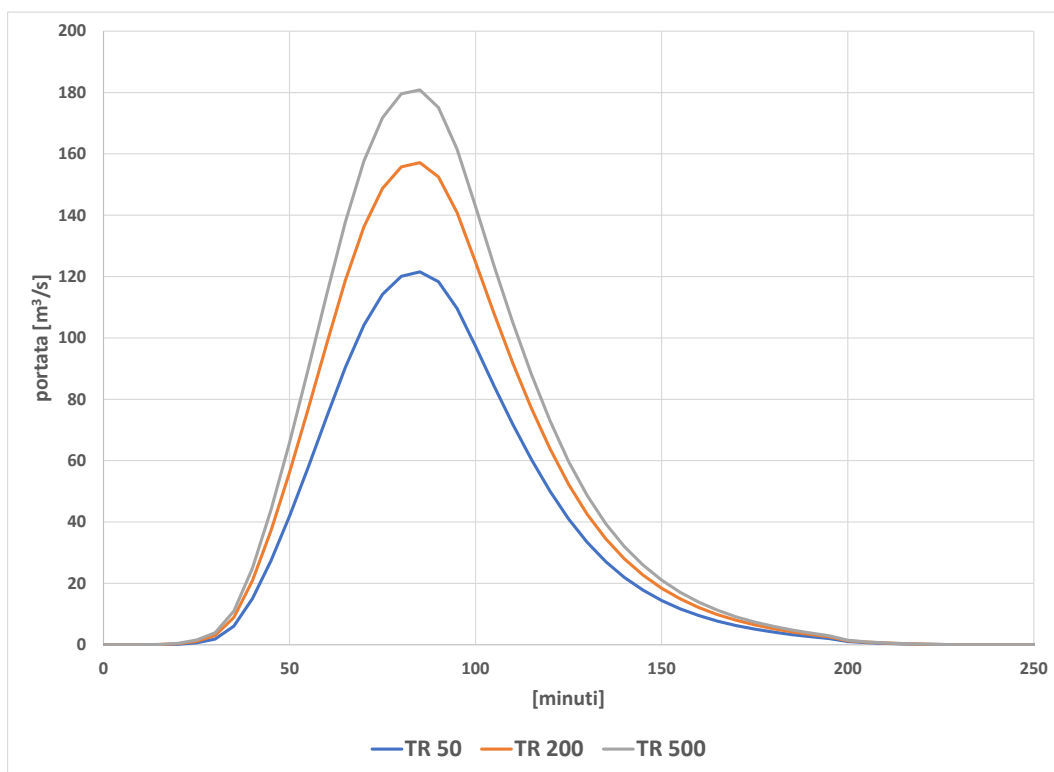


Figura 4: idrogramma di piena del Torrente Giustenice all'intersezione con la ferrovia per Tr 50, 200 e 500 anni

	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

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 possibili inondazione a 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.

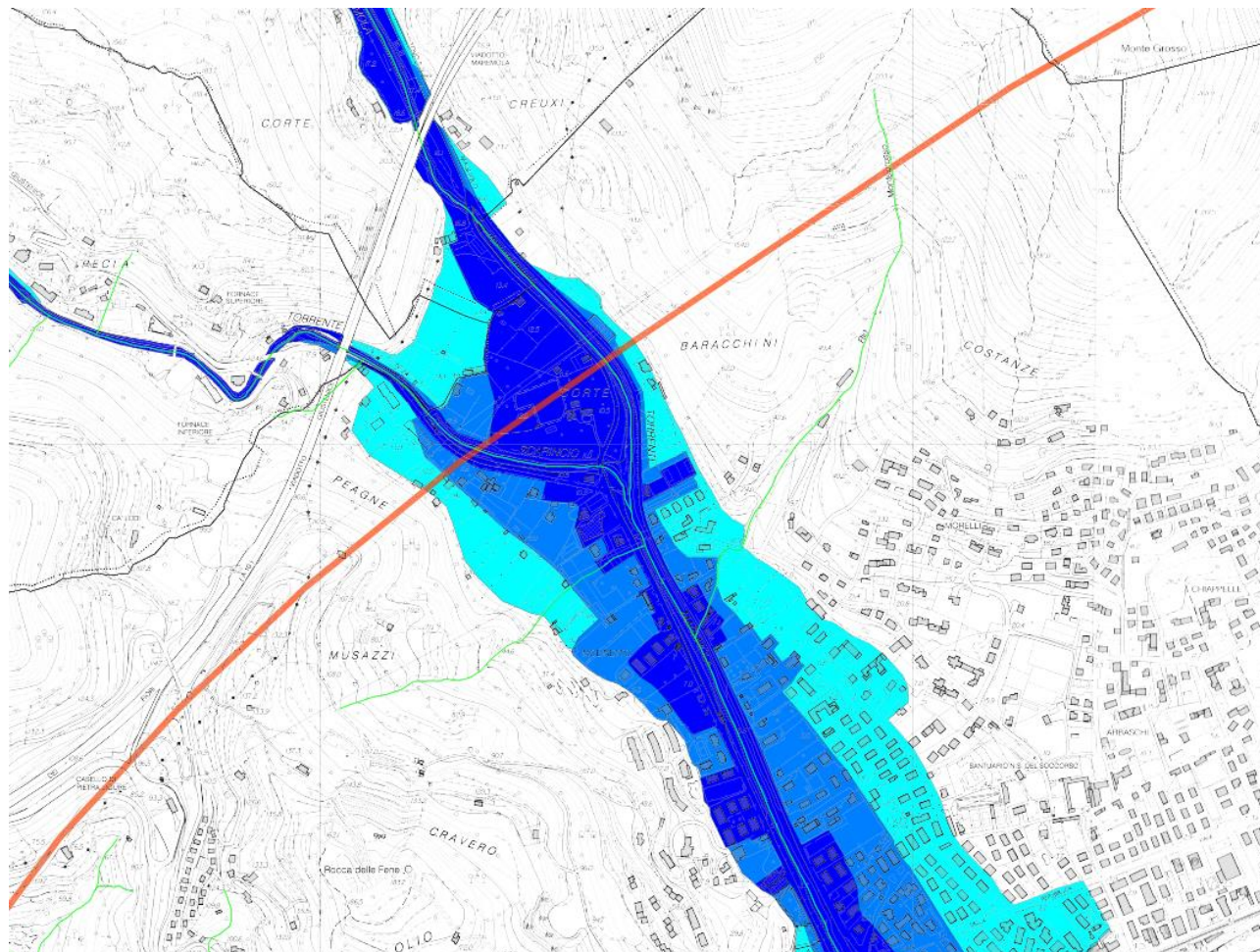
Nella figura seguente, è riportata la sovrapposizione del tracciato di progetto con le aree di pericolosità idraulica riportate nella pianificazione di bacino.

La nuova linea attraversa aree a pericolosità P1, P2, P3, in corrispondenza della confluenza dei Torrenti Maremola e Giustenice.

**PROGETTO DEFINITIVO**




**Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 001	C	21 di 69





**Legenda**


SCENARI DI ALLUVIONE

	Probabilità di alluvioni scarsa (tr. 500)	(L-Rara)
	Probabilità di alluvioni media (tr. 100/200)	(M-Poco frequente)
	Probabilità di alluvioni elevata (tr. 20/50)	(H-Frequente)

*Nota: Mappatura delle aree di Pericolosità idraulica secondo il Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA) relativo al distretto idrografico del Po, di cui all'art. 7 del d.lgs. 49/2010*

	Tracciato di progetto
	Rete idrografica regionale

**Figura 5: Estratto delle mappe delle aree di pericolosità idraulica dei Torrenti Maremola e Giustenice in quel di Pietra Ligure (fonte: Piano di Gestione del Rischio Alluvioni, Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale).**

	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

### 3.3 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO NUMERICO

#### 3.3.1 Approccio matematico (2D)

Il codice di calcolo utilizzato per l'implementazione del modello bidimensionale dei tratti 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 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

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

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 strutturate o non strutturate. 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-elaborata 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 molti 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 (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.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

- 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.

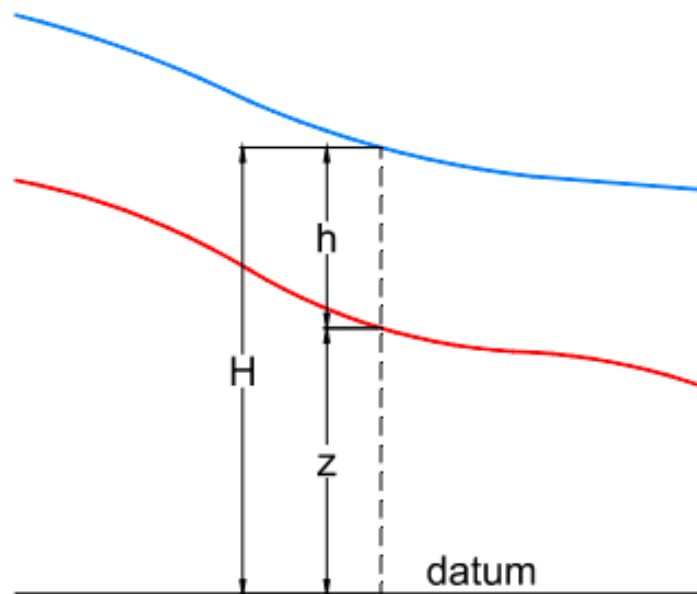


Figura 6 – Software Hec Ras 6.0: sistema di riferimento.


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 incomprimibile, l'equazione differenziale della conservazione della massa (continuità) in moto vario è:

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

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.



 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

**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:

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

in cui oltre ai simboli già illustrati,  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $\nu_t$  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.

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.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice	<b>COMMESSA</b> IV0I	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

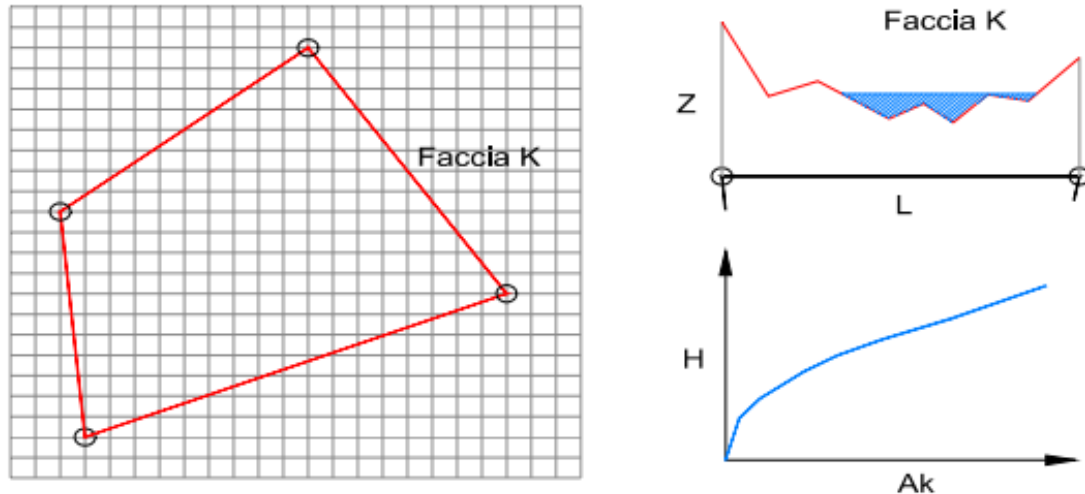



Figura 7 – Software Hec Ras: in grigio il dato della griglia DTM, in rosso la cella di calcolo del modello idraulico. A destra la schematizzazione effettuata da Hec Ras sulle facce del bordo della cella.

### 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. 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, sostanzialmente poche centinaia di metri a monte dello sbocco in mare. Infatti, benchè 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 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.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

Pertanto, a tale scopo è stata effettuata una interpolazione geospaziale delle sezioni rilevate, in ambiente GIS tramite il software XS Interpolator<sup>3</sup>, 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.

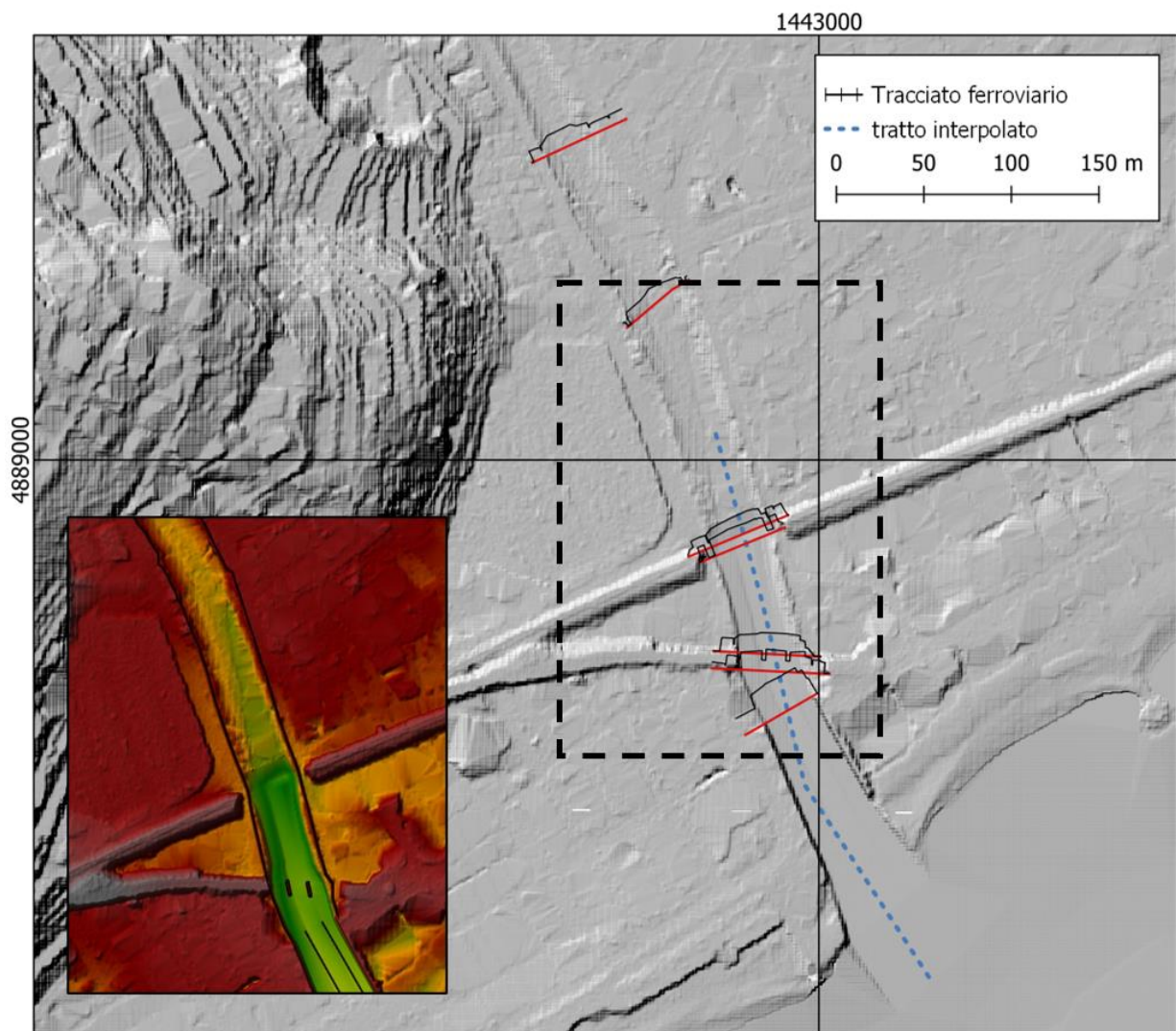



Figura 8: Estratto del DTM ottenuto integrando il DTM originario con le sezioni trasversali; il riquadro di dettaglio mostra il passaggio al tratto interpolato

<sup>3</sup><https://shop.m3eweb.com/home/32-xs-interpolator.html>

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice	<b>COMMESSA</b> IV0I	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

### 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 prendere in esame anche il tratto di fiume a valle della confluenza e chiudere il modello alla foce, considerando anche un tratto di mare prospiciente per schematizzare correttamente la condizione al contorno di valle.

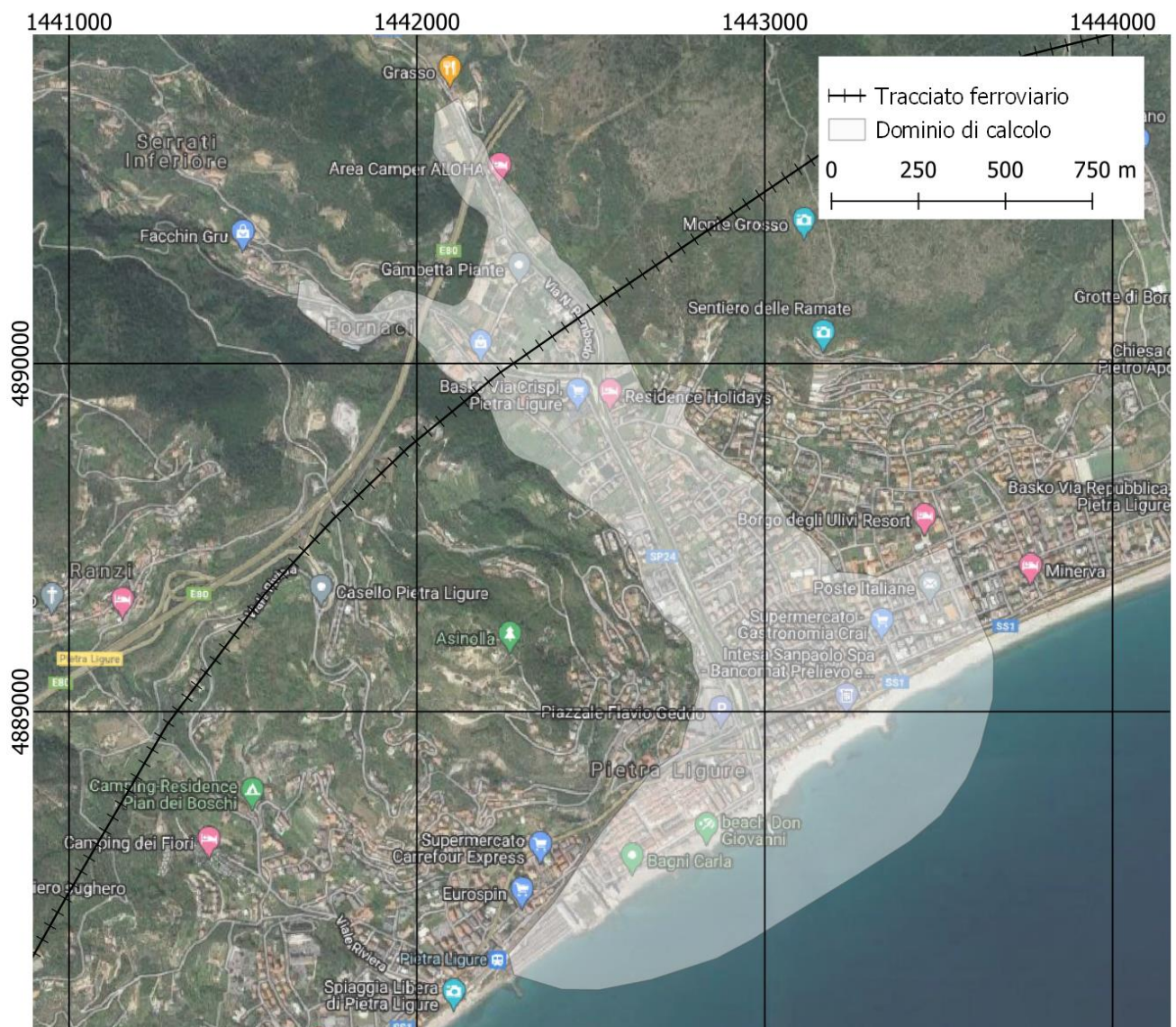


Figura 9: Estensione del dominio di calcolo

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

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

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

L'alveo dei torrenti Maremola e Giustenice è stato interamente schematizzato con griglia a 3 m.

La griglia così definita è costituita da 33'260 celle, di estensione media pari a 46.85 m<sup>2</sup>, con una variazione da 2.98 m<sup>2</sup> a 216.19 m<sup>2</sup>.

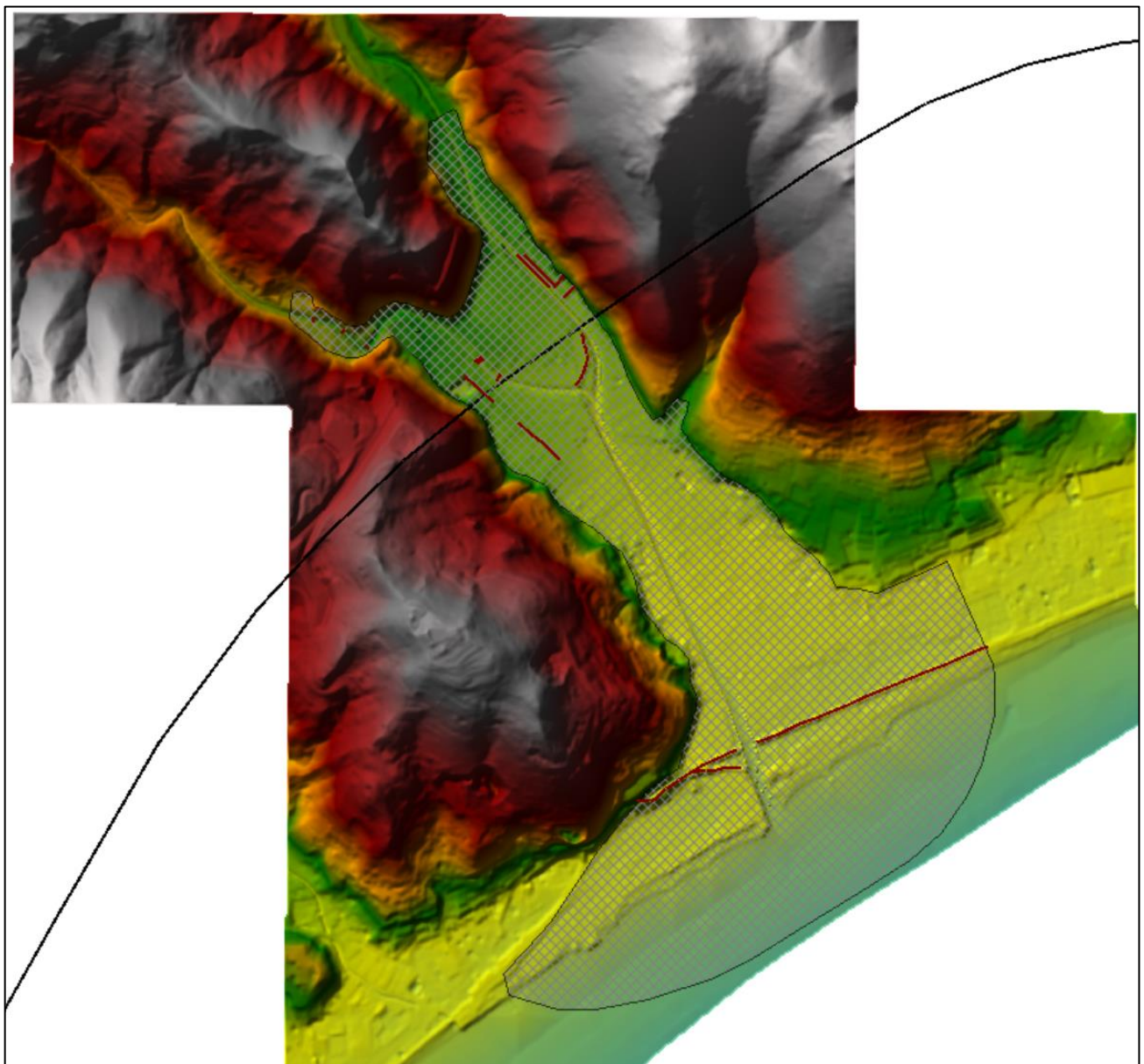


Figura 10: Dominio di calcolo e posizione dei rilevati utilizzati per la definizione della mesh

	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

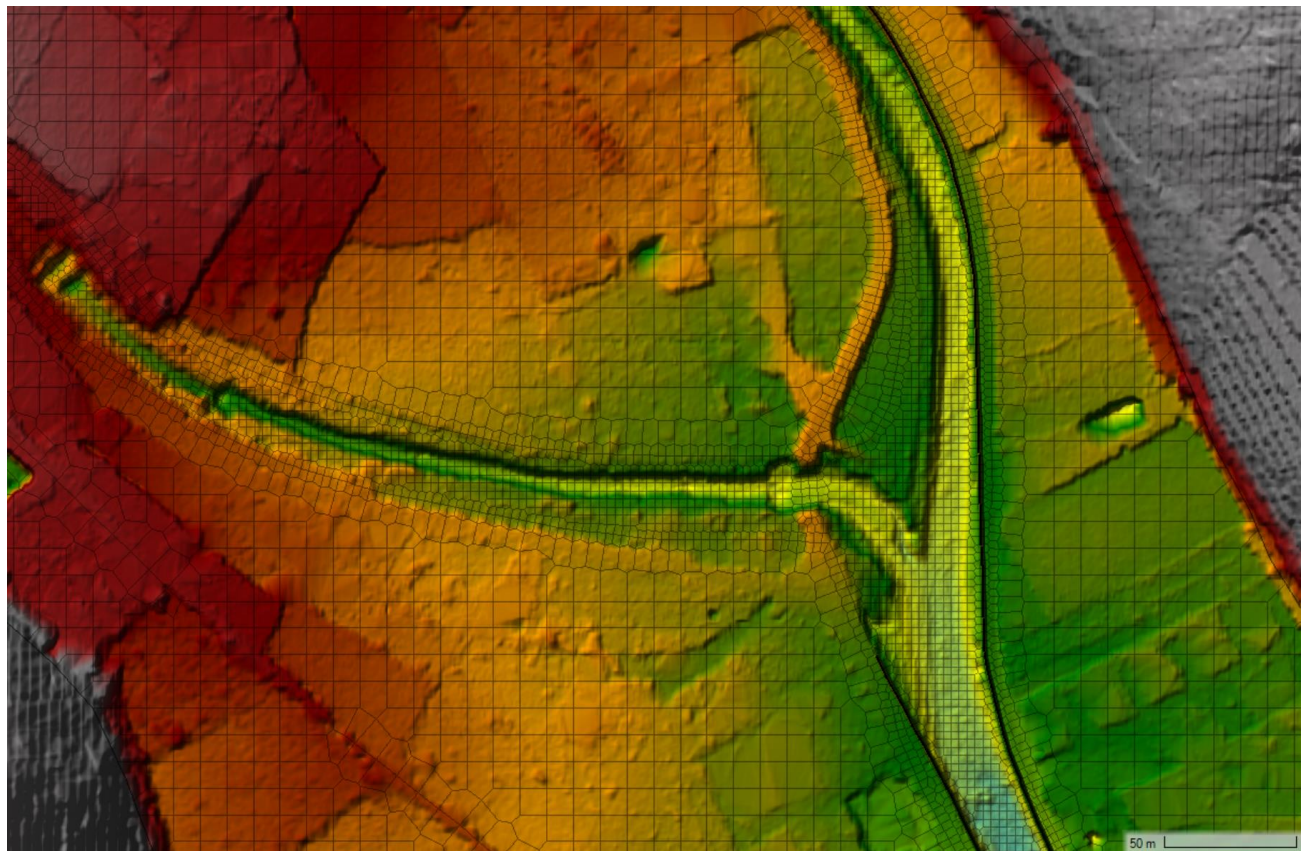


Figura 11: Dettaglio della meshalla confluenza tra Maremola e Giustenice

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. 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.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

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

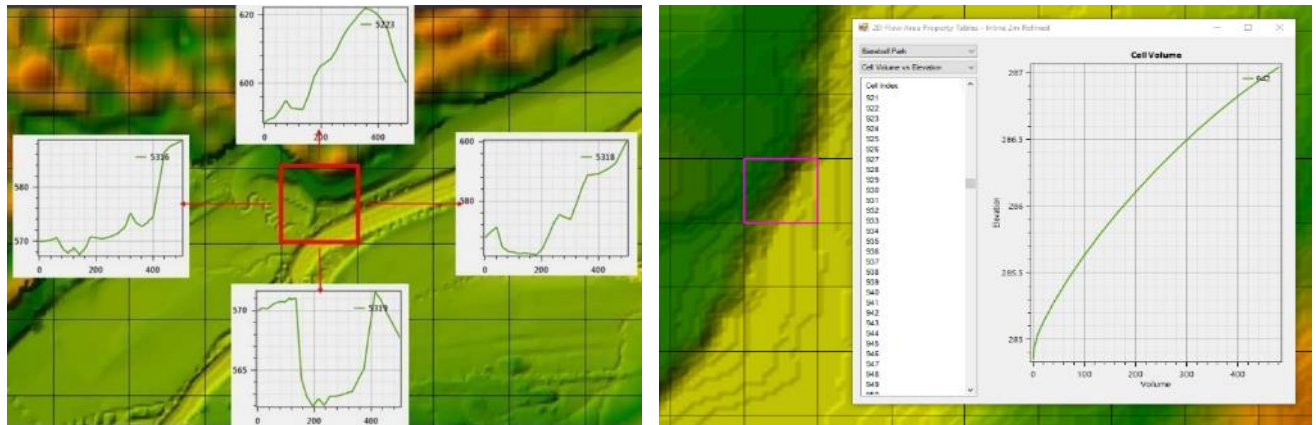


Figura 12: Esempio di DEM a sinistra estrazione dei profili lungo i confini delle celle, a destra curva livello-volume invasato

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.

In aggiunta, sono poi stati inseriti anche i muretti che costeggiano il Torrente Maremola presenti nel dominio di calcolo (in destra dalla confluenza con il Giustenice e in sinistra da monte della confluenza) e che possono influire sulle dinamiche di allagamento; tali rilevati sono stati schematizzati come modifiche locali al DTM inserendoli sulla base delle quote definite nelle sezioni e poi interpolate. Per i ponti per i quali l'impalcato è risultato non interferire con i livelli in gioco, si è scelto di considerare solo l'eventuale ingombro delle pile in alveo, quando presenti, modificando localmente il DTM a rappresentare l'effettiva geometria delle pile; tale approccio è stato applicato al ponte sulla A10 e sull'ultimo attraversamento prima dello sbocco in mare, dove sono stati schematizzati solo i setti a sostegno del parcheggio sovrastante. Le figure seguenti mostrano le posizioni delle strutture, la schematizzazione dell'attraversamento ferroviario esistente all'interno del modello e, a scopo esemplificativo, un estratto della mesh in corrispondenza dell'attraversamento a monte dello sbocco in mare, che mostra l'ingombro delle pile e dei setti implementato nel modello.

**PROGETTO DEFINITIVO**

Relazione idraulica - Studio idraulico  
bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 001	C	32 di 69

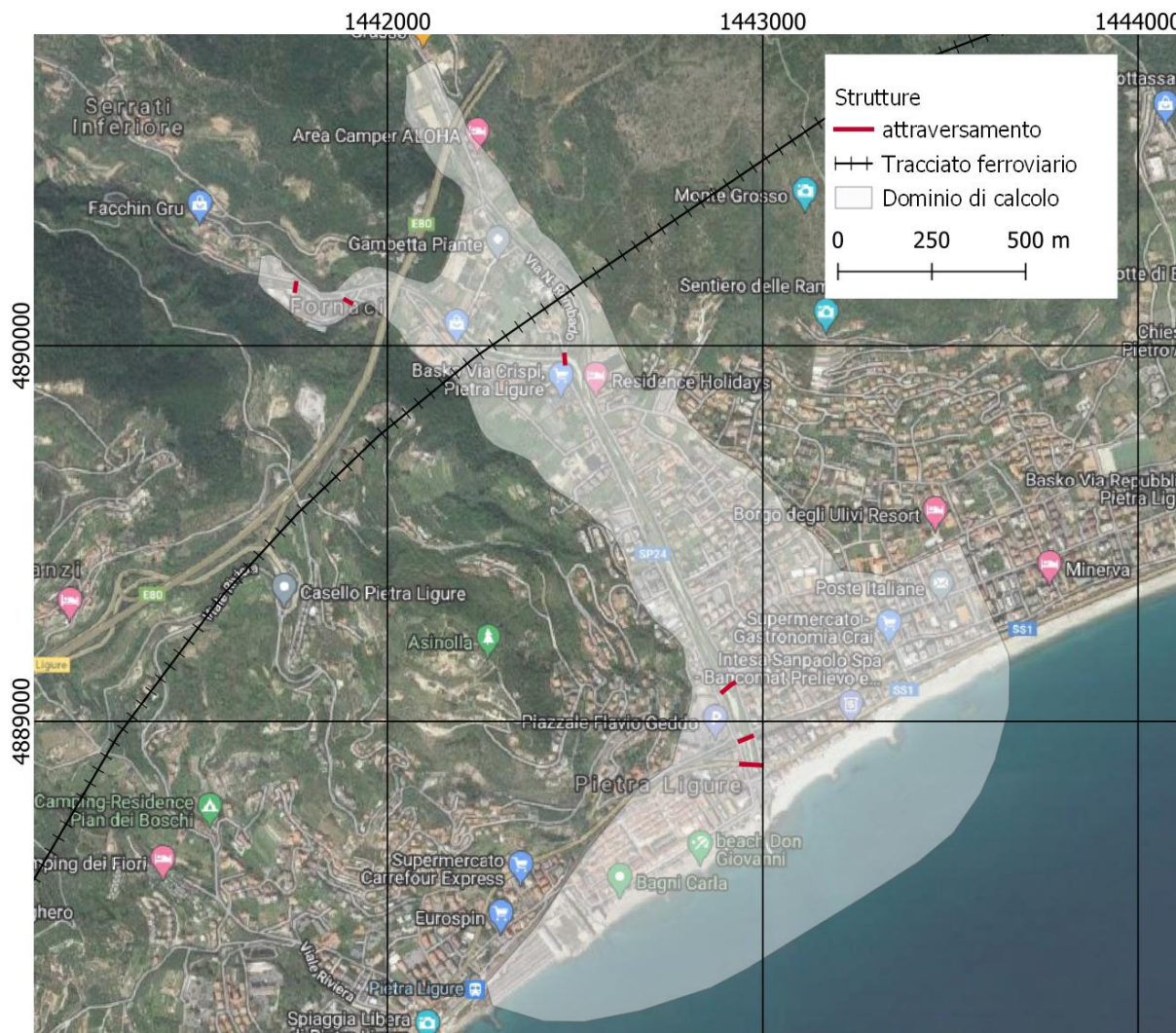


Figura 13: Strutture idrauliche inserite all'interno del modello

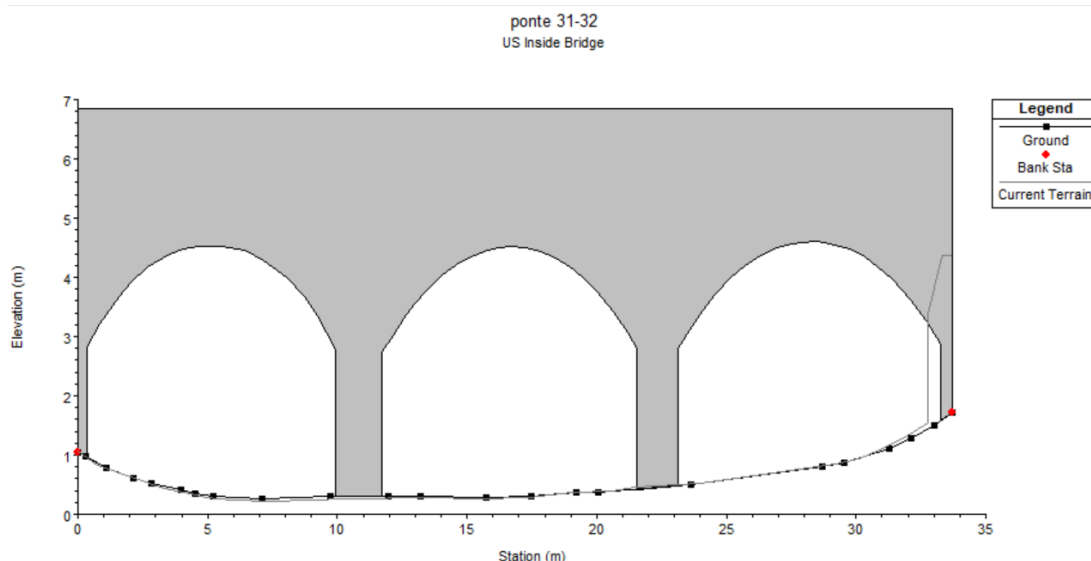


Figura 14: Schematizzazione dell'attraversamento ferroviario esistente sul Torrente Maremola



 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice	<b>COMMESSA</b> IV0I	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C	<b>FOGLIO</b> 33 di 69

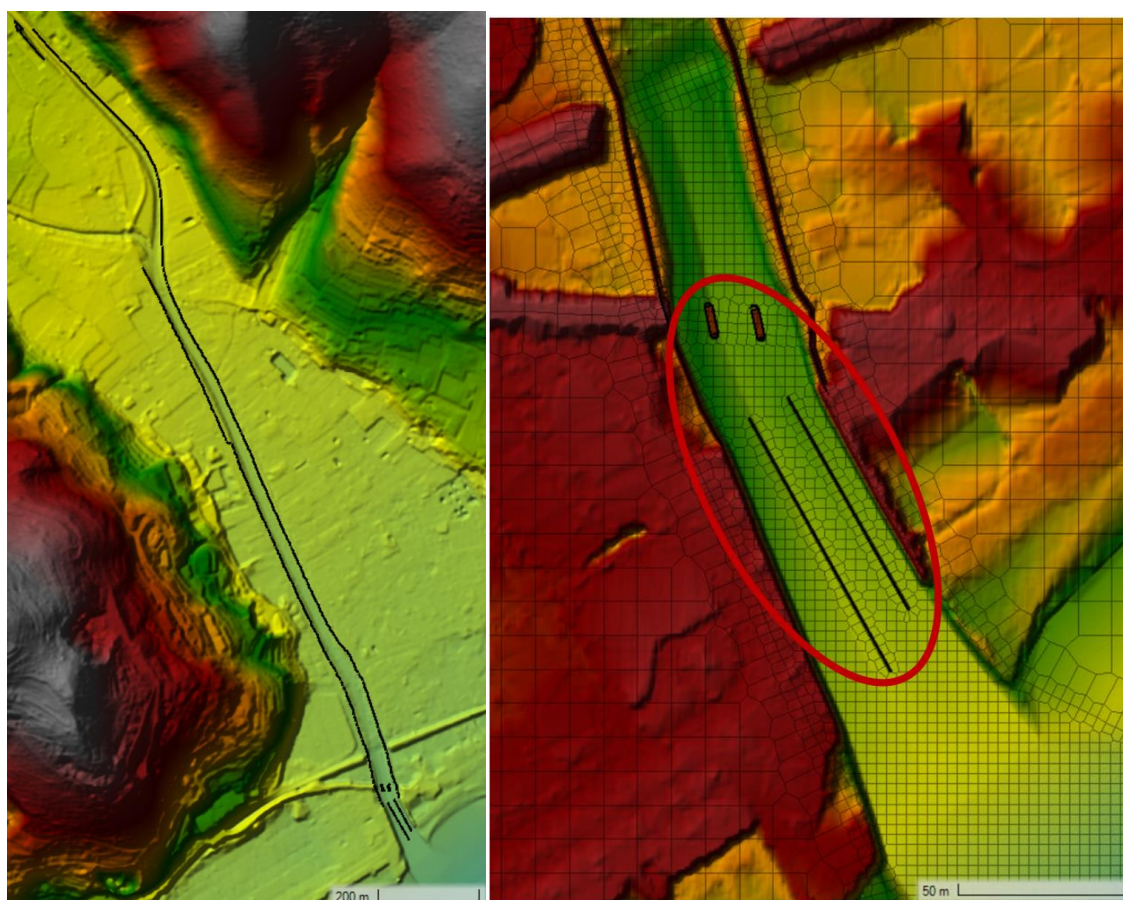



Figura 15: Schematizzazione dei muretti lungo il Torrente Maremola e dell'attraversamento a monte dello sbocco in mare mediante la definizione dell'ingombro delle pile e dei setti in alveo

### 3.3.5 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno imposte al modello includono:

- idrogrammi di piena di riferimento (Maremola e Giustenice) 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 medio del mare al 2100 dovuto ai cambiamenti climatici in atto, così come definito da studio ENEA disponibile basato sulla stazione di Imperia (per maggiori dettagli si rimanda all'elaborato IV0I00D09RIID0001001A)
- condizione al contorno di valle sul lato sud-est dell'area di calcolo dove è previsto il passaggio di acqua attraverso il contorno del dominio: è stata imposta la condizione di

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

*normal depth*, corrispondente ad una condizione di moto uniforme, localmente definita tramite il calcolo della pendenza del terreno.

Si sottolinea che le simulazioni numeriche sono state eseguite nell'ipotesi di non contemporaneità degli eventi di piena, ossia gli idrogrammi sono stati traslati nel tempo in modo da ottenere, secondo una procedura iterativa, un picco combinato sul torrente Maremola a valle della confluenza pari a quello definito dall'Autorità di Bacino per i tre tempi di ritorno di riferimento.

La Figura 16 mostra la schematizzazione delle principali condizioni al contorno imposte.

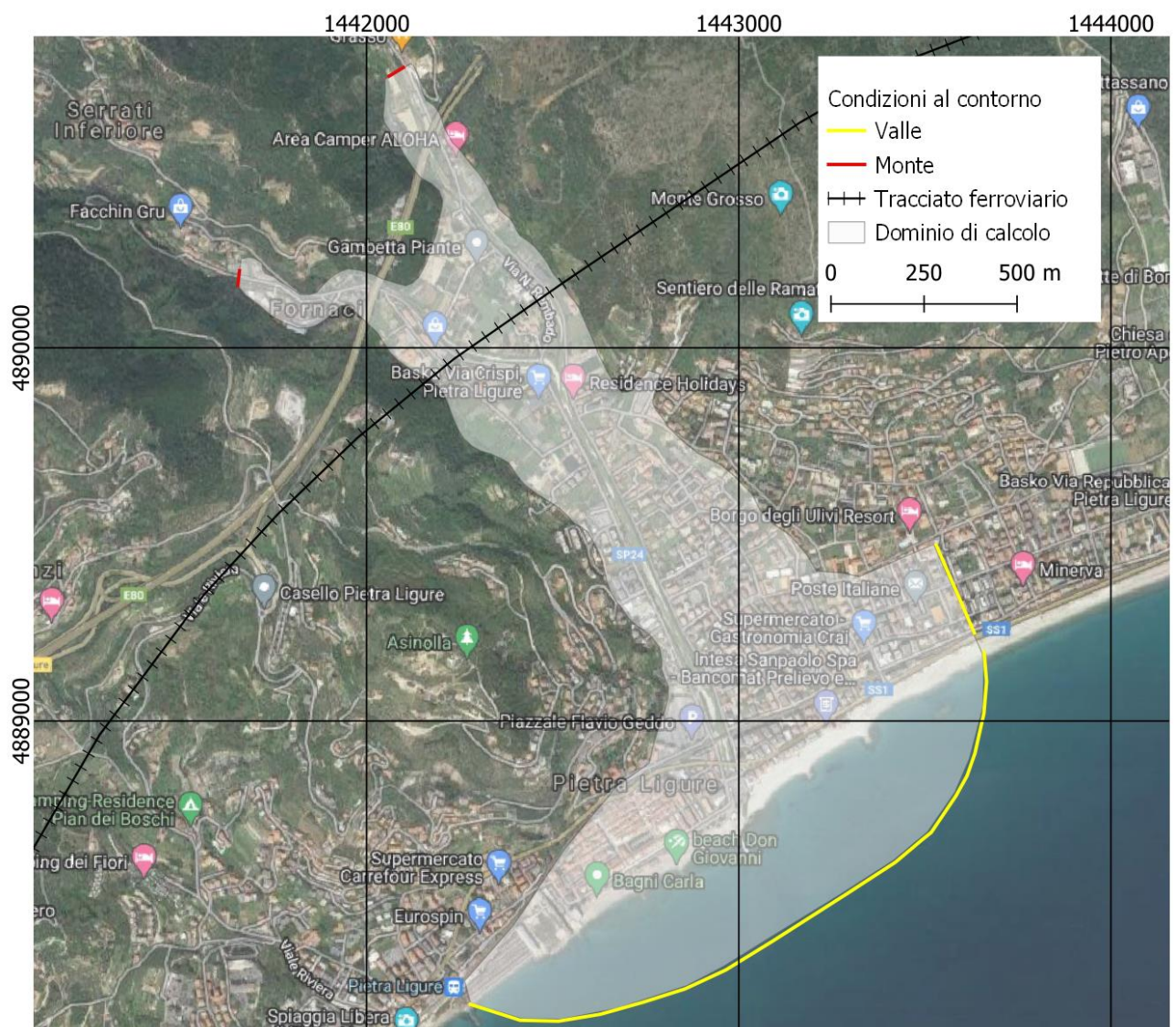


Figura 16: Condizioni al contorno imposte al modello

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

### 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 nell'ambito della pianificazione di bacino, per un evento con tempo di ritorno di duecentennale.

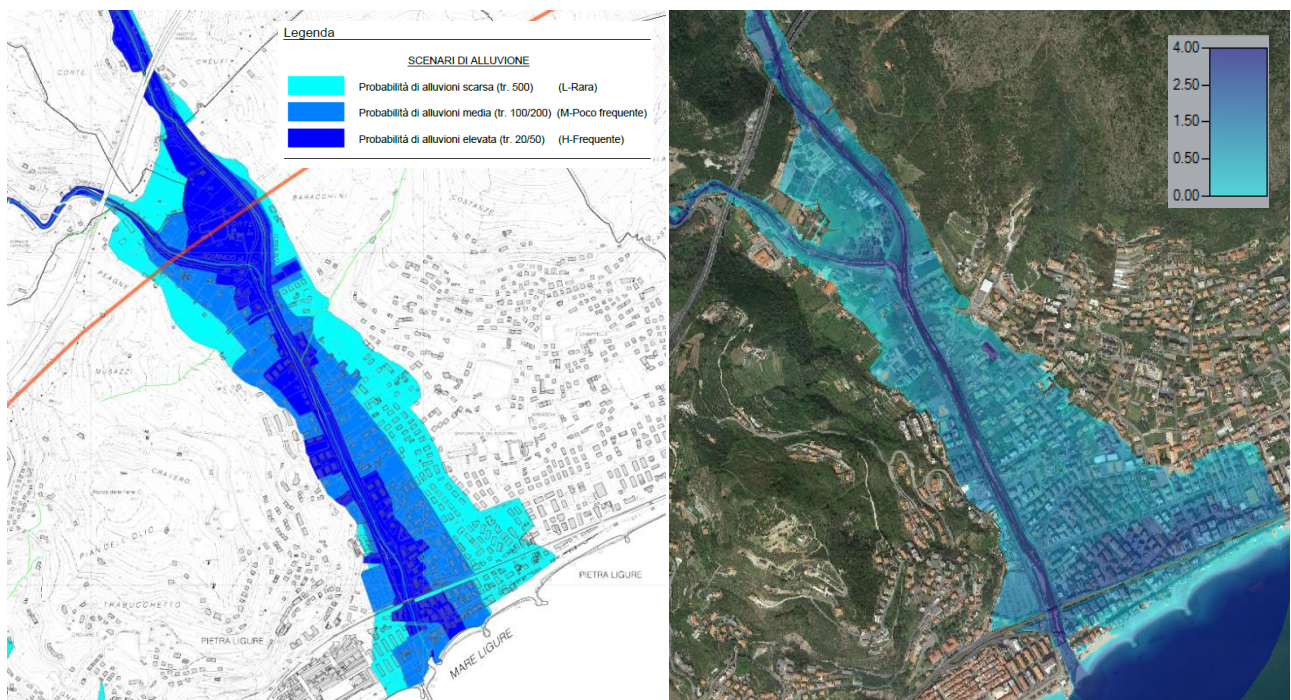


Figura 17: Confronto tra gli allagamenti ottenuti con il modello 2D e quelli definiti nel PGRA, per il torrente Maremola e Giustenice

I risultati descritti nelle figure precedenti sono stati ottenuti con il set di scabrezze riportato nella tabella seguente secondo la notazione di Manning  $n$  [ $s \cdot m^{-1/3}$ ], conformi anche a quelle indicate nelle NTA del P.A.I. di riferimento.

In particolare, il valore assegnato in alveo è stato scelto sia secondo quanto suggerito dalla letteratura tecnica (i.e. NTA), sulla base della documentazione fotografica disponibile da sopralluogo e dalla fotointerpretazione di immagini satellitari, che in funzione dell'estensione delle aree di pericolosità idraulica definite nel 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.

 <b>ITALFERR</b> <small>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</small>	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

Tabella 3: Scabrezze adottate nel modello

<b>Copertura</b>	<b>n</b>
Alveo Maremola a monte della confluenza	0.045
Alveo Giustenice a monte della confluenza	0.05
Alveo Maremola a valle confluenza	0.04
Pianura alluvionale	0.08

In linea generale i risultati ottenuti per l'evento duecentennale appaiono più cautelativi, in termini di estensione delle aree allagabili, rispetto a quanto illustrato nelle mappe delle aree di pericolosità idraulica per lo stesso tempo di ritorno.


È tuttavia opportuno evidenziare che la morfologia della piana alluvionale e le pendenze esistenti causano un significativo scorrimento superficiale dei volumi esondati, dinamica che è ben rappresentata dalla modellazione bidimensionale, dove i volumi esondati seguono sostanzialmente la pendenza del DTM. La differenza con i risultati riportati nella pianificazione di bacino è giustificabile perché il processo sopra descritto è generalmente meno correttamente rappresentato dalla modellazione monodimensionale, su cui è effettivamente basata la definizione delle aree allagabili PAI.

### 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 per lo scenario relativo allo stato attuale e per la configurazione di progetto, rispettivamente per i tempi di ritorno di 50, 200 e 500 anni, utilizzando gli idrogrammi definiti nel paragrafo 3.2.2.

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.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

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.

### 3.4.1 Scenario "ante operam"

Di seguito, si riportano gli stralci delle aree potenzialmente inondabili, ottenute da modello 2D, per i tre tempi di ritorno analizzati. Si rimanda agli elaborati specifici per la restituzione grafica dettagliata dei risultati, come definiti nel paragrafo 2.2.

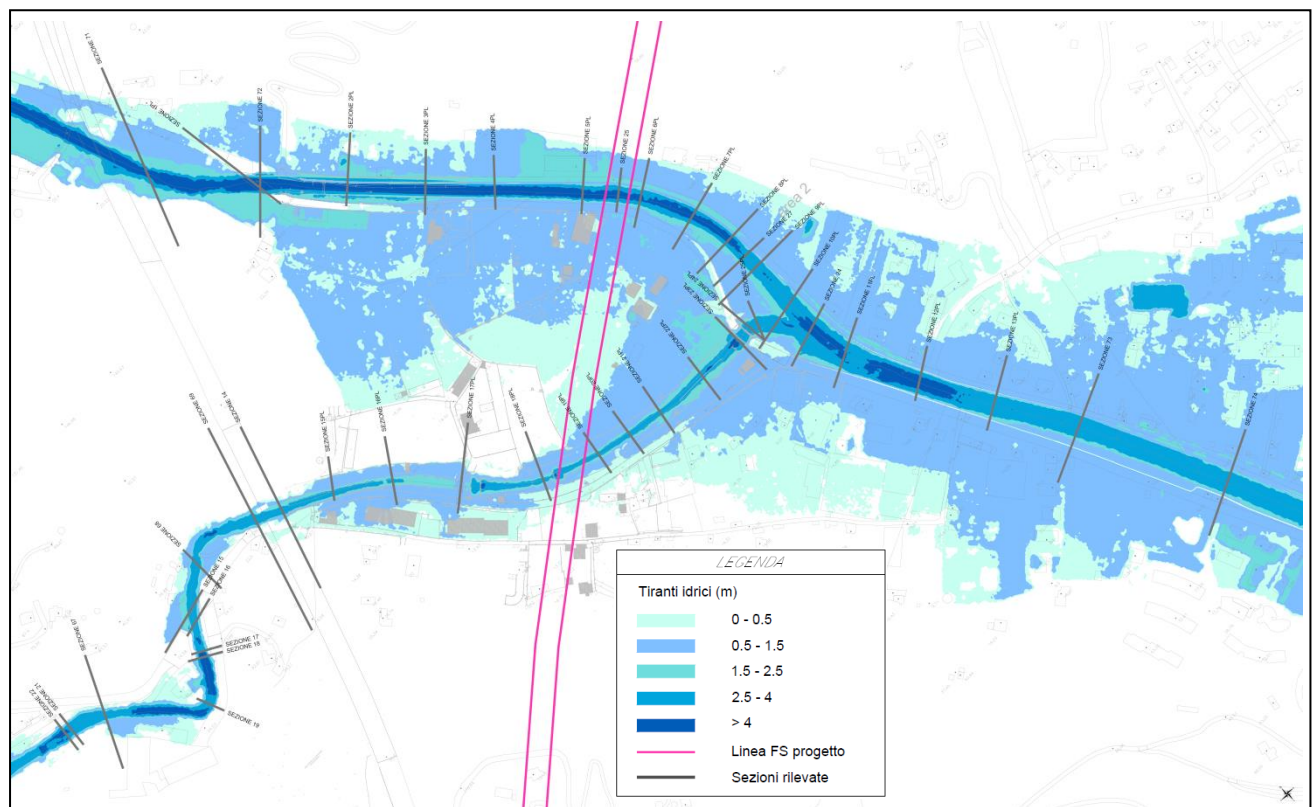
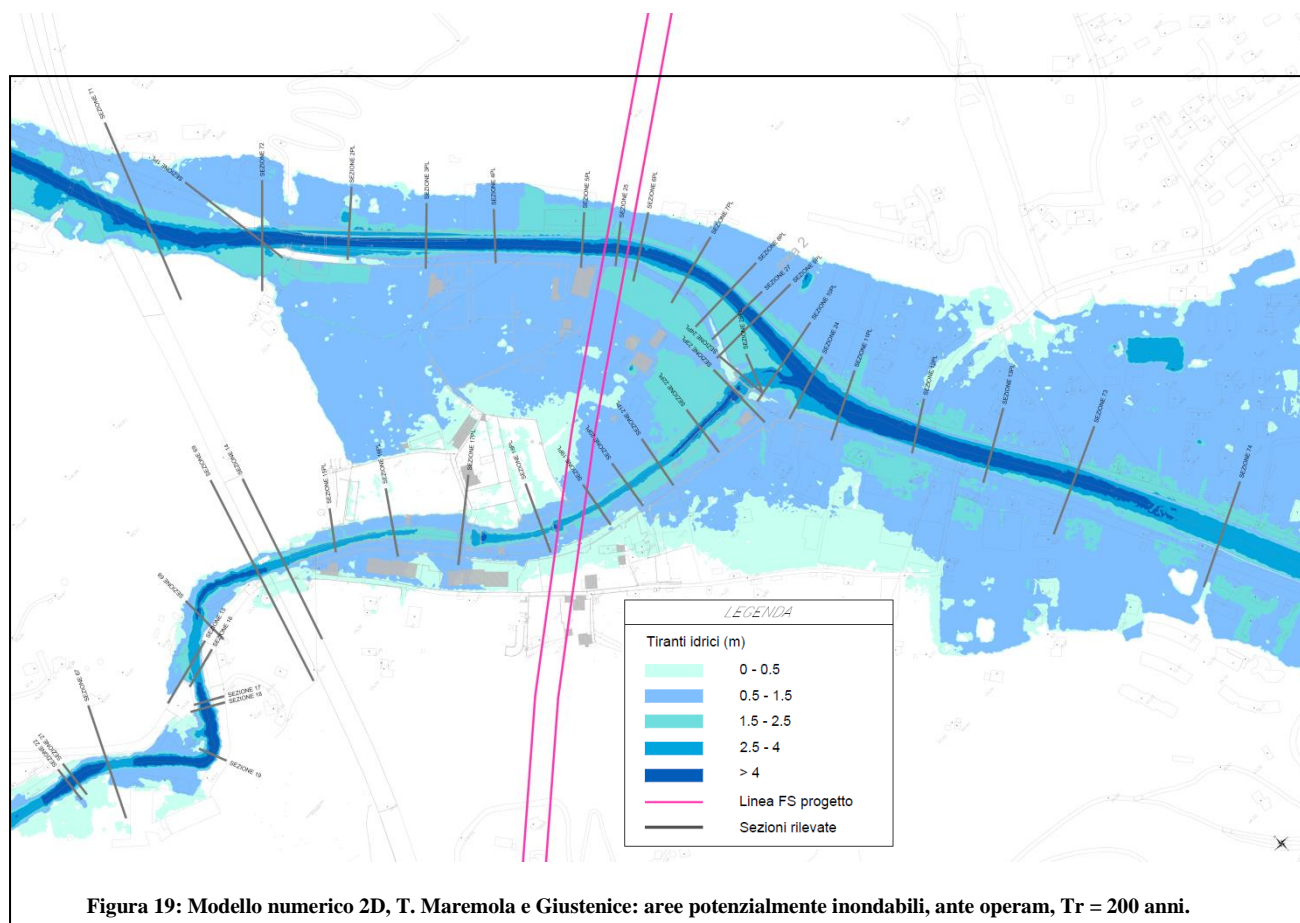


Figura 18: Modello numerico 2D, T. Maremola e Giustenice: aree potenzialmente inondabili, ante operam, Tr = 50 anni.

**PROGETTO DEFINITIVO**

**Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 001	C	38 di 69

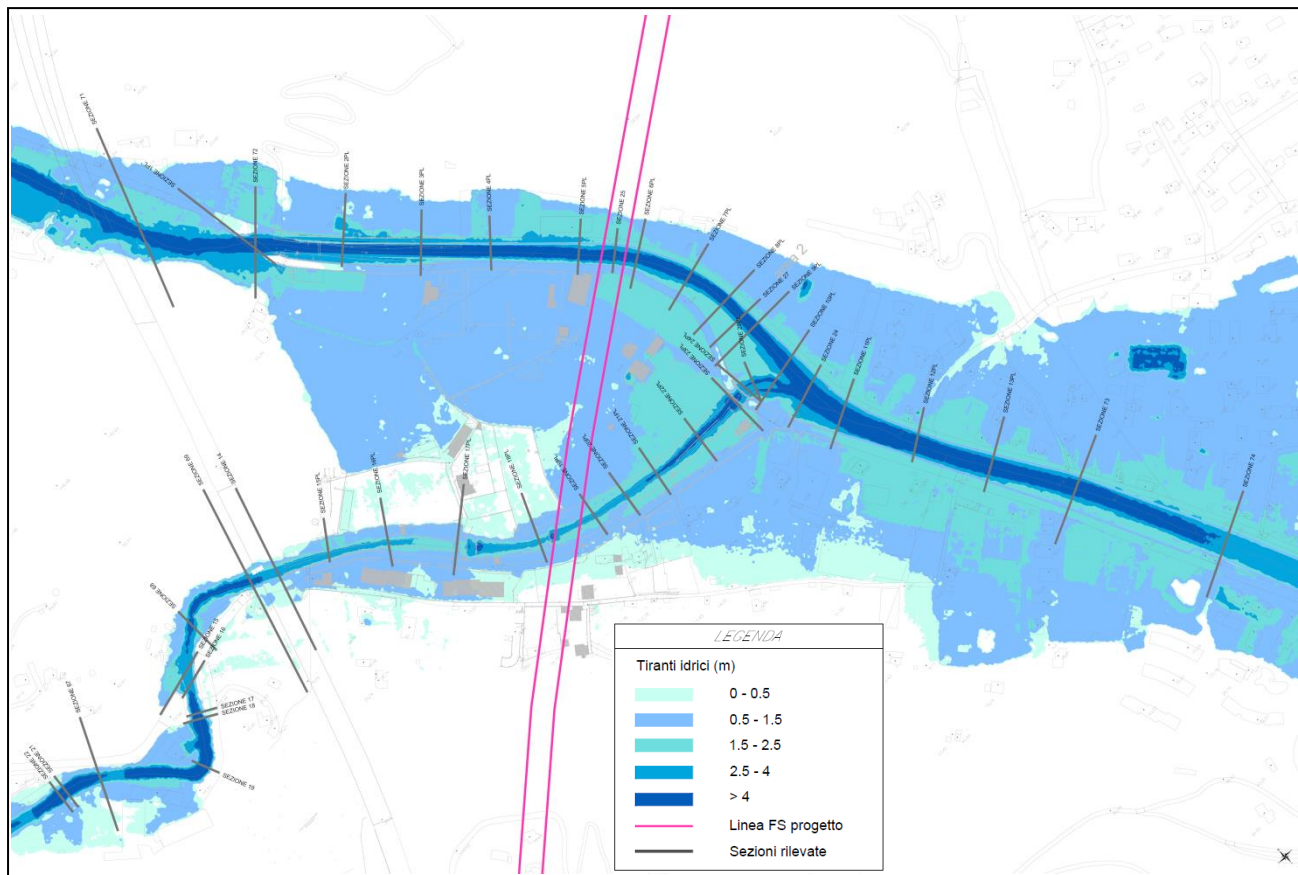


**Figura 19: Modello numerico 2D, T. Maremola e Giustenice: aree potenzialmente inondabili, ante operam, Tr = 200 anni.**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 001	C	39 di 69



**Figura 20: Modello numerico 2D, T. Maremola e Giustenice: aree potenzialmente inondabili, ante operam, Tr = 500 anni.**

Come evidenziato nelle figure precedenti, l'area di intervento è soggetta ad esondazioni diffuse delle piene dei torrenti Maremola e Giustenice, legate principalmente allo loro, "vicina", confluenza.

Nella tabella seguente sono riportati i livelli idrici ( $Tr = 50, 200, 500$  anni), in corrispondenza del nuovo attraversamento ferroviario, su entrambi i corsi d'acqua.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

Tabella 4: Livelli massimi in prossimità dell'attraversamento ferroviario per tempo di ritorno

	Livello (m s.l.m.m.)
<b>Torrente Maremola (sezione 25)</b>	
Tr 50	12.57
Tr 200	12.88
Tr 500	13.09
<b>Torrente Giustenice (sezione 18 PL)</b>	
Tr 50	12.87
Tr 200	13.07
Tr 500	13.19

### 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 Pietra Ligure, si prevede la realizzazione delle seguenti opere ed interventi:

- nuovo viadotto ferroviario VI02, per l'attraversamento dei due torrenti (Maremola, Giustenice) e delle rispettive aree di esondazione;
- nuova fermata di Pietra Ligure, in viadotto, con annesso parcheggio;
- sottostazione elettrica (SSE);
- nuova viabilità (NV02) di accesso al parcheggio della fermata e della SSE, con due nuovi ponti stradali (IV01, IV02) sul Torrente Giustenice;
- opere di sistemazione idraulica in alveo (su entrambi di corsi d'acqua) atte a limitare le esondazioni nell'area di intervento.

Si precisa che il tracciato di progetto, che ha influenzato le scelte soprattutto relative alle opere di sistemazione in alveo previste, è stato approvato dal CIPE, con prescrizioni, con Delibera n. 91 del 29/07/2005 (GURI 10/03/2006) confermando la compatibilità ambientale dell'intervento e perfezionando l'intesa Stato-Regioni circa la localizzazione dell'opera (comportando quindi l'automatica variazione degli strumenti urbanistici vigenti).

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



**PROGETTO DEFINITIVO**

 Relazione idraulica - Studio idraulico  
 bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 001	C	41 di 69

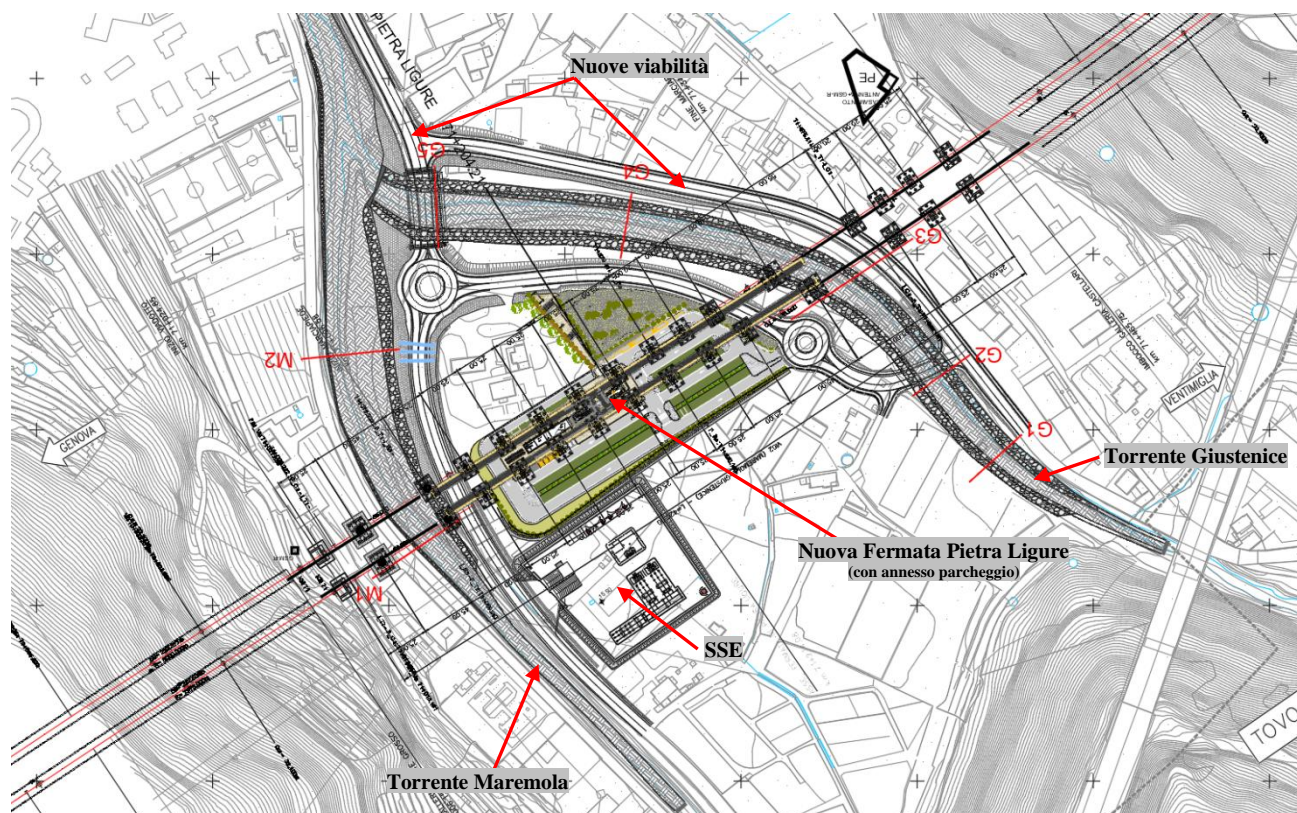


Figura 21: Stralcio della planimetria di progetto in quel di Pietra Ligure.

Di seguito invece uno stralcio del profilo, da cui si evince la scansione del nuovo viadotto VI02, costituito in realtà da due viadotti, a singolo binario, affiancati.

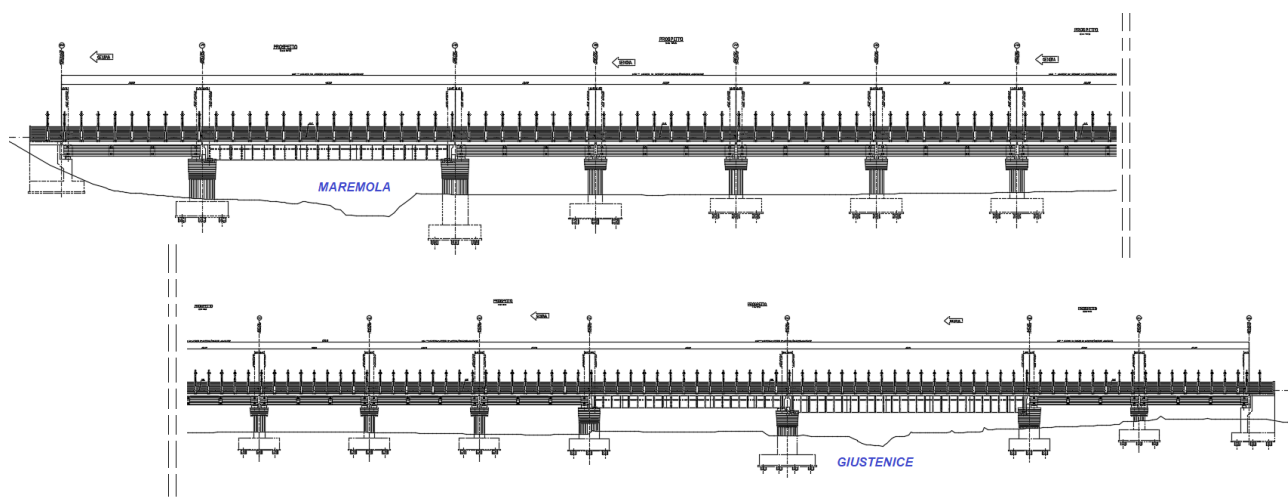


Figura 22: Stralcio del profilo di progetto, VI02: binario dispari.

Il viadotto su binario dispari presenta due campate con luce da 45 metri, una per l'attraversamento del T. Maremola e l'altra per lo scavalco della nuova viabilità; una campata con luce da 55 metri per lo scavalco del T. Giustenice e della nuova viabilità; 11 campate con luce da 25 metri.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

Quello su binario pari presenta una campata con luce da 45 metri per l'attraversamento del T. Maremola; una campata da 40 metri per lo scavalco della nuova viabilità; una campata con luce da 55 metri per lo scavalco del T. Giustenice e della nuova viabilità; 7 campate con luce da 25 metri e 4 campate con luce da 20 metri. Le quote di intradosso si attestano a +17.10 m s.l.m. in corrispondenza dell'attraversamento del T. Giustenice, e +18.10 m s.l.m. in corrispondenza del T. Maremola.

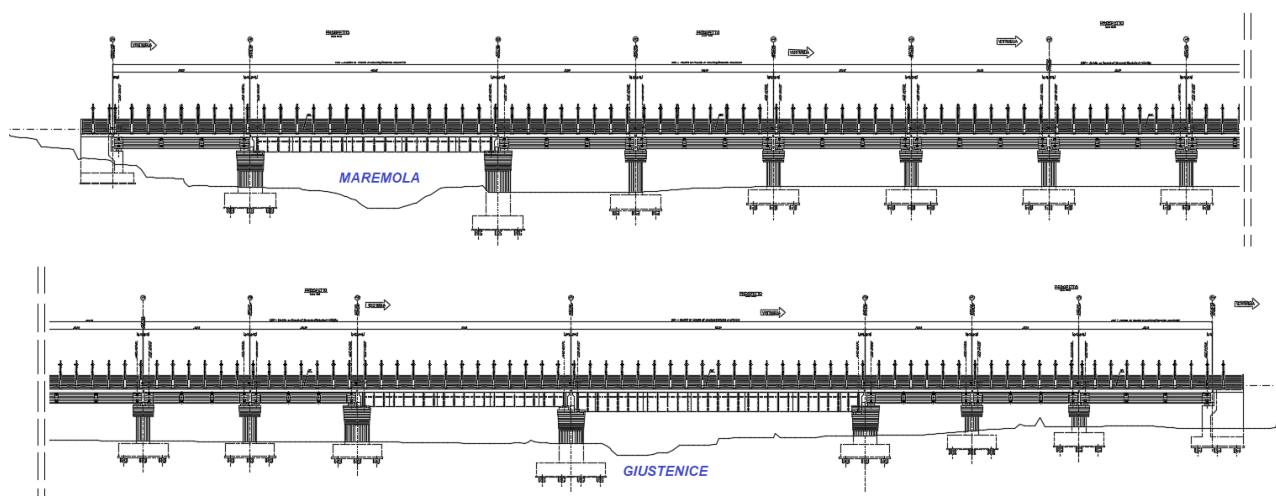



Figura 23: Stralcio del profilo di progetto, VI02: binario pari.

Il viadotto ferroviario (VI02) ha pertanto una estensione tale da attraversare completamente le aree potenzialmente inondabili, alla confluenza tra T. Maremola e T. Giustenice.

Stanti le esondazioni diffuse evidenziate nello scenario ante operam, descritto nel paragrafo precedente, le opere di sistemazione idraulica previste in progetto su entrambi i torrenti hanno lo scopo di limitare gli effetti della sottrazione di volume all'espansione delle piene dei due torrenti legati all'ubicazione della SSE e della Nuova Fermata (e del relativo parcheggio) in area potenzialmente inondabile, migliorandone le condizioni di deflusso, nel tratto fluviale limitrofo all'area di intervento. Tali interventi consistono in riprofilature spondali e del fondo alveo, secondo una sezione trapezoidale, sponde 1/1, di altezza e larghezza variabile. La SSE e il parcheggio saranno realizzate in rilevato o comunque con predisposizione di muri perimetrali di protezione dalle inondazioni.

Implementate le opere in progetto nel modello numerico 2D sviluppato, tramite appositi elementi presenti nel codice di calcolo Hec Ras o modifiche locali del DTM di base, si è proceduto alla simulazione della propagazione delle piene dei torrenti Maremola e Giustenice, per i tre tempi di ritorno di riferimento, nello scenario "post operam".

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

Nelle figure seguenti, si riportano i risultati ottenuti, in termini di aree potenzialmente inondabili. Si rimanda comunque agli elaborati specifici per la restituzione grafica dettagliata dei risultati, come definiti nel paragrafo 2.2.

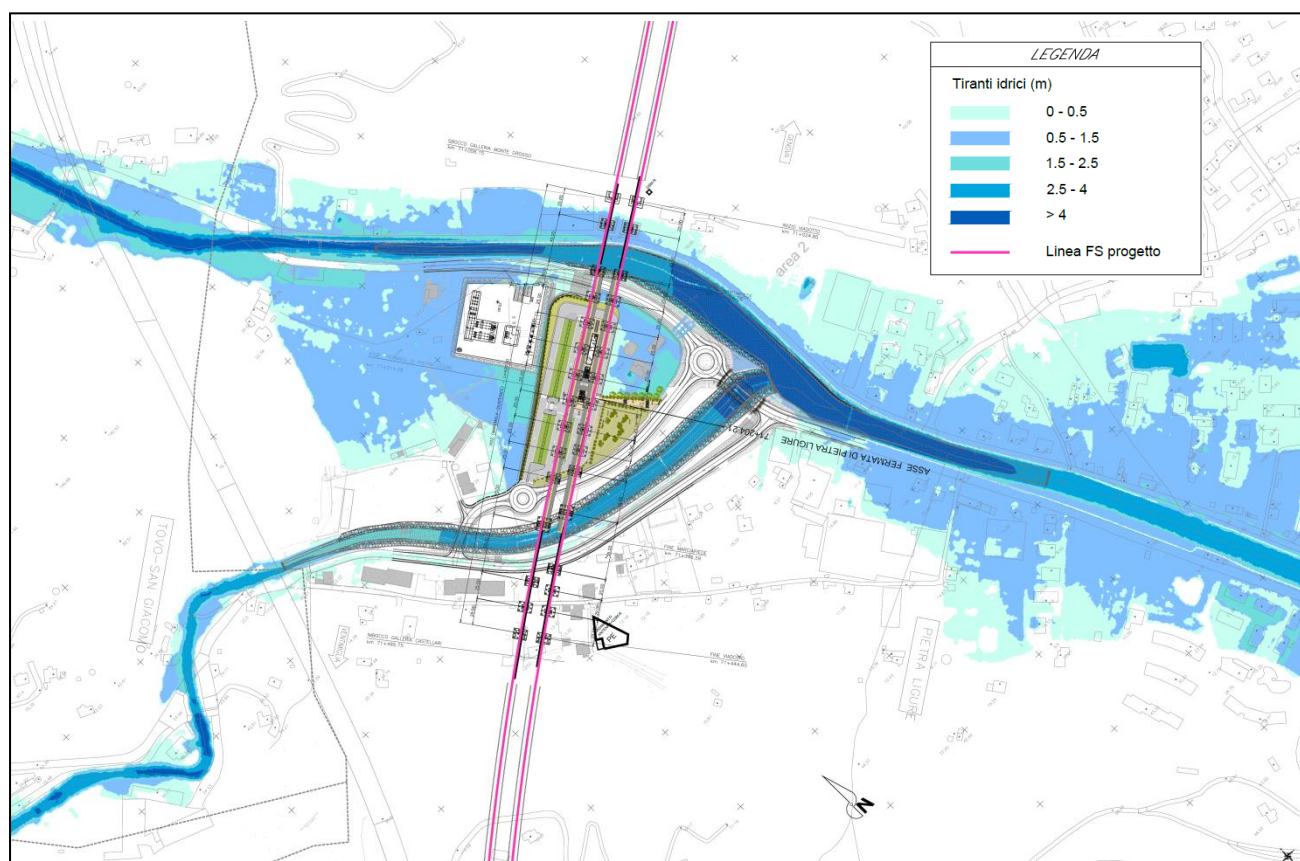
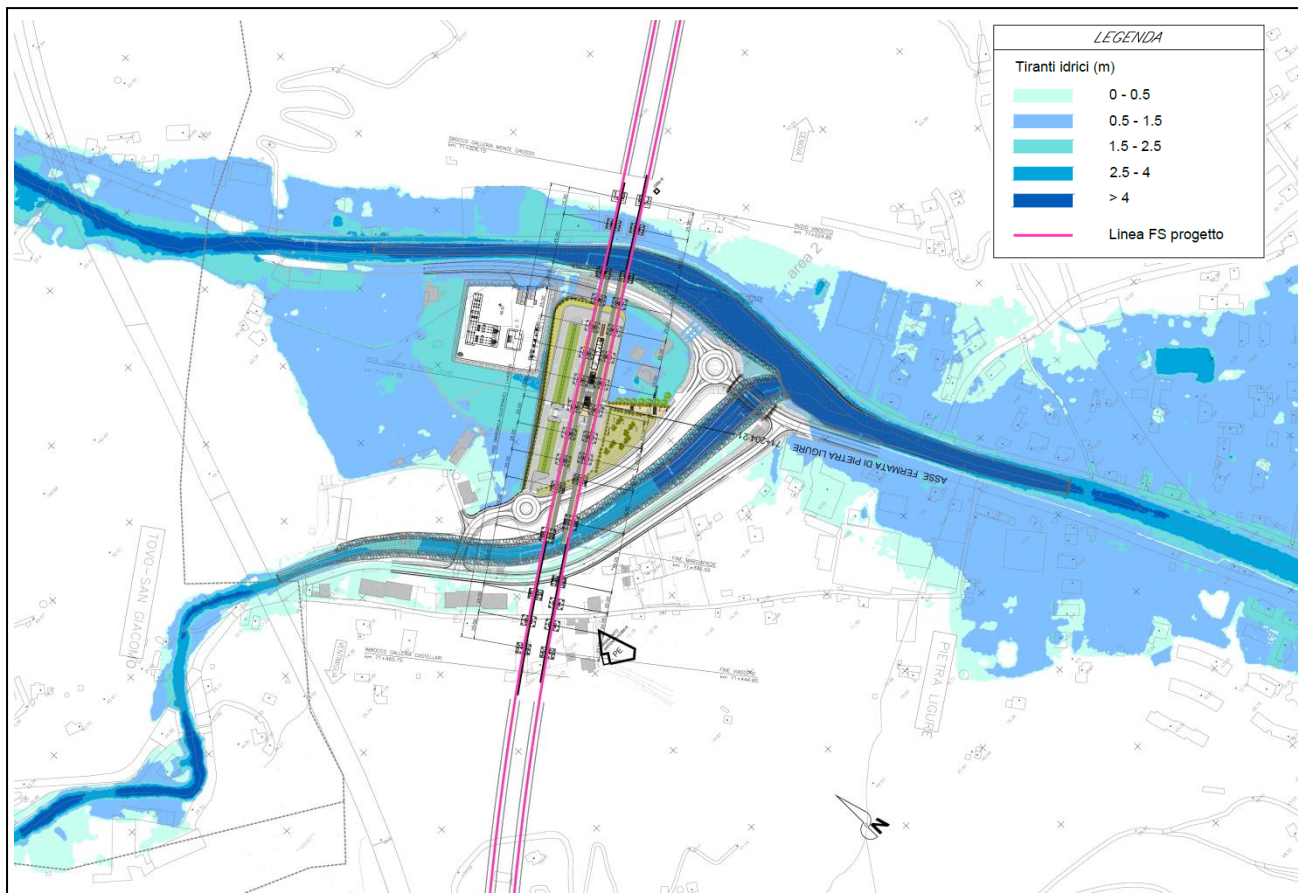


Figura 24: Modello numerico 2D, T. Maremola e Giustenice: aree potenzialmente inondabili, post operam, Tr = 50 anni.

**PROGETTO DEFINITIVO**

**Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 001	C	44 di 69



**Figura 25: Modello numerico 2D, T. Maremola e Giustenice: aree potenzialmente inondabili, post operam, Tr = 200 anni.**

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV0I	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

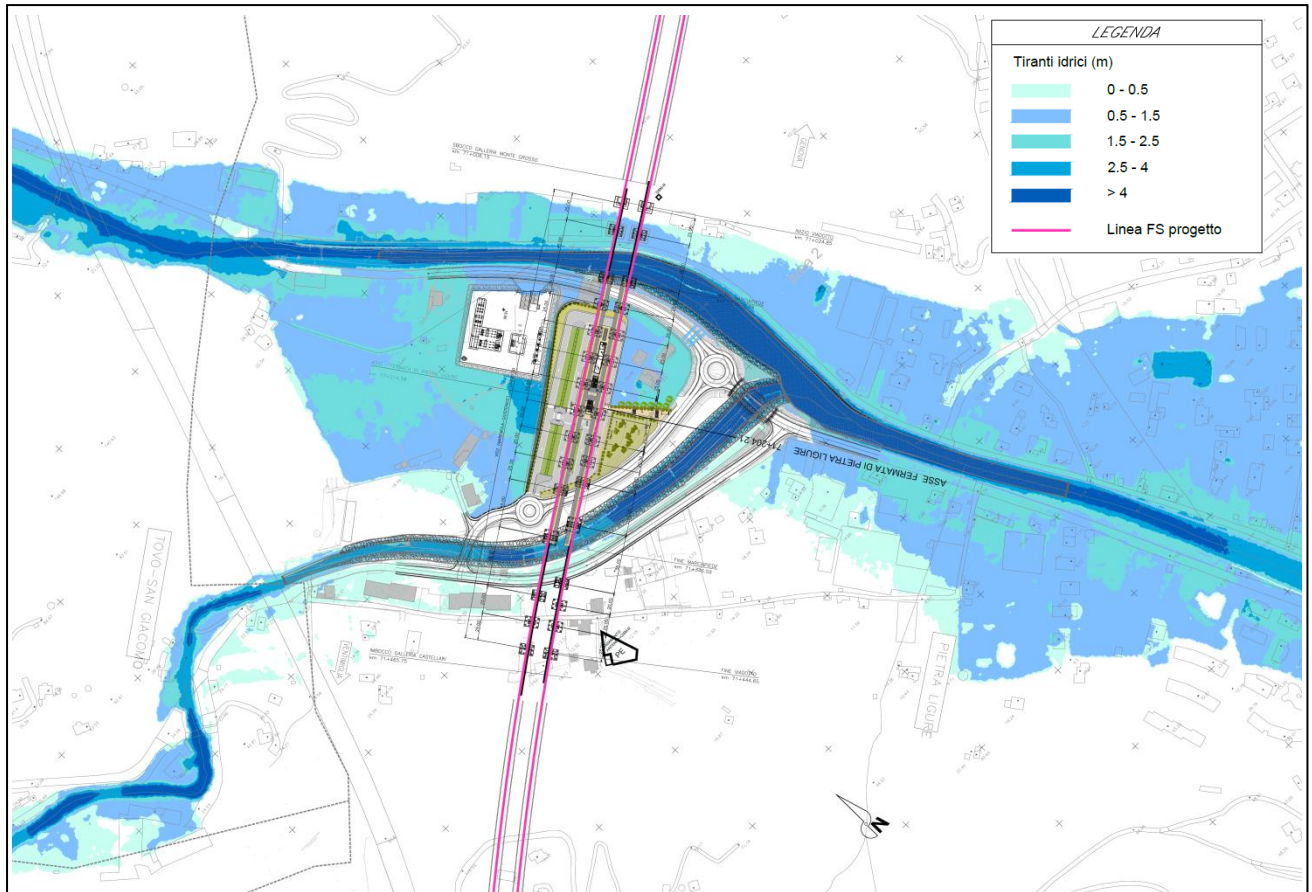



Figura 26: Modello numerico 2D, T. Maremola e Giustenice: aree potenzialmente inondabili, post operam, Tr = 500 anni.

Si osserva una riduzione sensibile delle aree di esondazione alla confluenza tra i due corsi d'acqua. Per evitare l'allagamento della SSE, il relativo piazzale dovrà attestarsi, su rilevato, a quota minima +15.50 m slm (tenendo conto anche del muro perimetrale di altezza pari a circa 1m); mentre per il parcheggio della Nuova Fermata, è necessario predisporre un muro perimetrale, soprattutto lato Nord, con quota di sommità minima +16.00 m slm.

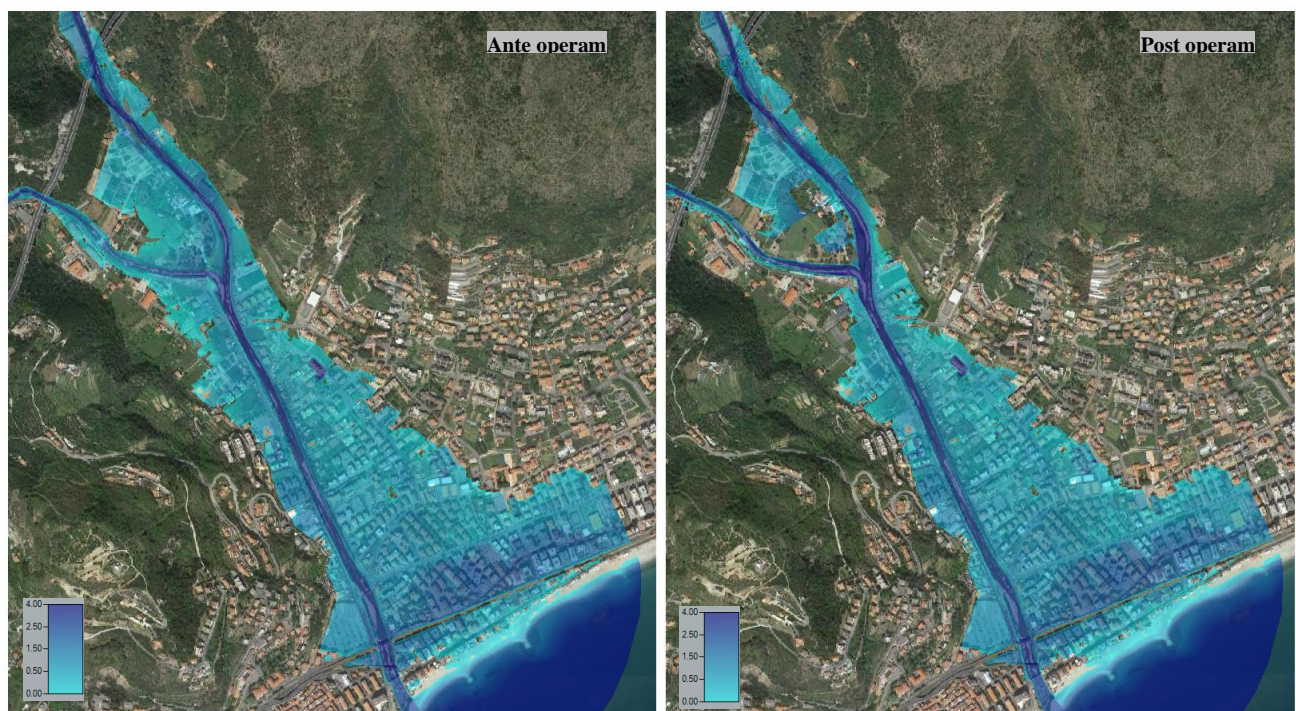
Al di sotto del rilevato della nuova viabilità di accesso alla fermata e alla SSE, sono stati inoltre predisposti tre tombini di trasparenza (DN1500) ai fini dello smaltimento e deflusso verso valle della acque esondate, accumulate tra i rilevati della SSE, del parcheggio e della viabilità di accesso stessa.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

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 delle nuove opere di attraversamento previste in progetto (ferroviarie, VI02, e stradali IV01, IV02). Da segnalare che il nuovo ponte stradale IV01 sostituisce l'attuale ponte stradale, idraulicamente insufficiente come si evince dai risultati delle simulazioni dello scenario *ante operam* riportati nelle tavole grafiche allegate. Il dettaglio della verifica delle nuove opere è riportato nel paragrafo successivo.

In ottemperanza delle NTA della pianificazione di bacino vigente, stante il miglioramento delle condizioni di deflusso nell'area di intervento, le opere in progetto (in particolare gli interventi di sistemazione idraulica previsti) non devono concorrere ad incrementare le condizioni di rischio nelle aree limitrofe, e nel caso specifico nelle aree vallive.

A tal proposito, di seguito si riporta il confronto diretto tra gli scenari *ante operam* e *post operam*, in termini di aree di esondazione lungo l'intero tratto fluviale studiato (ovvero fino alla foce) e di livelli idrici in corrispondenza di alcune sezioni nel tratto fluviale vallivo, per i tempi di ritorno di riferimento.



**Figura 27: Modello numerico 2D, T. Maremola e Giustenice: confronto in termini di aree potenzialmente inondabili, ante operam (a sinistra) vs post operam (a destra), Tr = 50 anni.**

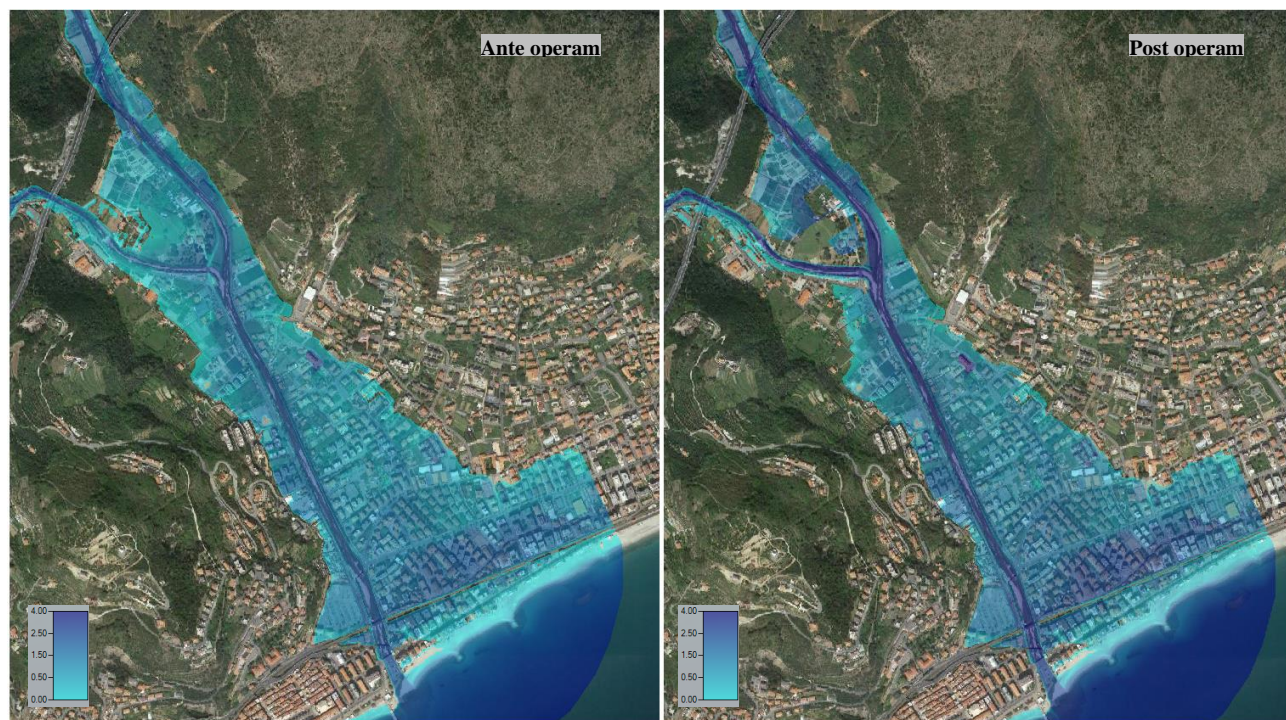
**PROGETTO DEFINITIVO**

Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV0I	00	D 09 RI	ID 0002 001	C	47 di 69



**Figura 28: Modello numerico 2D, T. Maremola e Giustenice: confronto in termini di aree potenzialmente inondabili, ante operam (a sinistra) vs post operam (a destra),  $Tr = 200$  anni.**

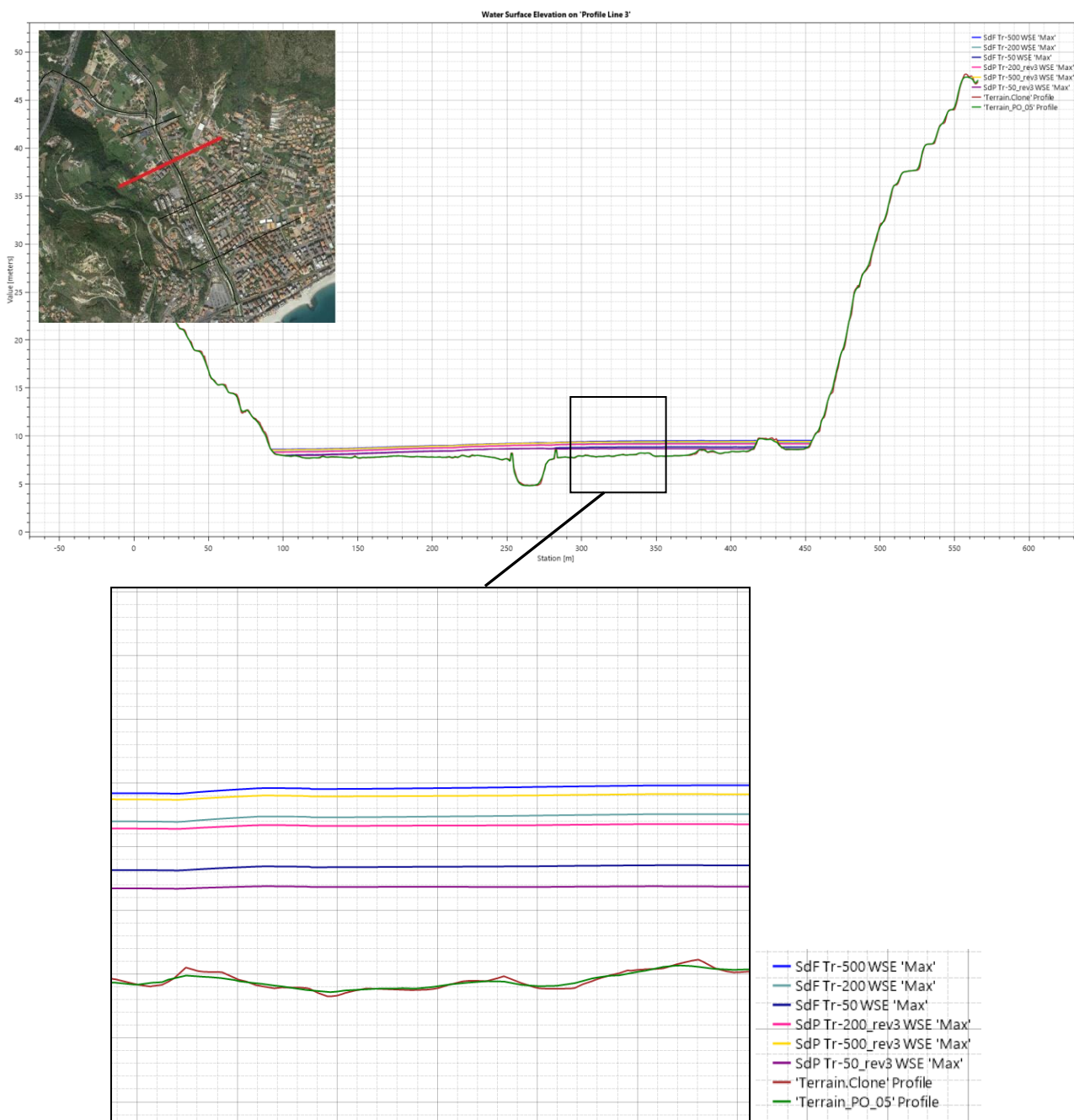


**Figura 29: Modello numerico 2D, T. Maremola e Giustenice: confronto in termini di aree potenzialmente inondabili, ante operam (a sinistra) vs post operam (a destra),  $Tr = 500$  anni.**

**PROGETTO DEFINITIVO**
**Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV0I	00	D 09 RI	ID 0002 001	C	48 di 69

In termini di aree potenzialmente inondabili, non si osservano differenze o incrementi nella configurazione “*post operam*”. Di seguito, il confronto in termini di livelli idrici in alcune sezioni del tratto fluviale vallivo, all’area di intervento.



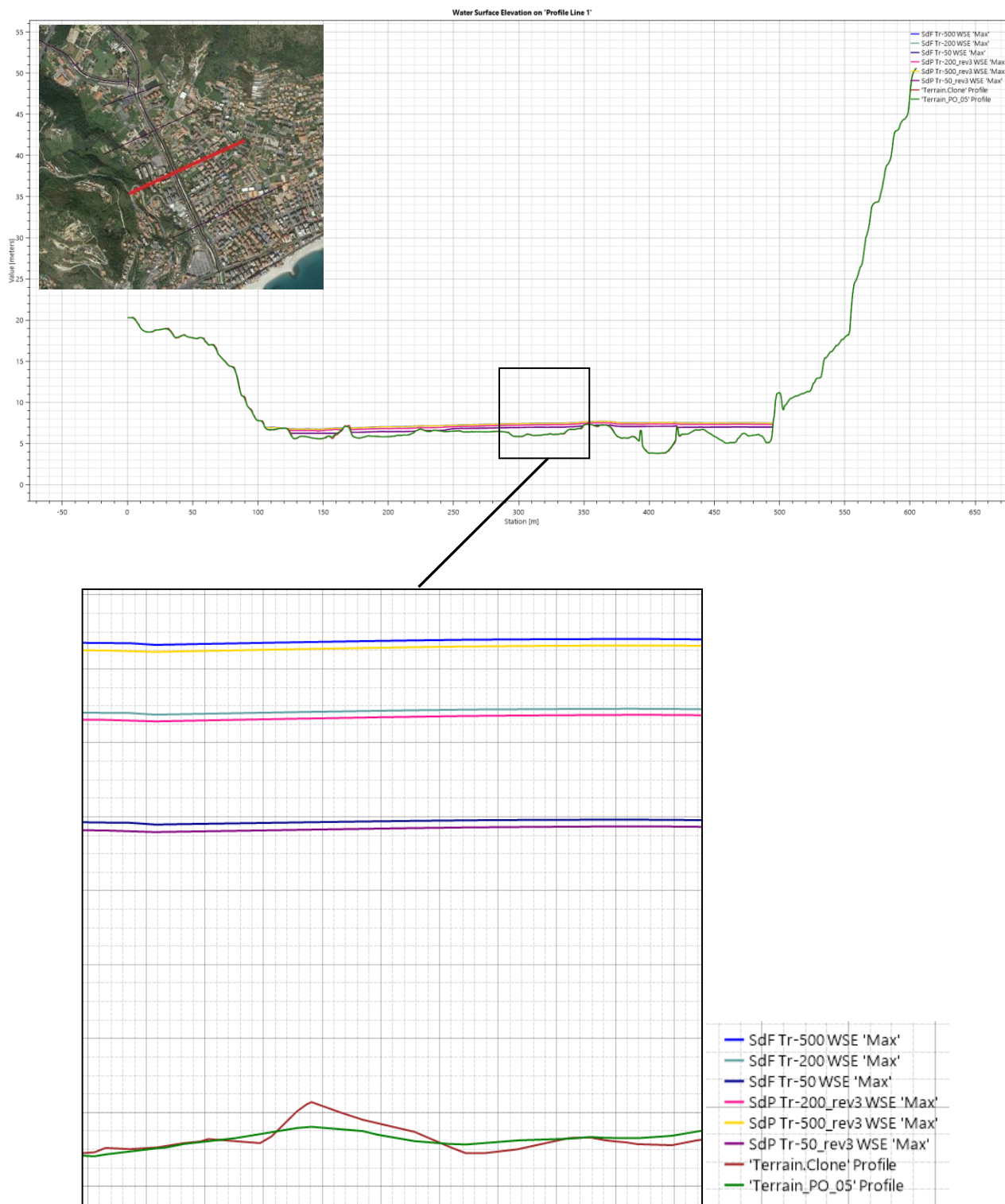
**Figura 30: Modello numerico 2D, T. Maremola e Giustenice: confronto in termini di livelli idrici in corrispondenza di alcune sezioni vallive, (SdF = ante operam vs SdP = post operam), 1 di 3.**



**PROGETTO DEFINITIVO**

**Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 001	C	49 di 69

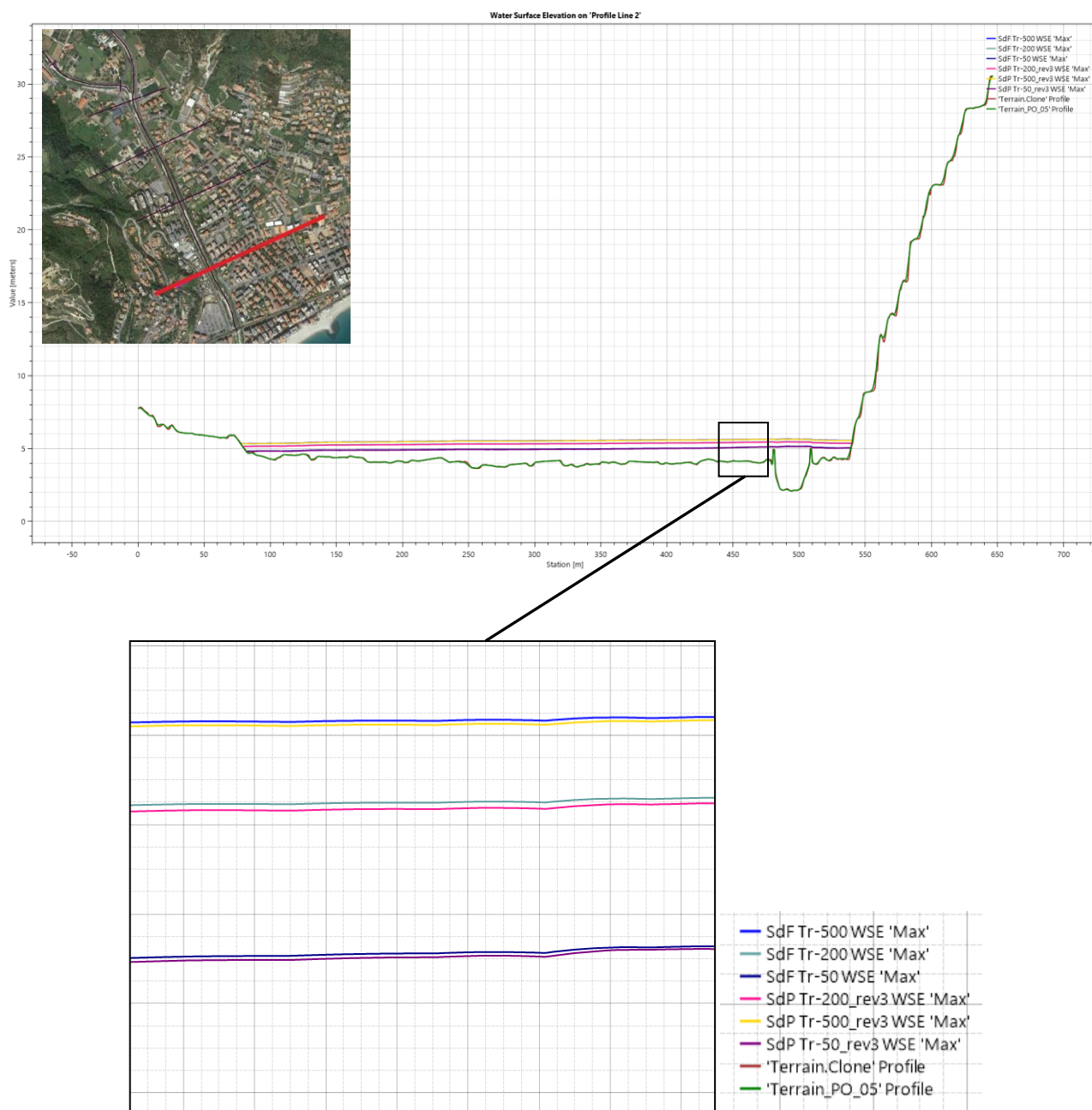


**Figura 31: Modello numerico 2D, T. Maremola e Giustenice: confronto in termini di livelli idrici in corrispondenza di alcune sezioni vallive, (SdF = ante operam vs SdP = post operam), 2 di 3.**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 001	C	50 di 69



**Figura 32: Modello numerico 2D, T. Maremola e Giustenice: confronto in termini di livelli idrici in corrispondenza di alcune sezioni vallive, (SdF = ante operam vs SdP = post operam), 3 di 3.**

Anche in termini di livelli idrici, non si evidenziano differenze sostanziali tra “ante operam” e “post operam”, anzi nello scenario “post operam” i livelli idrici sono inferiori (rispetto allo scenario “ante operam”) fino a 10-20 cm nelle sezioni più vicine alla confluenza e di 1-2 cm nelle sezioni più vallive, a dimostrazione di un effetto di invaso operato dalle opere di sistemazione in progetto.

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

#### 4 VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO DI PROGETTO

Nelle tabelle seguenti è riportata la verifica del franco idraulico di progetto delle nuove opere di attraversamento: VI02 (linea ferroviaria, T. Maremola e T. Giustenice), IV01 (ponte stradale mono campata, luce da 40 m) e IV02 (ponte stradale mono campata, luce da 26 m) entrambe sul T. Giustenice, eseguita secondo le normative vigenti (i.e. NTC2018, M.d.P. RFI, NTA Pianificazione di Bacino).

Tabella 5 – Viadotto VI02 (Torrente Maremola): 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.
+18.10	+11.85	1.30	+13.15	+6.25 (> 1.50 m)	+4.95 (> 0.50 m)	Franco idraulico > 1.5 m → <b>OK</b> Franco sul carico idraulico > 0.5 m → <b>OK</b>	Franco idraulico > max (carico cinetico; 1.5/2.0 m) → <b>OK</b>

Tabella 6 – Viadotto VI02 (Torrente Giustenice): 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.
+17.10	+11.85	0.65	+12.50	+5.25 (> 1.50 m)	+4.6 (> 0.50 m)	Franco idraulico > 1.5 m → <b>OK</b> Franco sul carico idraulico > 0.5 m → <b>OK</b>	Franco idraulico > max (carico cinetico; 1.5/2.0 m) → <b>OK</b>

Tabella 7 – Ponte IV01 (Torrente Giustenice): 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.
+12.80	+11.21	0.15	+11.36	+1.59 (> 1.50 m)	+1.44 (> 0.50 m)	Franco idraulico > 1.5 m → <b>OK</b> Franco sul carico idraulico > 0.5 m → <b>OK</b>	Franco idraulico > max (carico cinetico; 1.5/2.0 m) → <b>OK</b>

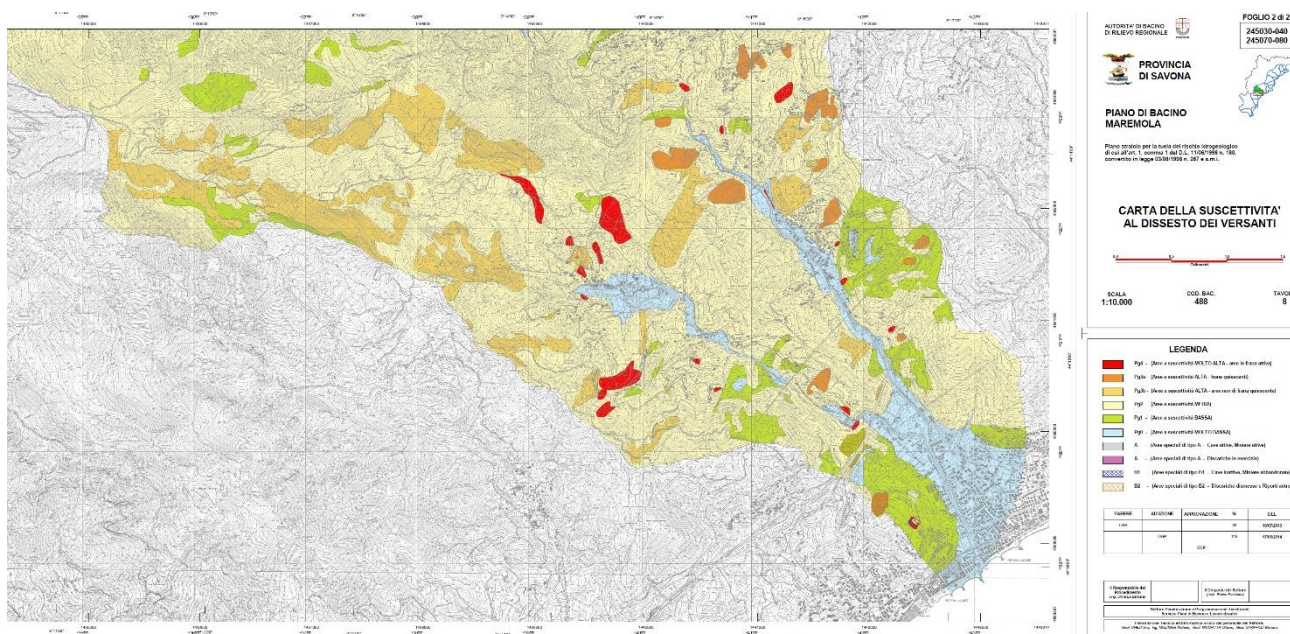
Tabella 8 – Ponte IV02 (Torrente Giustenice): verifica del franco idraulico di progetto.

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.
+13.97	+12.41	0.45	+12.86	+1.56 (> 1.50 m)	+1.11 (> 0.50 m)	Franco idraulico > 1.5 m → <b>OK</b> Franco sul carico idraulico > 0.5 m → <b>OK</b>	Franco idraulico > max (carico cinetico; 1.5/2.0 m) → <b>OK</b>

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

Inoltre, 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.

Si sottolinea come da *CARTA DELLA SUSCETTIVITA' AL DISSESTO DEI VERSANTI* a corredo del Piano di Bacino del Torrente Maremola (di seguito riportata), i due attraversamenti IV01 e IV02 sul Torrente Giustenice si collocano in aree a suscettività molto bassa ed in generale il sottobacino del Torrente Giustenice è caratterizzato prevalentemente da suscettività media, da cui una previsione di modesto trasporto solido. Pertanto, è stato considerato il limite imposto sul franco idraulico minimo di 1,5 m.



 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. C

## 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 alle pile 1, 2, 3, del nuovo viadotto VI02 in progetto, interessate dalle piene del *Torrente Maremola*.

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  $\Psi_0$  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  $\Psi_1$ .”*

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

- $Y_s$ , la profondità di scalzamento;
- $Y_1$ , l'altezza della corrente;
- $a$ , la larghezza della pila;
- $FR$ , il numero di Froude ( $FR = V_0/(gh_m)^{1/2}$ )

**PROGETTO DEFINITIVO**

 Relazione idraulica - Studio idraulico  
 bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV0I	00	D 09 RI	ID 0002 001	C	54 di 69

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 scalmamento attesa può essere valutata come:

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

con

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

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

$$\bullet f_1 = \tanh \left[ \left( \frac{y_1}{a^*} \right)^{0.4} \right]; f_2 = \left\{ 1 - 1.2 \left[ \ln \left( \frac{V_1}{V_c} \right) \right]^2 \right\}; f_3 = \left[ \frac{\left( \frac{a^*}{d_{50}} \right)}{0.4 \left( \frac{a^*}{d_{50}} \right)^{1.2} + 10.6 \left( \frac{a^*}{d_{50}} \right)^{-0.13}} \right]$$

$$\bullet a^* = K_s a_p; a_p = a \cdot \cos \theta + L \cdot \sin \theta; K_s = \begin{cases} 1 & \text{(pila circolare)} \\ 0.86 + 0.97 \left( \left| \frac{\pi \theta}{180} - \frac{\pi}{4} \right| \right)^4 & \text{(pila rettangolare)} \end{cases}$$

( $a$  = larghezza della pila;  $L$  = lunghezza della pila;  $\theta$  = 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,  $d_{50}$ ,...), relativi ai corsi 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;
- 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.

**PROGETTO DEFINITIVO**

 Relazione idraulica - Studio idraulico  
 bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 001	C	56 di 69

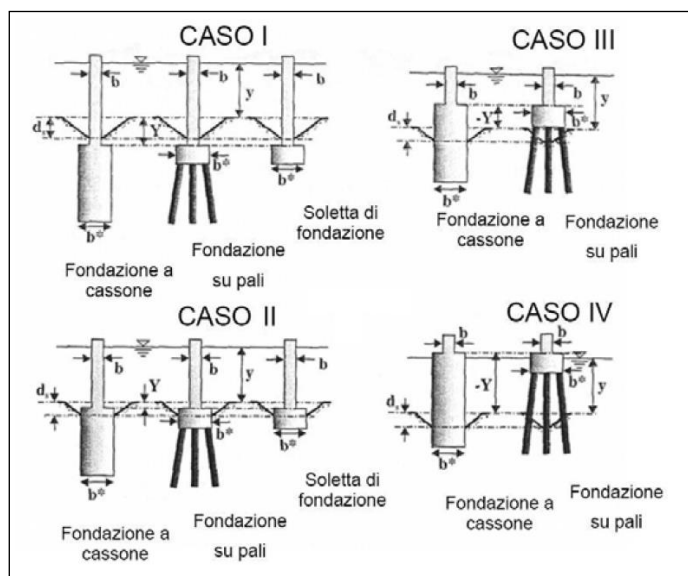


Figura 33: Differenti tipologie di pile non uniformi dotate di fondazioni.

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.

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, considerando dapprima le dimensioni delle pile. Per quanto concerne il calcolo dello scalzamento per la piena  $Tr = 1,001$ , i livelli idrici in alveo ad essa associati non interessano le pile dei viadotti in progetto. Pertanto, lo scalzamento per la piena  $Tr = 1,001$  è da ritenersi nullo.



 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV0I	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

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 VI02, ovvero per il Torrente Maremola, il materiale considerato è caratterizzato dalla seguente granulometria:  $d_{50} = 2$  mm,  $d_{90} = 8$  mm (rif. IV0I00D09RGID0002001A).

Nella tabella seguente si riportano i valori di scalzamento attesi per  $Tr = 200$  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 delle pile del viadotto VI02, interessate dalla piena di progetto. In particolare, risultano interessate dalle esondazioni della piena con  $Tr = 200$  anni, le pile P1, P2, P3 dei due viadotti a singolo binario affiancati (binario dispari BD, binario pari, BP).

Tabella 10- Viadotto VI02 (Torrente Maremola): valori di scalzamento attesi attorno alle pile, per  $Tr=200$ .

ID PILA	Forma pila	D (m) [pila]	h (m)	v (m/s)	Skew Angle (°)	Fr ( )	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU	Ys (m) Pila
P1 (BD)	circolare	4.5	1.5	1	0	0.261	3.7	2.5	<b>3.7</b>
P2 (BD)	circolare	4.5	1	1.5	0	0.479	3.6	3.9	<b>3.9</b>
P3 (BD)	circolare	2.4	0.8	1	0	0.357	2.2	1.7	<b>2.2</b>
P1 (BP)	circolare	4.5	0.9	1	0	0.337	3.2	2.6	<b>3.2</b>
P2 (BP)	circolare	4.5	2	1.5	0	0.339	4.4	4	<b>4.4</b>
P3 (BP)	circolare	2.4	1.3	1	0	0.280	2.5	1.7	<b>2.5</b>

Confrontando i valori di scalzamento atteso con quelli di ricoprimento dei plinti di fondazione (1 m per le pile P1 e P3; 4 m per la pila P2) si evince che in corrispondenza delle pile del VI02 (eccetto per la pila P2 BD) i fenomeni di erosione (innescati dalla piena  $Tr=200$  anni) possono interessare anche le fondazioni (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 (prevede la realizzazione di fondazioni “*plinto su pali*” di dimensioni 9.2 m x 12.8 m).

Di seguito, i valori definitivi di scalzamento, per le pile del nuovo *viadotto VI02* interessate dalla piena di riferimento del T. Maremola, da considerare nel dimensionamento delle relative fondazioni.

Tabella 11- Viadotto VI02 (Torrente Maremola): valori di scalzamento attesi attorno al sistema “pila-fondazione”, per  $Tr=200$ .

**PROGETTO DEFINITIVO**

 Relazione idraulica - Studio idraulico  
 bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV0I	00	D 09 RI	ID 0002 001	C	58 di 69

ID PILA	B (m) [plinto]	L (m) [plinto]	Deq (m)	Leq (m)	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU	Ys (m) Pila-Plinto
P1 (BD)	9.2	12.8	8.10	11.35	5.0	3.8	<b>5.00</b>
P2 (BD)	-	-	-	-	-	-	<b>3.9</b>
P3 (BD)	9.2	12.8	7.98	11.42	4.10	3.70	<b>4.10</b>
P1 (BP)	9.2	12.8	8.32	11.65	4.3	3.8	<b>4.30</b>
P2 (BP)	9.2	12.8	6.68	9.44	5.5	5.2	<b>5.50</b>
P3 (BP)	9.2	12.8	7.71	11.10	4.60	3.70	<b>4.60</b>

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. C

## 6 OPERE DI SISTEMAZIONE IDRAULICA

Come anticipato, si prevedono opere di riprofilatura e sistemazione idraulica dei torrenti Maremola e Giustenice. Tali interventi consistono in riprofilature spondali e del fondo alveo, secondo una sezione trapezoidale, sponde 1/1, di altezza e larghezza variabile.

Si prevede la posa in opera di rivestimenti spondali in massi cementati; sebbene cementati, si è proceduto comunque al dimensionamento dei massi di protezione, nell'eventualità di asportazione della malta cementizia a seguito di fenomeni abrasivi esercitati nel tempo dalla corrente.

A tal fine, si è fatto riferimento alla seguente formula (FHWA, 1989):

$$d_{50} = 0.001 C_{sg} C_{sf} \frac{V_a^3}{d_{avg}^{0.5} K_1^{1.5}} \quad (*)$$

in cui  $d_{50}$  = diametro medio dei massi;  $V_a$  = velocità media (ft/s);  $d_{avg}$  = tirante medio (ft);  $C_{sg} = 2.12/(S_g-1)^{1.5}$ ;  $S_g$  = peso specifico dei massi (t/mc);  $C_{sf} = (SF/1.2)^{1.5}$  ( $SF$  = coefficiente di sicurezza,  $\in [1; 2]$ );  $K_1 = [1 - \sin^2(\theta)/\sin^2(\phi)]^{0.5}$ ;  $\theta$  = inclinazione delle sponde;  $\phi$  = angolo di attrito interno del materiale, applicabile per i seguenti valori dei parametri (simili a quelli caratteristici dei corsi d'acqua oggetto di studio):

- *pendenza alveo: 0.00006 ÷ 0.0162*
- *tiranti idrici: 1.5 ÷ 14.8 m*
- *velocità medie: 0.7 ÷ 4 m/s*
- *portate: 35 ÷ 2200 mc/s*
- *d50: 0.15 ÷ 0.70 m*

Con riferimento alla formulazione (\*), adottando il valore di velocità media ( $Tr = 200$  anni) 3.5 m/s (e tirante = 4.5 m) per il Torrente Maremola e 3 m/s (e tirante = 3.5 m) per il Torrente Giustenice, nonché i valori  $SF = 2$ ; sponde = 1/1 ( $\theta = 45^\circ$ ),  $\phi = 55^\circ$ ,  $S_g = 2.6$  t/mc, si ha:  **$d_{50} = 0.75$  m** per i rivestimenti spondali sul **T. Maremola**, e  **$d_{50} = 0.55$  m** per i rivestimenti spondali lungo il **T. Giustenice**.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

## 7 VERIFICA DELLE FASI DI REALIZZAZIONE DI OPERE IN ALVEO

La realizzazione dei viadotti VI02 sui Torrenti Maremola e Giustenice e IV01 e IV02 sul Giustenice è subordinata alla realizzazione delle opere di sistemazione idraulica e riprofilatura del fondo, che sono evidentemente in grado di contenere i livelli idrici di cantiere. Per completezza, è comunque effettuata un'analisi ai fini della determinazione di un livello idrico di riferimento per eventuali considerazioni sulla falda, utili per la definizione delle opere da prevedersi per gli scavi relativi alla realizzazione delle fondazioni.

Si pone il problema della definizione della portata di riferimento per il dimensionamento delle eventuali opere provvisionali del periodo transitorio, di costruzione.

Per quanto concerne le opere provvisionali, 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 provvisionali 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);

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

$N$  = orizzonte temporale di riferimento (anni).

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:

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

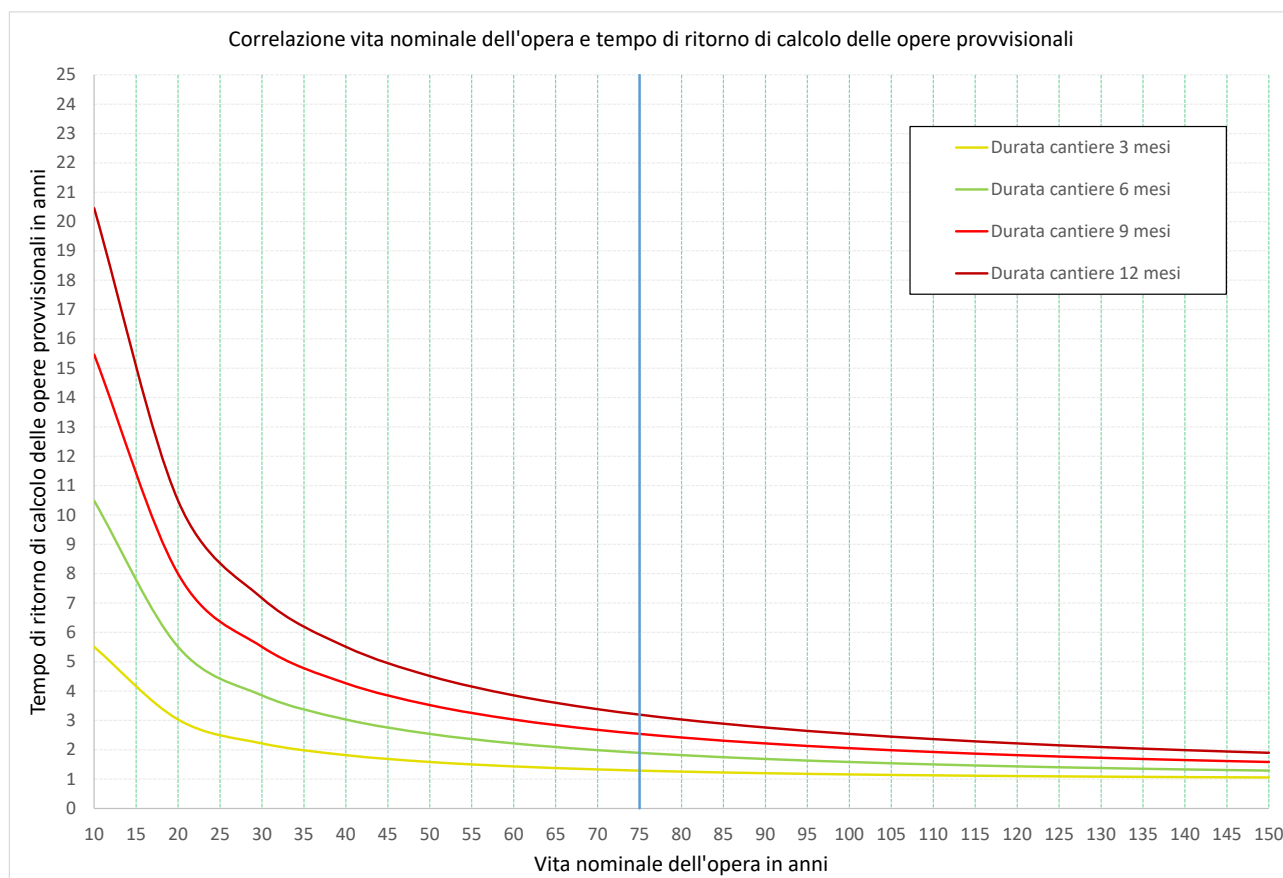
dalla quale si ricava quindi il tempo di ritorno di calcolo per le opere provvisionali,  $T_{pr}$ :

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

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 34 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.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C



**Figura 34: 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.

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

 <b>ITALFERR</b> <small>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</small>	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C	<b>FOGLIO</b> 63 di 69

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.

Le portate di riferimento con  $Tr=5$  anni per la verifica delle fasi di realizzazione dei nuovi viadotti sul T. Maremola e sul T. Giustenice sono state calcolate con modello HEC HMS, e sono pari a 170.3 m<sup>3</sup>/s per il T. Maremola e 62.4 m<sup>3</sup>/s per il T. Giustenice. La verifica idraulica è stata eseguita utilizzando il modello bidimensionale 2D descritto in precedenza, considerando una portata costante, in entrambi i Torrenti Maremola e Giustenice, e adottando le medesime impostazioni riguardanti scabrezze, regime della corrente, condizioni al contorno.

Come spiegato in precedenza, la realizzazione dei viadotti VI02 sui Torrenti Maremola e Giustenice e IV01 e IV02 sul Giustenice è subordinata alla realizzazione delle opere di sistemazione idraulica e riprofilatura del fondo, che sono evidentemente in grado di contenere i livelli idrici di cantiere.

Per completezza, è comunque effettuata un'analisi ai fini della determinazione di un livello idrico di riferimento per eventuali considerazioni sulla falda.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

### Viadotto VI02 – Torrenti Maremola e Giustenice

Di seguito, i risultati ottenuti in termini di livelli per l'attraversamento VI02 sul Torrente Maremola.

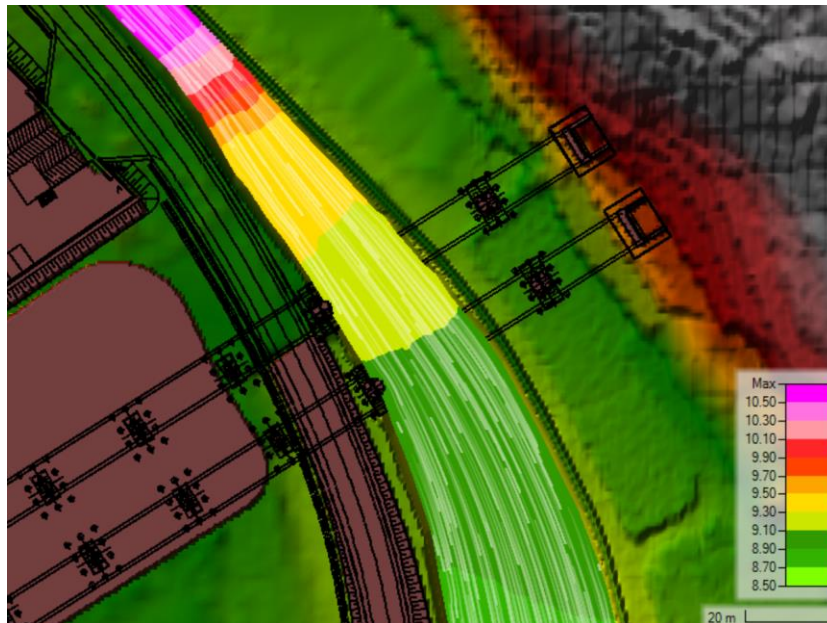


Figura 35: Livelli idrici - VI02 sul T. Maremola

Il livello massimo in corrispondenza dell'attraversamento previsto VI02 sul Torrente Maremola si attesta a +9.26 m slm. Di seguito, i risultati ottenuti in termini di livelli per l'attraversamento VI02 sul Torrente Giustenice.

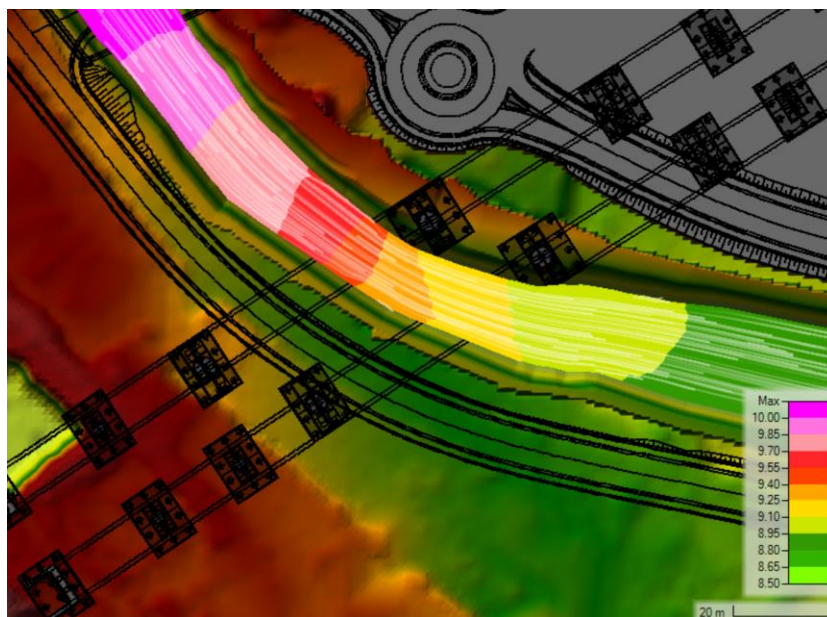


Figura 36: Livelli idrici - VI02 sul T. Giustenice

Il livello massimo in corrispondenza dell'attraversamento previsto VI02 sul Torrente Giustenice si attesta a +9.58 m slm.



 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

### Viadotto IV01 – Torrente Giustenice

Di seguito, i risultati ottenuti in termini di livelli per l'attraversamento IV01 sul Torrente Giustenice.

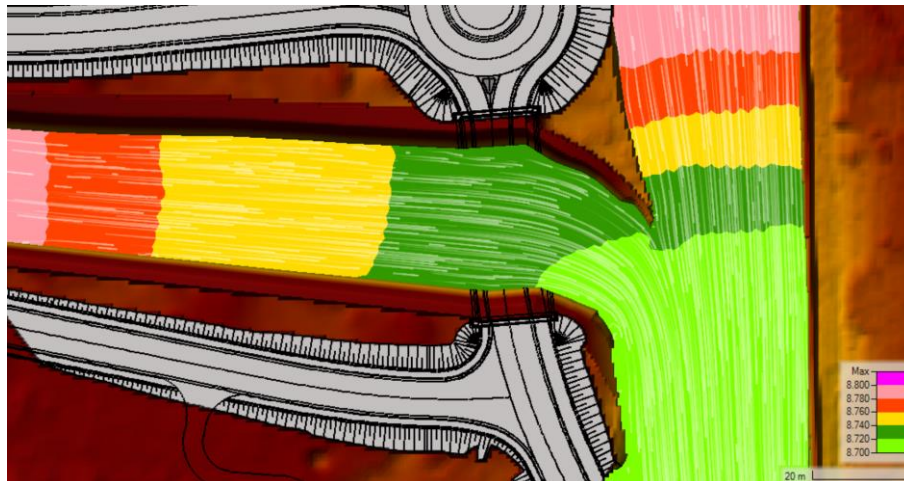


Figura 37: Livelli idrici – IV01 sul T. Giustenice

Il livello massimo in corrispondenza dell'attraversamento previsto IV01 sul Torrente Giustenice si attesta a +8.74 m slm.

### Viadotto IV02 – Torrente Giustenice

Di seguito, i risultati ottenuti in termini di livelli per l'attraversamento IV02 sul Torrente Giustenice.

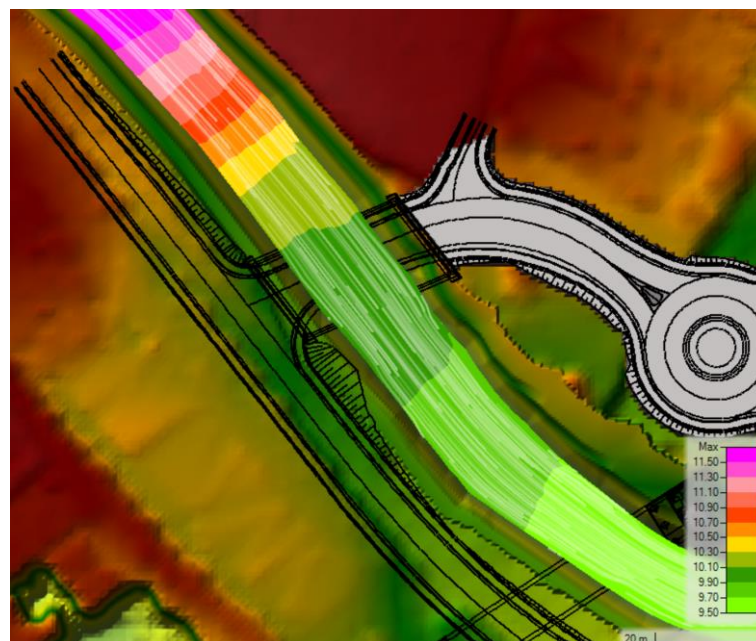



Figura 38: Livelli idrici – IV01 sul T. Giustenice

Il livello massimo in corrispondenza dell'attraversamento previsto IV02 sul Torrente Giustenice si attesta a +10.10 m slm.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

## 8 EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SULLE OPERE IN PROGETTO

Con riferimento allo studio idrologico annesso (rif. “*IV0100D09RIID0001001A*”), 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. Maremola, ad oggi stimata per il  $Tr = 200$  anni in 498 mc/s, si ottiene un valore della portata di progetto  $Tr_{200}$  proiettata nel periodo 2061-2090 pari a 562 mc/s circa, che è prossima alla portata ad oggi stimata per il  $Tr = 500$  anni (i.e. 608 mc/s). Applicando tali incrementi invece alla portata di progetto del T. Giustenice, ad oggi stimata per il  $Tr = 200$  anni in 157 mc/s, si ottiene un valore della portata di progetto  $Tr_{200}$  proiettata nel periodo 2061-2090 pari a 177 mc/s circa, che corrisponderebbe alla portata ad oggi stimata per il  $Tr = 500$  anni (i.e. 181 mc/s).

Con riferimento agli elaborati grafici annessi allo studio idraulico, riportanti le aree potenzialmente inondabili per  $Tr = 500$  anni, non si riscontrano particolari criticità rispetto alla configurazione di progetto ( $Tr_{200}$ ) ad oggi esaminata; di seguito, si riportano inoltre i valori di livello idrico e franco idraulico relativo allo scenario  $Tr = 500$  anni (“di riferimento” al 2090), in corrispondenza dei viadotti VI02 in progetto sui T. Maremola e Giustenice e IV01 e IV02 sul T. Giustenice, sopra analizzati.

	<b>Quota minima impalcato [m slm]</b>	<b>Livello di piena Tr 500 [m slm]</b>	<b>Franco sul livello idrico Tr 500 [m]</b>
VI02 (T. Maremola)	+18.10	+12.35	+5.75
VI02 (T. Giustenice)	+17.10	+12.21	+4.89
IV01 (T. Giustenice)	+12.80	+11.54	+1.26
IV02 (T. Giustenice)	+13.97	+12.83	+1.34

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.

 <b>ITALFERR</b> <small>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</small>	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

## 9 COMPATIBILITA' IDRAULICA DELLE OPERE IN PROGETTO

La modellazione numerica dei Torrenti Maremola e Giustenice elaborata nell'ambito del presente studio permette di fornire una valutazione dell'interferenza del nuovo attraversamento ferroviario sui due torrenti, entrambi corsi d'acqua liguri interessati 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 dei due torrenti 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 doppio viadotto sui due torrenti e dalla realizzazione delle opere connesse alla realizzazione della nuova stazione ferroviaria di Pietra Ligure oltre che dalla sistemazione dei due torrenti a monte e valle del nuovo ponte.

La sistemazione dei due torrenti prevede l'allargamento della sezione utile al deflusso, la riprofilatura del fondo alveo (intesa come eliminazione di dossi, accumuli di detritti, ecc), la disposizione di opportune opere di difesa del fondo alveo e delle sponde.

In entrambi i torrenti si vuole regolarizzare l'alveo naturale, risagomandolo in una forma trapezia a pendenza regolare, per aumentare la portata convogliata all'interno delle sponde naturali del corso d'acqua. Le sponde sono sostenute da una scogliera in massi cementati che evita la possibile erosione al piede.

Dai risultati della modellazione bidimensionale (dello stato *“post operam”*) emerge come l'intervento di sistemazione produca importanti miglioramenti rispetto alle condizioni attuali per i tempi di ritorno studiati. E' infatti evidente la riduzione dei valori dei livelli idrici e dell'estensione dell'allagamento in entrambi i corsi d'acqua, sia a monte che a valle della loro confluenza. Le velocità si attestano sui medesimi valori rilevati nella configurazione ante operam e l'intervento, in generale, non altera le condizioni di deflusso a monte e a valle della zona interessata dal progetto ferroviario.

Dai risultati illustrati si evince come gli interventi previsti inducano dei sensibili miglioramenti al deflusso della portata di progetto rispetto alle criticità evidenziate nella configurazione ante operam.

 <b>ITALFERR</b> <small>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</small>	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C

La sistemazione idraulica dei torrenti, grazie all'aumento della sezione utile al deflusso in entrambi i corsi d'acqua, evita l'esonazione del Torrente Giustenice, confinando le portate nell'alveo naturale e limita l'esonazione del Torrente Maremola.

La verifica idraulica degli attraversamenti sui Torrenti Maremola e Giustenice 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 dei ponti/viadotti in progetto, con franchi idraulici superiori ai valori minimi stabiliti nelle normative vigenti.

Con riferimento alla pianificazione di bacino vigente, per i corsi 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 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 periferiali esterne alle precedenti A e B, inondabili al verificarsi dell'evento di piena con portata al colmo di piena corrispondente a periodo di ritorno  $T_r=500$  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 ferroviario sui Torrenti Maremola e Giustenice e le altre opere connesse alla realizzazione della nuova

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Maremola e Giustenice</b>	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 001	<b>REV.</b> C	<b>FOGLIO</b> 69 di 69

stazione di Pietra Ligure non alterano le attuali condizioni di deflusso nel corso d'acqua ma anzi riducono le possibili esondazioni nella zona;

- in corrispondenza degli attraversamenti progettati i franchi idraulici risultano soddisfatti;
- non modificano le condizioni di deflusso idrico e solido nel tratto oggetto di studio.

Pertanto, le opere previste si possono definire idraulicamente compatibili.