

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



U.O. OPERE CIVILI

PROGETTO DEFINITIVO

RADDOPPIO DELLA LINEA GENOVA – VENTIMIGLIA
TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Varatella

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 2 B

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	D. Polverelli	Dic. 2021	C. Cesali	Dic. 2021	G. Fadda	Dic. 2021	A. Vittozzi Gennaio 2022 ITALFERR S.p.A. U.O. Opere Civili e Gestione delle varianti Dott. Ing. Andrea Vittozzi Ordine degli Ingegneri della Provincia N° A.20783
B	Emissione esecutiva	D. Polverelli	Gen.2022	C. Cesali	Gen. 2022	G. Fadda	Gen. 2022	

File: IV0I00D09RIID0002002B.doc

n. Elab.:

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

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	2 di 58

INDICE

1	PREMESSA	5
1.1	RIFERIMENTI NORMATIVI.....	6
2	INQUADRAMENTO GENERALE E OBIETTIVI DELLO STUDIO.....	13
2.1	OBIETTIVI DELLO STUDIO.....	14
2.2	ELENCO ELABORATI DI PROGETTO DI RIFERIMENTO.....	14
3	STUDIO IDRAULICO.....	15
3.1	GENERALITÀ.....	15
3.2	DATI DI BASE.....	16
3.2.1	DATI TOPOGRAFICI	16
3.2.1	DATI IDROLOGICO-IDRAULICI	16
3.3	IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO NUMERICO.....	21
3.3.1	APPROCCIO MATEMATICO (2D)	21
3.3.2	GENERAZIONE DEL MODELLO DIGITALE DEL TERRENO.....	25
3.3.3	DEFINIZIONE DEL DOMINIO E DELLA GRIGLIA DI CALCOLO.....	27
3.3.4	STRUTTURE IDRAULICHE ALL'INTERNO DEL MODELLO 2D.....	31
3.3.5	CONDIZIONI AL CONTORNO.....	34
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".....	38
4	VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO DI PROGETTO	43
5	VERIFICA ALLO SCALZAMENTO.....	44
6	OPERE DI SISTEMAZIONE IDRAULICA.....	49
7	VERIFICA DELLE FASI DI REALIZZAZIONE DI OPERE IN ALVEO	52
8	EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SULLE OPERE IN PROGETTO.....	56
9	COMPATIBILITÀ IDRAULICA DELLE OPERE IN PROGETTO	57

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

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	3 di 58

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 VARATELLO ALL’INTERSEZIONE CON LA FERROVIA PER TR 50,200 E 500 ANNI	18
FIGURA 4: ESTRATTO DELLE MAPPE DELLE AREE DI PERICOLOSITÀ IDRAULICA DEL TORRENTE VARATELLA IN QUEL DI BORGHETTO SANTO SPIRITO (FONTE: PIANO DI GESTIONE DEL RISCHIO ALLUVIONI, AUTORITÀ DI BACINO DISTRETTUALE DELL’APPENNINO SETTENTRIONALE).....	20
FIGURA 5 – SOFTWARE HEC RAS 6.0: SISTEMA DI RIFERIMENTO.	23
FIGURA 6 – SOFTWARE HEC RAS: IN GRIGIO IL DATO DELLA GRIGLIA DTM, IN ROSSO LA CELLA DI CALCOLO DEL MODELLO IDRAULICO. A DESTRA LA SCHEMATIZZAZIONE EFFETTUATA DA HEC RAS SULLE FACCE DEL BORDO DELLA CELLA.	25
FIGURA 7: ESTRATTO DEL DTM OTTENUTO INTEGRANDO IL DTM ORIGINARIO CON LE SEZIONI TRASVERSALI; IL RIQUADRO DI DETTAGLIO MOSTRA IL PASSAGGIO AL TRATTO INTERPOLATO.....	27
FIGURA 8: ESTENSIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO	28
FIGURA 9: DOMINIO DI CALCOLO E POSIZIONE DEI RILEVATI UTILIZZATI PER LA DEFINIZIONE DELLA MESH	29
FIGURA 10: DETTAGLIO DELLA MESH IN PROSSIMITÀ DELL’ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO ESISTENTE	30
FIGURA 11: ESEMPIO DI DEM A SINISTRA ESTRAZIONE DEI PROFILI LUNGO I CONFINI DELLE CELLE, A DESTRA CURVA LIVELLO-VOLUME INVASATO	31
FIGURA 12: STRUTTURE IDRAULICHE INSERITE ALL’INTERNO DEL MODELLO.....	32
FIGURA 13: SCHEMATIZZAZIONE DELL’ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO ESISTENTE ALL’INTERNO DEL MODELLO	33
FIGURA 14: SCHEMATIZZAZIONE DELL’ATTRAVERSAMENTO AUTOSTRADALE MEDIANTE LA DEFINIZIONE DELL’INGOMBRO DELLE PILE IN ALVEO.....	33
FIGURA 15: CONDIZIONI AL CONTORNO IMPOSTE AL MODELLO	34
FIGURA 16: CONFRONTO TRA GLI ALLAGAMENTI OTTENUTI CON IL MODELLO E QUELLI DEFINITI DAL PAI.	35
FIGURA 17: MODELLO NUMERICO 2D, T. VARATELLA: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, ANTE OPERAM, TR = 200 ANNI.	37
FIGURA 18: STRALCIO DELLA PLANIMETRIA DI PROGETTO IN QUEL DI PIETRA LIGURE.....	39
FIGURA 19: STRALCIO DEL PROFILO DI PROGETTO, NUOVO VIADOTTO VI03.	40
FIGURA 20: STRALCIO DEL PROFILO DI PROGETTO, NUOVO VIADOTTO VI04.	40
FIGURA 21: MODELLO NUMERICO 2D, T. VARATELLA: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, POST OPERAM, TR = 200 ANNI.	41
FIGURA 22: MODELLO NUMERICO 2D, T. VARATELLA: CONFRONTO IN TERMINI DI AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, ANTE OPERAM (A SINISTRA) VS POST OPERAM (A DESTRA), TR = 200 ANNI.	42
FIGURA 23 - DIFFERENTI TIPOLOGIE DI PILE NON UNIFORMI DOTATE DI FONDAZIONI.	47

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

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	4 di 58

FIGURA 24 – VIADOTTO VI04, TORRENTE VARATELLA: SEZIONE DI PROGETTO.	51
FIGURA 25: 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	54
FIGURA 26: LIVELLI IDRICI - VI03	55

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 A MONTE DELL'ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO PER VARI TEMPI DI RITORNO (ANTE OPERAM).....	38
TABELLA 5: LIVELLI MASSIMI A MONTE DELL'ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO PER TEMPO DI RITORNO (POST OPERAM).....	42
TABELLA 6 – VIADOTTO VI03 (ALVEO INCISO, TORRENTE VARATELLA): VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO DI PROGETTO.	43
TABELLA 7 – VIADOTTO VI04 (AREA INONDABILE, TORRENTE VARATELLA): VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO DI PROGETTO.	43
TABELLA 8- FORMULAZIONE CSU: VALORI DEI FATTORI CORRETTIVI K1, K2, K3.....	45
TABELLA 9- VIADOTTO VI04 (AREA INONDABILE, TORRENTE VARATELLA): VALORI DI SCALZAMENTO ATTESI ATTORNO ALLE PILE, PER Tr200.....	48
TABELLA 10- VIADOTTO VI04 (AREA INONDABILE, TORRENTE VARATELLA): VALORI DI SCALZAMENTO ATTESI ATTORNO AL SISTEMA "PILA-FONDAZIONE" (PILE P1, P2, P3), PER Tr200.....	49

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

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	5 di 58

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 Borghetto Santo Spirito, la nuova linea ferroviaria attraversa il Torrente Varatella. Inoltre, in tale area è prevista la realizzazione della nuova fermata di Borghetto Santo Spirito, in sinistra idraulica al Torrente Varatella.

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

 ITALFERR <small>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</small>	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Varatella	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 002	REV. B

1.1 RIFERIMENTI NORMATIVI

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

Per quanto riguarda il torrente Varatella, è preso in esame il Piano di bacino stralcio per l'assetto idrogeologico per il bacino del Torrente Varatella, 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);

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

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	7 di 58

- "Manuale di Progettazione delle Opere Civili" della Rete Ferroviaria Italiana (RFI);
- 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:

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

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	8 di 58

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

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

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

Art. 15 – Fasce di inondabilità

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

.....

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

PROGETTO DEFINITIVO

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

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	9 di 58

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

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

.....

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

.....

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

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

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

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

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

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	10 di 58

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

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

.....

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

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

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

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

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	11 di 58

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

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

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

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

Alla loro valutazione devono concorrere considerazioni sia relative alla tipologia di opera e alla sua rilevanza determinata anche in funzione della vulnerabilità delle zone limitrofe, sia relative alle caratteristiche cinetiche della corrente, con la fondamentale distinzione dei casi di correnti lente e di correnti veloci. I franchi idraulici non devono essere inferiori ai valori indicati nella tabella seguente, assumendo come riferimento il valore maggiore tra quelli contrassegnati con le lettere (a) e con (b).

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

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	12 di 58

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

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

PROGETTO DEFINITIVO

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

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	13 di 58

2 INQUADRAMENTO GENERALE E OBIETTIVI DELLO STUDIO

La zona di interesse è ubicata nel Comune di Borghetto Santo Spirito (SV) tra la frazione Canapari Marici e lo sbocco a mare del Torrente Varatella in corrispondenza dell'abitato di Borghetto Santo Spirito.

In questo tratto del corso d'acqua sono presenti diversi attraversamenti; da monte verso valle si susseguono: il viadotto autostradale della A10, il ponte di Corso Giotto, il ponte di via Leonardo Da Vinci, due ponti pedonali, il ponte della SS, l'attuale ponte ferroviario e il ponte di via Lungomare Matteotti.

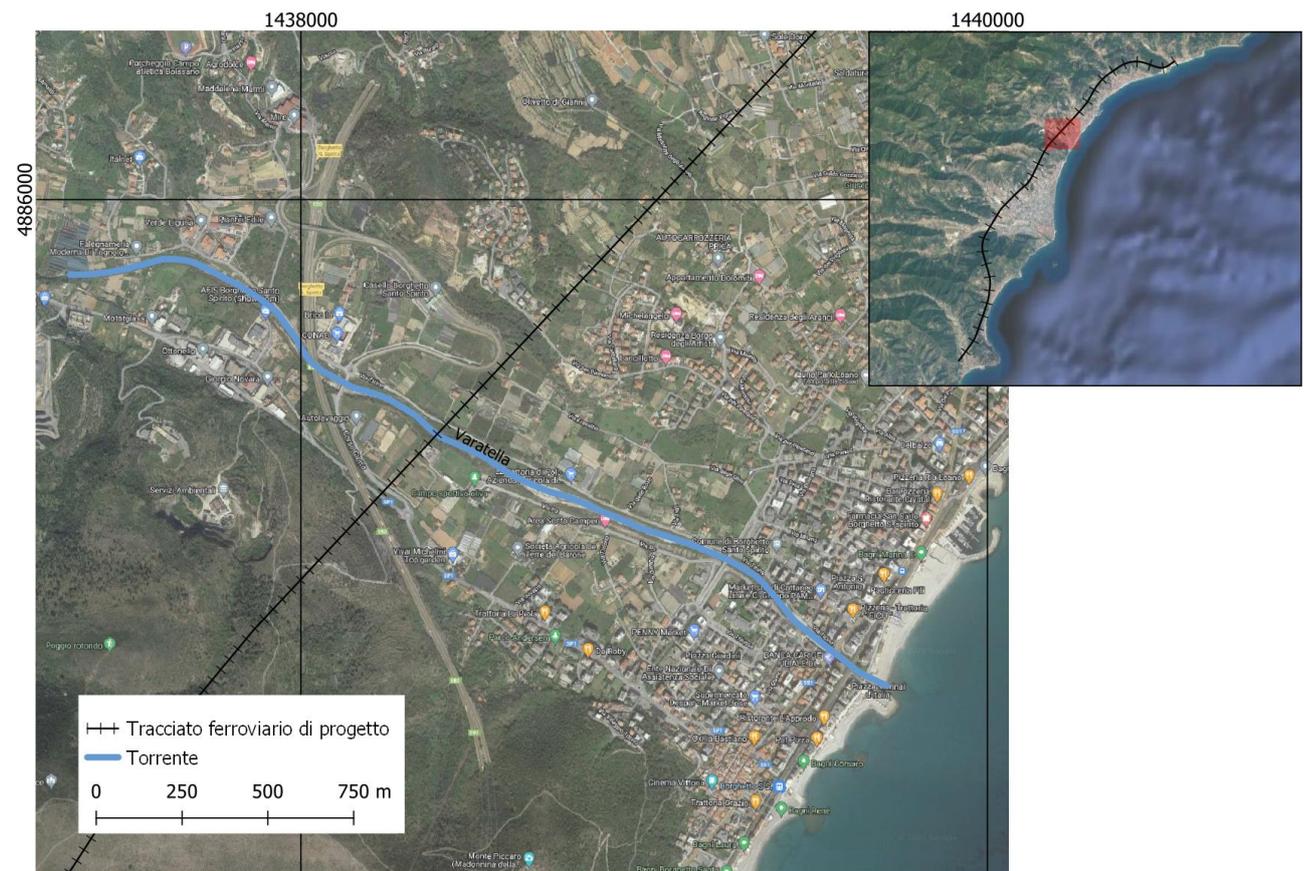


Figura 1 – Inquadramento generale dell'area di studio

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

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

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV0I	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	14 di 58

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 al Torrente Varatella, in particolare all'intersezione con la linea ferroviaria.

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

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

2.2 ELENCO ELABORATI DI PROGETTO DI RIFERIMENTO

ELABORATO	SCALA	CODIFICA
Relazione idrologica generale	-	IV0I00D09RIID0001001
Planimetria livelli idrici Torrente Varatello - Modello 2D - ante operam - Tr 50 anni	1:1000	IV0I00D09P7ID0002009
Planimetria livelli idrici Torrente Varatello - Modello 2D - ante operam - Tr 200 anni	1:1000	IV0I00D09P7ID0002010
Planimetria livelli idrici Torrente Varatello - Modello 2D - ante operam - Tr 500 anni	1:1000	IV0I00D09P7ID0002011
Planimetria valori velocità Torrente Varatello - Modello 2D - ante operam - Tr 200 anni	1:1000	IV0I00D09P7ID0002015
Sezioni significative con livelli idrici (Modello 2D) - Tr 50, 200, 500 anni - Torrente Varatello - ante operam	varie	IV0I00D09WZID0002005
Profili di rigurgito (Modello 2D) - Tr 50, 200, 500 anni - Torrente Varatello - ante operam	varie	IV0I00D09FZID0002005
Planimetria livelli idrici Torrente Varatello - Modello 2D - post operam - Tr 50 anni	1:1000	IV0I00D09P7ID0002012

 ITALFERR <small>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</small>	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Varatella	COMMESSA IV0I	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 002	REV. B

ELABORATO	SCALA	CODIFICA
Planimetria livelli idrici Torrente Varatello - Modello 2D - post operam - Tr 200 anni	1:1000	IV0I00D09P7ID0002013
Planimetria livelli idrici Torrente Varatello - Modello 2D - post operam - Tr 500 anni	1:1000	IV0I00D09P7ID0002014
Planimetria valori velocità Torrente Varatello - Modello 2D - post operam - Tr 200 anni	1:1000	IV0I00D09P7ID0002016
Sezioni significative con livelli idrici (Modello 2D) - Tr 50, 200, 500 anni - Torrente Varatello - post operam	varie	IV0I00D09WZID0002006
Profili di rigurgito (Modello 2D) - Tr 50, 200, 500 anni - Torrente Varatello - post operam	varie	IV0I00D09FZID0002006
Planimetria sistemazione idraulica – Torrente Varatella – Pianta e sezioni	varie	IV0I00D09PZID0002003

Tabella 1 – Elenco elaborati annessi.

3 STUDIO IDRAULICO

3.1 GENERALITÀ

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

L'approccio metodologico seguito è partito dall'integrazione ed elaborazione di dati di base, fondamentalmente di natura topografica per poter correttamente implementare la geometria del sistema.

Una volta elaborata la base topografica è stato possibile sviluppare un modello idraulico con il software HEC-RAS¹(ver. 6.1), con schema puramente bidimensionale.

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

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

 ITALFERR <small>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</small>	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Varatella	COMMESSA IV0I	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 002	REV. B	FOGLIO 16 di 58

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 Liguria² con isobatimetriche ad 1 m.

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

3.2.1 Dati idrologico-idraulici

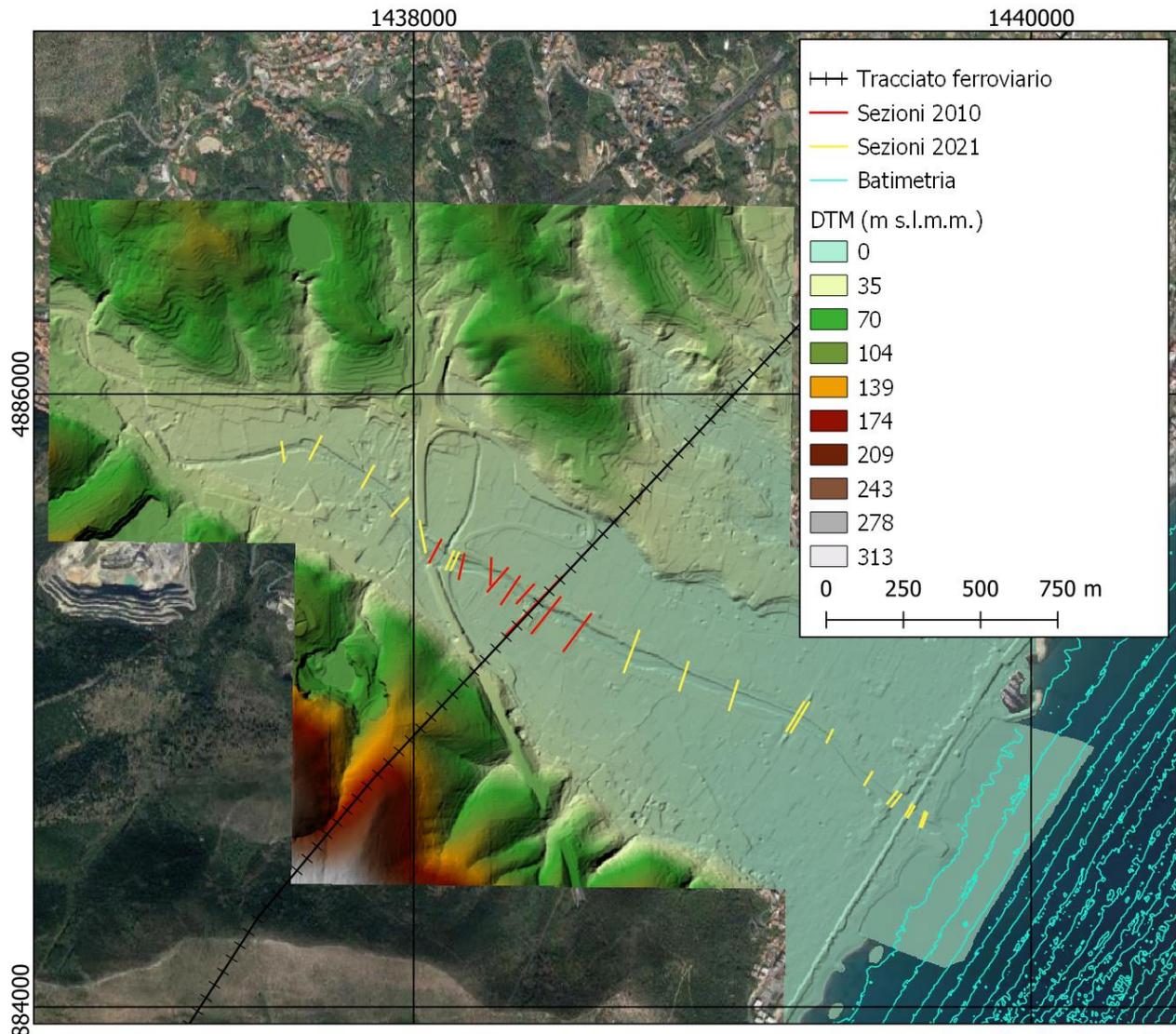
Le informazioni di base di carattere idrologico-idraulico includono i dati utilizzati per la definizione delle condizioni al contorno dei modelli e per la loro calibrazione.

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

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

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

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	17 di 58


Figura 2: Informazioni topografiche a disposizione

Tali idrogrammi sono stati determinati secondo diversi approcci statistici applicati ai dati di precipitazione, sia secondo Gumbel sia secondo VAPI, comunemente accettati in letteratura nella valutazione degli eventi estremi, implementando su tale base un modello di trasformazione afflussi-deflussi e scegliendo poi i valori più cautelativi per la condizione al contorno del modello idraulico. Gli idrogrammi ottenuti con il metodo VAPI sono risultati più cautelativi, rispetto a quelli ottenuti con il metodo di Gumbel, e sono stati utilizzati per la determinazione delle aree potenzialmente inondabili di riferimento.

PROGETTO DEFINITIVO
**Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale del Torrente Varatella**
COMMESSA
LOTTO
CODIFICA
DOCUMENTO
REV.
FOGLIO

IV01

00

D 09 RI

ID 0002 002

B

18 di 58

TEMPO DI RITORNO	VALORE AL COLMO (m ³ /s)
Tr 50	459
Tr 200	578
Tr 500	656

Tabella 2 – Valori di picco degli eventi estremi considerati

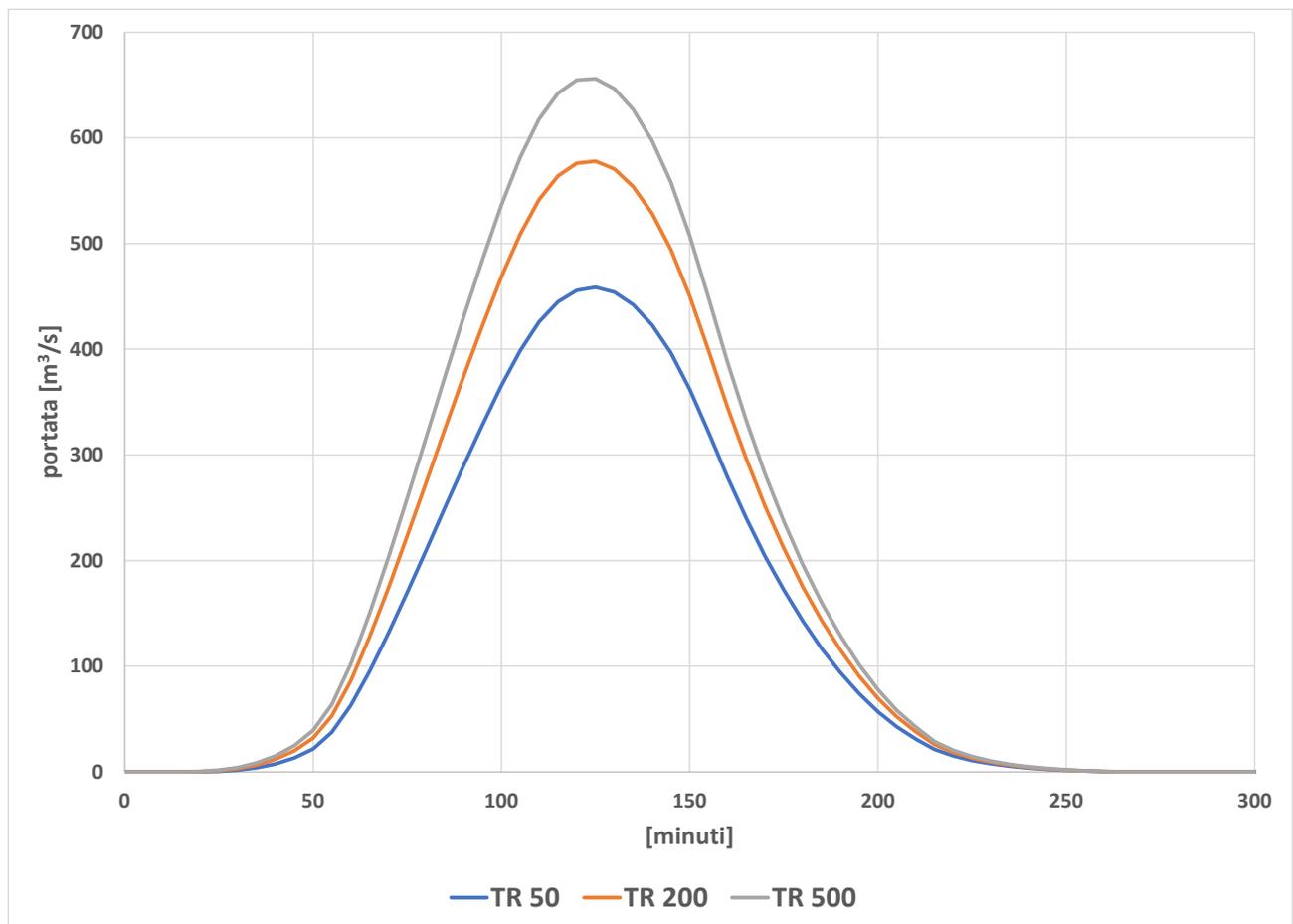


Figura 3: idrogramma di piena del Torrente Varatello all'intersezione con la ferrovia per Tr 50,200 e 500 anni

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*).

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</p>					
<p>PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Varatella</p>	<p>COMMESSA IV01</p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA D 09 RI</p>	<p>DOCUMENTO ID 0002 002</p>	<p>REV. B</p>	<p>FOGLIO 19 di 58</p>

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

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

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

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

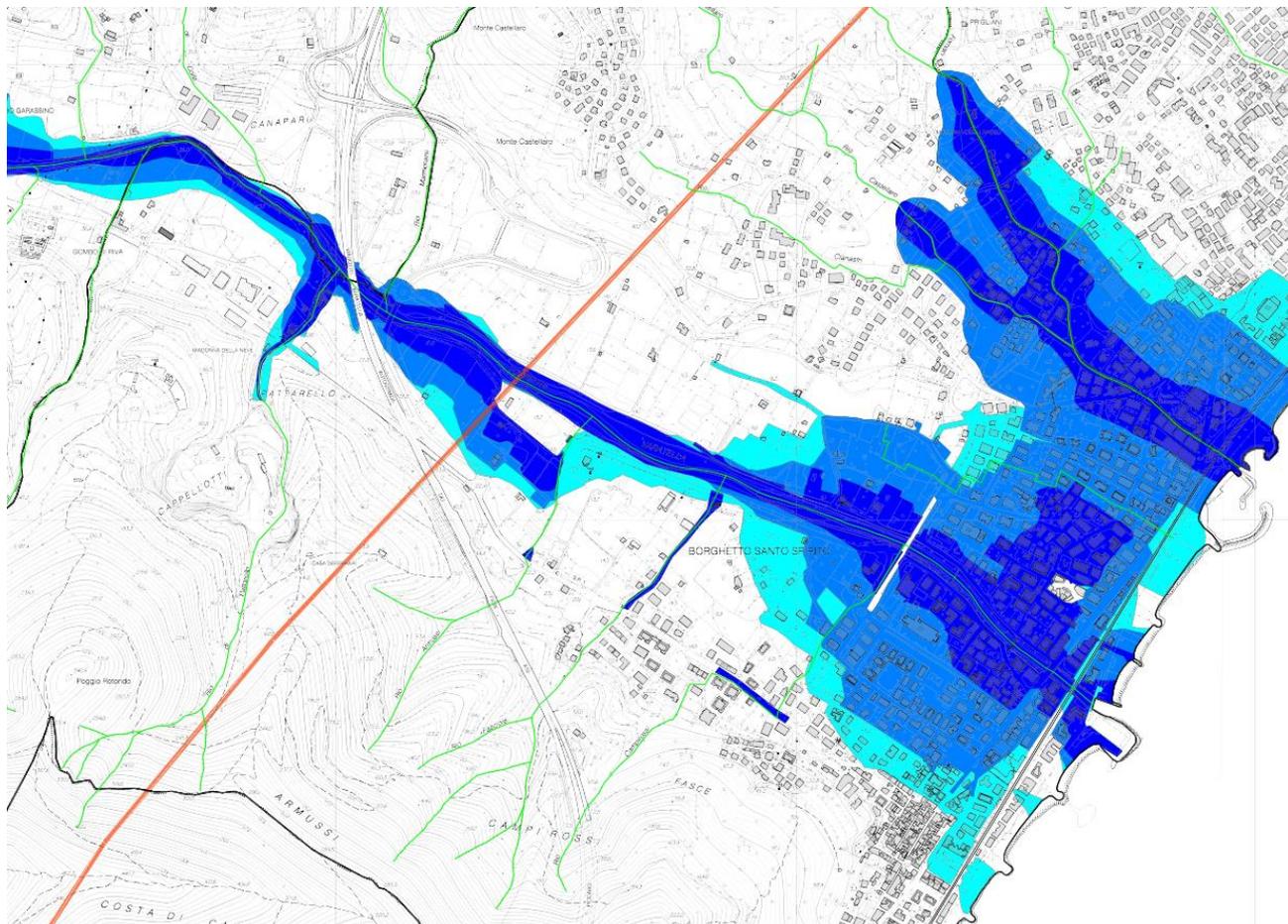
Nella figura seguente, è riportata la sovrapposizione del tracciato di progetto con le aree di pericolosità idraulica riportate nella pianificazione di bacino.

La nuova linea attraversa aree a pericolosità P1, P2, P3, soltanto in corrispondenza del nuovo attraversamento sul T. Varatella. Le opere "accessorie", come la nuova fermata di Borghetto Santo Spirito e le relative nuove viabilità di accesso, non ricadono in area di pericolosità idraulica.

PROGETTO DEFINITIVO

Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Varatella

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	20 di 58



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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Varatella	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 002	REV. B

3.3 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO NUMERICO

3.3.1 Approccio matematico (2D)

Il codice di calcolo utilizzato per l'implementazione del modello bidimensionale del tratto di Torrente Varatella in fase di studio è il software HEC-RAS 6.1 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

 ITALFERR <small>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</small>	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Varatella	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 002	REV. B	FOGLIO 22 di 58

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

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

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

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

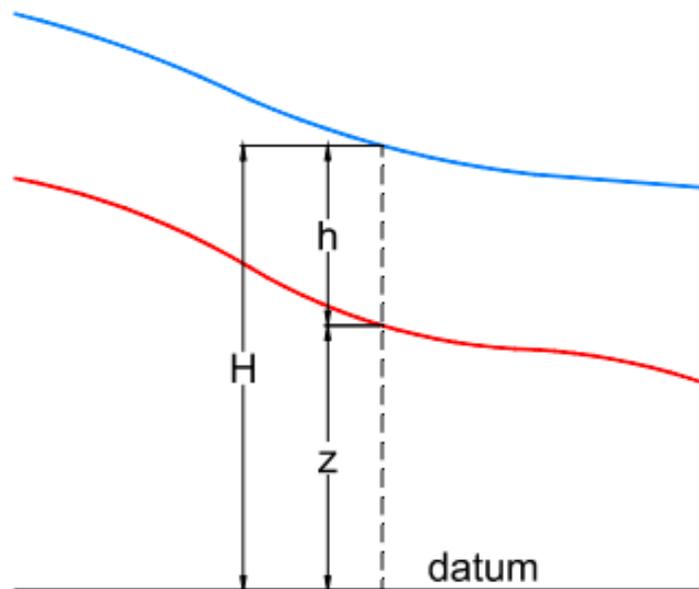


Figura 5 – Software Hec Ras 6.0: sistema di riferimento.

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

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

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

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	24 di 58

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	25 di 58

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

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

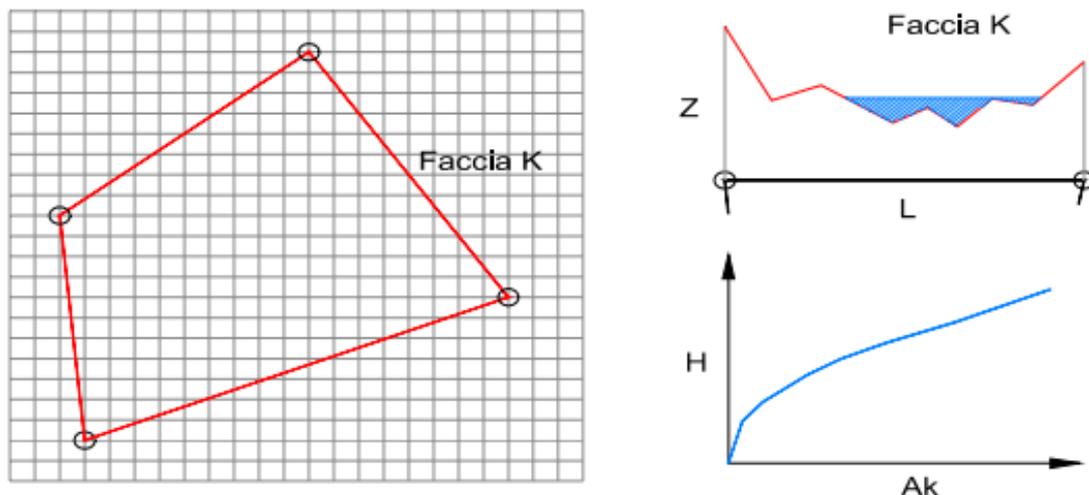


Figura 6 – Software Hec Ras: in grigio il dato della griglia DTM, in rosso la cella di calcolo del modello idraulico. A destra la schematizzazione effettuata da Hec Ras sulle facce del bordo della cella.

3.3.2 Generazione del Modello Digitale Del Terreno

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

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</p>					
<p>PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Varatella</p>	<p>COMMESSA IV01</p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA D 09 RI</p>	<p>DOCUMENTO ID 0002 002</p>	<p>REV. B</p>	<p>FOGLIO 26 di 58</p>

Effettivamente si è scelto di sostituire il dato in alveo fornito dal DTM con quello ottenibile dall'interpolazione tra le sezioni, nel tratto in cui il confronto tra le due tipologie di dati ha evidenziato una non corretta definizione dell'alveo nel DTM; tale discrepanza è dovuta principalmente alla presenza di acqua nella fase di acquisizione dei dati lidar, ossia nell'ultimo tratto di fiume, a valle del Ponte di Via Leonardo Da Vinci. Infatti, benché generalmente la sezione trasversale battuta fornisca valori puntuali più precisi del DTM, dove possibile si è preferito mantenere il DTM che fornisce una rappresentazione continua dell'alveo, considerata più rappresentativa di quella ottenibile da interpolazione dei dati puntuali forniti dalle sezioni.

Nel tratto di valle, dove i valori ottenibili dal DTM appaiono maggiormente influenzati dalla presenza dell'acqua in alveo e dove quindi si discostano maggiormente dalle sezioni, si è scelto di interpolare queste ultime, integrando la morfologia in alveo ricostruita con il DTM al di fuori dell'alveo. Pertanto, a tale scopo è stata effettuata una interpolazione geospaziale delle sezioni rilevate, in ambiente GIS tramite il software XS Interpolator³, 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.

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

PROGETTO DEFINITIVO
**Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale del Torrente Varatella**
COMMESSA
LOTTO
CODIFICA
DOCUMENTO
REV.
FOGLIO

IV01

00

D 09 RI

ID 0002 002

B

27 di 58

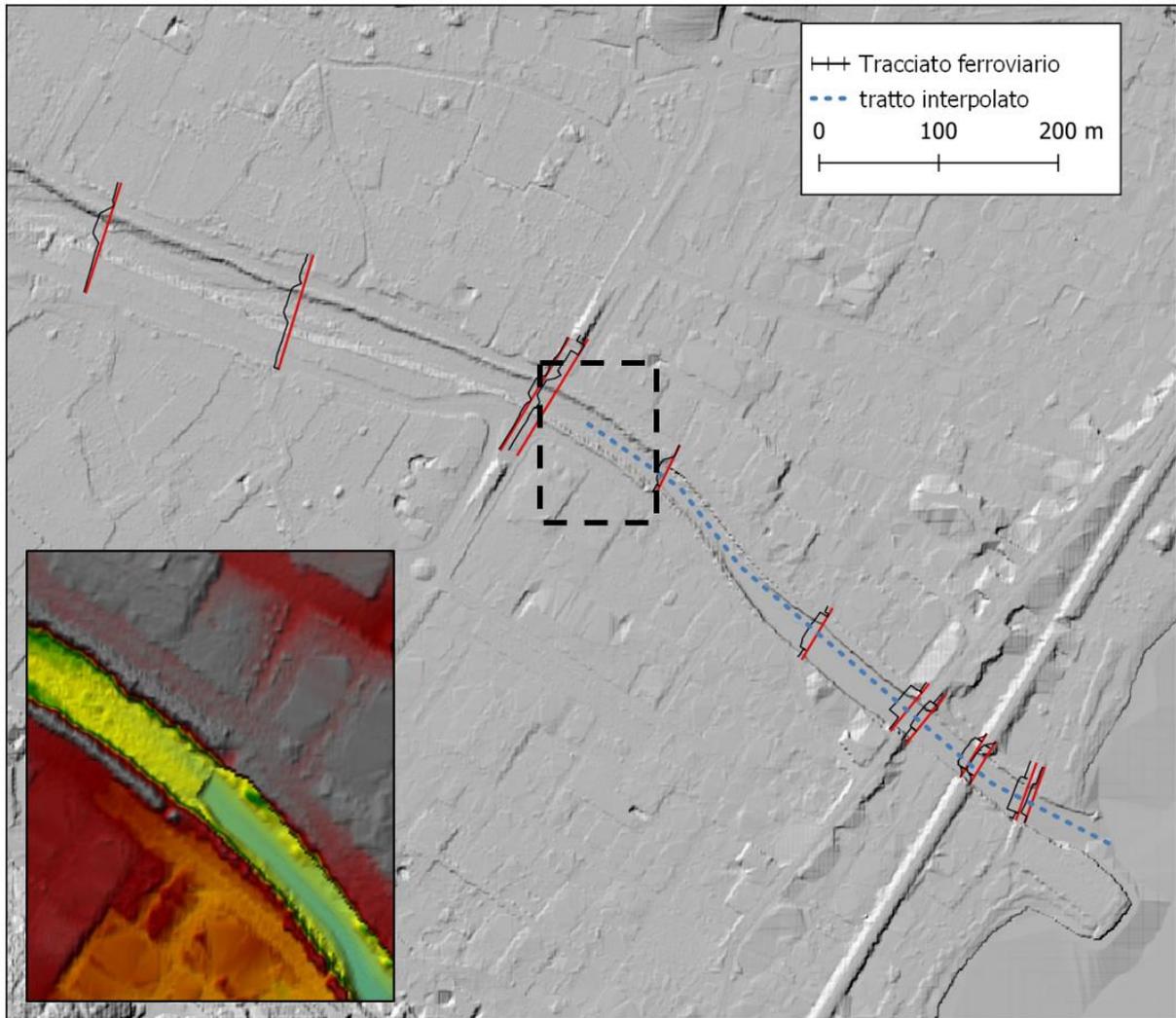


Figura 7: Estratto del DTM ottenuto integrando il DTM originario con le sezioni trasversali; il riquadro di dettaglio mostra il passaggio al tratto interpolato

3.3.3 Definizione del dominio e della griglia di calcolo

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

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

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	28 di 58


Figura 8: Estensione del dominio di calcolo

Per quanto riguarda la griglia di calcolo, HEC-RAS 2D utilizza uno schema di soluzioni a volumi finiti, che consente l'utilizzo di una griglia di calcolo (mesh) strutturata o non strutturata. Ciò significa che la mesh può essere costituita da celle di calcolo da 3 a 8 lati. A partire dal modello digitale del terreno finale implementato come descritto sopra, è stata selezionata una risoluzione nominale della griglia pari a 10 m e sono stati utilizzati gli strumenti automatizzati all'interno di HEC-RAS per la costruzione della griglia di calcolo nel piano campagna, imponendo la posizione dei rilevati, in modo da adattare gli elementi della griglia ai principali ostacoli al deflusso.

PROGETTO DEFINITIVO

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

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	29 di 58

L'alveo del Varatella è stato interamente schematizzato con griglia a 3 m.

La griglia così definita è costituita da 33'425 celle, di estensione media pari a 54.13 m², con una variazione da 5.06 m² a 563.52 m².

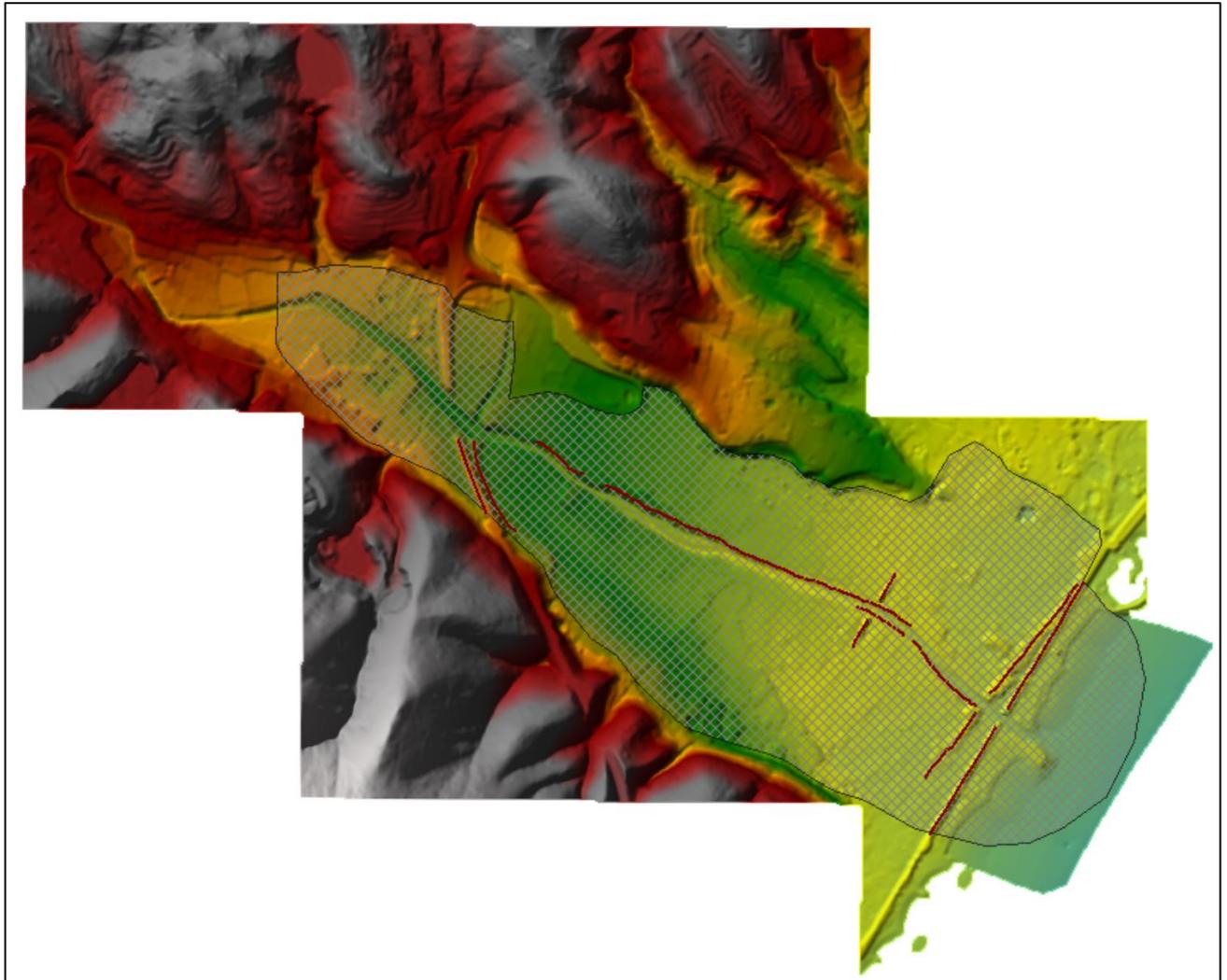


Figura 9: Dominio di calcolo e posizione dei rilevati utilizzati per la definizione della mesh

PROGETTO DEFINITIVO
**Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale del Torrente Varatella**
COMMESSA
LOTTO
CODIFICA
DOCUMENTO
REV.
FOGLIO

IV01

00

D 09 RI

ID 0002 002

B

30 di 58

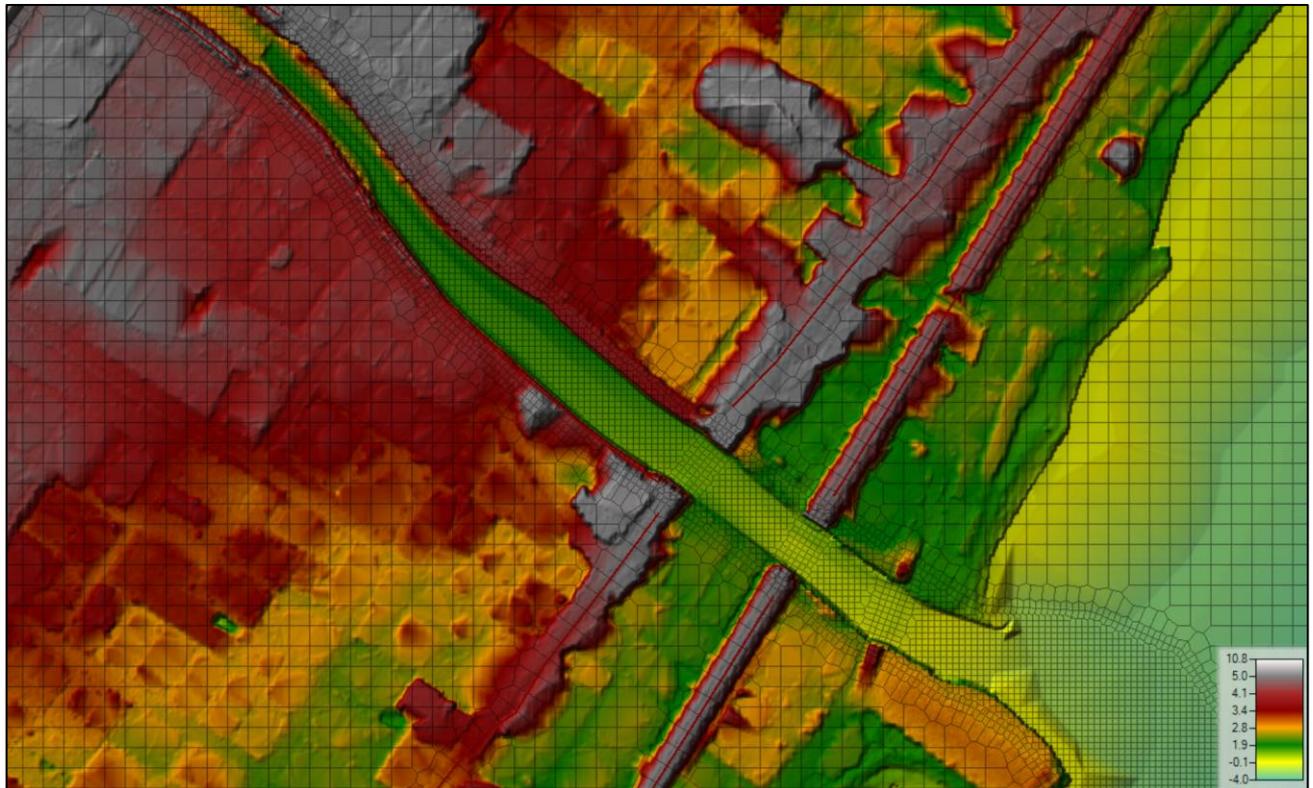


Figura 10: Dettaglio della mesh in prossimità dell'attraversamento ferroviario esistente

La discretizzazione delle celle è stata ritenuta sufficientemente dettagliata per rappresentare la dinamica di allagamento; tuttavia, è opportuno considerare che, in realtà, il livello di dettaglio del modello HEC-RAS non dipende solo dalle dimensioni della cella.

La specificità della modellazione in RAS 2D è legata al fatto che il software è in grado di considerare nel calcolo un'informazione topografica più dettagliata rispetto alla griglia di calcolo che utilizza. 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,

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

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	31 di 58

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

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

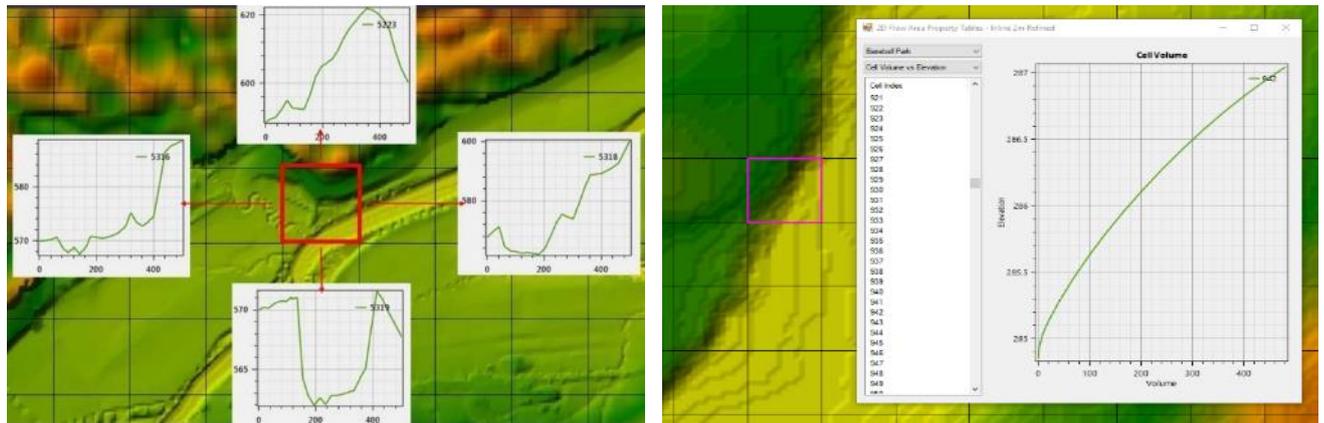


Figura 11: Esempio di DEM a sinistra estrazione dei profili lungo i confini delle celle, a destra curva livello-volume invasato

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. 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.

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 autostradale, che mostra l'ingombro delle pile implementato nel modello.

PROGETTO DEFINITIVO

Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Varatella

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	32 di 58

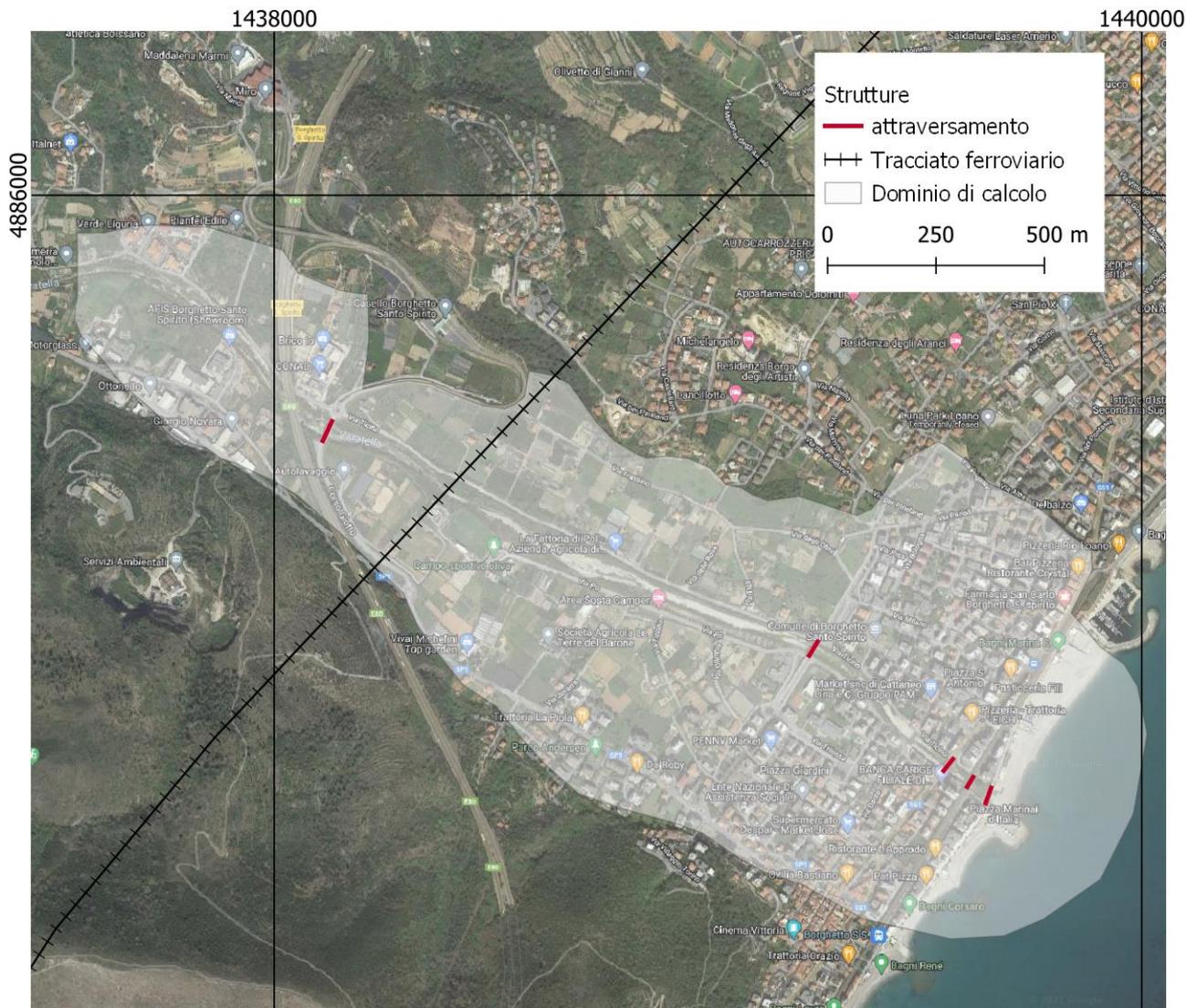


Figura 12: Strutture idrauliche inserite all'interno del modello

PROGETTO DEFINITIVO

Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Varatella

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	33 di 58

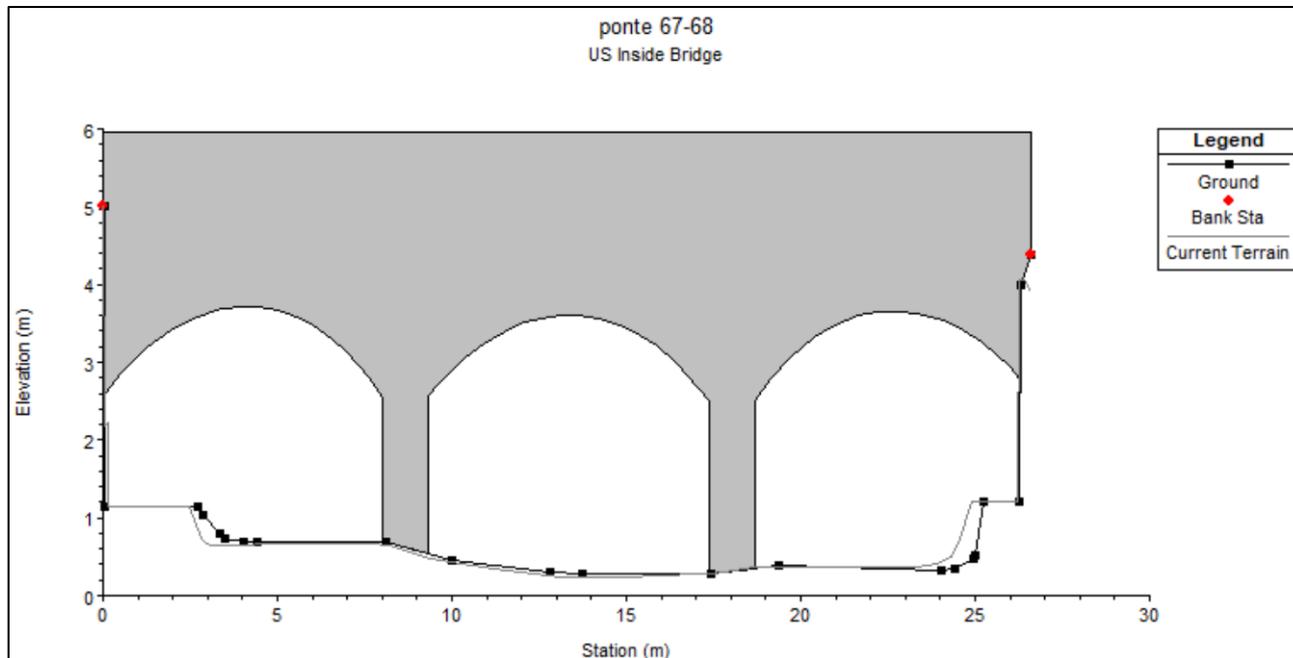


Figura 13: Schematizzazione dell'attraversamento ferroviario esistente all'interno del modello

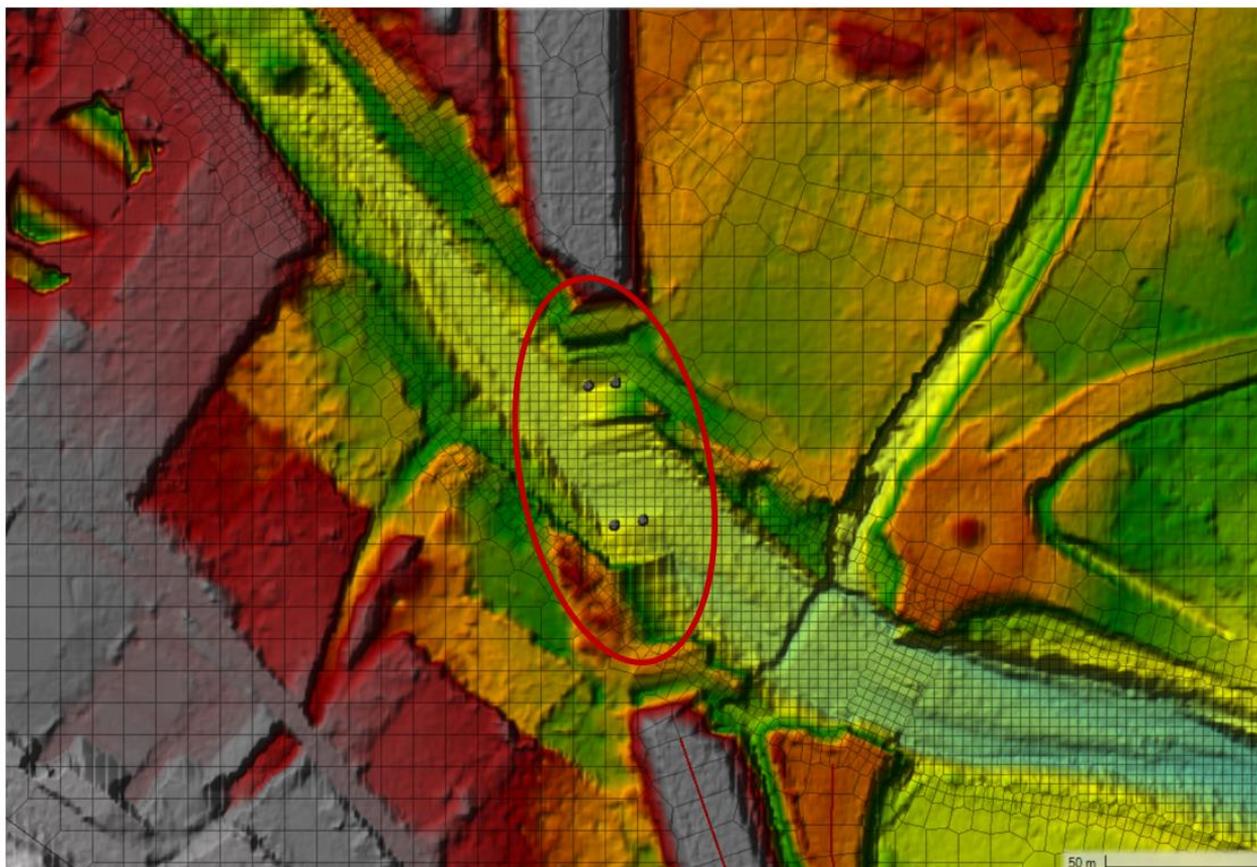


Figura 14: Schematizzazione dell'attraversamento autostradale mediante la definizione dell'ingombro delle pile in alveo

3.3.5 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno imposte al modello includono:

- idrogrammi di piena di riferimento in input a monte;
- condizioni al contorno di valle lungo il contorno a mare: è stata imposta la condizione di livello pari a 2 m s.l.m.m. corrispondente ad una condizione estrema che prende in considerazione l'azione di *storm surge* e l'innalzamento del livello del mare stimato al 2100 dovuto ai cambiamenti climatici, così come definito da studio ENEA disponibile basato sulla stazione di Imperia (rif. IV0I00D09RIID0001001);
- condizioni al contorno di valle sul lato nord-est e sul lato sud dell'area di calcolo dove è previsto il passaggio di acqua attraverso il contorno del dominio: è stata imposta la condizione di *normal depth*, corrispondente ad una condizione di moto uniforme, localmente definita tramite il calcolo della pendenza del terreno.

La Figura 15 mostra la schematizzazione delle principali condizioni al contorno imposte.

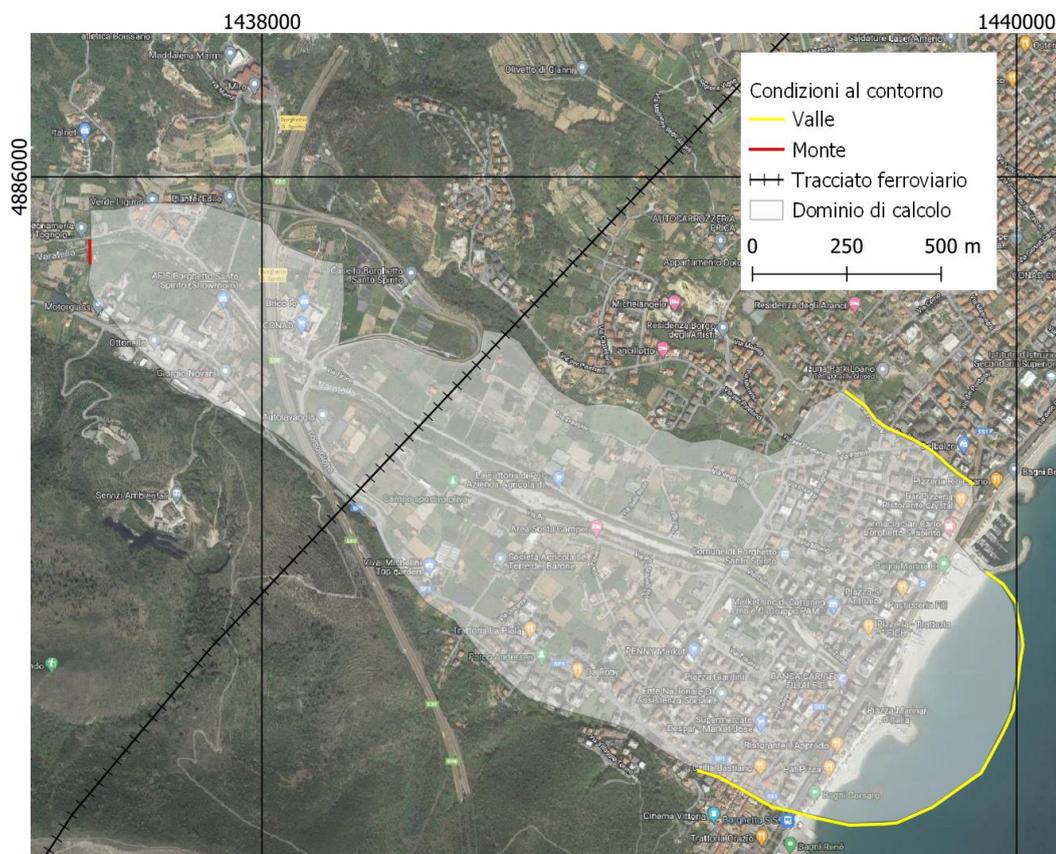


Figura 15: Condizioni al contorno imposte al modello

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Varatella	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 002	REV. B	FOGLIO 35 di 58

3.3.6 Calibrazione

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

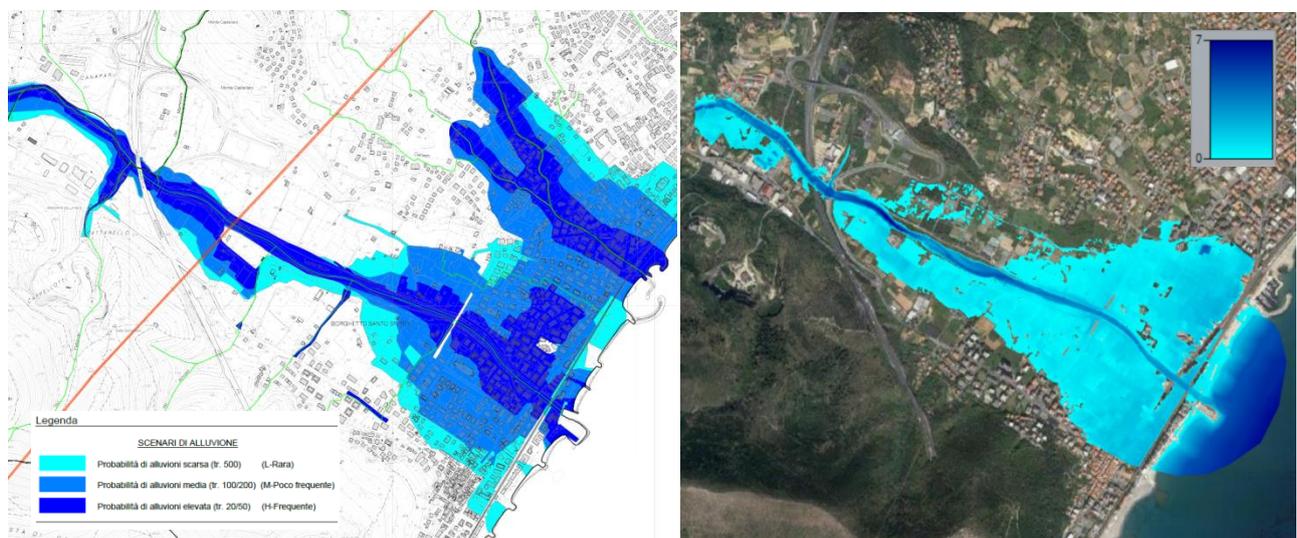


Figura 16: Confronto tra gli allagamenti ottenuti con il modello e quelli definiti dal PAI.

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

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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Varatella	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 002	REV. B

Tabella 3: Scabrezze adottate nel modello

Copertura	n
Alveo	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 carte degli allagamenti PAI 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 PAI 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 0, è stato utilizzato per condurre tre simulazioni sia per lo scenario relativo allo stato attuale sia per la configurazione di progetto, rispettivamente per i tempi di ritorno di 50, 200 e 500 anni, utilizzando gli idrogrammi definiti nel paragrafo 3.2.1.

Nello specifico, per la configurazione:

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

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

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	37 di 58

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 il tempo di ritorno di progetto ($Tr = 200$ anni). Si rimanda agli elaborati specifici per la restituzione grafica dettagliata dei risultati, come definiti nel paragrafo 2.2.

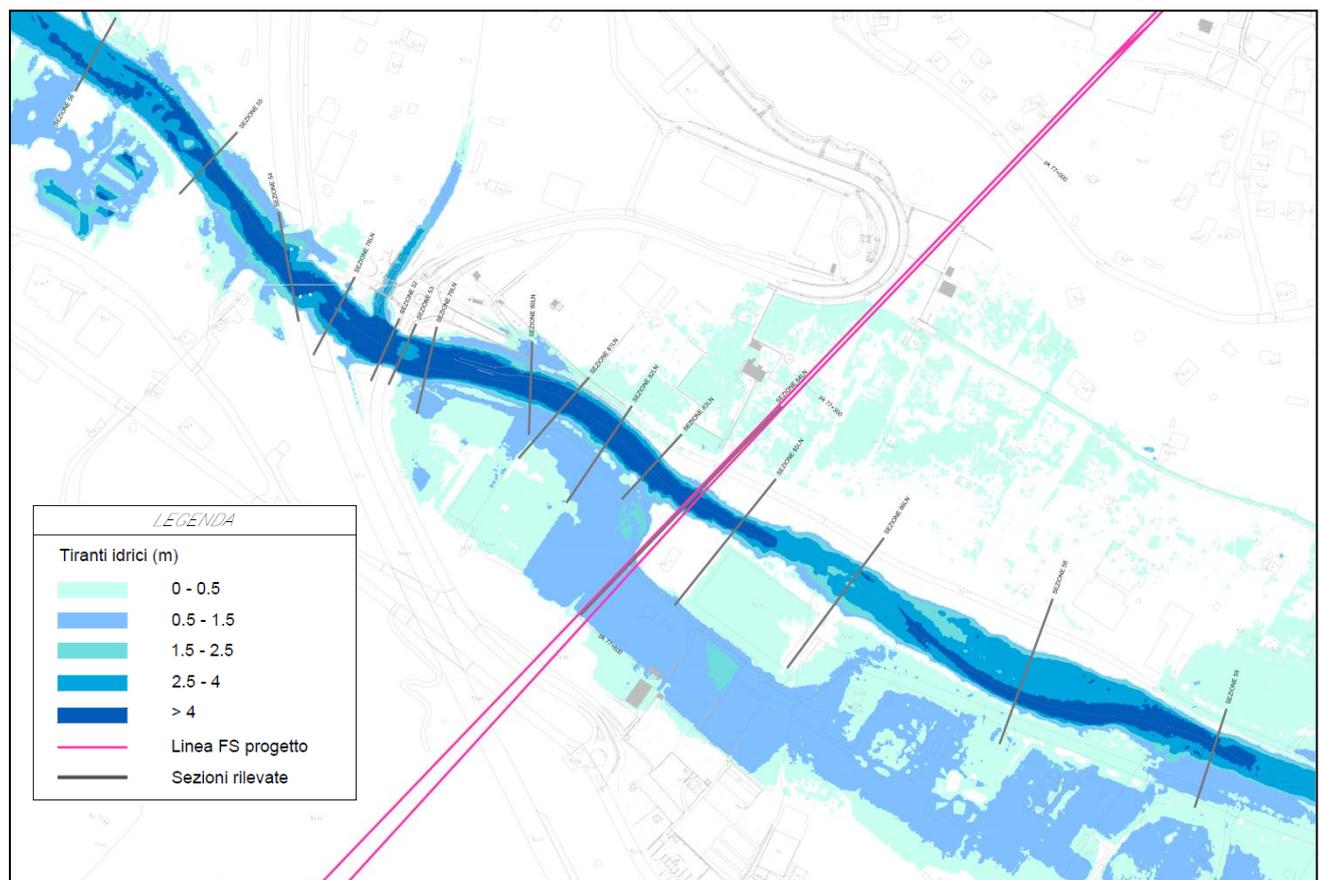


Figura 17: Modello numerico 2D, T. Varatella: aree potenzialmente inondabili, ante operam, $Tr = 200$ anni.

 ITALFERR <small>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</small>	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Varatella	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 002	REV. B

Come evidenziato nella figura precedente, l'area di intervento è soggetta ad esondazioni diffuse delle piene del Torrente Varatella; l'estensione della zona potenzialmente inondabile riproduce, come già mostrato nell'ambito della calibrazione del modello, quella indicata nelle mappe di pericolosità idraulica del P.G.R.A. di riferimento.

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

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

	Livello (m s.l.m.m.)
Tr 50	16.17
Tr 200	16.70
Tr 500	16.83

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 Borghetto Spirito, si prevede la realizzazione delle seguenti opere ed interventi:

- nuovo viadotto ferroviario VI03, per l'attraversamento del Torrente Varatella (alveo inciso);
- nuovo viadotto ferroviario VI04, per l'attraversamento di aree potenzialmente inondabili per esondazione delle piene del Torrente Varatella; l'opera ha lo scopo principale di garantire la massima trasparenza idraulica dell'infrastruttura ferroviaria in un'area esterna all'alveo inciso, ma definita come a pericolosità idraulica (P.G.R.A.) e allagabile come confermato dalle simulazioni numeriche sviluppate nell'ambito del presente studio;
- nuova fermata di Borghetto Santo Spirito, con annesso parcheggio;
- nuove viabilità per l'accesso alla nuova fermata;
- opere di sistemazione idraulica in alveo atte a limitare le esondazioni nell'area di intervento.

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

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	39 di 58

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 planimetria di progetto in quel di Borghetto Santo Spirito.

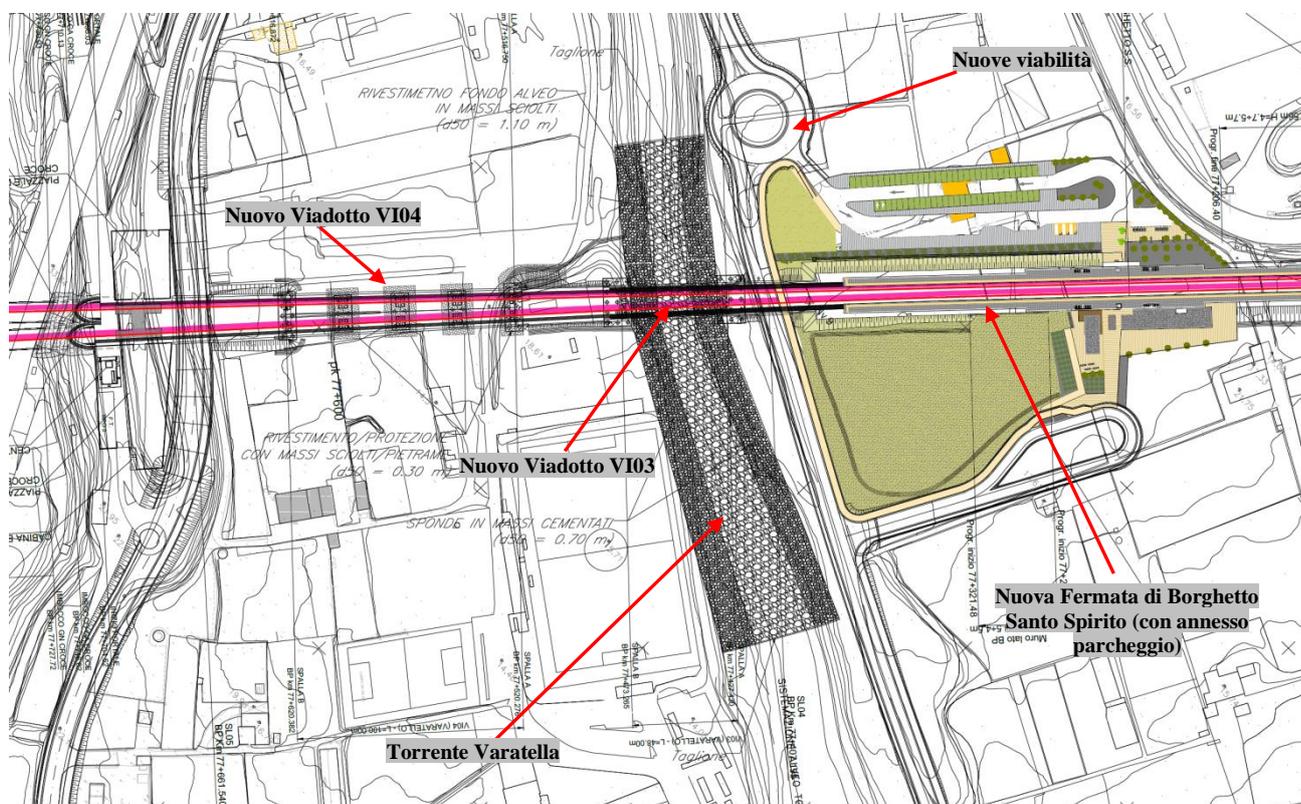


Figura 18: Stralcio della planimetria di progetto in quel di Pietra Ligure.

Di seguito invece uno stralcio del profilo, da cui si evince la configurazione/scansione dei due nuovi viadotti VI03 e VI04.

Nello specifico, il viadotto VI03 è costituito di un'unica campata (con luce di 45 m) che scavalca completamente l'alveo inciso del T. Varatella. Il viadotto VI04 è costituito invece di 4 campate con luce da 25 m, che garantiscono la massima trasparenza idraulica dell'infrastruttura ferroviaria in un'area potenzialmente inondabile per esondazione delle piene del T. Varatella.

PROGETTO DEFINITIVO
**Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale del Torrente Varatella**
COMMESSA
LOTTO
CODIFICA
DOCUMENTO
REV.
FOGLIO

IV01

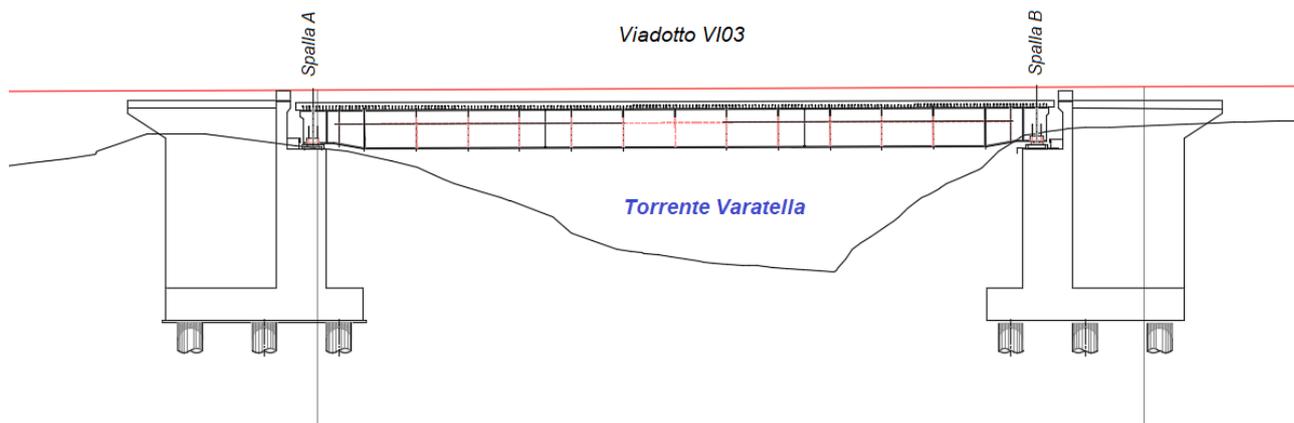
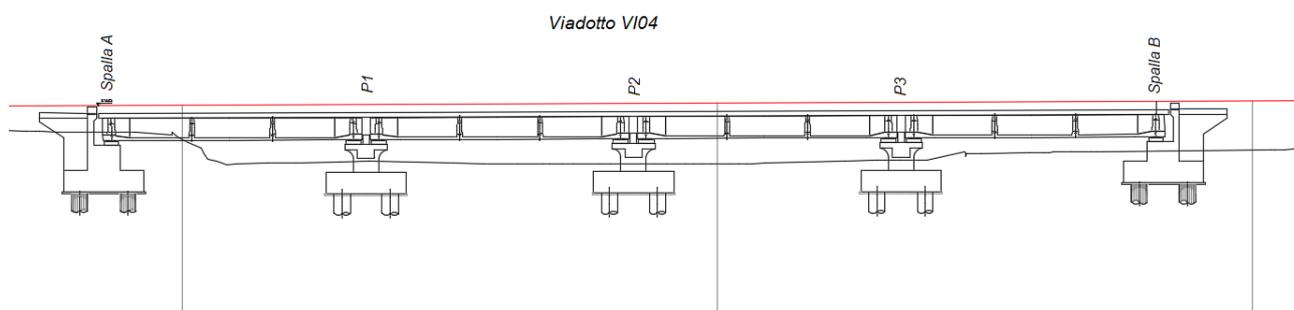
00

D 09 RI

ID 0002 002

B

40 di 58


Figura 19: Stralcio del profilo di progetto, nuovo viadotto VI03.

Figura 20: Stralcio del profilo di progetto, nuovo viadotto VI04.

Stanti le esondazioni diffuse evidenziate nello scenario *ante operam*, descritto nel paragrafo precedente, le opere di sistemazione idraulica previste in progetto sul T. Varatella hanno lo scopo di limitare le esondazione, migliorandone le condizioni di deflusso, nel tratto fluviale limitrofo all'area di intervento, senza alterarle nel tratto fluviale vallivo.

Tali interventi consistono in riprofilature spondali e del fondo alveo, secondo una sezione trapezoidale, sponde 1/1, di altezza e larghezza variabile.

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 del T. Varatella, per i tre tempi di ritorno di riferimento, nello scenario "*post operam*".

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

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	41 di 58

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

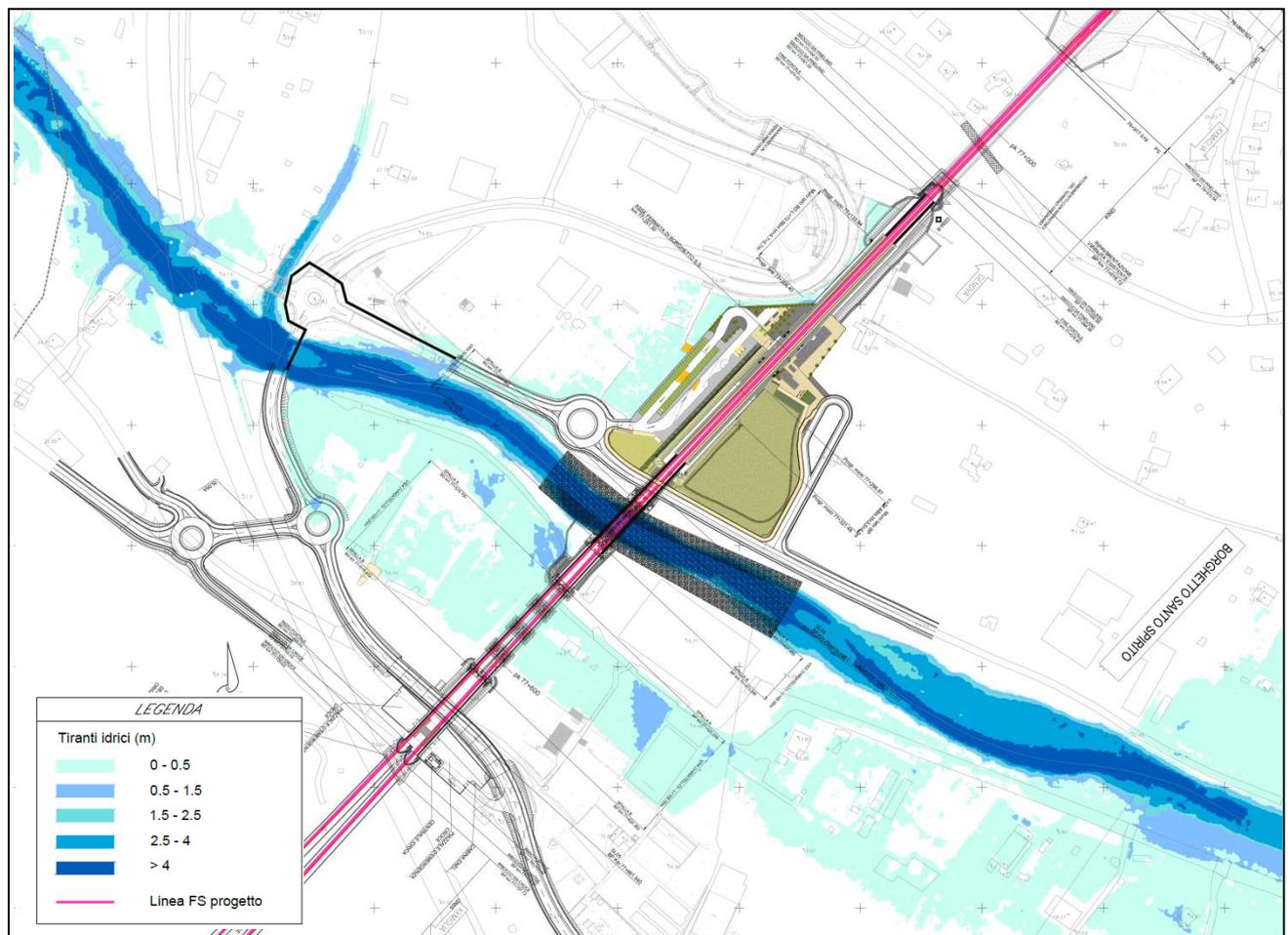


Figura 21: Modello numerico 2D, T. Varatella: aree potenzialmente inondabili, post operam, $Tr = 200$ anni.

Si osserva una riduzione sensibile delle aree di esondazione del T. Varatella.

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 (nuovi viadotti ferroviari VI03, VI04).

In analogia allo stato attuale, nella tabella seguente si riportano i livelli idrici ($Tr = 50, 200, 500$ anni), allo stato attuale, in corrispondenza del nuovo attraversamento ferroviario (VI03).

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Varatella	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 002	REV. B

Tabella 5: Livelli massimi a monte dell'attraversamento ferroviario per tempo di ritorno (post operam)

	Livello (m s.l.m.m.)
Tr 50	14.60
Tr 200	15.20
Tr 500	15.60

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), per il tempo di ritorno di progetto.

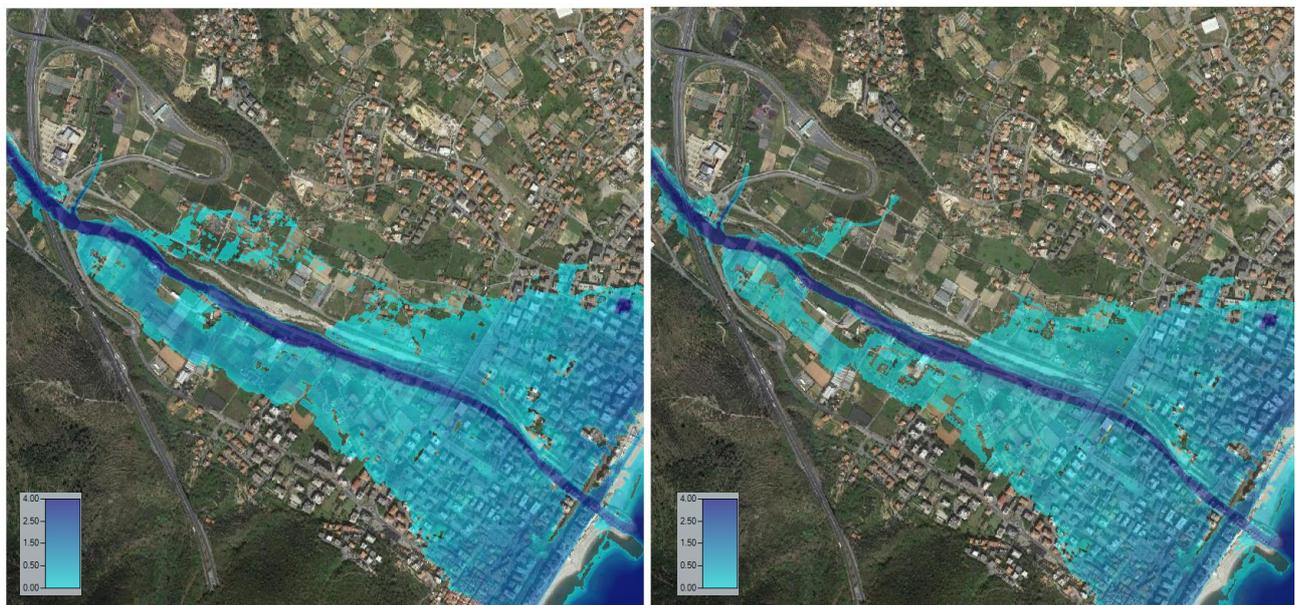


Figura 22: Modello numerico 2D, T. Varatella: confronto in termini di aree potenzialmente inondabili, ante operam (a sinistra) vs post operam (a destra), Tr = 200 anni.

In termini di aree potenzialmente inondabili, classificate secondo i valori di tiranti idrici rispetto a p.c., non si osservano differenze o incrementi significativi nella configurazione "*post operam*".

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Varatella	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 002	REV. B

4 VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO DI PROGETTO

Nelle tabelle seguenti è riportata la verifica del franco idraulico di progetto delle nuove opere di attraversamento: VI03 (alveo inciso, T. Varatella) e VI04 (in area potenzialmente inondabile, T. Varatella), eseguita secondo le normative vigenti (i.e. NTC2018, M.d.P. RFI, NTA Pianificazione di Bacino).

Tabella 6 – Viadotto VI03 (alveo inciso, Torrente Varatella): 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.
+17.20	+15.20	1.30	+16.50	+2.00 (> 1.50 m)	+0.70 (> 0.50 m)	Franco idraulico > 1.5 m → OK Franco sul carico idraulico > 0.5 m → OK	Franco idraulico > max (carico cinetico; 1.5/2.0 m) → OK

Tabella 7 – Viadotto VI04 (area inondabile, Torrente Varatella): 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.
+17.90	+15.90	0.10	+16.00	+2.00 (> 1.50 m)	+1.90 (> 0.50 m)	Franco idraulico > 1.5 m → OK Franco sul carico idraulico > 0.5 m → OK	Franco idraulico > max (carico cinetico; 1.5/2.0 m) → OK

Inoltre, relativamente al viadotto VI03 di scavalco dell'alveo inciso, 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.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Varatella	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 002	REV. B

5 VERIFICA ALLO SCALZAMENTO

In ragione dei risultati delle simulazioni numeriche idrauliche condotte, si è proceduto alla valutazione della profondità massima di erosione attesa, in particolare attorno alle pile 1, 2, 3, del nuovo viadotto VI04 in progetto, in area potenzialmente inondabile per esondazione delle piene del Torrente Varatella.

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 Ψ_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 Ψ_1 .”

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

Formulazione CSU

La profondità di scalzamento attesa può essere stimata come:

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

in cui

- K_1, K_2, K_3 sono fattori correttivi legati alla forma delle pile, all’angolo di attacco e alle condizioni del fondo alveo (vedi tabella seguente)
- K_4 è un fattore correttiva legato al materiale di fondo alveo, valutabile come:

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

dove $V_r = \frac{V_0 - V_i}{V_{c90} - V_i}$, $V_i = 0.645(d_{50}/a)^{0.053} V_{c50}$, $V_{c90} = 10.95(Y_1)^{1/6} d_{90}^{1/3}$, $V_{c50} = 10.95(Y_1)^{1/6} d_{50}^{1/3}$, d_{50}, d_{90} = diametro corrispondente al 50% e al 90 % di passante in peso

PROGETTO DEFINITIVO
Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Varatella

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	45 di 58

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

Tabella 8- Formulazione CSU: valori dei fattori correttivi K1, K2, K3.

Correction Factor, K_1		Correction Factor, K_2			
Shape of Pier Nose	K_1	Angle	L/a=4	L/a=8	L/a=12
(a) Square nose	1.1	0	1.0	1.0	1.0
(b) Round nose	1.0	15	1.5	2.0	2.5
(c) Circular cylinder	1.0	30	2.0	2.75	3.5
(d) Group of cylinders	1.0	45	2.3	3.3	4.3
(e) Sharp nose	0.9	90	2.5	3.9	5.0

Angle = skew angle of flow
L = length of pier

Bed Condition	Dune Height ft	K_3
Clear-Water Scour	N/A	1.1
Plane bed and Antidune flow	N/A	1.1
Small Dunes	$10 > H \geq 2$	1.1
Medium Dunes	$30 > H \geq 10$	1.2 to 1.1
Large Dunes	$H \geq 30$	1.3

Formulazione di Sheppard – Melville

La profondità di scalzamento attesa può essere valutata come:

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

con

- $V_{1p} = \max(V_{1p1}; V_{1p2})$
- $V_{1p1} = 5V_c; \quad V_{1p2} = 0.6\sqrt{gy_1}$

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

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	46 di 58

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

$(a = \text{larghezza della pila}; L = \text{lunghezza della pila}; \theta = \text{angolo di attacco } [^\circ])$

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

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

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

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

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

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

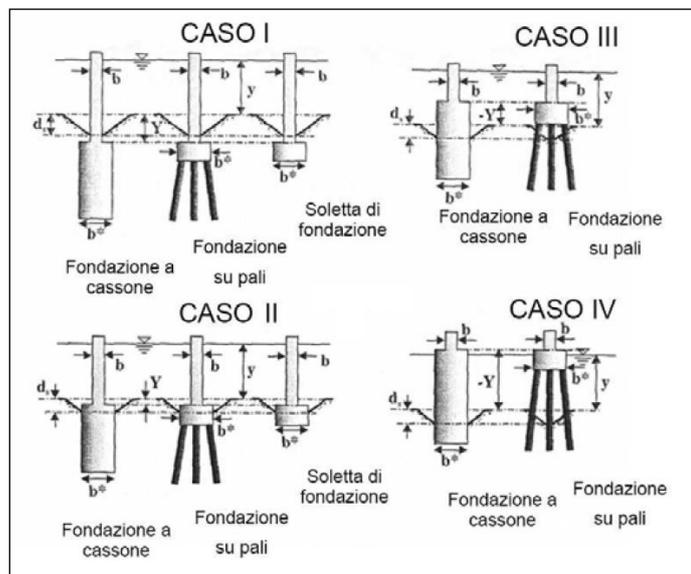


Figura 23 - Differenti tipologie di pile non uniformi dotate di fondazioni.

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

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Varatella	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 002	REV. B

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

E' stato effettuato dunque il calcolo dello scalzamento, relativo alla piena di progetto, $Tr = 200$ anni, 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 (VI04) in progetto. Pertanto, lo scalzamento per la piena $Tr = 1,001$ è da ritenersi nullo.

Per quanto concerne il materiale potenzialmente erodibile sul fondo, si è fatto riferimento alle analisi granulometriche effettuate su campioni prelevati durante i sondaggi; in particolare, per il viadotto VI04, il materiale considerato è caratterizzato dalla seguente granulometria: $d_{50} = 4.75$ mm, $d_{90} = 20$ mm (rif. IV0100D09RGID0002001A).

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 P1, P2, P3 del viadotto VI04, interessate dalla piena di progetto.

Tabella 9- Viadotto VI04 (area inondabile, Torrente Varatella): valori di scalzamento attesi attorno alle pile, per Tr200.

ID PILA	Forma pila	D (m) [pila]	L (m) [pila]	h (m)	v (m/s)	Skew Angle (°)	Fr ()	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU	Ys (m) Pila
P1	rettangolare	4	12.7	0.5	0.4	0	0.181	0.6	1.85	1.85
P2	rettangolare	4	12.7	0.2	0.6	0	0.428	1.9	0.7	1.9
P3	rettangolare	4	12.7	0.05	0.05	0	0.071	0.0	0.6	0.6

Confrontando i valori di scalzamento atteso con quelli di ricoprimento dei plinti di fondazione (1 m per le pile P1, P2 e P3) si evince che in corrispondenza delle pile del VI04 (eccetto per la pila P3) 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 (si prevede la realizzazione di fondazioni, rettangolari, "plinto su pali" di dimensioni 7.6 m x 16.1 m).

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Varatella	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 002	REV. B

Di seguito, i valori definitivi di scalzamento, per le pile del nuovo *viadotto VI04* interessate dalla piena di riferimento del T. Varatella, da considerare nel dimensionamento delle relative fondazioni.

Tabella 10- Viadotto VI04 (area inondabile, Torrente Varatella): valori di scalzamento attesi attorno al sistema “pila-fondazione” (pile P1, P2, P3), per Tr200.

ID PILA	Forma pila	B (m) [plinto]	L (m) [plinto]	Deq (m)	Leq (m)	Ys (m) Sheppard & Melville	Ys (m) CSU	Ys (m) Pila-Plinto
P1	rettangolare	7.6	16.1	6.93	15.79	0.8	2.7	2.70
P2	rettangolare	7.6	16.1	7.05	15.85	2.5	1.2	2.50
P3	rettangolare	7.6	16.1	-	-	-	-	0.60

6 OPERE DI SISTEMAZIONE IDRAULICA

Come anticipato, si prevedono opere di riprofilatura e sistemazione idraulica del Torrente Varatella. 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, $\in [1; 2]$); $K_1 = [1 - \sin^2(\theta)/\sin^2(\phi)]^{0.5}$; θ = inclinazione delle sponde; ϕ = 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*

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Varatella	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 002	REV. B

- *velocità medie: 0.7÷4 m/s*
- *portate: 35÷2200 mc/s*
- *d50: 0.15÷0.70 m*

Sul fondo alveo si prevede invece un rivestimento in massi sciolti, opportunamente dimensionati. A tal proposito si è fatto riferimento alla formulazione (e.g. Blevins, 2003; NCHRP, 2006):

$$d_{50} = \frac{V^2}{2g \cdot C^2 (S - 1)} \quad (**)$$

in cui:

- C = costante di Isbach ($C = 0.86$ per condizioni di flusso fortemente turbolento, $C = 1.2$ per condizioni di flusso debolmente turbolento)
- d_{50} = diametro medio dei massi di protezione (m)
- g = accelerazione di gravità (9.81 m/s^2)
- S = peso specifico dei massi
- V = velocità della corrente (m/s)

Con riferimento ai rivestimenti spondali (massi cementati), applicando la formulazione (*) con i parametri: velocità media = 3 m/s ($Tr = 200$ anni); tirante = 5 m; SF = 2; sponde = 1/1 ($\theta = 45^\circ$), $\phi = 50^\circ$, $Sg = 2.6 \text{ t/mc}$, si ha: **$d_{50} = 0.70 \text{ m}$** . Con riferimento al rivestimento sul fondo alveo (massi sciolti), applicando la formulazione (**) con i parametri: velocità = 5 m/s ($Tr = 200$ anni); $C = 0.86$; $S = 2.6 \text{ t/mc}$, si ha: **$d_{50} = 1.10 \text{ m}$** . Nella figura seguente, si riporta la sezione “di progetto” in corrispondenza del VI03 (rif. IV0I00D09PZID0002003A).

PROGETTO DEFINITIVO

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

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	51 di 58

VIADOTTO VI03 - TORRENTE VARATELLA

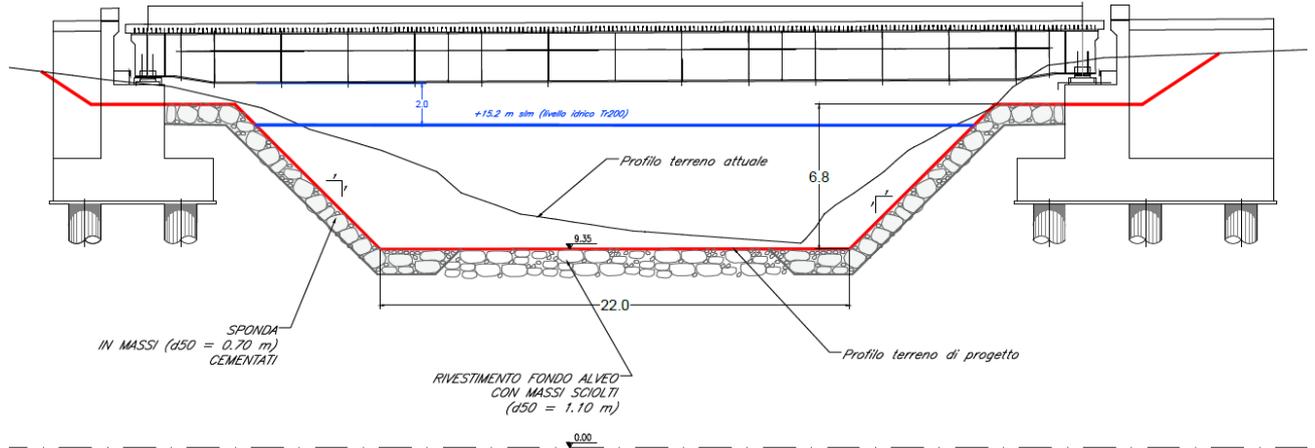


Figura 24 – Viadotto VI04, Torrente Varatella: sezione di progetto.

Si prevede inoltre, in corrispondenza del viadotto VI04, in area potenzialmente inondabile, il rivestimento delle pile/fondazioni con massi sciolti/pietrame ($d_{50} = 0.30$ m, secondo la formulazione (**), rif. IV0100D09PZID0002003A).

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Varatella	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 002	REV. B

7 VERIFICA DELLE FASI DI REALIZZAZIONE DI OPERE IN ALVEO

Durante la costruzione delle opere di attraversamento fluviale, nel caso specifico del nuovo viadotto VI03 sul T. Varatella, rispetto alla sezione d'alveo attuale del corso d'acqua, le lavorazioni necessarie per la realizzazione delle fondazioni delle spalle non interferiscono con i deflussi ordinari. È comunque effettuata un'analisi ai fini della determinazione di un livello idrico di riferimento per valutazioni sulla falda, necessarie per la definizione delle opere da prevedersi per gli scavi relativi alla realizzazione delle fondazioni.

Per il viadotto VI04, non è necessaria alcuna verifica di cantiere non essendo interessato dai deflussi ordinari, relativi alle fasi provvisorie.

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

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

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

nella quale:

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

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

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	53 di 58

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

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 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** riporta l'elaborazione condotta con riferimento specifico alla vita nominale delle opere pari a 75 anni e per durate variabili della cantierizzazione che ad ogni modo viene preventivamente stimata in 6 mesi.

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

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 002	B	54 di 58

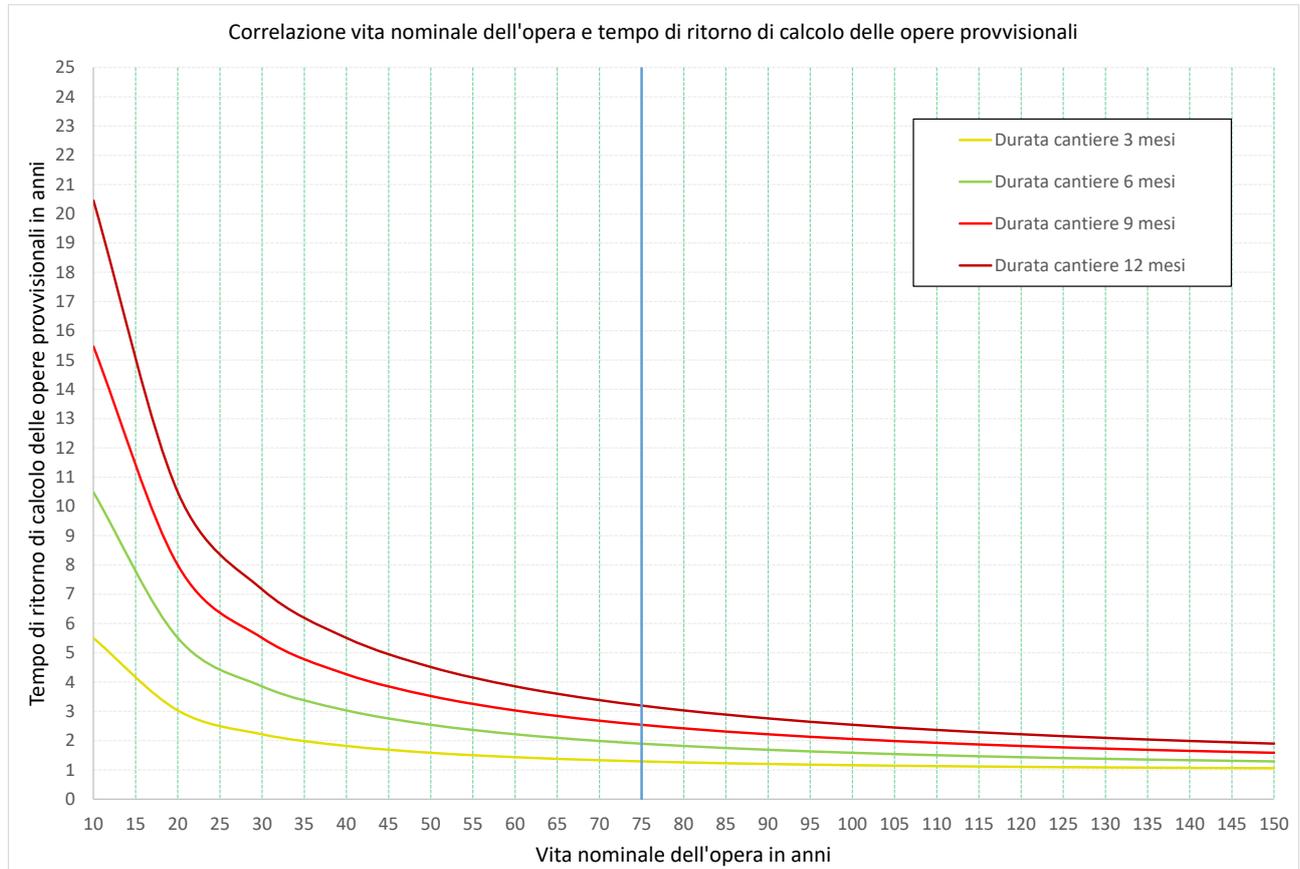


Figura 25: Correlazione tra tempo di ritorno di verifica delle opere provvisionali e vita nominale dell'opera in funzione della durata del cantiere, fissato un tempo di ritorno di riferimento pari a 200 anni

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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Varatella	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 002	REV. B

Ingegneria idraulica, marittima, ambientale e geotecnica” e in mancanza di una specifica analisi di rischio si ritiene opportuno considerare una probabilità di accadimento massima del 5-10%. Per la durata di 6 mesi, ammettendo una probabilità di accadimento del 10%, si perviene a $Tr = 5$ anni.

La portata di riferimento con $Tr=5$ anni, per le valutazioni sulla falda necessarie per la definizione delle opere provvisorie da prevedersi per gli scavi relativi alla realizzazione delle fondazioni del nuovo viadotto VI03 sul T. Varatella, è stata calcolata con modello HEC HMS, ed è pari a $251.7 \text{ m}^3/\text{s}$. La verifica idraulica della fase transitoria di cantiere è stata eseguita utilizzando il modello bidimensionale 2D descritto in precedenza, considerando una portata costante, e adottando le medesime impostazioni riguardanti scabrezza, regime della corrente, condizioni al contorno.

Di seguito, i risultati ottenuti (in termini di livelli).

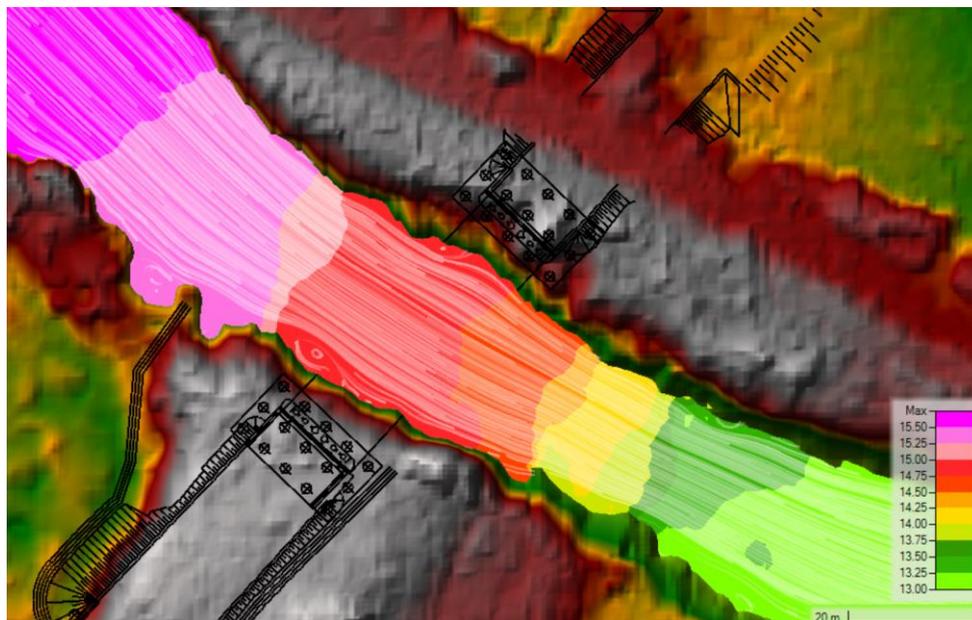


Figura 26: Livelli idrici - VI03

Il livello massimo in corrispondenza dell'attraversamento previsto VI03 si attesta a $+14.99 \text{ m s.l.m.}$

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Varatella	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 002	REV. B

8 EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SULLE OPERE IN PROGETTO

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

Applicando tali incrementi alla portata di progetto del T. Varatella, ad oggi stimata per il $Tr = 200$ anni in 578 mc/s, si ottiene un valore della portata di progetto Tr_{200} proiettata nel periodo 2061-2090 pari a 653 mc/s circa, che corrisponderebbe alla portata ad oggi stimata per il $Tr = 500$ anni (i.e. 656 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 progetto al 2090), in corrispondenza dei viadotti VI03 e VI04 in progetto sul T. Varatella, sopra analizzati.

	Quota minima impalcato [m slm]	Livello di piena Tr 500 [m slm]	Franco sul livello idrico Tr 500 [m]
VI03 (alveo inciso, T. Varatella)	+17.20	+15.60	+1.60
VI04 (area inondabile, T. Varatella)	+17.90	+16.00	+1.90

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

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</p>					
<p>PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Varatella</p>	<p>COMMESSA IV01</p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA D 09 RI</p>	<p>DOCUMENTO ID 0002 002</p>	<p>REV. B</p>	<p>FOGLIO 57 di 58</p>

9 COMPATIBILITA' IDRAULICA DELLE OPERE IN PROGETTO

La modellazione numerica del Torrente Varatella elaborata nell'ambito del presente studio ha permesso di fornire una valutazione dell'interferenza del nuovo attraversamento ferroviario con il corso d'acqua suddetto, interessato da nuove opere civili nell'ambito della progettazione definitiva del "Raddoppio della Linea ferroviaria Genova-Ventimiglia, Tratta Finale Ligure - Andora".

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

La configurazione di progetto è costituita dai due viadotti VI03 e VI04 e dalla realizzazione delle opere connesse alla realizzazione della nuova stazione ferroviaria di Borghetto Santo Spirito oltre che dalla sistemazione idraulica del torrente a monte e valle del nuovo ponte.

Nello specifico, la sistemazione idraulica in progetto sul T. Varatella prevede l'allargamento della sezione utile al deflusso, la riprofilatura del fondo alveo (intesa come eliminazione di dossi, accumuli di detriti, ecc), la disposizione di opportune opere di difesa del fondo alveo e delle sponde.

Si intende 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. 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 alla situazione evidenziata nello stato attuale. La sistemazione idraulica del corso d'acqua, grazie all'aumento della sezione utile al deflusso, riduce l'esondazione del Torrente Varatella, confinando maggiormente le portate nell'alveo naturale.

 ITALFERR <small>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</small>	RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	PROGETTO DEFINITIVO Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale del Torrente Varatella	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 002	REV. B

La verifica idraulica delle nuove opere di attraversamento ha evidenziato come la portata di piena di progetto, con tempo di ritorno pari a 200 anni, riesce a transitare in sicurezza al di sotto dei ponti/viadotti in progetto, con franchi idraulici superiori ai valori minimi stabiliti nelle normative vigenti. Con riferimento alla pianificazione di bacino vigente, per il corso d'acqua in esame l'Autorità di Bacino prevede, nella zona di studio, la fascia di inondabilità denominata A (aree periferuviali, 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 periferuviali 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 sul T. Varatella e le altre opere connesse alla realizzazione della nuova fermata di Borghetto Santo Spirito 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 in progetto si possono definire idraulicamente compatibili.