

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP: J71H92000020011

U.O. OPERE CIVILI

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA

VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO - GENOVA

QUADRUPPLICAMENTO TORTONA - VOGHERA

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza

SCALA:

-

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


I Q 0 1 0 1 R 0 9 R I I D 0 0 0 2 0 0 1 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	C. Cesali 	Settembre 2021	F. Cabas 	Settembre 2021	M. Berlingieri 	Settembre 2021	Vittozzi settembre 2021

ITALFERR S.p.A.
U.O. Opere Civili e gestione delle varianti
Dott. Ing. Angelo Vittozzi
Ordine degli Ingegneri della Provincia
N° A.20783


File: IQ0101R09RIID0002001A.doc

n. Elab.:

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

INDICE

1	PREMESSA.....	7
1.1	RIFERIMENTI NORMATIVI	8
2	INQUADRAMENTO GENERALE E OBIETTIVI DELLO STUDIO	9
2.1	PERICOLOSITA' IDRAULICA NELL'AREA DI INTERVENTO.....	10
2.2	OBIETTIVI DELLO STUDIO	11
2.2.1	CRITERI DI VERIFICA DELLA COMPATIBILITÀ IDRAULICA DELLE OPERE DI ATTRAVERSAMENTO	15
3	ANALISI IDRAULICHE DISPONIBILI NELL'AREA DI STUDIO	17
4	STUDIO IDRAULICO	20
4.1	GENERALITÀ	20
4.2	DATI DI BASE.....	20
4.2.1	DATI TOPOGRAFICI	20
4.2.2	OPERE DI ATTRAVERSAMENTO ESISTENTI E IN PROGETTO.....	22
4.2.3	DATI IDROLOGICO-IDRAULICI	27
4.3	IMPLEMENTAZIONE DEI MODELLI NUMERICI.....	31
4.3.1	MODELLO BIDIMENSIONALE (2D)	31
4.3.2	MODELLO MONODIMENSIONALE (1D)	47
4.4	RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE	54
4.4.1	MODELLO NUMERICO 2D.....	54
4.4.2	MODELLO NUMERICO 1D.....	69
5	VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO DI PROGETTO	73
6	OPERE DI SISTEMAZIONE IDRAULICA	74
6.1	TORRENTE GRUE.....	74
6.2	TORRENTE CALVENZA	80
7	CONSIDERAZIONI SUGLI EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI.....	81

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

8	COMPATIBILITA' IDRAULICA DELLE OPERE IN PROGETTO.....	83
9	BIBLIOGRAFIA	86
10	ALLEGATO – NOTA “REGIONE PIEMONTE”.....	87

INDICE DELLE FIGURE

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).....	9
FIGURA 2: ESTRATTO DELLE MAPPE DI PERICOLOSITÀ E DI RISCHIO DEL PIANO DI GESTIONE RISCHIO ALLUVIONI (PGRA - REGIONE PIEMONTE).	12
FIGURA 3: AREE DI ALLAGAMENTO DOVURE AL PASSAGGIO DELLA PIENA NEL TORRENTE GRUE (STRALCIO DAGLI ELABORATI GRAFICI DELLO STUDIO IDRAULICO DELL'INTERO BACINO DEL TORRENTE GRUE - ANSELMO, 2016)	18
FIGURA 4: INTERVENTI DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO IDRAULICO DEFINITI NELL'AMBITO DELLO STUDIO IDRAULICO DELL'INTERO BACINO DEL TORRENTE GRUE – ANSELMO ASSOCIATI (2016)	19
FIGURA 5: INFORMAZIONI TOPOGRAFICHE A DISPOSIZIONE.....	21
FIGURA 6: OPERE DI ATTRAVERSAMENTO NELL'AREA DI STUDIO	22
FIGURA 7: TORRENTE GRUE: OPERA FS DI ATTRAVERSAMENTO ESISTENTE	23
FIGURA 8: TORRENTE GRUE: PIANTE DELL'OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN PROGETTO	24
FIGURA 9: TORRENTE GRUE: SEZIONE/PROSPETTO DELL'OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN PROGETTO.	24
FIGURA 10: TORRENTE CALVENZA: OPERA FS DI ATTRAVERSAMENTO ESISTENTE.....	25
FIGURA 11: TORRENTE CALVENZA: PIANTE DELL'OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN PROGETTO.....	26
FIGURA 12: TORRENTE CALVENZA: SEZIONE/PROSPETTO DELL'OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN PROGETTO	26
FIGURA 13: TORRENTE GRUE: IDROGRAMMI DI PIENA – METODO DI GUMBEL	27
FIGURA 14: TORRENTE GRUE: IDROGRAMMI DI PIENA – METODO GEV	28
FIGURA 15: TORRENTE CALVENZA: IDROGRAMMI DI PIENA – METODO DI GUMBEL.....	28
FIGURA 16: TORRENTE CALVENZA: IDROGRAMMI DI PIENA – METODO GEV	29
FIGURA 17: CORINE LAND COVER PER L'AREA DI STUDIO	30
FIGURA 18: VALORI DEL COEFFICIENTE DI SCABREZZA IN TERMINI DI COEFFICIENTE DI MANNING ($S M^{-1/3}$) PER LE CLASSI CARATTERISTICHE DEL CLC	30


 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</p>					
<p>IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza</p>	<p>COMMESSA IQ01</p>	<p>LOTTO 01</p>	<p>CODIFICA R 09 RI</p>	<p>DOCUMENTO ID 0002 001</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 4 di 87</p>

FIGURA 19 – SOFTWARE HEC RAS 5.0.7: SISTEMA DI RIFERIMENTO.....	33
FIGURA 20 – SOFTWARE HEC RAS 5.0.7: 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.....	35
FIGURA 21: ESTRATTO DEL DTM DA LIDAR (A) E DEL DTM OTTENUTO INTEGRANDO IL LIDAR CON LE SEZIONI TRASVERSALI (B), LUNGO IL TORRENTE GRUE, A MONTE DELL'ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO.....	37
FIGURA 22: ESTENSIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO E PARTICOLARE DELLA MESH IN PROSSIMITÀ DELL'ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO DEL TORRENTE GRUE.....	38
FIGURA 23: ESTENSIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO E PARTICOLARE DELLA MESH IN PROSSIMITÀ DELL'ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO DEL TORRENTE CALVENZA	39
FIGURA 24: ESEMPIO DI DEM A SINISTRA ESTRAZIONE DEI PROFILI LUNGO I CONFINI DELLE CELLE, A DESTRA CURVA LIVELLO-VOLUME INVASATO	40
FIGURA 25: STRUTTURE INSERITE NEL MODELLO.....	41
FIGURA 26: TORRENTE GRUE – DETTAGLIO DELLA GRIGLIA DI CALCOLO IN CORRISPONDENZA DELL'ATTRAVERSAMENTO DELLA LINEA FS	42
FIGURA 27: TORRENTE GRUE – ATTRAVERSAMENTO DELLA LINEA FS	43
FIGURA 28: TORRENTE CALVENZA – DETTAGLIO DELLA GRIGLIA DI CALCOLO IN CORRISPONDENZA DELL'ATTRAVERSAMENTO DELLA LINEA FS	43
FIGURA 29: TORRENTE CALVENZA – ATTRAVERSAMENTO DELLA LINEA FS.....	44
FIGURA 30: CONDIZIONI AL CONTORNO IMPOSTE AL MODELLO	45
FIGURA 31: CONFRONTO TRA AREE ALLAGABILI CALCOLATE (A SINISTRA) CON QUELLE DEFINITE DALLO STUDIO DEL PROF. ANSELMO (A DESTRA)	46
FIGURA 32 – SCHEMA DI CALCOLO PER LA DETERMINAZIONE DEL PROFILO DEL PELO LIBERO NEI CORSI D'ACQUA.	48
FIGURA 33 - SEZIONE SCHEMATICA DI UN CORSO D'ACQUA.....	49
FIGURA 34: MODELLO 1D PER IL TORRENTE GRUE	52
FIGURA 35: MODELLO 1D PER IL TORRENTE CALVENZA	53
FIGURA 36: MODELLO 2D “T. GRUE-T. CALVENZA”: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, TR = 50 ANNI, ANTE OPERAM.....	55
FIGURA 37: MODELLO 2D “T. GRUE-T. CALVENZA”: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, TR = 200 ANNI, ANTE OPERAM.....	56


 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

FIGURA 38: MODELLO 2D “T. GRUE-T. CALVENZA”: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, Tr = 500 ANNI, ANTE OPERAM.....	57
FIGURA 39: T. GRUE – LIVELLI IDRICI NELLA SEZIONE A MONTE DELL’ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO ESISTENTE, SCENARIO ANTE OPERAM.	58
FIGURA 40: T. CALVENZA – LIVELLI IDRICI NELLA SEZIONE A MONTE DELL’ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO ESISTENTE, SCENARIO ANTE OPERAM.....	58
FIGURA 41: T. GRUE – OPERA DI DEVIAZIONE PREVISTA.....	59
FIGURA 42 – TORRENTE GRUE: SEZIONE TIPO NELLA TRATTO DI DEVIAZIONE IN PROGETTO.	60
FIGURA 43 – TORRENTE GRUE: SEZIONI RILEVATE NEL TRATTO OGGETTO DI DEVIAZIONE.....	60
FIGURA 44: PARTICOLARE DELLA MESH “POST OPERAM” IN PROSSIMITÀ DELL’ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO DEL TORRENTE GRUE.....	61
FIGURA 45: T. GRUE - DTM E MESH IN CORRISPONDENZA DELL’ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO E DELLA DEVIAZIONE IN PROGETTO, NELLE SITUAZIONI ANTE OPERAM (A SINISTRA) E POST OPERAM (A DESTRA)	62
FIGURA 46: MODELLO 2D “T. GRUE-T. CALVENZA”: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, Tr = 50 ANNI, POST OPERAM	63
FIGURA 47: MODELLO 2D “T. GRUE-T. CALVENZA”: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, Tr = 200 ANNI, POST OPERAM	64
FIGURA 48: MODELLO 2D “T. GRUE-T. CALVENZA”: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, Tr = 500 ANNI, POST OPERAM	65
FIGURA 49: MODELLO 2D “T. GRUE-T. CALVENZA”: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, Tr = 200 ANNI, IN CORRISPONDENZA DELL’ATTRAVERSAMENTO DEL TORRENTE GRUE, NELLE SITUAZIONI ANTE OPERAM (A SINISTRA) E POST OPERAM (A DESTRA).....	66
FIGURA 50: MODELLO 2D “T. GRUE-T. CALVENZA”: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, Tr = 200 ANNI, IN CORRISPONDENZA DELL’ATTRAVERSAMENTO DEL TORRENTE CALVENZA, NELLE SITUAZIONI ANTE OPERAM (A SINISTRA) E POST OPERAM (A DESTRA).....	66
FIGURA 51: MODELLO 2D “T. GRUE-T. CALVENZA”: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, Tr = 200 ANNI, POST OPERAM CON INTERVENTI DI PROTEZIONE IDRAULICA (RIF. STUDIO ANSELMO ASSOCIATI, 2016)..	68
FIGURA 52: MODELLO 1D “T. GRUE”: LIVELLI IDRICI (PORTATA IDROLOGICA TR200) IN CORRISPONDENZA DEL VIADOTTO VI06, POST OPERAM.	70
FIGURA 53: MODELLO 1D “T. GRUE”: PROFILI DI RIGURGITO (PORTATA IDROLOGICA TR200) IN CORRISPONDENZA DEL VIADOTTO VI06, ANTE E POST OPERAM.	71


 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</p>												
<p>IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IQ01</td> <td>01</td> <td>R 09 RI</td> <td>ID 0002 001</td> <td>A</td> <td>6 di 87</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	6 di 87
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	6 di 87								

FIGURA 54: MODELLO 1D “T. CALVENZA”: LIVELLI IDRICI (PORTATA IDROLOGICA TR200) IN CORRISPONDENZA DEL VIADOTTO VI07, POST OPERAM.72

FIGURA 55 – DIMENSIONAMENTO DI RIVESTIMENTI FLESSIBILI: SCHEMA DI RIFERIMENTO.....75

FIGURA 56 – DIMENSIONAMENTO DI RIVESTIMENTI FLESSIBILI: DEFINIZIONE DEI PARAMETRI PROGETTUALI.76

FIGURA 57 – TORRENTE GRUE: PARTICOLARE DEL RIVESTIMENTO FLESSIBILE ADOTTATO.77


INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 1 - CLASSI DI PERICOLOSITÀ IDRAULICA (P.G.R.A. – AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO).11

TABELLA 2: LIVELLI MASSIMI A MONTE DELL’ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO PER TEMPO DI RITORNO ...66

TABELLA 3 – VIADOTTO VI06 (TORRENTE GRUE): VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO DI PROGETTO.....73

TABELLA 4 – VIADOTTO VI07 (TORRENTE CALVENZA): VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO DI PROGETTO.73

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

1 PREMESSA


Il presente studio idraulico è stato redatto nell'ambito del Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica dell'intervento di *Quadruplicamento della linea ferroviaria Tortona - Voghera*.

La tratta in oggetto si sviluppa per una lunghezza complessiva di 16.2 km nell'ambito territoriale delle province di Alessandria e Pavia. L'intervento ha origine dalle curve di ingresso della stazione di Tortona lato Ovest (Alessandria, Arquata S.) e termina nei pressi della radice lato Tortona della stazione di Voghera. L'intervento prevede *i*) la messa a PRG della stazione di Tortona; *ii*) il quadruplicamento in affiancamento ai binari della linea Tortona – Voghera; *iii*) la sistemazione della fermata di Pontecurone.

La linea ferroviaria attraversa i corsi d'acqua maggiori denominati *Torrente Grue* (alla progr. 59+110 circa), *Torrente Calvenza* (alla progr. 60+430 circa), *Torrente Curone* (alla progr. 64+380 circa) e *Torrente Limbione* (alla progr. 65+525 circa), per lo scavalco dei quali si prevede la realizzazione dei viadotti VI06, VI07, VI09, VI10, rispettivamente. Inoltre, la linea ferroviaria attraversa anche una serie di rivi minori e scoli in corrispondenza dei quali si prevede la realizzazione di manufatti minori/tombini idraulici.

Nella presente relazione sono analizzati nel dettaglio i corsi d'acqua *Torrente Grue* e *Torrente Calvenza*. Lo studio idraulico in oggetto ha lo scopo quindi di definire le aree potenzialmente inondabili associate alle esondazioni delle piene di riferimento (con tempo di ritorno di 50, 200 e 500 anni) dei corsi d'acqua *Torrente Grue* e *Torrente Calvenza*, nonché i rispettivi tiranti idrici e le velocità della corrente in corrispondenza delle sezioni di attraversamento, nonché lungo tutta la tratta ferroviaria oggetto di intervento. A tal scopo, si è proceduto all'implementazione di modelli numerici idraulici secondo approcci bidimensionali e monodimensionali, in regime di moto vario e permanente. Sono state definite opportune opere di protezione e sistemazione del fondo alveo e delle sponde in corrispondenza delle nuove opere di attraversamento (VI06, VI07).


Le analisi sono state condotte in conformità a quanto previsto nell'ambito del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (P.G.R.A.) dell'Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po (aggiornamento 2019), nonché nelle Norme Tecniche delle Costruzioni (NTC2018), e nella relativa circolare esplicativa n.7/2019, e nel Manuale di Progettazione Ferroviaria (RFI).

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 8 di 87

1.1 RIFERIMENTI NORMATIVI

I principali riferimenti normativi per il presente progetto sono rappresentati dai seguenti strumenti di pianificazione:

- *Direttiva Quadro Acque 2000/60/CE*
- *Direttiva Alluvioni 2007/60/CE*
- *Regio Decreto del 08/05/1904, n.368*
- *Regio Decreto del 25/07/1904 n.523*
- *Legge n. 183/1989, “Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo”*
- *D.M. del 14 febbraio 1997 “Direttive tecniche per l’individuazione e perimetrazione da parte delle Regioni a rischio idraulico”*
- *D.L. n. 180/1998 (Decreto Sarno)*
- *Legge n. 365/2000 “Conversione in legge, con modificazioni, del decreto legge 12 ottobre 2000, n. 279, recante interventi urgenti per le aree a rischio idrogeologico molto elevato ed in materia di protezione civile” (Legge Soverato)*
- *D.Lgs. n. 152/2006 “Norma in materia ambientale”*
- *D.Lgs. n. 49/2010 “Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi alluvioni”*
- *Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni (P.G.R.A.), Autorità di Bacino del Fiume Po, Regione Piemonte (aggiornamento 2019) e relative Norme Tecniche di Attuazione (NTA)*
- *Nuove Norme Tecniche delle Costruzioni (NTC2018)*
- *Circolare del 21 gennaio 2019, n.7 del C.S.LL.PP, esplicativa delle NTC 2018*
- *Manuale di Progettazione delle opere ferroviarie (RFI, 2020)*

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 9 di 87

2 INQUADRAMENTO GENERALE E OBIETTIVI DELLO STUDIO

Come anticipato in premessa, il presente studio idraulico è stato redatto a supporto della progettazione del quadruplicamento linea ferroviaria Tortona-Voghera. L'area di studio è centrata sulle intersezioni tra la linea ferroviaria e i torrenti Grue e Calvenza (tratta Tortona-Pontecurone). La mappa che segue illustra il tratto preso in esame per i corpi idrici oggetto di studio nel presente elaborato, in relazione al tracciato della linea ferroviaria.

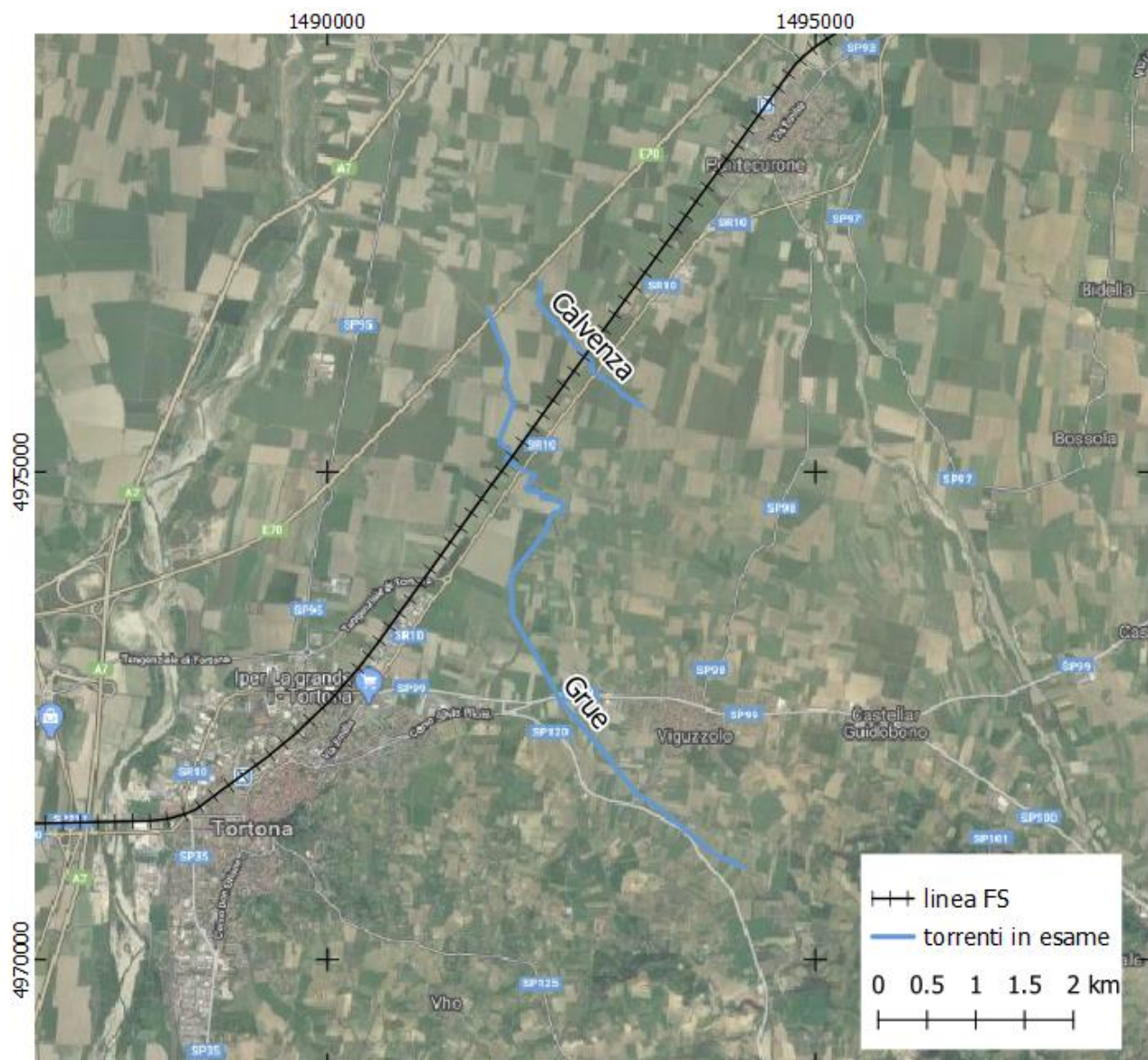



Figura 1: Inquadramento generale dell'area di studio (NOTA: il sistema di riferimento adottato per le coordinate indicate nelle mappe presentate nel presente rapporto è Gauss-Boaga Fuso Ovest).

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

2.1 PERICOLOSITA' IDRAULICA NELL'AREA DI INTERVENTO

Il quadro conoscitivo di riferimento per la caratterizzazione idrologica e idraulica dell'area di intervento e la definizione delle relative aree di pericolosità è attualmente riportata nel Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (P.G.R.A.) dell'Autorità di Bacino del Fiume Po, 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.

Per quanto riguarda l'area di intervento, il Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA) è stato adottato dall'autorità di Bacino del Po nella seduta di Comitato Istituzionale del 17 dicembre 2015, con deliberazione n.4/2015, ed è stato approvato nella seduta di Comitato Istituzionale del 3 marzo 2016, con deliberazione n.2/2016. Gli elaborati relativi alla Regione Piemonte, a cui si è fatto riferimento nel presente studio, sono stati recentemente aggiornati (2019), a seguito degli eventi alluvionali verificatesi nel 2014 e nel 2019.

Nello specifico, nell'ambito della pianificazione di bacino vigente sono individuate 3 classi di pericolosità idraulica (*P3 - elevata, P2 - media, P1 - scarsa*).

La classe di pericolosità elevata (*P3 – elevata probabilità di alluvioni, H = high*) fa riferimento ad un evento caratterizzato da una probabilità di accadimento $Tr \in 20 - 50$ anni (frequente).

La classe di pericolosità media (*P2 – media probabilità di alluvioni, M = medium*) fa riferimento ad un evento caratterizzato da una probabilità di accadimento $Tr \in 100 - 200$ anni (poco frequente).

La classe di pericolosità bassa (*P1 – scarsa probabilità di alluvioni o scenari di eventi estremi, L = low*) fa riferimento ad un evento di piena raro, caratterizzato da un tempo di ritorno Tr maggiore o uguale a 500 anni o al massimo storico registrato.

Di seguito, una tabella riepilogativa delle classi di pericolosità idraulica adottate.


	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

Tabella 1 - Classi di pericolosità idraulica (P.G.R.A. – Autorità di Bacino del Fiume Po).

<i>T_r</i> (anni)	<i>Pericolosità idraulica</i>
20-50	P3
100-200	P2
≥ 500	P1

Come mostrato nella Figura 2, relativamente agli attraversamenti dei corsi d'acqua Torrente Grue e Torrente Calvenza, la linea FS esistente e l'intervento di quadruplicamento in progetto sono interessati da aree a pericolosità idraulica P2 (media probabilità di alluvioni), non soltanto limitatamente agli attraversamenti dei corsi d'acqua stessi, ma per un tratto di circa 5 km (dalla zona industriale di Tortona fino a poco prima dell'abitato di Pontecurone), così come indicato nelle mappe del P.G.R.A. della Regione Piemonte¹.

2.2 OBIETTIVI DELLO STUDIO

L'obiettivo principale dello studio è quello di valutare allo stato attuale e allo stato di progetto i processi idrodinamici che caratterizzano gli eventi estremi relativi al *Torrente Grue* e al *Torrente Calvenza*, in particolare all'intersezione con la linea ferroviaria, e poter correttamente identificare e dimensionare i manufatti e le opere di sistemazione idraulica necessarie al fine di garantire l'efficienza degli attraversamenti dei torrenti in esame, anche durante gli eventi idrologici estremi.

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

- studio e analisi delle normative di riferimento;
- reperimento di analisi idrauliche esistenti nell'area di studio;

¹http://visregppa.territorio.csi.it/visregppa/?printEnabled=true&ricercaTopoEnabled=true&lang=it&topic=DIFESA%20SUOLO&bgLayer=1&lavers=Limiti_amministrativi_comunali20171020145903623.Scenari_di_alluvioni_Pericolosita_201920200709124046443

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	12 di 87

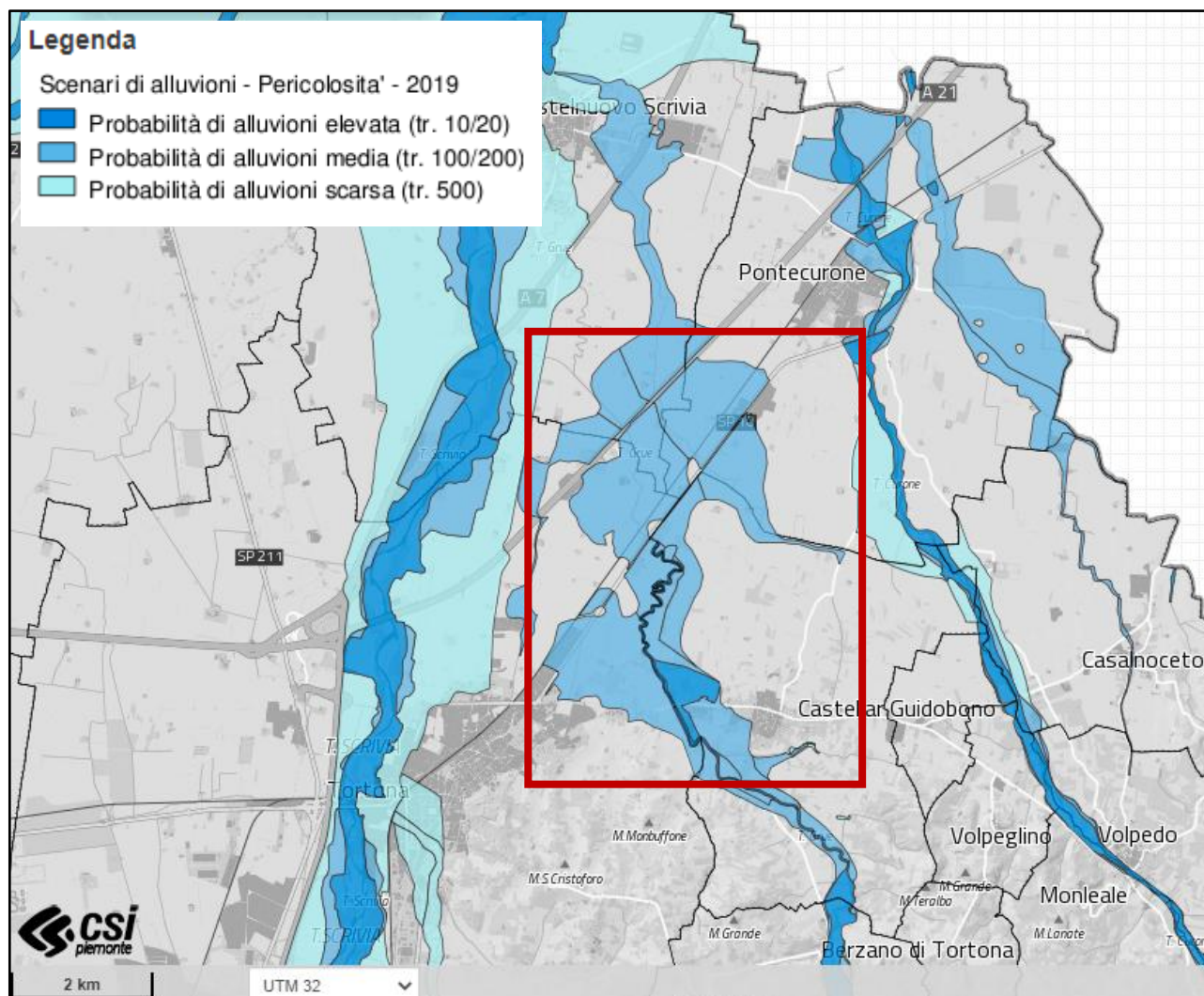



Figura 2: Estratto delle mappe di pericolosità e di rischio del Piano di Gestione Rischio Alluvioni (PGRA - Regione Piemonte).

- implementazione di un modello numerico bidimensionale per l'analisi ante operam e post operam;
- implementazione di modelli numerici monodimensionali con esondazioni impedito al fine di verificare il comportamento dei manufatti previsti nell'ipotesi di transito della cosiddetta *portata idrologica*;
- identificazione/definizione delle opere di sistemazione idraulica.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 13 di 87

Per la sicurezza idraulica della linea ferroviaria nel suo complesso, le opere d'arte di attraversamento devono osservare le prescrizioni del Manuale di Progettazione Ferroviaria RFI (MdP, 2020), nonché le indicazioni riportate nelle NTC2018 (normativa di riferimento del presente progetto) e nella relativa circolare esplicativa n. 7 del 21 gennaio 2019.


In sintesi, con riferimento al MdP RFI, le opere idrauliche di attraversamento devono essere verificate per eventi di massima piena caratterizzati da un tempo di ritorno di **200 anni**. Relativamente ai requisiti idraulici nei confronti dei livelli di massima piena, si specifica quanto segue:

- il franco idraulico tra la quota di intradosso del manufatto ed il livello idrico corrispondente alla piena di progetto (**Tr = 200 anni**) non deve essere inferiore a **1.5 m** nella sezione immediatamente a monte dell'attraversamento;
- il franco minimo tra la quota di intradosso del manufatto e la quota di carico idraulico totale (**Tr = 200 anni**) 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 per le Costruzioni (NTC2018), l'opera deve rispondere ai seguenti requisiti:

“..... 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

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 14 di 87

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 di 2/3 della luce, e comunque non inferiore a 40 m.”


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

“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 $6 \div 7$ 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.”

Con riferimento alle Norme Tecniche di Attuazione (NTA) del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) dell'Autorità di Bacino del Fiume Po (26 aprile 2001), ri-adottate nell'ambito del P.G.R.A. attualmente vigente:

Art. 38. Interventi per la realizzazione di opere pubbliche o di interesse pubblico

1. *Fatto salvo quanto previsto agli artt. 29 e 30, all'interno delle Fasce A e B è consentita la realizzazione di opere pubbliche o di interesse pubblico, riferite a servizi essenziali non altrimenti localizzabili, a condizione che non modifichino i fenomeni idraulici naturali e le caratteristiche di particolare rilevanza naturale dell'ecosistema fluviale che possono aver luogo nelle fasce, che non costituiscano significativo ostacolo al deflusso e non limitino in modo significativo la capacità di invaso, e che non concorrano ad incrementare il carico*

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 15 di 87


insediativo. A tal fine i progetti devono essere corredati da uno studio di compatibilità, che documenti l'assenza dei suddetti fenomeni e delle eventuali modifiche alle suddette caratteristiche, da sottoporre all'Autorità competente, così come individuata dalla direttiva di cui al comma successivo, per l'espressione di parere rispetto la pianificazione di bacino.

2. *L'Autorità di bacino emana ed aggiorna direttive concernenti i criteri, gli indirizzi e le prescrizioni tecniche relative alla predisposizione degli studi di compatibilità e alla individuazione degli interventi a maggiore criticità in termini d'impatto sull'assetto della rete idrografica. Per questi ultimi il parere di cui al comma 1 sarà espresso dalla stessa Autorità di bacino.*
3. *Le nuove opere di attraversamento, stradale o ferroviario, e comunque delle infrastrutture a rete, devono essere progettate nel rispetto dei criteri e delle prescrizioni tecniche per la verifica idraulica di cui ad apposita direttiva emanata dall'Autorità di bacino.*

In definitiva, in accordo al MdP e alle NTC2018, nonché alle indicazioni riportate nelle NTA del P.A.I. o del P.G.R.A. dell'Autorità di Bacino del Fiume Po, è stato sviluppato lo studio di compatibilità idraulica delle nuove opere di attraversamento previste in progetto sui corsi d'acqua Torrente Grue e Torrente Calvenza, nonché della linea ferroviaria in progetto nel suo complesso, tramite simulazioni numeriche idrauliche della propagazione delle piene per i tempi di ritorno di **50, 200 e 500 anni.**

2.2.1 Criteri di verifica della compatibilità idraulica delle opere di attraversamento


In relazione alla rassegna delle normative vigenti in materia di compatibilità idraulica riportata in precedenza, ai risultati dello studio idrologico annesso (rif. IQ0101R09ID0001001A), nonché alle indicazioni di *Regione Piemonte*, alla quale sono state sottoposte preliminarmente le valutazioni idrologiche e idrauliche sviluppate nell'ambito del presente progetto e di cui si riporta in allegato alla presente relazione la relativa nota di riscontro (o *parere preventivo*), sono stati adottati i seguenti criteri di analisi e verifica:

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 16 di 87

- adozione delle portate al colmo e dei rispettivi idrogrammi di piena di riferimento (con $Tr = 200$ anni) derivanti dall'applicazione di LSPP elaborate secondo la distribuzione di probabilità di Gumbel per la calibrazione (in termini di scabrezza) dei modelli numerici bidimensionali (in regime di moto vario) sviluppati sulla base degli studi idraulici (e dei relativi risultati in termini di aree di esondazione) disponibili sul territorio (descritti nel paragrafo successivo)
- adozione delle portate al colmo e dei rispettivi idrogrammi di piena di riferimento (con $Tr = 200$ anni) derivanti dall'applicazione di LSPP elaborate secondo la distribuzione di probabilità GEV per la determinazione, mediante modello numerico bidimensionale (2D, in regime di moto vario), delle aree potenzialmente inondabili di "progetto"
- adozione delle portate al colmo di riferimento derivanti dall'applicazione di LSPP elaborate secondo la distribuzione di probabilità di Gumbel (in analogia agli studi sviluppati sul territorio) per la determinazione dei livelli idrici di progetto (con $Tr = 200$ anni) in corrispondenza delle opere di attraversamento principali (i.e. VI06, VI07), mediante modelli numerici monodimensionali (1D), in regime di moto permanente, nell'ipotesi di transito della cosiddetta "portata idrologica" (i.e. non "laminata" per effetto delle esondazioni a monte della sezione di attraversamento di interesse) a seguito di eventuali futuri interventi di sistemazione/protezione idraulica (alcuni già in corso di attuazione sul territorio, come descritto nel paragrafo successivo)

Nello specifico, il franco idraulico minimo di 1,5 m in corrispondenza delle opere di attraversamento dovrà essere garantito con riferimento ai livelli idrici associati alla piena con tempo di ritorno di 200 anni (stimata sulla base delle LSPP elaborate mediante Gumbel), derivanti dalle simulazioni numeriche secondo modello monodimensionale (1D), in regime di moto permanente.

La sicurezza idraulica della linea ferroviaria nel suo complesso dovrà essere valutata con riferimento alle aree potenzialmente inondabili associate all'esondazione della piena con tempo di ritorno di 200 anni (stimata sulla base delle LSPP elaborate mediante GEV), nonché dei corrispondenti livelli idrici, derivanti dalle simulazioni numeriche secondo modello bidimensionale (2D), in regime di moto vario.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 17 di 87

3 ANALISI IDRAULICHE DISPONIBILI NELL'AREA DI STUDIO

Le analisi idrauliche disponibili nell'area di studio includono, oltre alle indicazioni fornite dalla normativa vigente in tema di rischio idraulico già citate nel paragrafo 1.1, lo “*Studio idraulico dell'intero bacino del Torrente Grue*”, svolto per conto della Regione Piemonte dallo Studio Anselmo Associati, nel 2016.

Le indagini allestite nell'ambito dello studio hanno avuto lo scopo di ricostruire il campo di inondazione del Torrente Grue conseguente all'evento di riferimento del 13 ottobre 2014. La ricostruzione del campo di inondazione ha messo in evidenza le zone vulnerabili ed ha permesso l'individuazione di una serie di interventi aventi lo scopo di mitigare la pericolosità evidenziata. L'approccio seguito ha preso in esame la caratterizzazione idrologica e quella idraulica sulla scala dell'intero bacino del Grue, partendo dalla raccolta di dati idrologici, e sviluppando un modello idrologico di trasformazione afflussi-deflussi per la determinazione degli idrogrammi di piena ed un modello idraulico bidimensionale per l'analisi dell'idrodinamica degli eventi presi in esame.

Tale studio ha pertanto fornito una solida base di riferimento per l'analisi qui presentata, benché quest'ultima sia focalizzata su un'area più ridotta e condotta ad un livello di dettaglio maggiore rispetto a quanto sviluppato nel 2016. Lo studio pregresso è stato pertanto tenuto in considerazione sia per quanto riguarda la definizione delle condizioni al contorno da utilizzare, sia per quanto riguarda la validazione (calibrazione) dei risultati ottenuti in termini di aree inondate.

In particolare, per quanto riguarda le criticità individuate in prossimità della linea ferroviaria, lo *Studio* di riferimento mostra che il ponte ad arco della SR 10, immediatamente a monte della linea FS, appare insufficiente al convogliamento della portata con tempo di 100 anni, mentre non vengono tracciati i successivi ponti della ferrovia e della strada comunale. La figura che segue mostra uno stralcio dei risultati delle verifiche idrauliche secondo modello bidimensionale in moto vario, svolte per la caratterizzazione dell'evento di riferimento, in termini di profondità della corrente al transito della portata al colmo. È possibile osservare come a monte del nodo critico definito dalla SR 10 (identificato dal numero 5) siano presenti aree di allagamento dovute all'insufficienza del manufatto di attraversamento esistente, mentre non si osservano criticità dovute all'attraversamento ferroviario posto immediatamente a valle.

IDROLOGIA E IDRAULICA

 Relazione idraulica - Studio idraulico
 bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	18 di 87

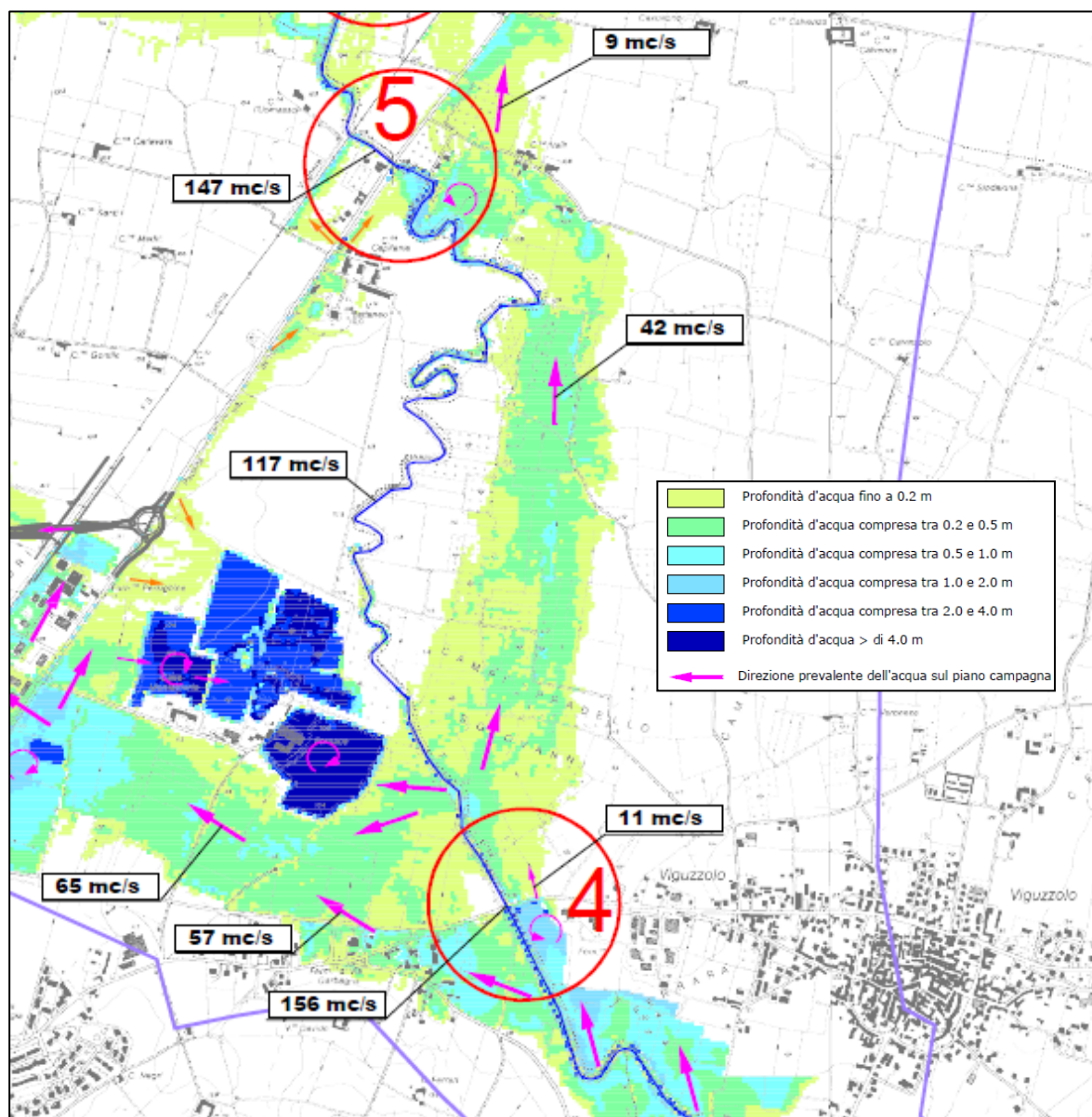


Figura 3: Aree di allagamento dovute al passaggio della piena nel Torrente Grue (Stralcio dagli elaborati grafici dello Studio idraulico dell'intero bacino del Torrente Grue - Anselmo, 2016)

Sulla base dei risultati ottenuti nello studio di *Anselmo Associati* (2016), sono stati individuati una serie di interventi di mitigazione del rischio idraulico del territorio, schematicamente indicati nella figura seguente, che consistono principalmente in argini in terra o muri di protezione a difesa di alcune specifiche aree.

IDROLOGIA E IDRAULICA

**Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	19 di 87

Ad oggi risultano finanziati, ed in procinto di realizzazione, gli interventi denominati “4a” e “3”, che prevedono rispettivamente la realizzazione di un muro di protezione, lungo la SR10 (ovvero lungo l’adiacente Roggia Cadè), a difesa della zona industriale di Tortona, e la realizzazione di manufatti di protezione degli edifici presenti nell’abitato di Valle (frazione di Viguzzolo) che comunque non interrompono il campo di inondazione in destra idraulica, in direzione del T. Calvenza (come mostrato nella figura precedente).

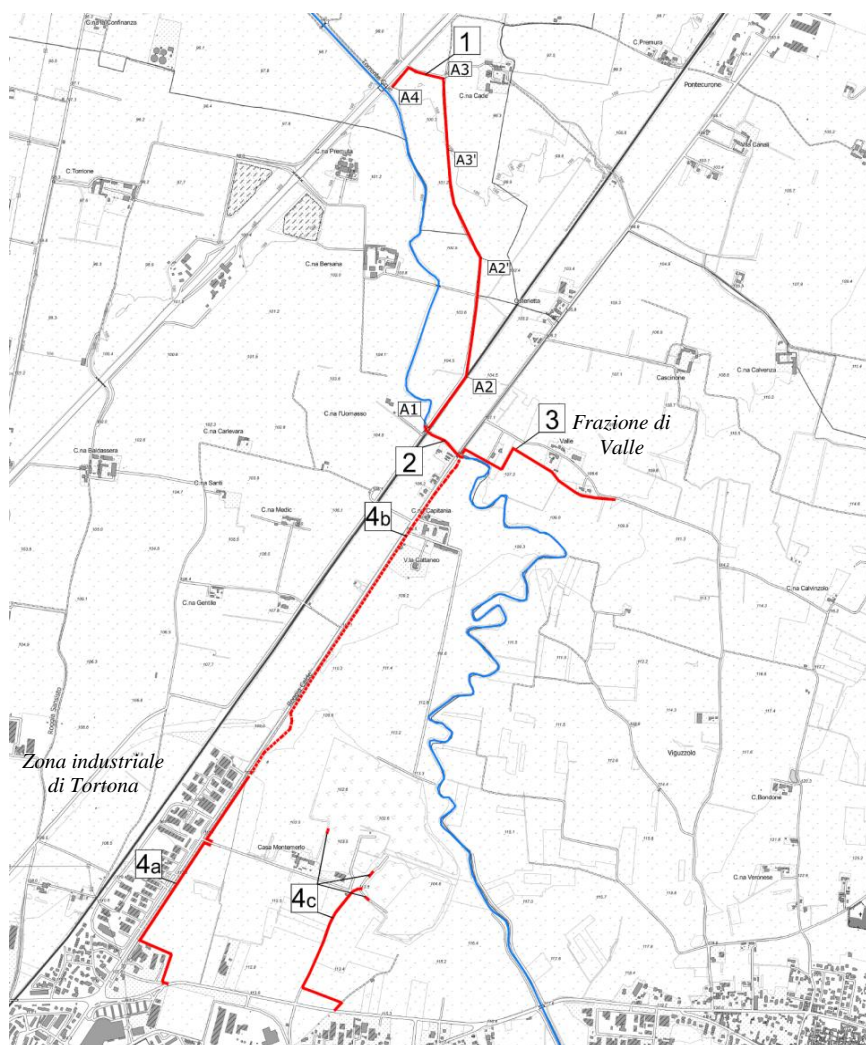



Figura 4: Interventi di mitigazione del rischio idraulico definiti nell’ambito dello Studio idraulico dell’intero bacino del Torrente Grue – Anselmo Associati (2016)

Relativamente al Torrente Calvenza, non sono invece disponibili studi idraulici specifici o di dettaglio svolti dal “territorio”.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

4 STUDIO IDRAULICO

4.1 GENERALITÀ

Lo studio idraulico è stato basato sull'implementazione di modelli numerici atti a rappresentare le dinamiche idrauliche durante gli eventi di piena dei torrenti 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-RAS² (ver. 5.0.7), con schema puramente bidimensionale. La taratura dei modelli è stata effettuata in riferimento a quanto riportato nel PGRA e ai risultati dello studio pregresso sul Torrente Grue. Gli scenari analizzati comprendono lo stato *ante operam* e quello *post operam*. Infine, è stato implementato anche un modello idraulico HEC-RAS monodimensionale con esondazioni impedito per ciascun torrente, al fine di verificare la compatibilità idraulica dei manufatti/delle opere in progetto.

4.2 DATI DI BASE

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


- dati topografici;
- informazioni sulle opere di attraversamento esistenti e in progetto;
- dati idrologico-idraulici.

4.2.1 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 dei torrenti, nonché delle relative opere di attraversamento esistenti, effettuato nel 2020: sono state rilevate 30 sezioni sul Torrente Grue e 9 sezioni lungo il Torrente Calvenza;

²<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

- Rilievo delle sezioni trasversali del Torrente Grue disponibili nello studio esistente della Regione Piemonte (Anselmo, 2016), effettuato nel 2016: sono state rilevate 20 sezioni nell'area di interesse;
- Rilievo Lidar dell'area di studio ad alta risoluzione (50 punti a metro quadrato) eseguito da Italferr nel 2020;
- Rilievo topografico 2D e 3D lungo il tracciato della linea ferroviaria, effettuato nel 2020;
- Modello Digitale del Terreno della Regione Piemonte con risoluzione a 5 m, derivato da Lidar del 2009-2011.

La Figura 5 fornisce la mappa con il dettaglio dell'estensione delle informazioni topografiche a disposizione.

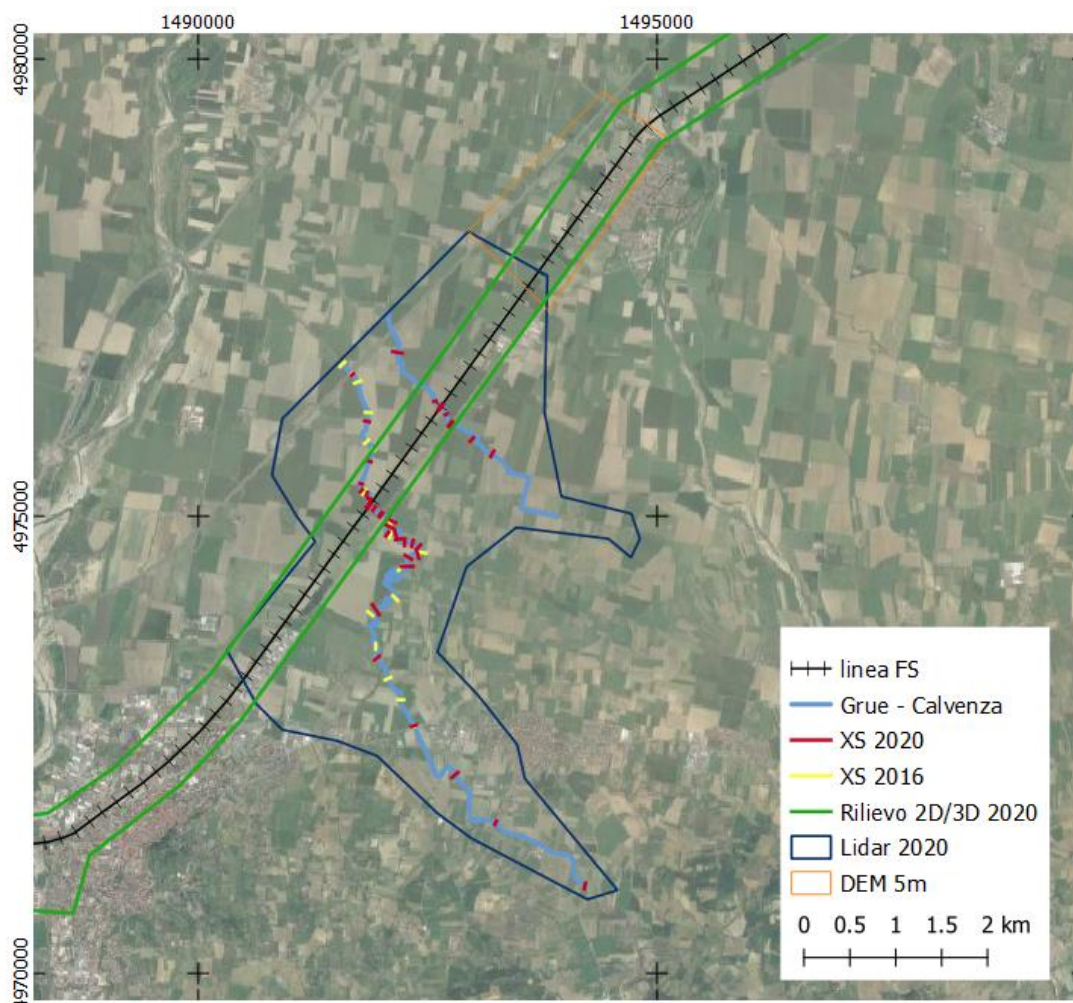



Figura 5: Informazioni topografiche a disposizione

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

4.2.2 Opere di attraversamento esistenti e in progetto

Le informazioni geometriche relative alle opere di attraversamento esistenti lungo i due torrenti sono state desunte dalla campagna di indagini topografiche effettuata nel 2020, integrate e validate con quelle disponibili dal rilievo topografico eseguito per lo studio di *Anselmo Associati* del 2016.

Per gli altri manufatti presenti nell'area di studio, fondamentalmente le opere idrauliche minori localizzate lungo la linea ferroviaria, le informazioni sono state ricavate dal rilievo 3D, integrato con dati puntuali raccolti in campo, durante i sopralluoghi.

La configurazione dello scenario di progetto è stata poi utilizzata per la definizione delle geometrie degli attraversamenti in progetto.

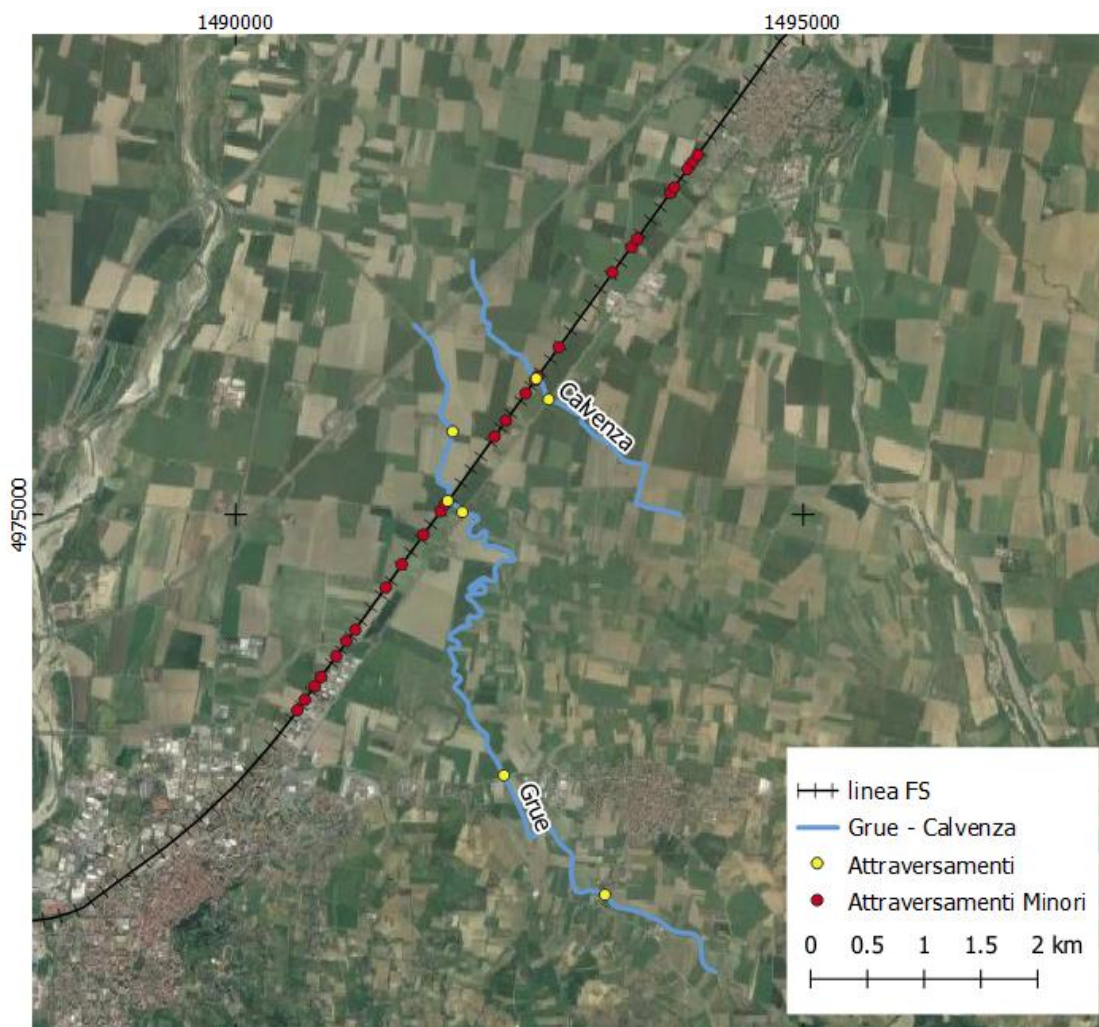



Figura 6: Opere di attraversamento nell'area di studio

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 23 di 87

Relativamente all'opera di attraversamento esistente sul Torrente Grue, l'attuale linea ferroviaria scavalca il corso d'acqua mediante un ponte mono-campata con luce di 9 metri e altezza di 4 metri circa, con quota di intradosso a +105.2 m slm (Figura 7).



Figura 7: Torrente Grue: opera FS di attraversamento esistente

Il progetto di quadruplicamento della linea FS Tortona-Voghera prevede in corrispondenza del T. Grue oltre alla realizzazione dei due binari di quadruplicamento anche la realizzazione di due binari destinati a sviluppi infrastrutturali futuri. Sul Torrente Grue è prevista quindi la realizzazione di due nuovi viadotti ferroviari affiancati, a valle del ponte FS esistente. In ragione della conformazione del T. Grue, a valle della linea ferroviaria, con sviluppo sub-parallelo, si è reso necessario un intervento di deviazione del corso d'acqua, descritti in dettaglio nei capitoli/paragrafi seguenti.

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	24 di 87

Le nuove opere di attraversamento (VI06) scavalcano completamente il corso d'acqua (con luce di 33 metri) senza interferire con la sezione di deflusso. La quota minima di intradosso si attesta a +108.40 m slm.

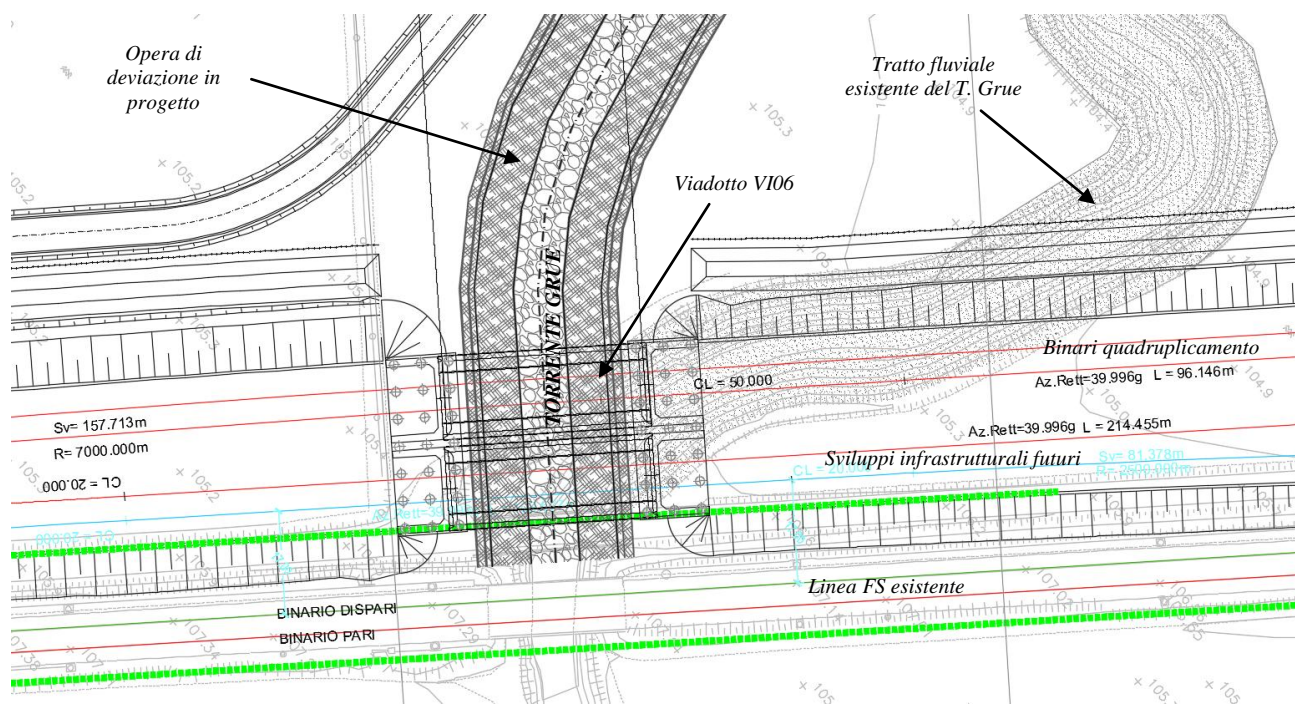


Figura 8: Torrente Grue: pianta dell'opera di attraversamento in progetto

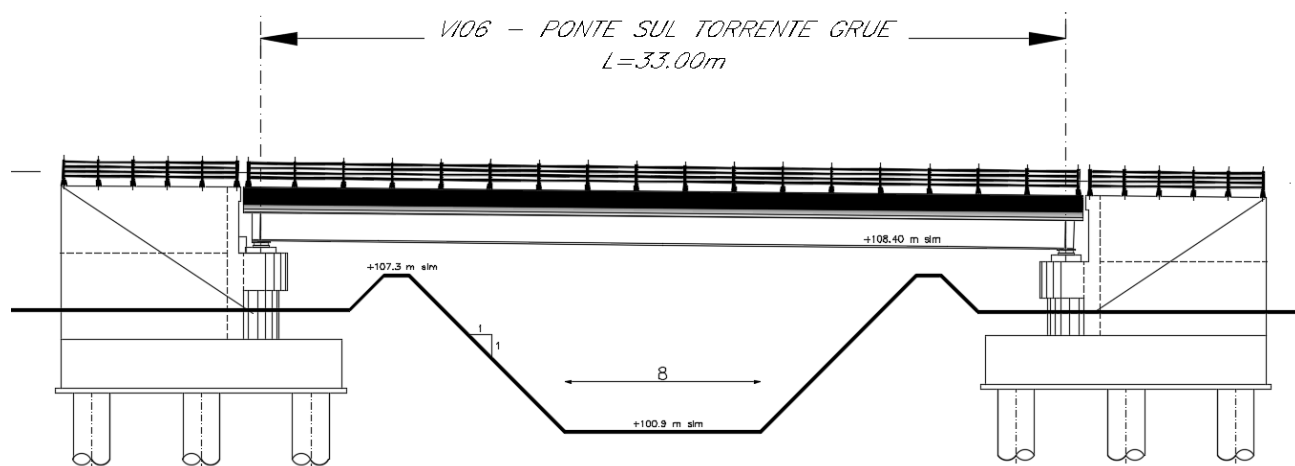



Figura 9: Torrente Grue: sezione/prospetto dell'opera di attraversamento in progetto.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 25 di 87


Per quanto riguarda l'opera di attraversamento esistente sul Torrente Calvenza, l'attuale linea ferroviaria scavalca il corso d'acqua mediante un manufatto in muratura, ad arco, con luce di 3 metri e altezza di 2.5 metri circa, con quota di intradosso a +100.9 m slm. In adiacenza a tale manufatto in muratura, sono presenti altri due manufatti di dimensioni minori, uno per lato (Figura 10), probabilmente realizzati in seguito per aumentare l'efficienza idraulica dell'opera attraversamento, in caso di eventi estremi.



Figura 10: Torrente Calvenza: opera FS di attraversamento esistente

La nuova opera di attraversamento (VI07), a valle di quella esistente, è caratterizzata da una luce di circa 70 metri e una quota minima di intradosso di +103.40 m slm.

Tale luce si è resa necessaria per scavalcare l'intera sezione interessata dal deflusso della piena di riferimento (tempo di ritorno di 200 anni) attraverso i tre manufatti esistenti a monte, come meglio mostrato nei paragrafi seguenti.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

4.2.3 Dati idrologico-idraulici

Le informazioni di base di carattere idrologico-idraulico includono i dati utilizzati per la definizione delle condizioni al contorno dei modelli numerici e per la loro calibrazione. Per quanto riguarda l'idrologia, si è fatto riferimento alla Relazione idrologica bacini maggiori - T. Grue, T. Calvenza, T. Curone, T. Limbione (Cod. IQ0101R09RIID0001001A) a corredo del presente progetto, che ha portato alla definizione degli idrogrammi di piena per assegnato tempo di ritorno immediatamente a monte dei tratti di asta analizzati. Tali idrogrammi sono stati determinati secondo diversi approcci statistici, sia secondo Gumbel sia secondo GEV, distribuzioni di probabilità comunemente accettate in letteratura nella valutazione degli eventi estremi. Gli idrogrammi ottenuti con il metodo GEV 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; tuttavia, gli idrogrammi secondo Gumbel sono stati comunque presi come riferimento (per la calibrazione), specialmente per 200 anni di tempo di ritorno, dato che in termini di picco il valore riportato in questa sede appare simile a quello utilizzato negli studi disponibili sul territorio, nello specifico per il T. Grue.

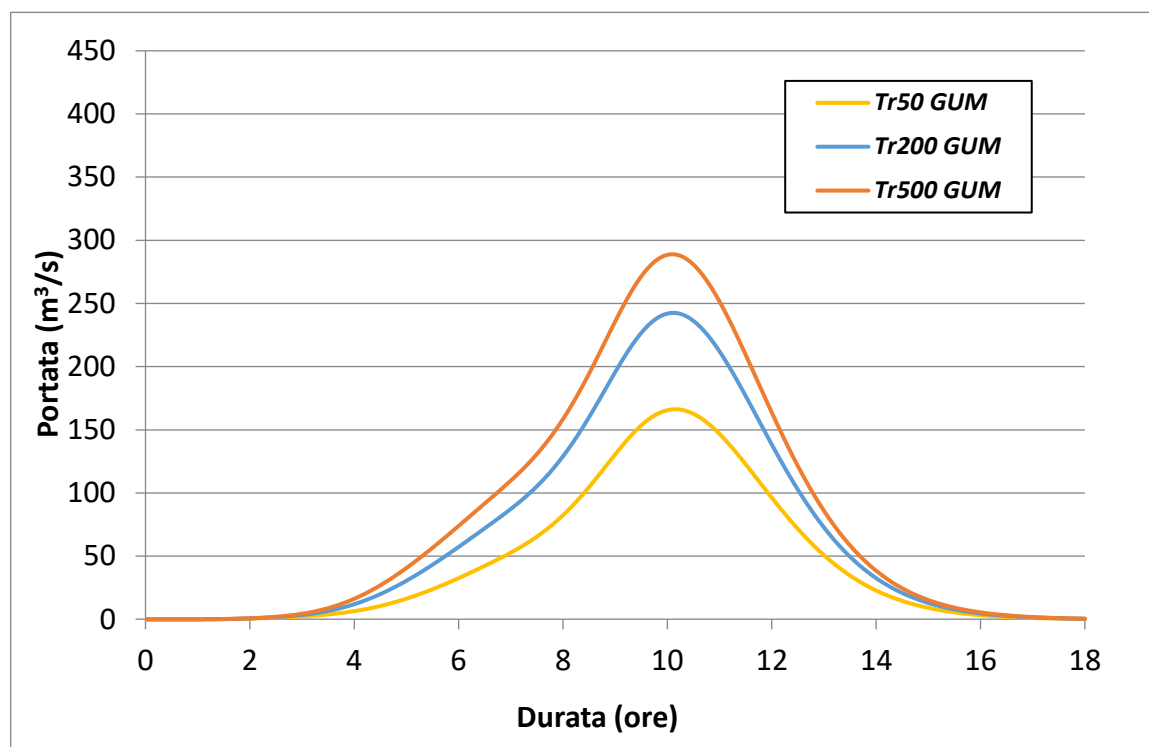


Figura 13: Torrente Grue: idrogrammi di piena – metodo di Gumbel

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	28 di 87

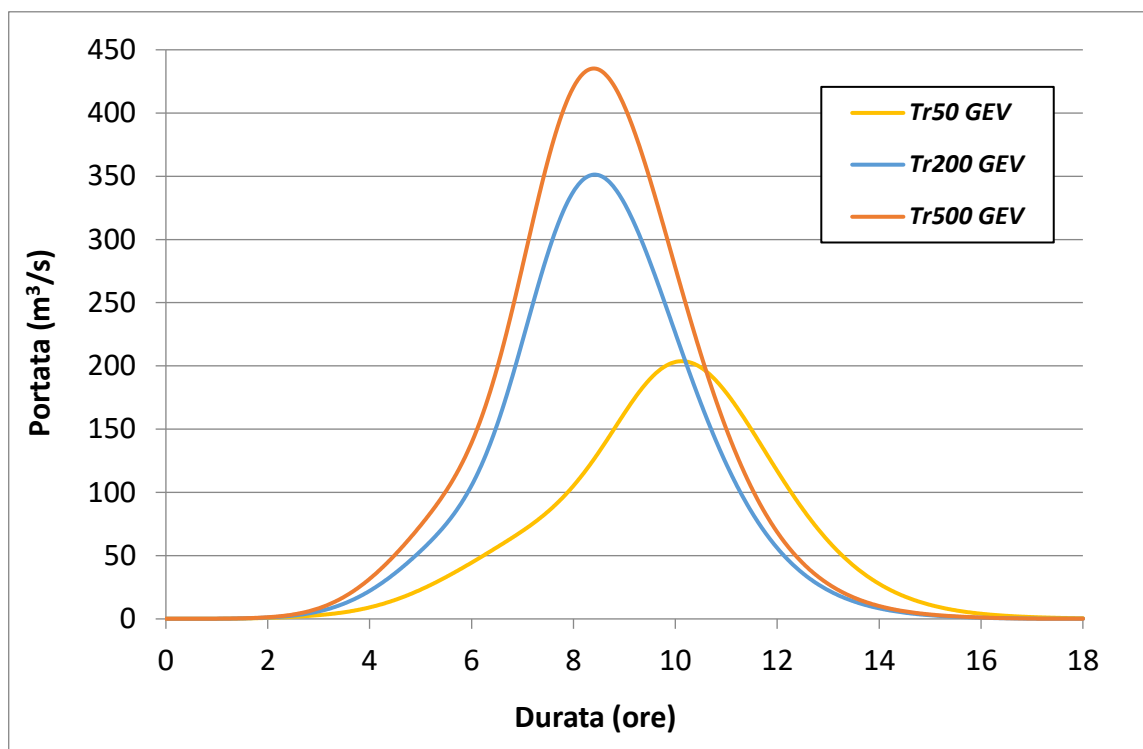


Figura 14: Torrente Grue: idrogrammi di piena – metodo GEV

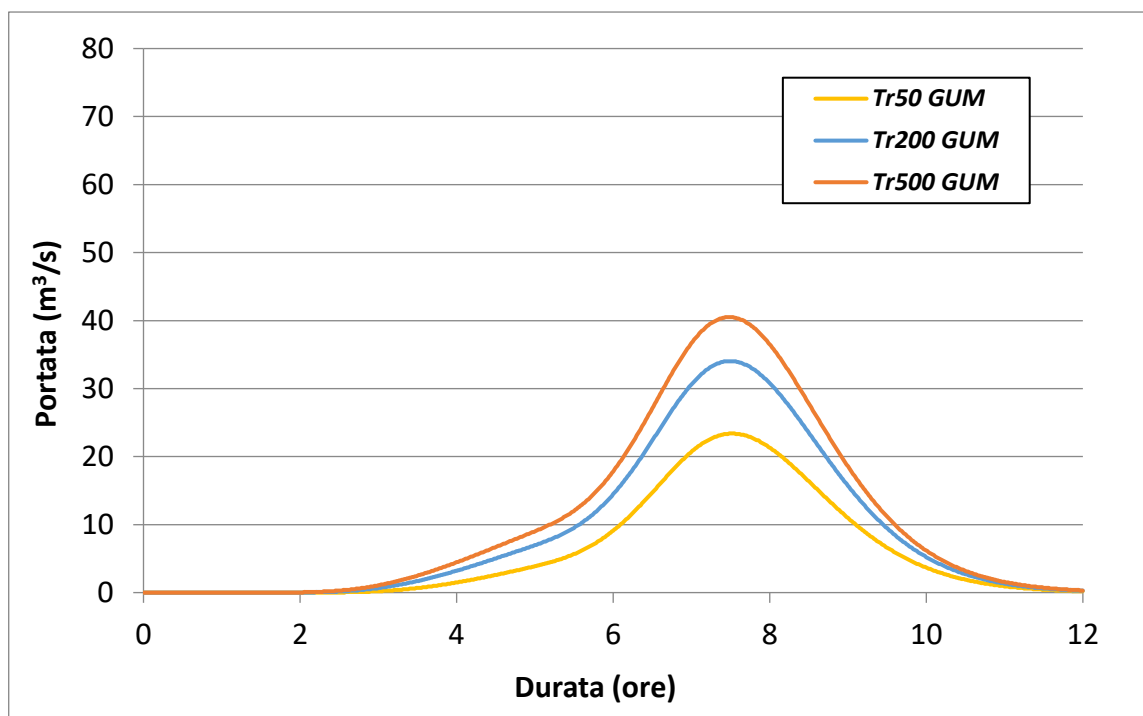



Figura 15: Torrente Calvenza: idrogrammi di piena – metodo di Gumbel

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

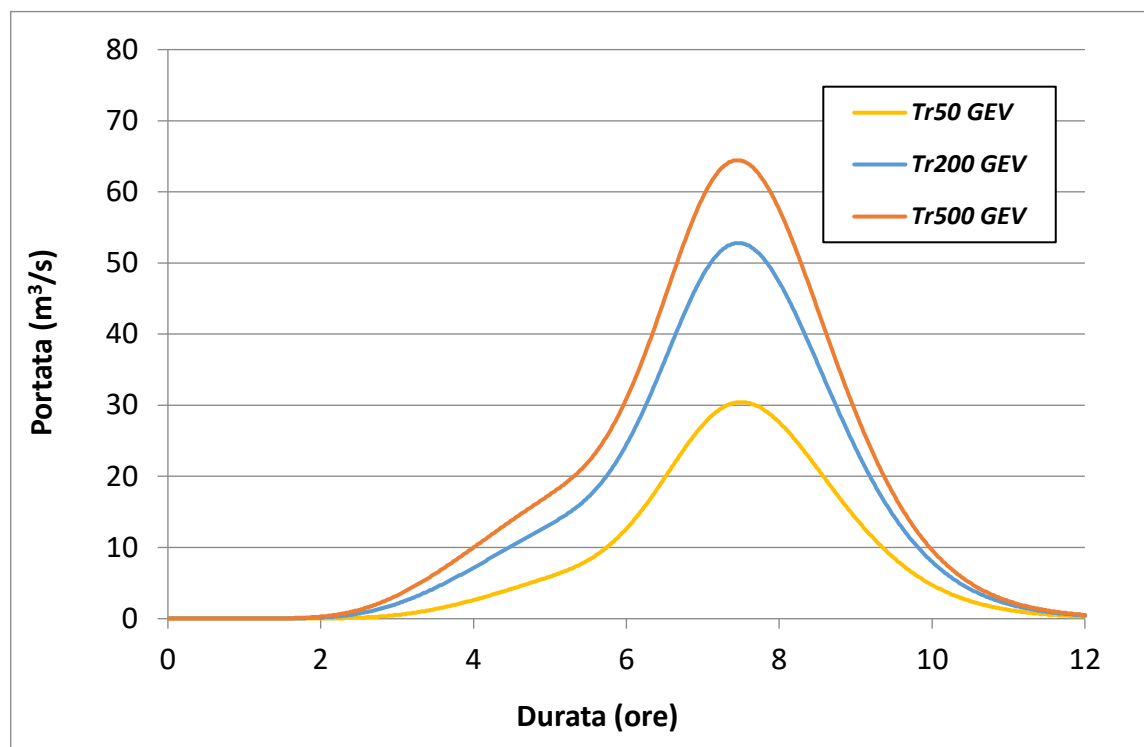


Figura 16: Torrente Calvenza: idrogrammi di piena – metodo GEV

Per quanto riguarda la caratterizzazione delle superfici delle aree di allagamento, a supporto dell'identificazione dei parametri di scabrezza per le zone esterne ai corsi d'acqua, è stato utilizzato il Corine Land Cover (CLC)³, standard europeo per il rilevamento e il monitoraggio delle caratteristiche di copertura e uso del territorio.

La tipologia di copertura del suolo è stata poi correlata ad un coefficiente di scabrezza direttamente implementabile in ambiente RAS, secondo quanto reperito nella letteratura tecnica (Pestana et al., 2013) e riportato in Figura 18.

³<https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/biodiversita/documenti/corine-land-cover-clc#:~:text=Il%20progetto%20Corine%20Land%20Cover,alle%20esigenze%20di%20tutela%20ambientale>

IDROLOGIA E IDRAULICA

 Relazione idraulica - Studio idraulico
 bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	30 di 87

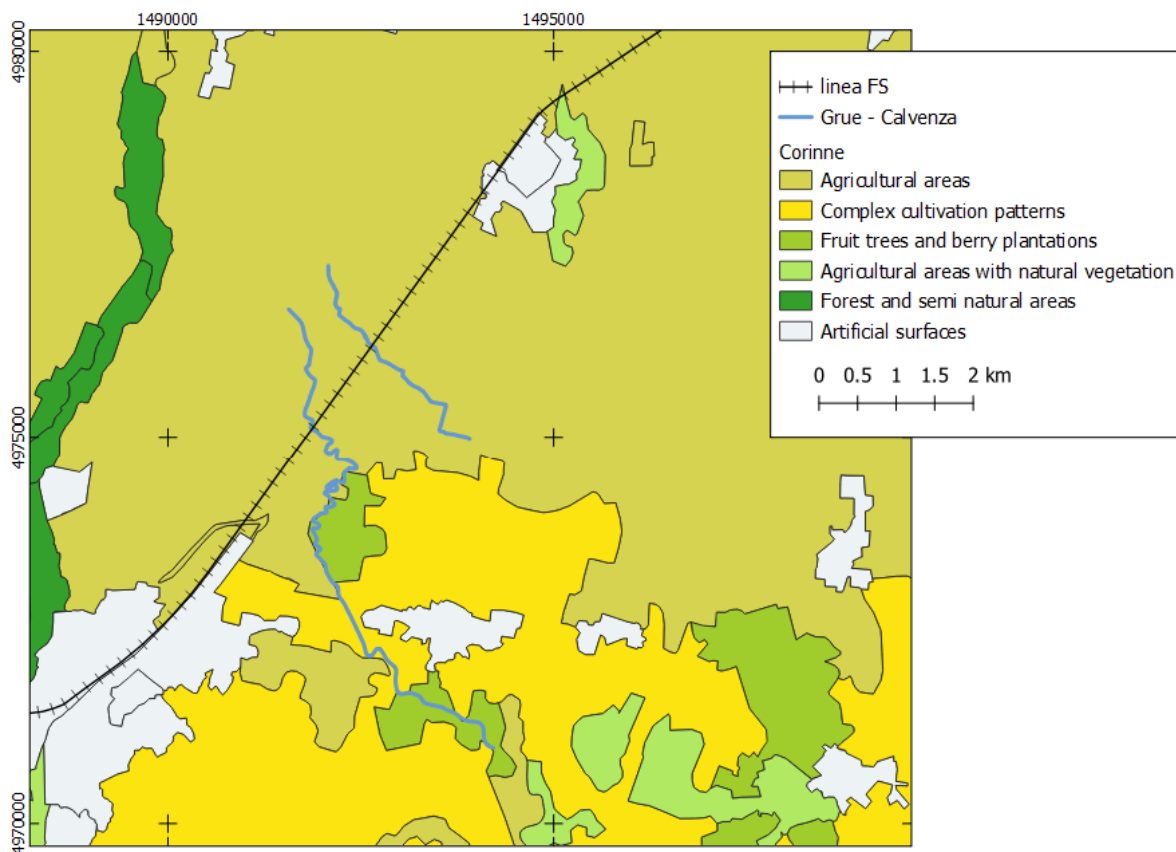


Figura 17: Corine Land Cover per l'area di studio

Code	Designation	n	Code	Designation	n
111	Continuous urban fabric	0.230	242	Complex cultivation patterns	0.023
112	Discontinuous urban fabric	0.115	243	Agriculture, w/significant natural vegetation	0.058
121	Industrial or commercial units	0.230	244	Agro-forestry areas	0.058
122	Roads and rail networks and associated land	0.038	311	Broad-leaved forest	0.230
124	Airports	0.230	312	Coniferous forest	0.127
131	Mineral extraction sites	0.104	313	Mixed forest	0.230
132	Dump sites	0.115	321	Natural grasslands	0.039
133	Construction sites	0.115	322	Moors and heathland	0.058
142	Sport and leisure facilities	0.023	323	Sclerophyllous vegetation	0.058
211	Non-irrigated arable land	0.043	324	Transitional woodland-shrub	0.058
212	Permanently irrigated land	0.043	331	Beaches, dunes, sands	0.138
213	Rice fields	0.023	332	Bare rocks	0.104
221	Vineyards	0.043	333	Sparsely vegetated areas	0.104
222	Fruit trees and berry plantations	0.043	334	Burnt areas	0.104
223	Olive groves	0.043	411	Inland marshes	0.115
231	Pastures	0.298	511	Water courses	0.035
241	Annual crops associated w/permanent crops	0.043	512	Water bodies	0.035

 Figura 18: Valori del coefficiente di scabrezza in termini di coefficiente di Manning ($s\ m^{-1/3}$) per le classi caratteristiche del CLC

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

Altra informazione utilizzata è costituita dalle mappe di pericolosità e di rischio del PGRA e dalla perimetrazione delle aree allagabili per assegnato tempo di ritorno, sopra descritte, usate anche esse (unitamente agli studi idraulici disponibili) come riferimento per la taratura dei modelli idraulici sviluppati.

4.3 IMPLEMENTAZIONE DEI MODELLI NUMERICI


4.3.1 Modello bidimensionale (2D)

4.3.1.1 Approccio matematico (2D)

Il codice di calcolo utilizzato per l'implementazione dei modelli bidimensionali dei corsi d'acqua Torrente Grue e Torrente Calvenza è il software Hec-Ras 5.0.7 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

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 32 di 87

volumi finiti fornisce una misura dei miglioramenti in termini di stabilità e robustezza rispetto alle tradizionali tecniche differenziali di soluzione basate su metodi agli elementi finiti.

- Algoritmo per la soluzione accoppiata dei modelli 1D e 2D: Gli algoritmi di soluzione 1D e 2D sono strettamente accoppiati nello stesso passo temporale di calcolo permettendo una perfetta coerenza a ogni step tra i modelli 1D e 2D. Ad esempio, se un fiume è modellato in 1D, ma l'area dietro un argine è modellata in 2D, il deflusso al di sopra dell'argine o eventualmente attraverso una breccia nell'argine è valutato utilizzando come carico di monte il livello nel fiume 1D e come carico di valle il livello nell'area 2D. L'equazione dello stramazzo è utilizzata per calcolare il deflusso al di sopra dell'argine o attraverso la breccia.
- Maglie computazionali strutturate e non strutturate: Il software è stato progettato per utilizzare mesh computazionali strutturati o non strutturati. Ciò significa che le cellule computazionali possono essere triangoli, quadrati, rettangoli o anche elementi a cinque e sei facce. La maglia può essere una miscela di forme e dimensioni delle celle. Il contorno esterno della maglia computazionale è definito con un poligono.
- Tabella dettagliata delle proprietà idrauliche per le celle di calcolo: All'interno di HEC-RAS le celle e le facce delle celle si basano sui dati del terreno sottostante (DTM). Ogni cella della maglia computazionale è pre-elaborato per sviluppare dei grafici dettagliati sulle proprietà idrauliche basate sul terreno sottostante che vengono utilizzati nella modellazione di HEC. Inoltre, ogni faccia delle celle viene valutata come una sezione trasversale dove vengono elaborate in tabelle che descrivono le proprietà idrauliche. Il flusso si muove in tutta la faccia (tra le celle) basandosi su questi dati. Questo permette agli utenti di utilizzare delle celle molto grandi senza però perdere troppo il dettaglio del terreno sottostante che governa il movimento del flusso. Il vantaggio è un minor numero di calcoli e quindi tempi di esecuzione molto più veloci.
- Dettagliata mappatura dello scenario degli allagamenti con animazioni: La perimetrazione delle aree allagabili così come le animazioni dello scenario degli allagamenti in funzione del tempo può essere fatta all'interno di HEC-RAS utilizzando le funzionalità di RAS-Mapper.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

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 ora 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

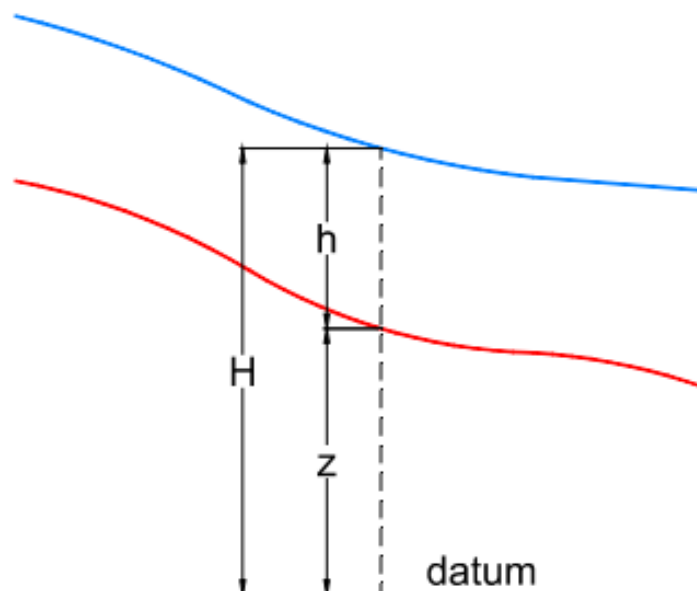



Figura 19 – Software Hec Ras 5.0.7: sistema di riferimento.

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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

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 $H(x,y,t) = z(x,y) + h(x,y,t)$ (Figura 19).

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

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

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

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:

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA												
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">COMMESSA</th> <th style="text-align: center;">LOTTO</th> <th style="text-align: center;">CODIFICA</th> <th style="text-align: center;">DOCUMENTO</th> <th style="text-align: center;">REV.</th> <th style="text-align: center;">FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">IQ01</td> <td style="text-align: center;">01</td> <td style="text-align: center;">R 09 RI</td> <td style="text-align: center;">ID 0002 001</td> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">35 di 87</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	35 di 87
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	35 di 87								

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

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

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

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

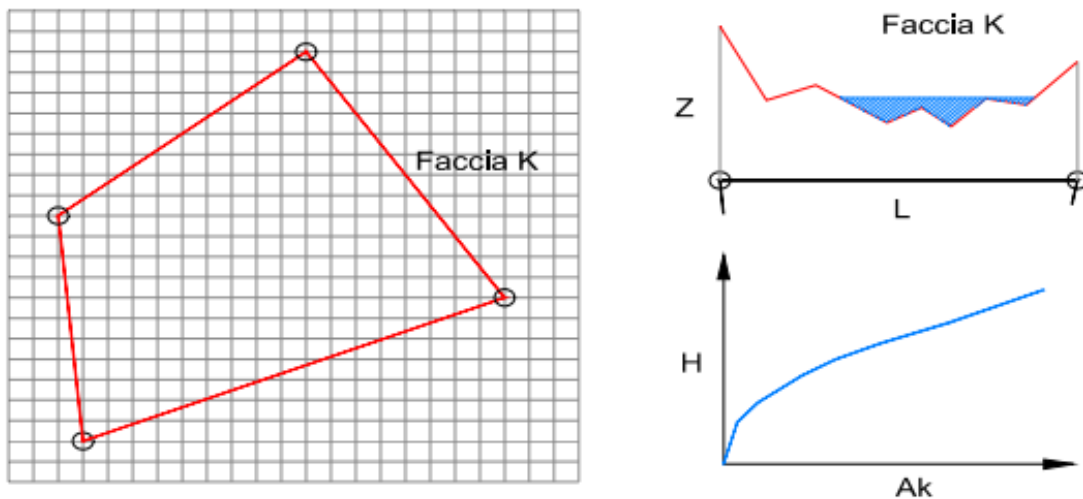


Figura 20 – Software Hec Ras 5.0.7: in grigio il dato della griglia DTM, in rosso la cella di calcolo del modello idraulico. A destra la schematizzazione effettuata da Hec Ras sulle facce del bordo della cella.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 36 di 87

4.3.1.2 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 4.2.1, avendo cura di integrare le informazioni derivate dalle sezioni trasversali rilevate in alveo con quelle relative al piano campagna provenienti dai modelli digitali del terreno.

Per tale scopo è stata effettuata una interpolazione geospaziale delle sezioni rilevate, in ambiente GIS tramite il software XS Interpolator⁴, 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 Lidar per le quote del terreno di piano campagna.

La figura che segue fornisce un esempio dell'interpolazione effettuata, mostrando il confronto tra il rilievo Lidar e l'integrazione tra quest'ultimo 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.

L'estratto del modello digitale del terreno ottenuto integrando le sezioni trasversali mostra anche un caso particolare che si applica al Torrente Grue, per il quale è stata ricostruita anche la geometria della Roggia Cadè, in sinistra idraulica, immediatamente a monte della SR10, che non era sufficientemente definita nel rilievo Lidar disponibile.

⁴<https://shop.m3eweb.com/home/32-xs-interpolator.html>

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	37 di 87

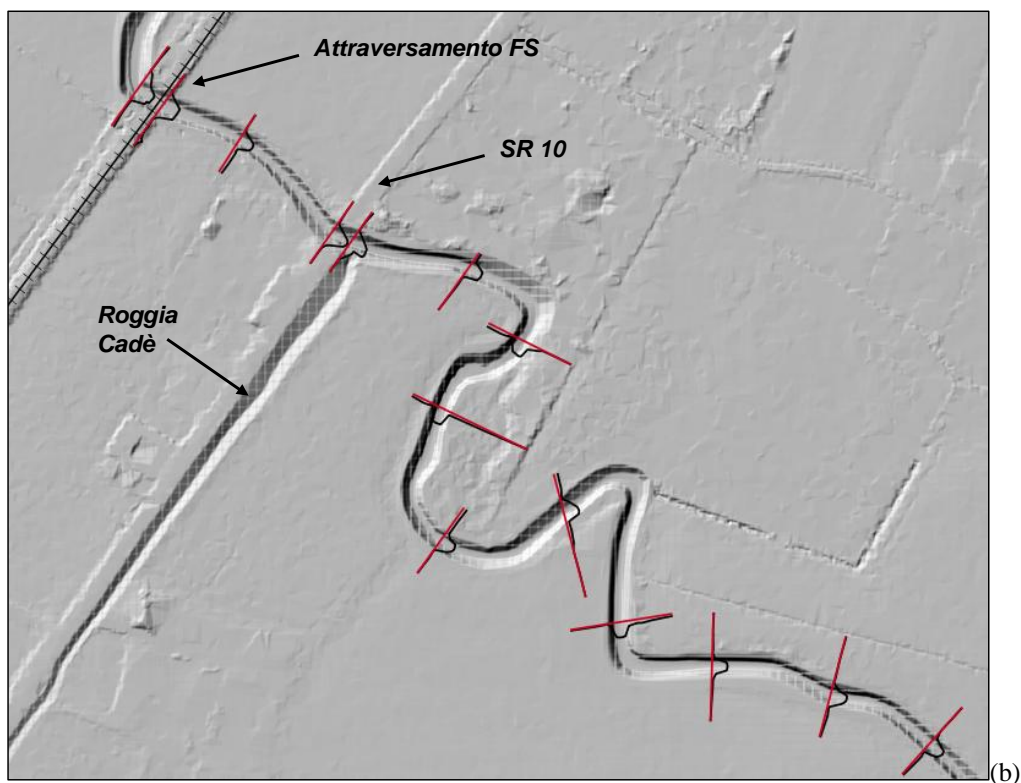
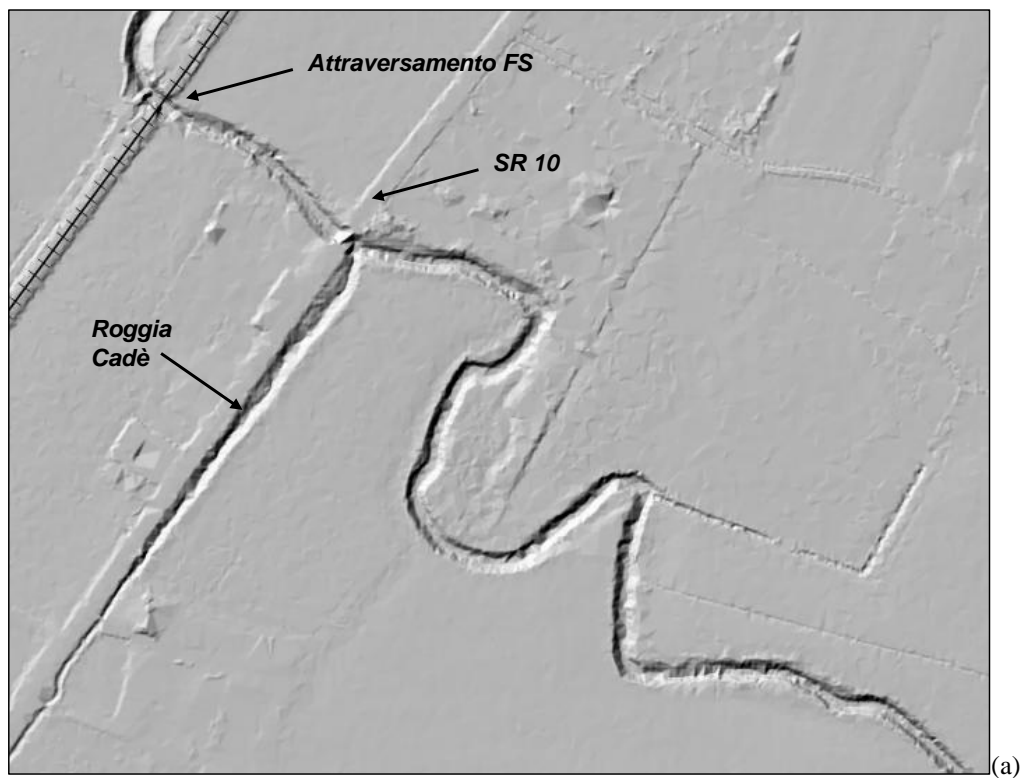



Figura 21: Estratto del DTM da Lidar (a) e del DTM ottenuto integrando il Lidar con le sezioni trasversali (b), lungo il torrente Grue, a monte dell'attraversamento ferroviario

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 38 di 87

4.3.1.3 Definizione del dominio e della griglia di calcolo

Poiché appartenenti allo stesso bacino (del Torrente Scrivia), ovvero l'uno confluisce nell'altro, ed essendo interagenti in termini di aree inondate (ovvero le acque esondate dall'uno defluiscono nell'altro, a monte della SR10, come evidenziato dagli studi di Anselmo Associati, 2016), è stato implementato un unico modello numerico bidimensionale che considera e simula la propagazione contemporanea delle piene del T. Grue e del T. Calvenza. 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. Particolare attenzione è stata posta sull'esigenza (sopra descritta) di includere all'interno dello stesso dominio di calcolo i due torrenti, al fine di poter correttamente prendere in considerazione potenziali interconnessioni tra i flussi di esondazione che possano poi gravare ulteriormente sull'officiosità delle opere di attraversamento oggetto di studio.

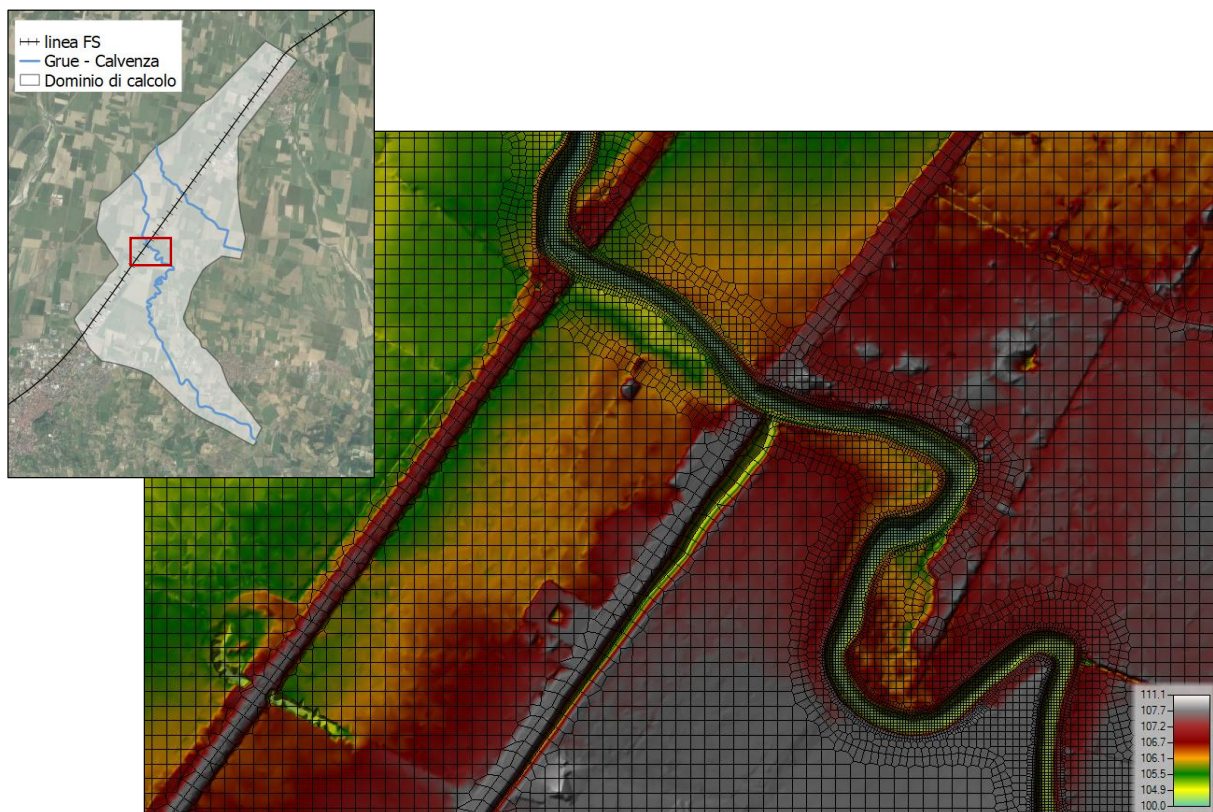



Figura 22: Estensione del dominio di calcolo e particolare della mesh in prossimità dell'attraversamento ferroviario del Torrente Grue

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

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 a 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. In corrispondenza dei principali corsi d'acqua, la griglia è stata dettagliata maggiormente passando ad una risoluzione di 5 m per le fasce spondali, a 2 m per l'alveo inciso del Grue e a 1 m per l'alveo inciso del Calvenza. La griglia così definita è costituita da 273'306 celle, di estensione media pari a 58.41 m², con una variazione da 0.39 m² a 261.25 m².

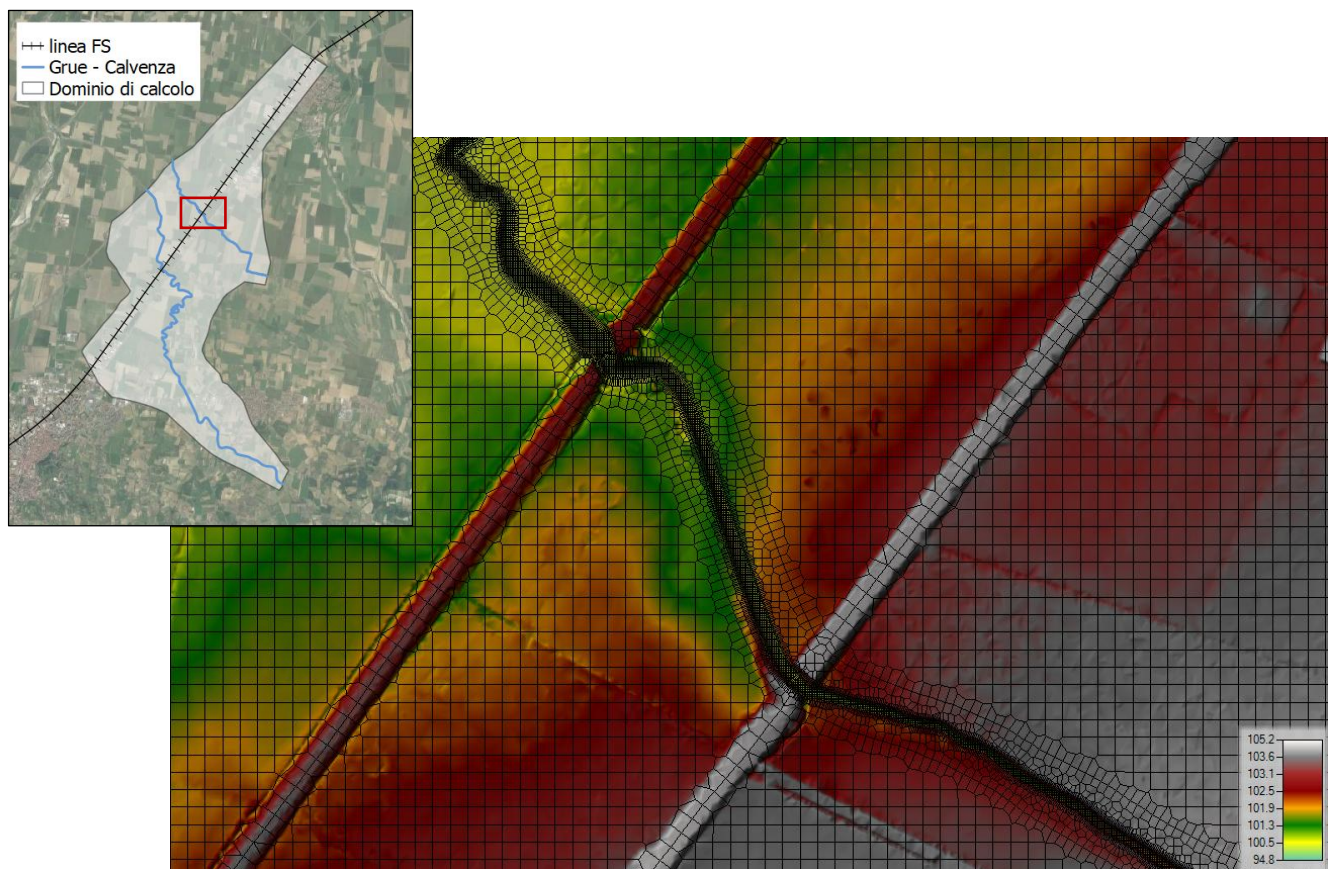



Figura 23: Estensione del dominio di calcolo e particolare della mesh in prossimità dell'attraversamento ferroviario del Torrente Calvenza

 <p>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</p>					
<p>IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza</p>	<p>COMMESSA IQ01</p>	<p>LOTTO 01</p>	<p>CODIFICA R 09 RI</p>	<p>DOCUMENTO ID 0002 001</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 40 di 87</p>

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

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

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

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

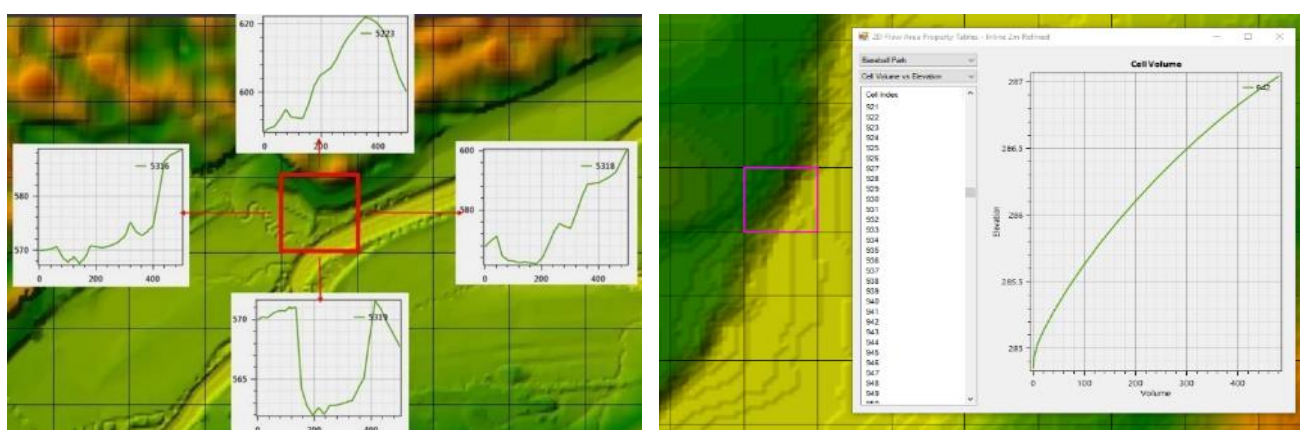



Figura 24: Esempio di DEM a sinistra estrazione dei profili lungo i confini delle celle, a destra curva livello-volume invasato

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.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

4.3.1.4 Strutture “idrauliche” all’interno del modello 2D

Tutte le strutture identificate nel paragrafo 4.2.2 sono state inserite nella geometria del modello come culvert, secondo le informazioni geometriche disponibili. In aggiunta a tutti i tombini e agli attraversamenti, sono poi stati inseriti anche i rilevati significativi presenti nel dominio di calcolo e che possono influire sulle dinamiche di allagamento; tali rilevati sono stati schematizzati come strutture di sfioro, alla quota definita dal modello del terreno.

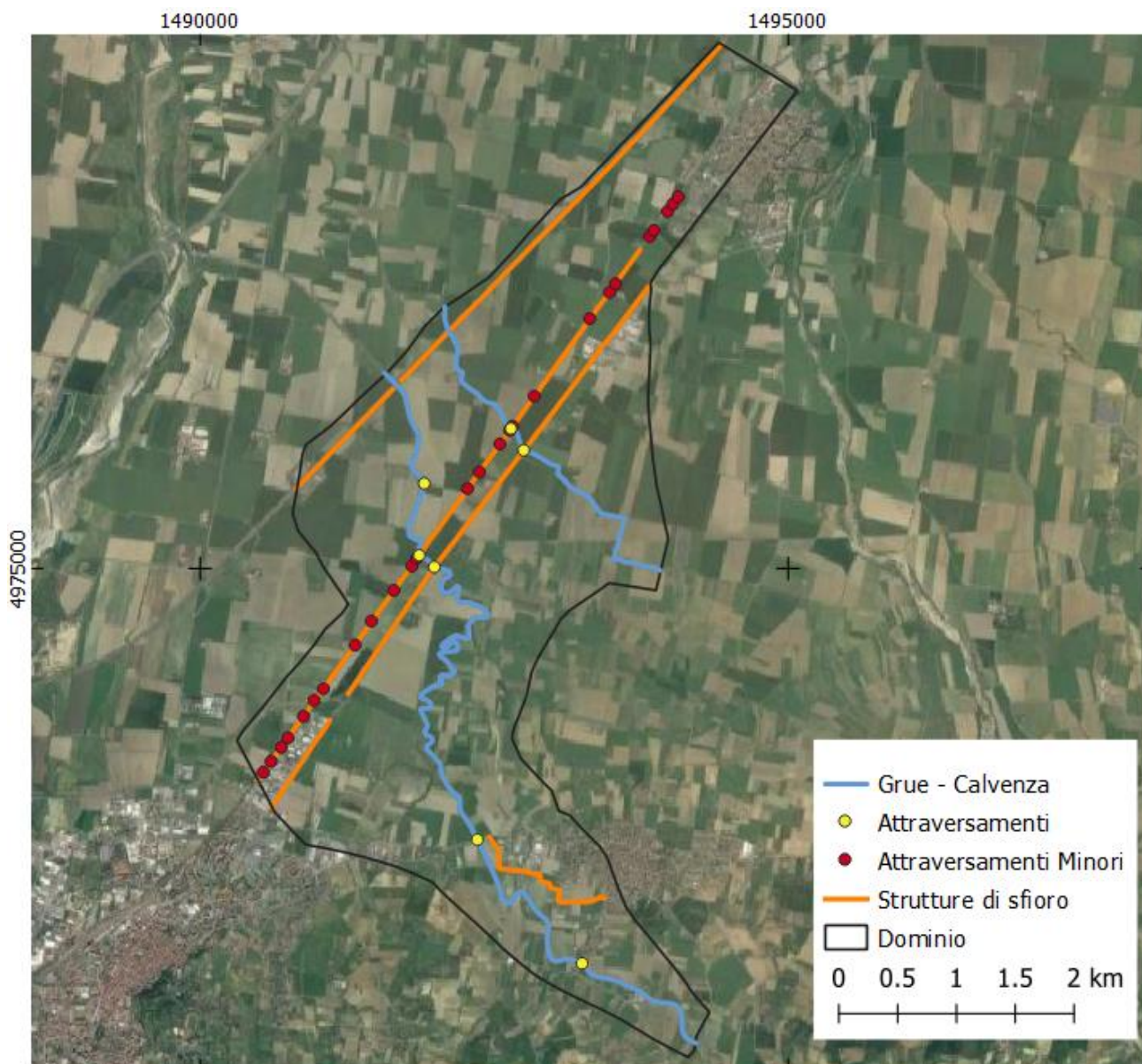



Figura 25: Strutture inserite nel modello

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 42 di 87

In particolare, per quanto riguarda gli attraversamenti della linea ferroviaria, allo stato attuale, le strutture sono state schematizzate come illustrato nelle figure seguenti, che riportano una vista planimetrica di dettaglio della griglia di calcolo nell'intorno delle strutture e la loro effettiva definizione nel modello (sezione di deflusso), secondo quanto ricavato dal rilievo topografico.

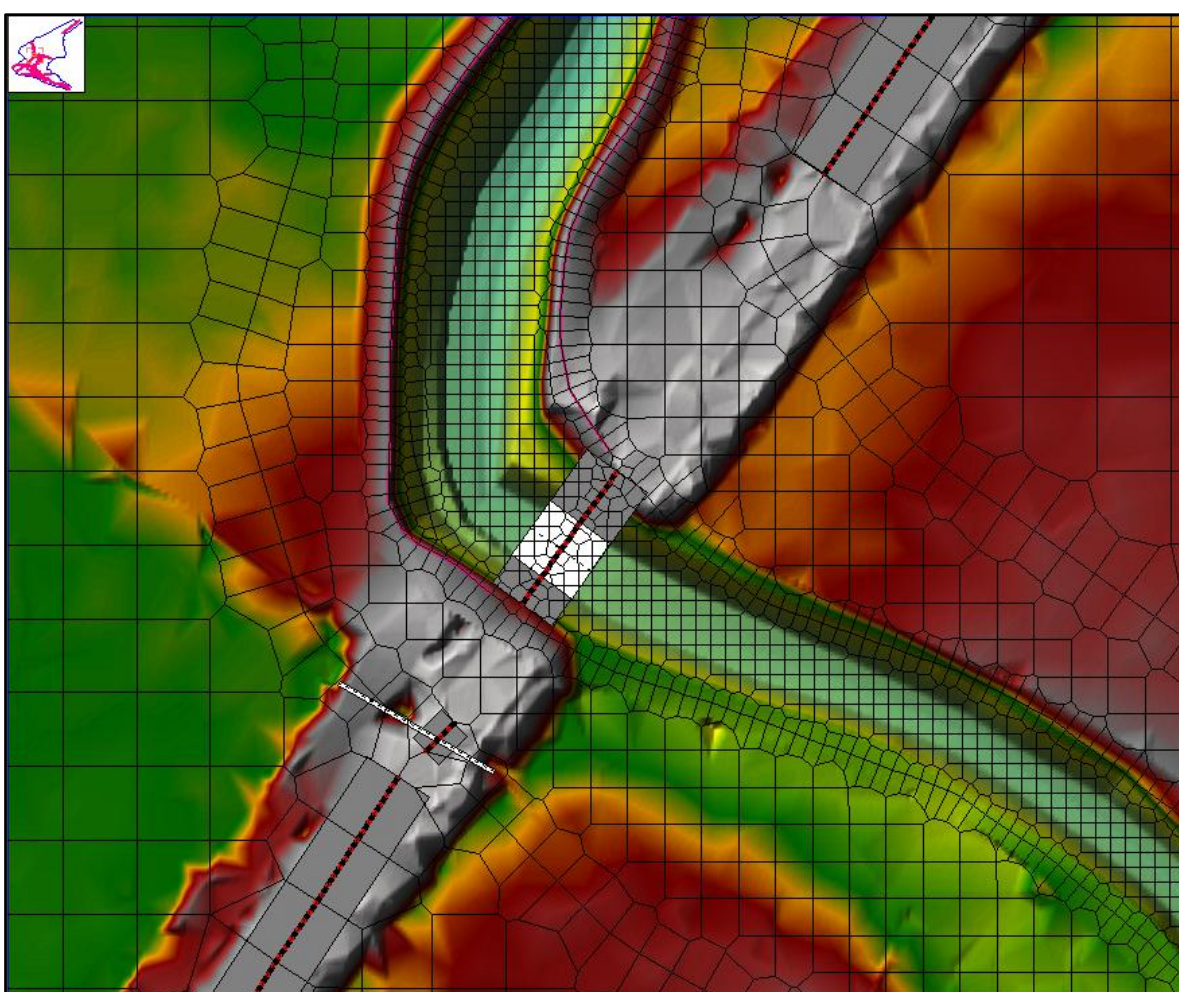


Figura 26: Torrente Grue – dettaglio della griglia di calcolo in corrispondenza dell'attraversamento della linea FS

IDROLOGIA E IDRAULICA

**Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	43 di 87

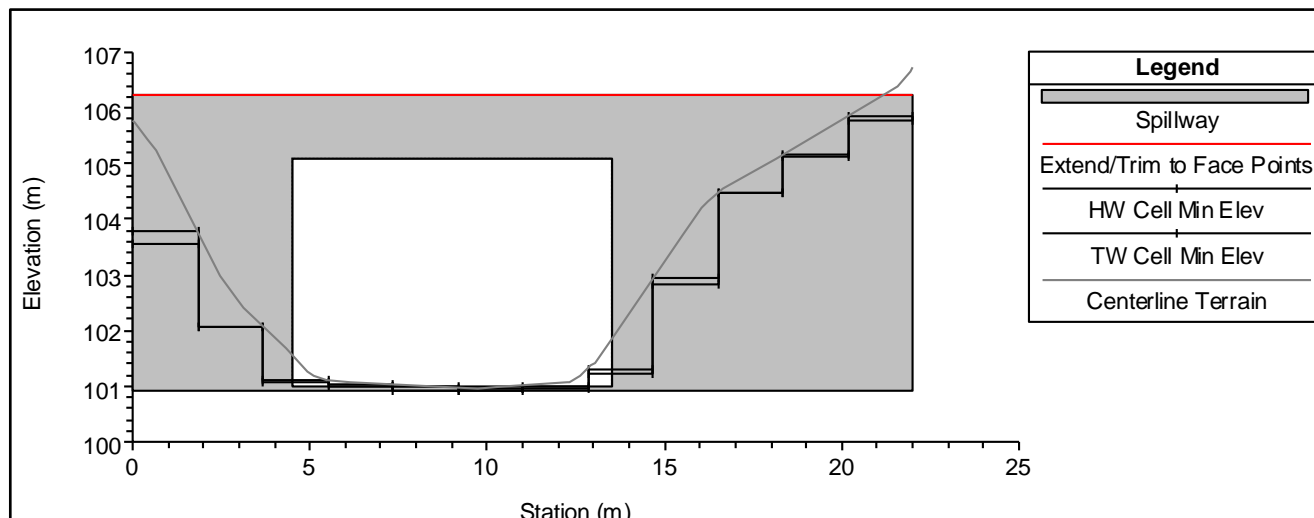


Figura 27: Torrente Grue – attraversamento della linea FS

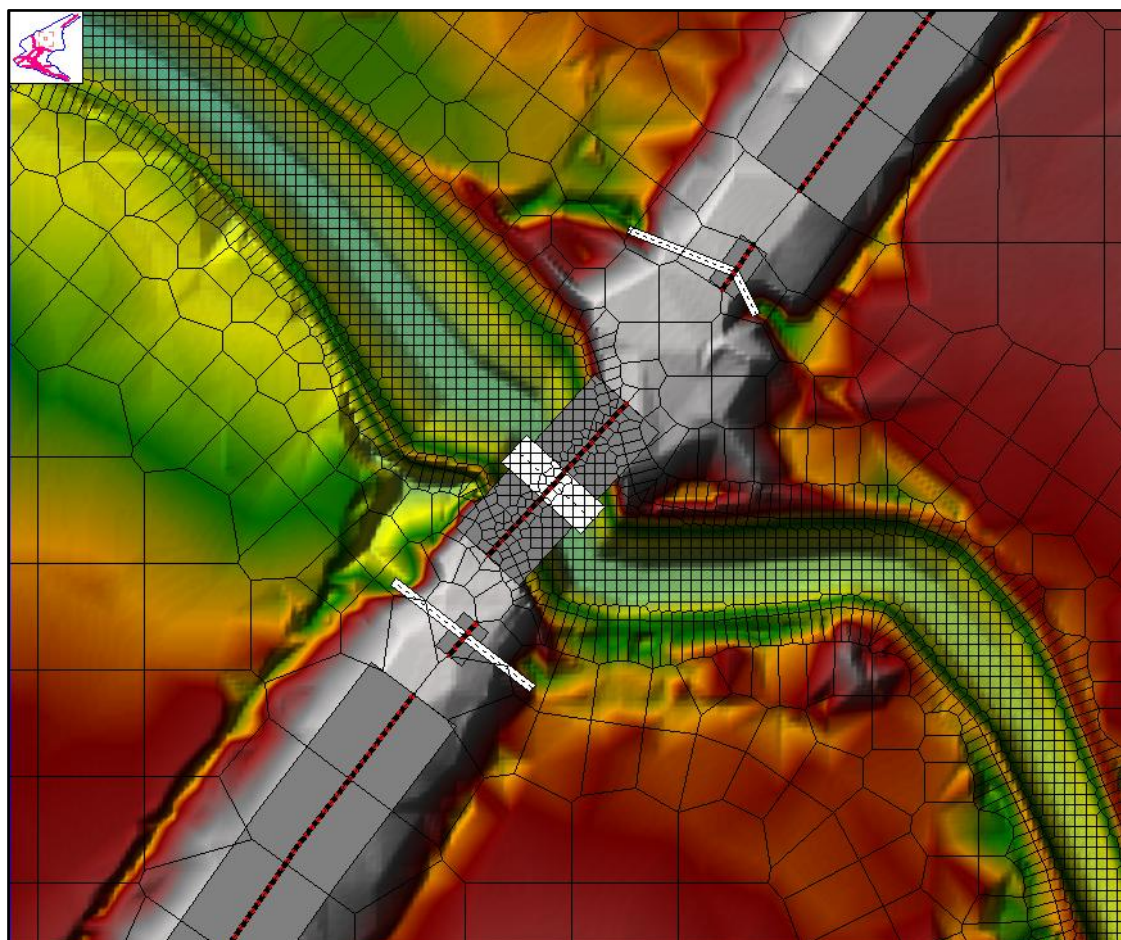



Figura 28: Torrente Calvenza – dettaglio della griglia di calcolo in corrispondenza dell'attraversamento della linea FS

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

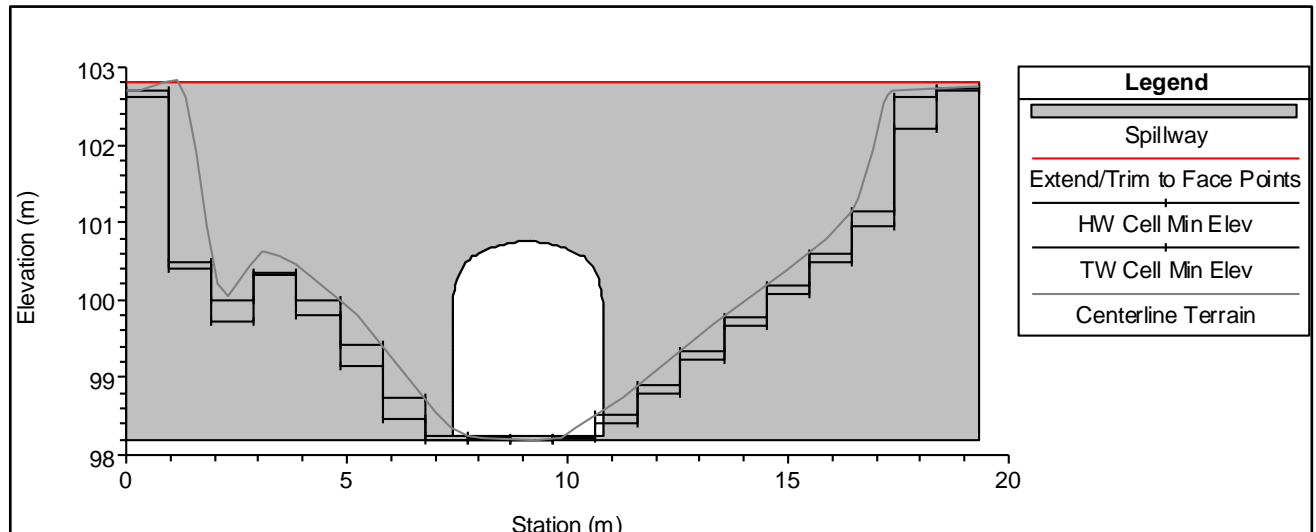



Figura 29: Torrente Calvenza – attraversamento della linea FS

4.3.1.5 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno imposte al modello includono:

- idrogrammi di piena di riferimento in input a monte lungo il T. Calvenza e il T. Grue;
- condizioni al contorno di valle lungo i contorni del dominio 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 30 mostra la schematizzazione delle condizioni al contorno imposte.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 45 di 87

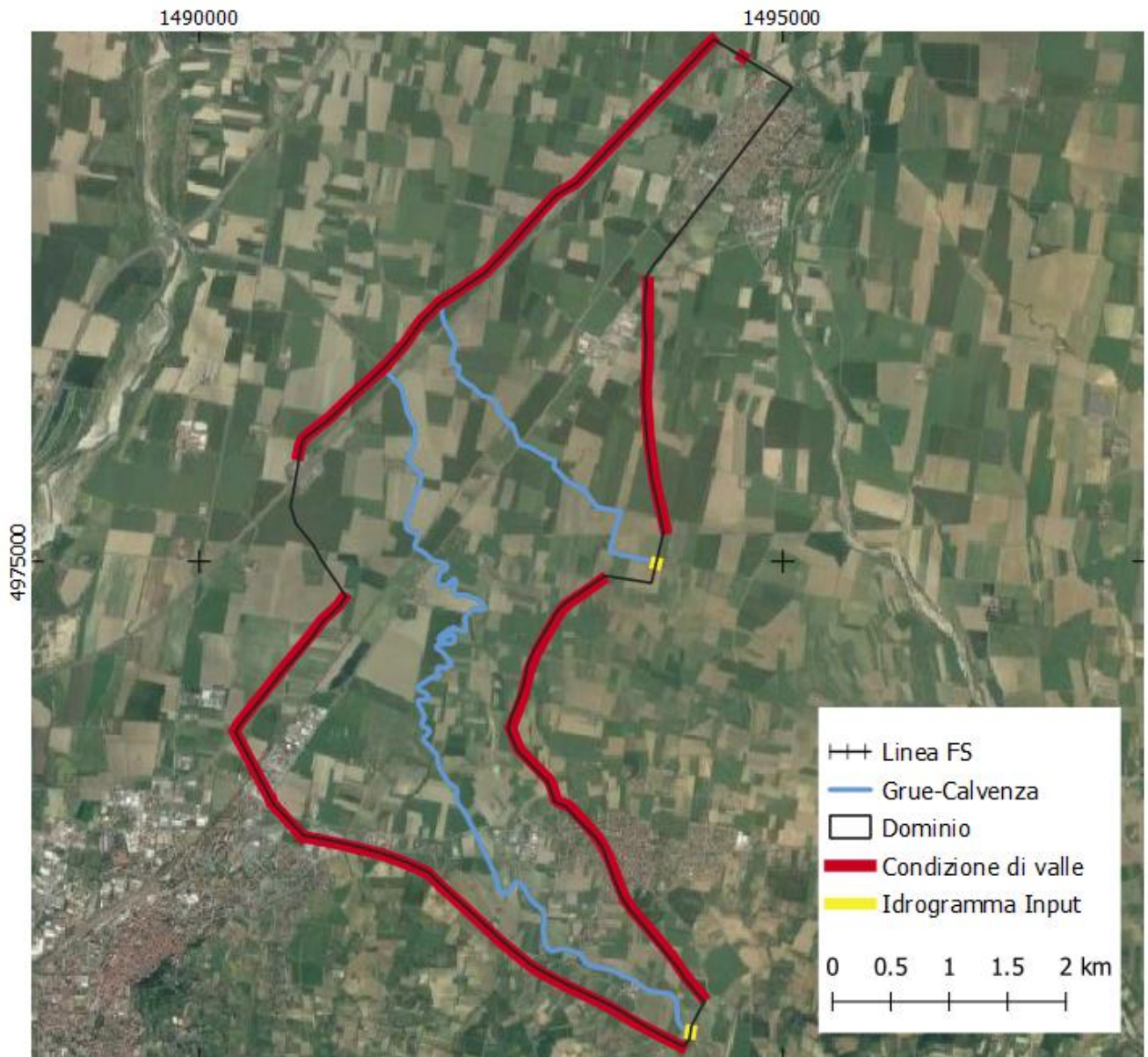



Figura 30: Condizioni al contorno imposte al modello

4.3.1.6 Calibrazione

Non essendo disponibili informazioni relative a misurazioni idrometriche durante eventi specifici per entrambi i torrenti in fase di studio, si è potuto calibrare il modello unicamente sulla base dei risultati degli studi esistenti.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 46 di 87

Per il Torrente Grue si è fatto riferimento all'analisi condotta dalla Regione Piemonte del 2016, redatta dallo Studio Anselmo, che, a partire dalle piogge registrate per l'evento del 9-13 ottobre 2014, ha cercato di riprodurre l'evento stesso basandosi sulla ricostruzione delle aree effettivamente allagate. Inoltre, per entrambi i torrenti, si è cercato di riprodurre quanto possibile le aree di allagamento identificate dal P.G.R.A.. È opportuno evidenziare tuttavia che le aree allagabili definite dal P.G.R.A., per come sono state definite e per il loro livello di dettaglio, forniscono una rappresentazione di massima delle aree di esondazione, e non possono rappresentare un riferimento in senso assoluto per la calibrazione del modello. La calibrazione è stata pertanto effettuata impostando valori di scabrezza in alveo in modo da riprodurre quanto possibile le aree di allagamento definite dagli studi sopra menzionati.

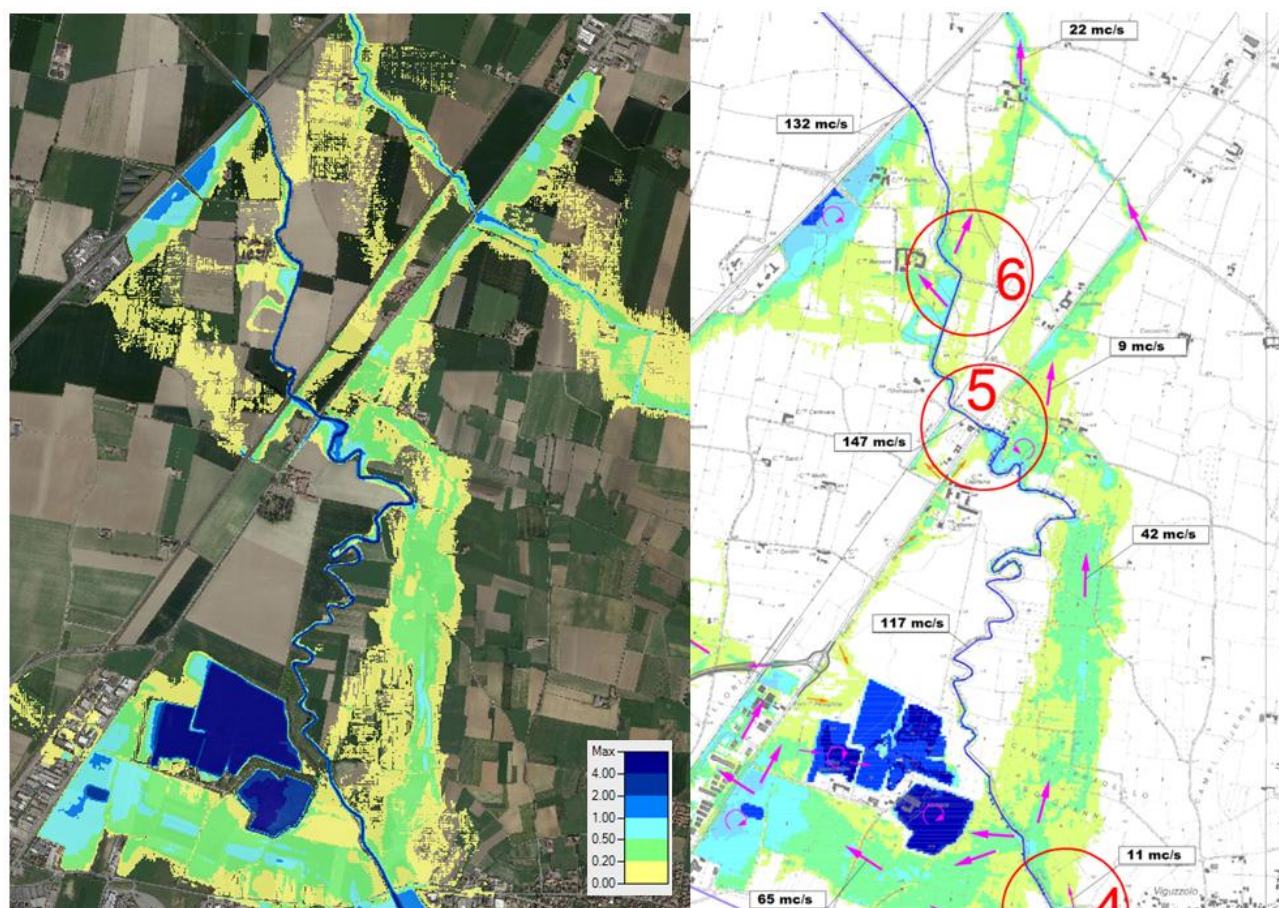



Figura 31: confronto tra aree allagabili calcolate (a sinistra) con quelle definite dallo studio del Prof. Anselmo (a destra)

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 47 di 87

In particolare, per quanto riguarda la calibrazione sul Torrente Grue, è stata condotta una simulazione per il tempo di ritorno pari a 200 anni, con l'idrogramma definito secondo la distribuzione statistica di Gumbel (paragrafo 4.2.3), in modo da ottenere una simulazione consistente con l'approccio utilizzato nello studio esistente, secondo il quale l'evento preso a riferimento è risultato caratterizzato da un tempo di ritorno duecentennale.


Relativamente all'estensione degli allagamenti i risultati di taratura del modello sono in accordo con quanto riportato nello studio di Anselmo Associati del 2016 (Figura 31); per quanto riguarda le portate e le distribuzioni dei flussi si riscontrano modeste discrepanze e l'assenza di una descrizione delle assunzioni modellistiche considerate per l'implementazione del modello sviluppato dallo Studio Anselmo Associati, in particolare di quelle per la schematizzazione delle strutture, non consente di capire ulteriormente le motivazioni di tali differenze.

In definitiva, la procedura di calibrazione ha condotto per il Torrente Grue alla scelta di un valore di scabrezza pari a $0.035 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$, mentre per il Torrente Calvenza ad un valore pari a $0.05 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$.

4.3.2 Modello monodimensionale (1D)

Al fine di verificare la compatibilità idraulica dei manufatti previsti in progetto nell'ipotesi di transito dell'intera portata idrologica, a seguito di future opere di sistemazione/protezione idraulica del territorio che riducano o eliminino le attuali esondazioni dei due torrenti che si verificano a monte della linea ferroviaria, è stato implementato anche un modello idraulico HEC-RAS monodimensionale (con esondazioni impedito quindi), in regime di moto permanente, per ciascun corso d'acqua.

Nello specifico, tale verifica è volta alla determinazione dei livelli idrici associati alla portata al colmo con tempo di ritorno di 200 anni, da prendere come riferimento nella definizione della quota minima di intradosso delle opere di attraversamento in progetto, secondo i criteri definiti in precedenza.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA												
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IQ01</td> <td>01</td> <td>R 09 RI</td> <td>ID 0002 001</td> <td>A</td> <td>48 di 87</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	48 di 87
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	48 di 87								

4.3.2.1 Approccio matematico (1D)

Il calcolo del profilo di corrente in condizioni di moto permanente fra due sezioni successive è effettuato dal software HEC-RAS mediante la soluzione dell'equazione dell'energia, attraverso un processo iterativo denominato *'standard step method'*.

Indicate con 1 e 2 rispettivamente le sezioni di valle e di monte, l'equazione dell'energia è espressa dalla seguente relazione:

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

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

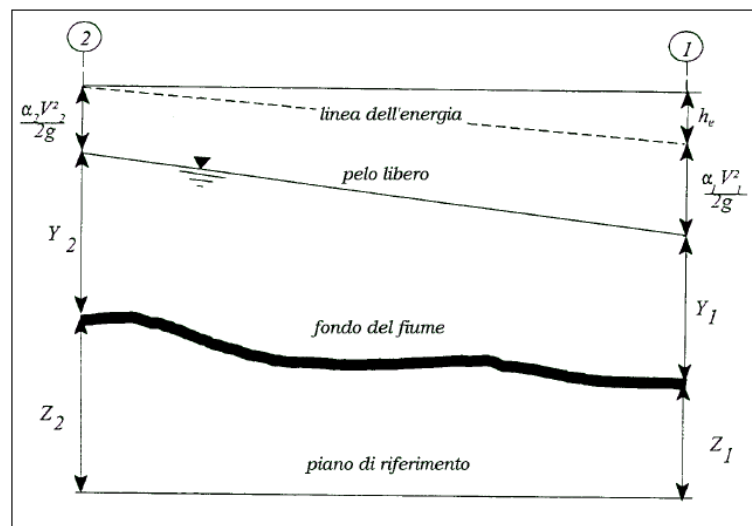



Figura 32 – Schema di calcolo per la determinazione del profilo del pelo libero nei corsi d'acqua.

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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

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

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

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

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

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

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

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

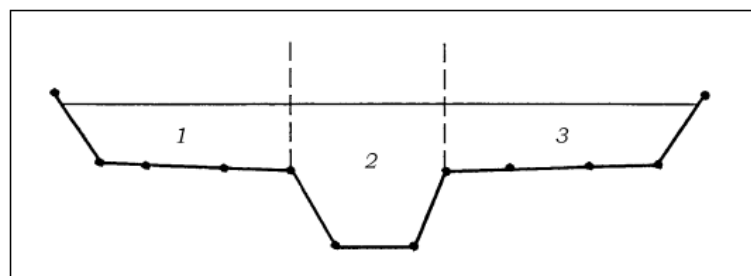



Figura 33 - Sezione schematica di un corso d'acqua.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

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


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

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

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

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

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

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA												
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">COMMESSA</th> <th style="text-align: center;">LOTTO</th> <th style="text-align: center;">CODIFICA</th> <th style="text-align: center;">DOCUMENTO</th> <th style="text-align: center;">REV.</th> <th style="text-align: center;">FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">IQ01</td> <td style="text-align: center;">01</td> <td style="text-align: center;">R 09 RI</td> <td style="text-align: center;">ID 0002 001</td> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">51 di 87</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	51 di 87
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	51 di 87								

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

IDROLOGIA E IDRAULICA
Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	52 di 87

4.3.2.2 Geometria e caratteristiche dei modelli

La geometria dei modelli monodimensionali è stata estratta direttamente dal DTM costruito per il modello numerico 2D, utilizzando le sezioni rilevate, da sponda a sponda, imponendo l'assenza di esondazioni. Le strutture lungo i corsi d'acqua sono state inserite come ponti/tombini (*bridge/culvert*) all'interno della geometria stessa.

I parametri di scabrezza dei modelli sono stati anch'essi derivati dal modello numerico 2D. Per quanto concerne le condizioni al contorno, sia nella sezione di monte che in quella di valle è stata imposta la condizione di moto uniforme ("*Normal Depth*"), in ragione della sufficiente estensione dei modelli rispetto alle sezioni di attraversamento in progetto. Le simulazioni sono state condotte in moto permanente, imponendo il regime di corrente mista.

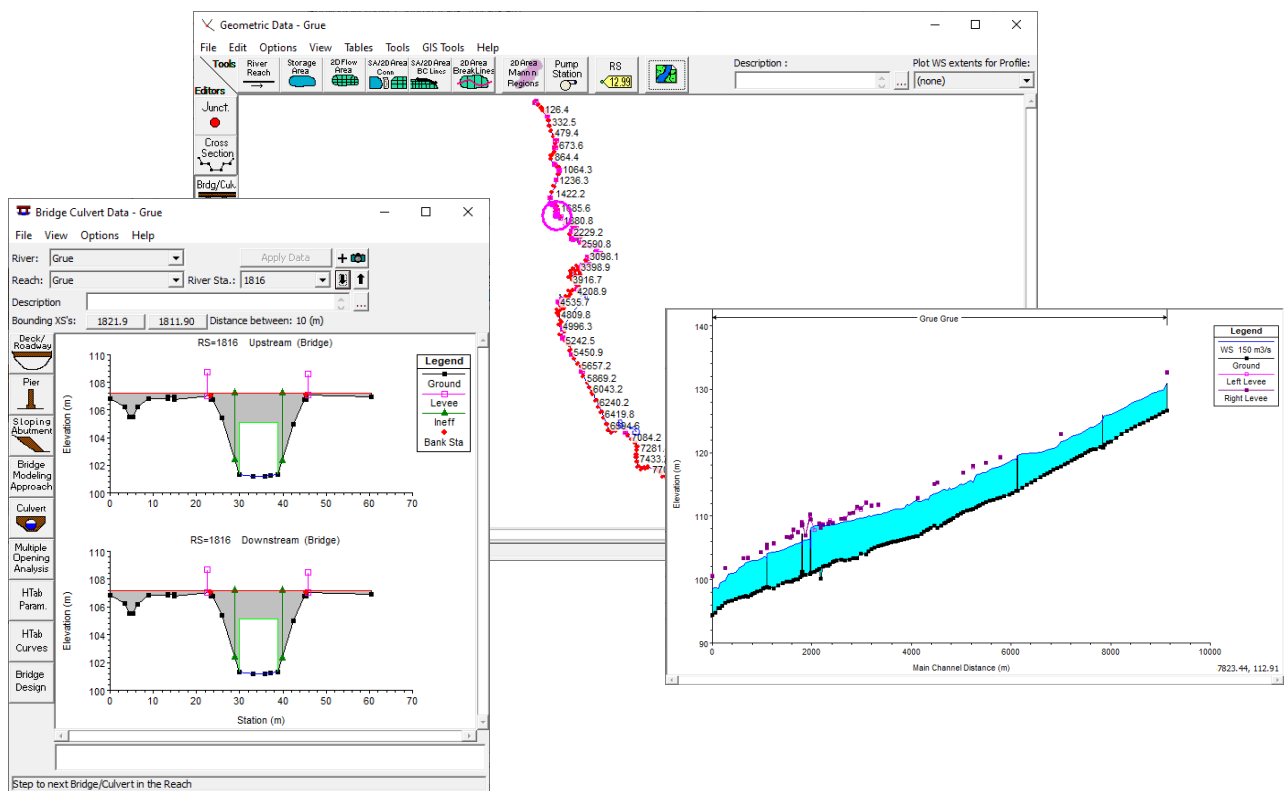
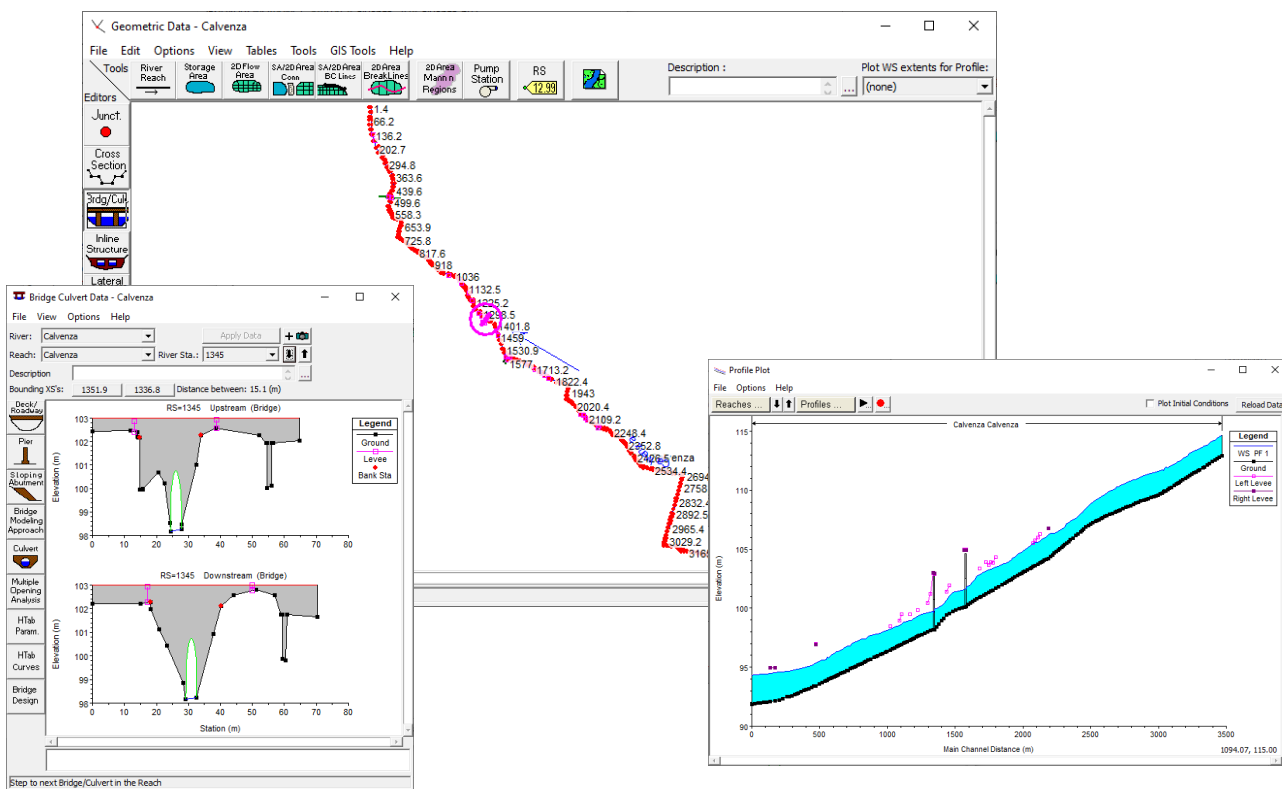


Figura 34: Modello 1D per il Torrente Grue


IDROLOGIA E IDRAULICA
Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	53 di 87


Figura 35: Modello 1D per il Torrente Calvenza

Come anzidetto, le portate al colmo (Tr200) applicate ai modelli 1D sono quelle derivanti dall'applicazione delle LSPP secondo *Gumbel* (rif. IQ0101R09RIID0001001A); nello specifico,

- Torrente Grue: $Q_{200,Gumbel} = 242.40 \text{ mc/s}$
- Torrente Calvenza: $Q_{200,Gumbel} = 33.70 \text{ mc/s}$

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 54 di 87

4.4 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE

4.4.1 Modello numerico 2D

4.4.1.1 Situazione “ante operam”

Dopo le procedure di calibrazione, il modello numerico 2D, così come descritto nel paragrafo 4.3, è stato utilizzato per condurre tre simulazioni per lo scenario *ante operam*, rispettivamente per i tempi di ritorno di 50, 200 e 500 anni, utilizzando gli idrogrammi definiti nel paragrafo 4.2.3, secondo la distribuzione statistica *GEV*, risultata più cautelativa dalle analisi idrologiche condotte.

I risultati ottenuti hanno portato all'identificazione del campo dei tiranti e delle velocità in tutto il dominio di calcolo. Le figure seguenti mostrano le aree potenzialmente inondabili, classificate in termini di tiranti idrici sul piano campagna, associate all'esondazione delle piene con tempo di ritorno pari a 50, 200 e 500 anni, nello scenario “*stato attuale*”.

Le mappa evidenziano come parte dei volumi esondati in destra idraulica dal Torrente Grue vengano incanalati lungo il rilevato della SR10 e raggiungano poi il Torrente Calvenza e impattino, di conseguenza, anche i livelli che si instaurano in corrispondenza delle opere di attraversamento stradale e ferroviaria. Si rimanda agli elaborati specifici per la restituzione grafica dettagliata dei risultati.

In generale, la linea ferroviaria esistente non risulta mai sormontata (i livelli idrici si attestano sempre al di sotto del piano di regolamento); le aree potenzialmente inondabili che si riscontrano localmente in alcuni tratti a valle della linea esistente sono dovute alla presenza di manufatti di trasparenza idraulica lungo il rilevato ferroviario, nonché di sottovia (soggetti ad allagamento), che consentono il deflusso delle acque esondate a monte della linea FS verso le aree di valle.

Più nel dettaglio, la zona industriale di Tortona risulta soggetta ad allagamenti (a seguito di eventi di piena con tempo di ritorno duecentennale); tale evidenza è confermata anche dalla documentazione fotografica relativa alle alluvioni del 2014 e del 2019 nonché dallo studio sviluppato da Anselmo Associati (2016).

E' soggetto ad allagamento anche il sottovia della Tangenziale in uscita da Tortona (già geometricamente compatibile con l'ampliamento dei due binari di futuro quadruplicamento).

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	55 di 87

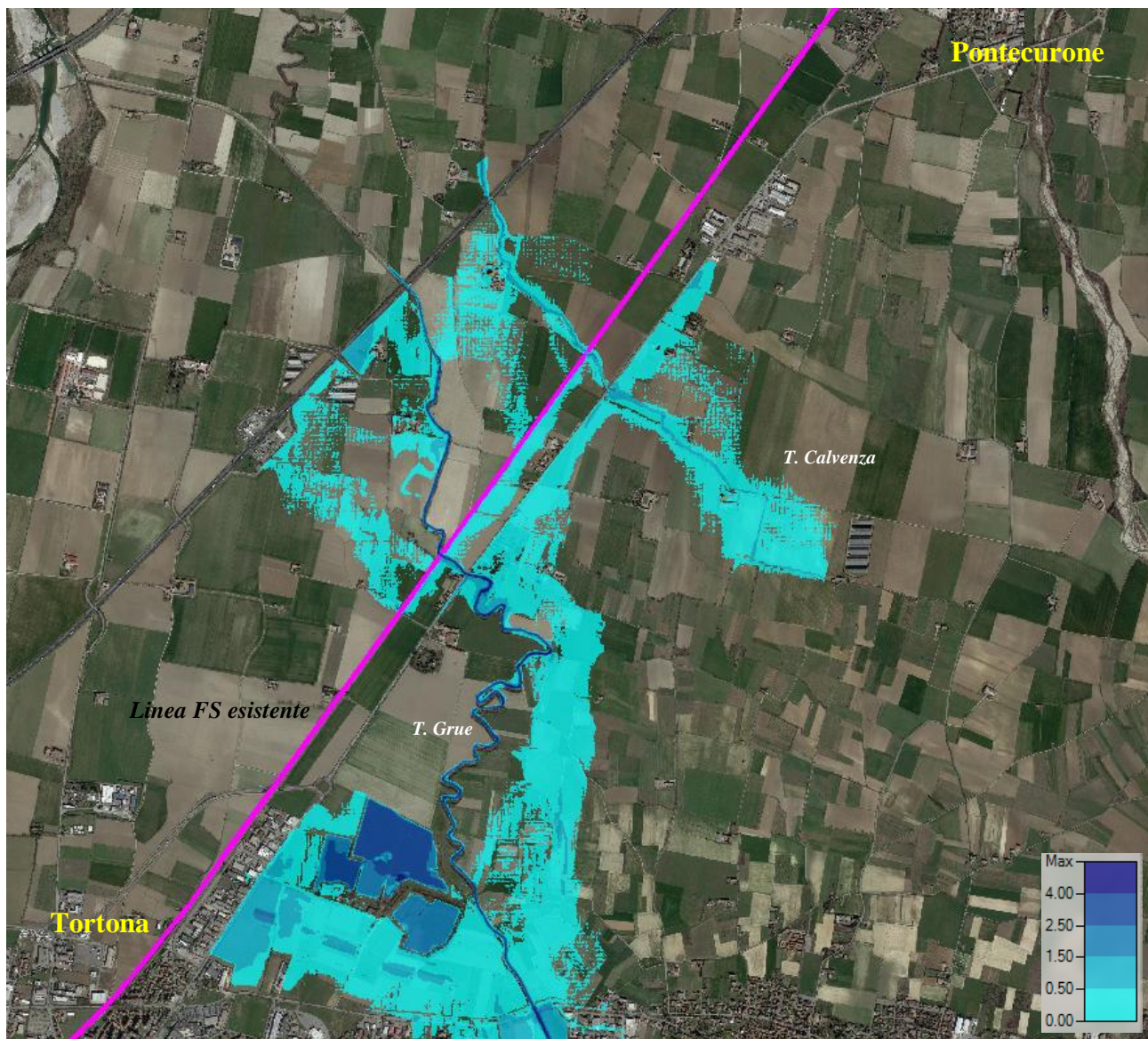


Figura 36: Modello 2D “T. Grue-T. Calvenza”: aree potenzialmente inondabili, Tr = 50 anni, ante operam

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	56 di 87

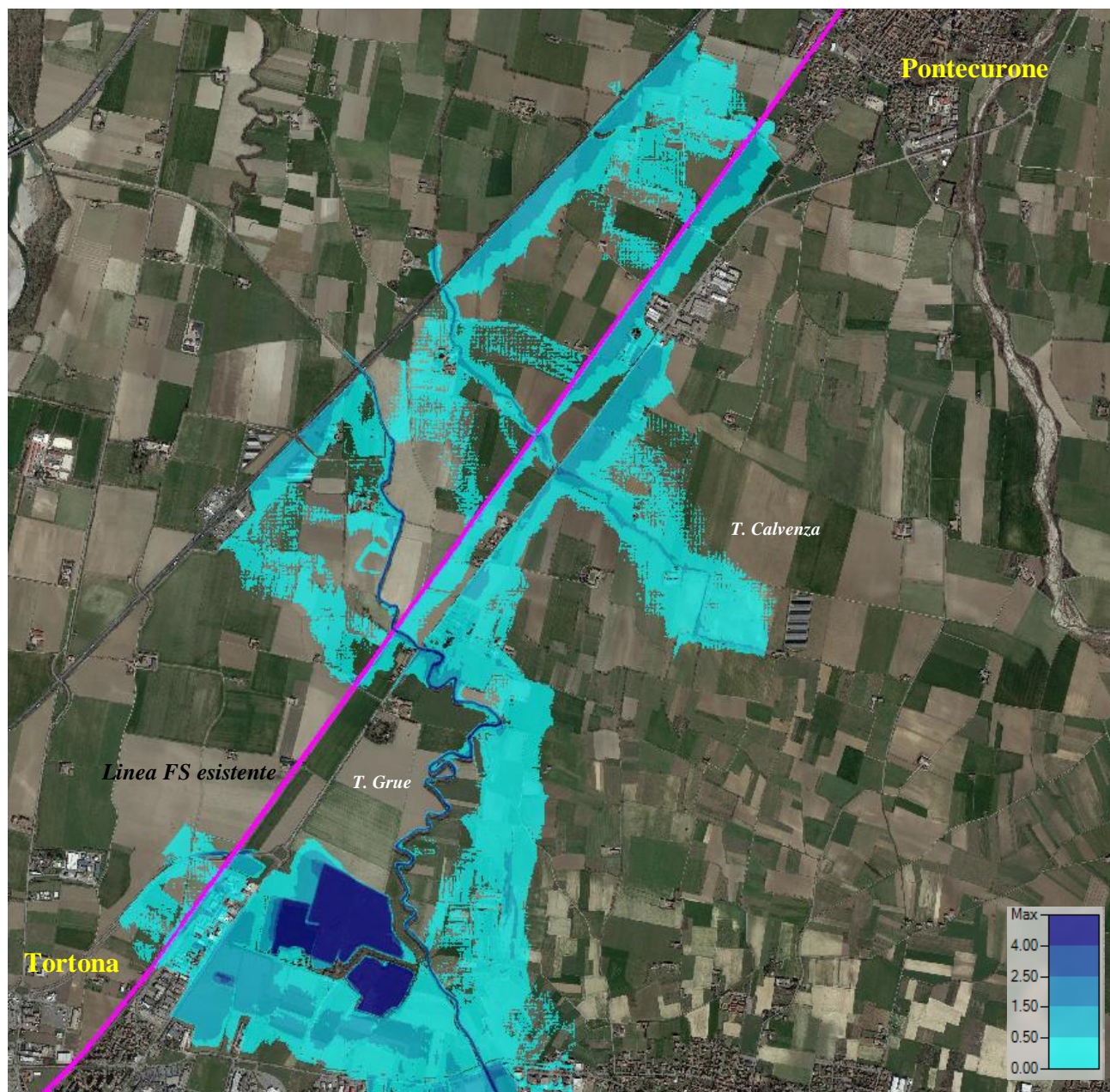


Figura 37: Modello 2D "T. Grue-T. Calvenza": aree potenzialmente inondabili, Tr = 200 anni, ante operam

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	57 di 87

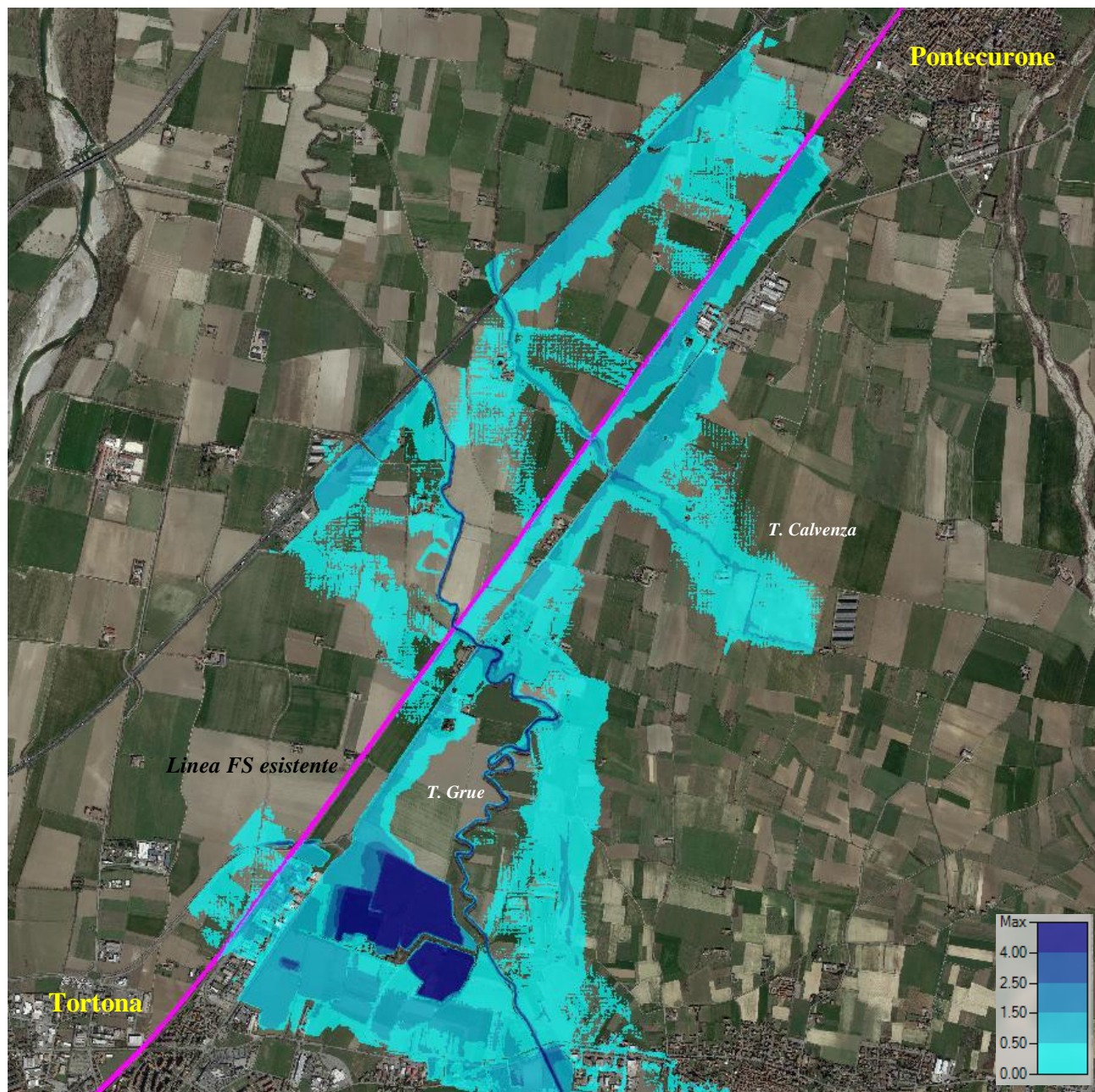



Figura 38: Modello 2D "T. Grue-T. Calvenza": aree potenzialmente inondabili, Tr = 500 anni, ante operam

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

I ponti ferroviari esistenti sul T. Grue e sul T. Calvenza risultano idraulicamente insufficienti (come mostrato nelle figure seguenti) e quindi le acque esondate si propagano nell'area interclusa tra la strada SR10 e la ferrovia.

Le aree allagate a valle della linea FS sono conseguenza della presenza sia dei sottovia viari esistenti soggetti ad allagamento di via Marcanzolo e di via Piccagallo, sia di tombini/manufatti di trasparenza presenti al di sotto del rilevato ferroviario.

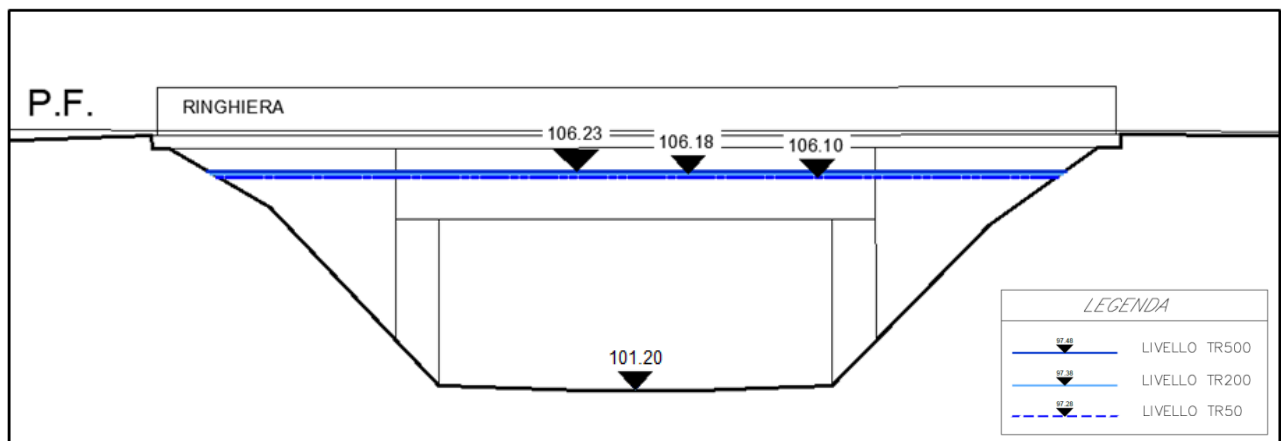


Figura 39: T. Grue – Livelli idrici nella sezione a monte dell'attraversamento ferroviario esistente, scenario ante operam.

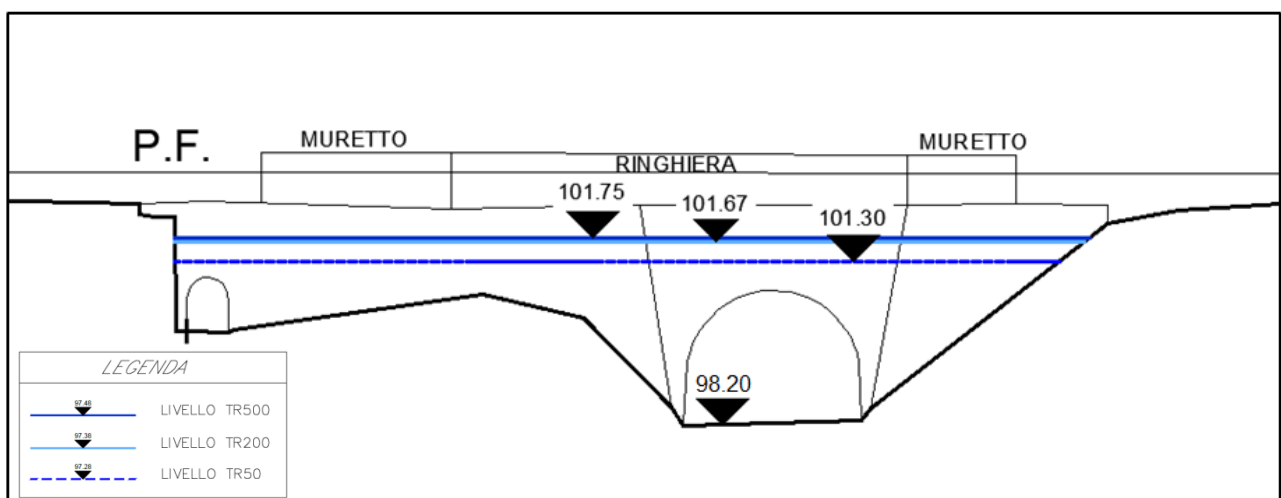



Figura 40: T. Calvenza – Livelli idrici nella sezione a monte dell'attraversamento ferroviario esistente, scenario ante operam.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

4.4.1.2 Situazione “post operam”

Si è proceduto all’implementazione della configurazione “*post operam*”, modificando localmente la geometria del sistema, in modo da riprodurre i rilevati, le opere di attraversamento e le sistemazioni idrauliche previste. In particolare è stato modificato il DTM di base per il modello ante operam inserendo i nuovi rilevati ferroviari e le pile dei viadotti, modificando localmente la mesh per meglio schematizzare la nuova struttura. Come anzidetto, in ragione della conformazione del T. Grue a valle della linea FS esistente, che presenta una brusca curva verso destra proseguendo poi sub-parallelo alla linea FS stessa, si rende necessario un intervento di deviazione del corso d’acqua, per un tratto di circa 440 metri (220 m circa di deviazione e 220 m circa di riprofilatura/ricalibratura dell’alveo esistente), ai fini della realizzazione della “*nuova*” infrastruttura.

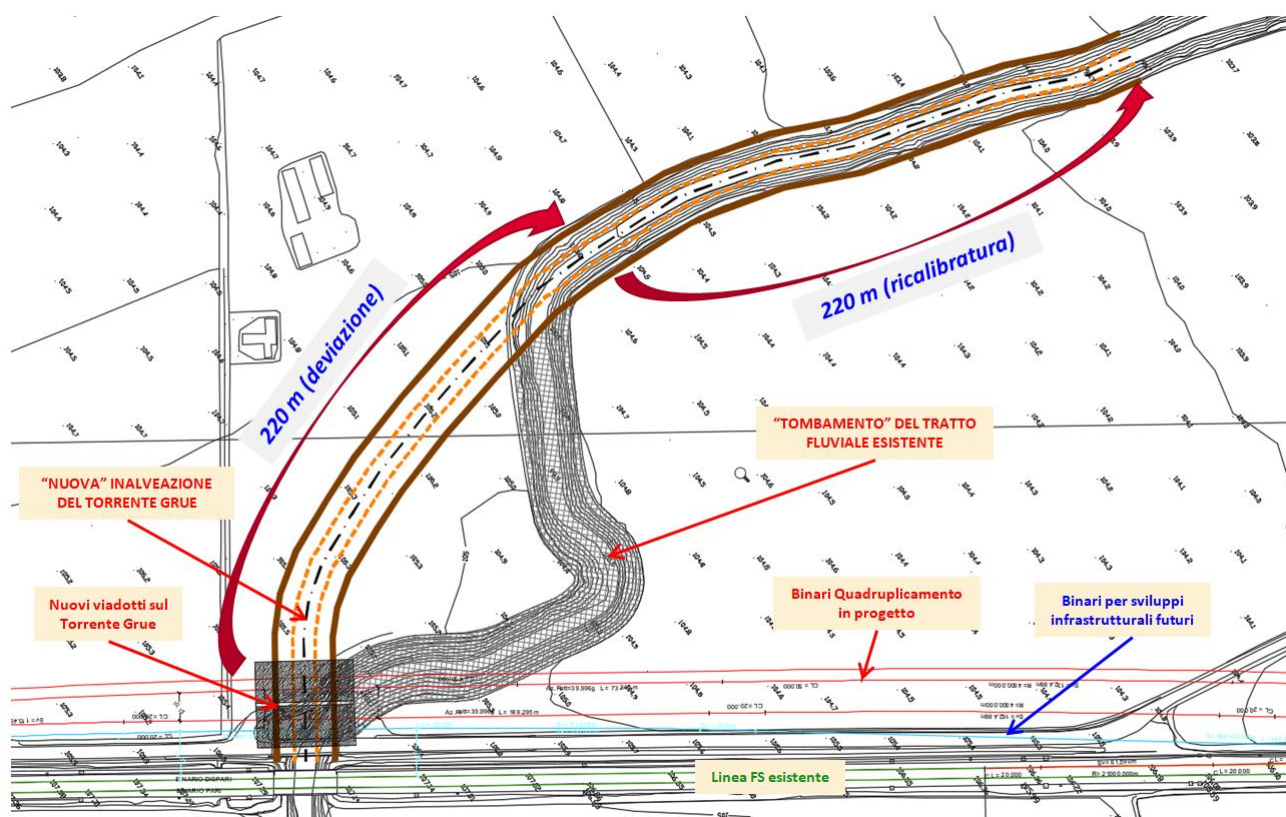



Figura 41: T. Grue – Opera di deviazione prevista.

La sezione tipo adottata per la nuova inalveazione del T. Grue è riportata nella figura seguente. Sono ripristinate le attuali arginature presenti lungo il corso d’acqua, tra l’altro classificate come opere

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

idrauliche di difesa ai sensi del R.D. n. 523/1904 e riportate nel corrispondente catasto della Regione Piemonte (rif. *database BDTRE regionale*).

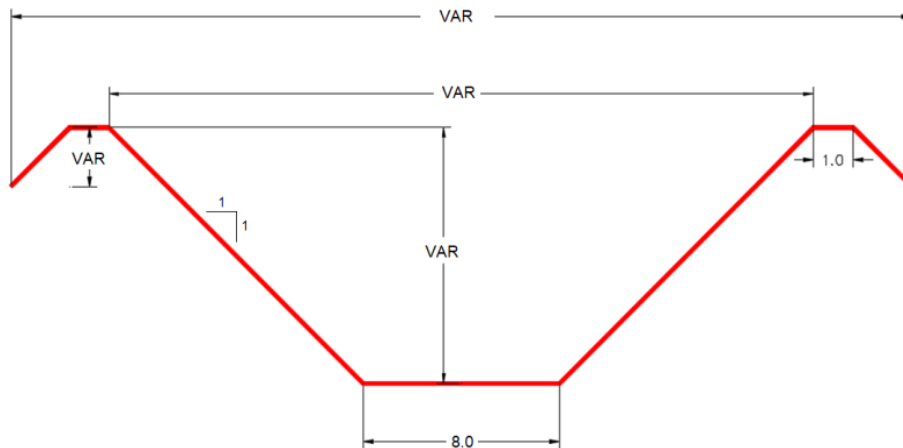


Figura 42 – Torrente Grue: sezione tipo nella tratto di deviazione in progetto.

Tale sezione è stata definita in relazione alle attuali dimensioni del T. Grue nel tratto oggetto di deviazione, dedotte dai rilievi eseguiti in alveo, nonché ai risultati delle simulazioni numeriche condotte secondo modello monodimensionale (1D) in regime di moto permanente, descritte in seguito.

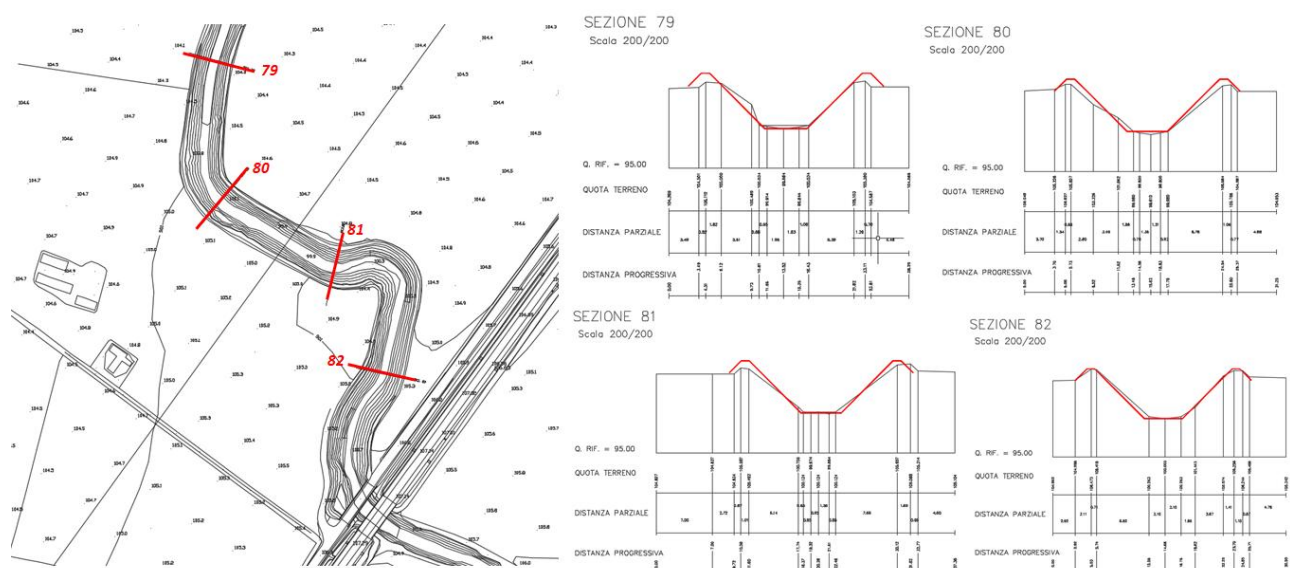



Figura 43 – Torrente Grue: sezioni rilevate nel tratto oggetto di deviazione.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 61 di 87

Inoltre, su indicazione di *Regione Piemonte* (in ottemperanza delle direttive emesse dall’Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po), l’altezza delle arginature (su piano campagna) è stata definita in modo tale da rispettare 1 metro di franco idraulico minimo tra livello idrico Tr200 (da modello 1D) e sommità arginale, e (in corrispondenza delle opere di attraversamento) tra sommità arginale e quota minima di intradosso.

Nelle figure seguenti, il particolare della geometria del modello numerico 2D “*post operam*” in corrispondenza del Torrente Grue. Le opere di attraversamento (VI06, VI07) in progetto (in ragione di una quota di intradosso ben superiore ai livelli idrici di riferimento e di assenza di interferenza con i deflussi) non sono state “fisicamente” implementate.

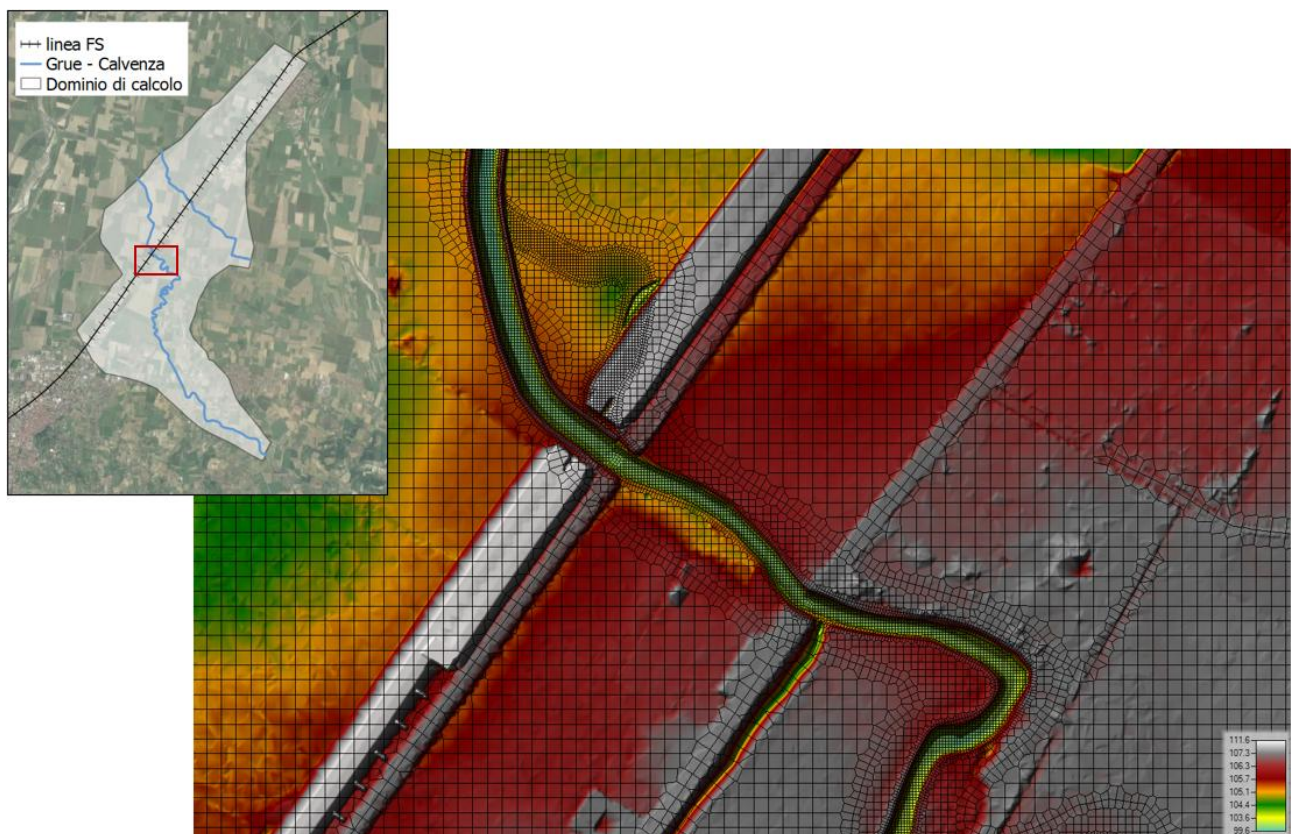


Figura 44: Particolare della mesh “post operam” in prossimità dell’attraversamento ferroviario del Torrente Grue

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

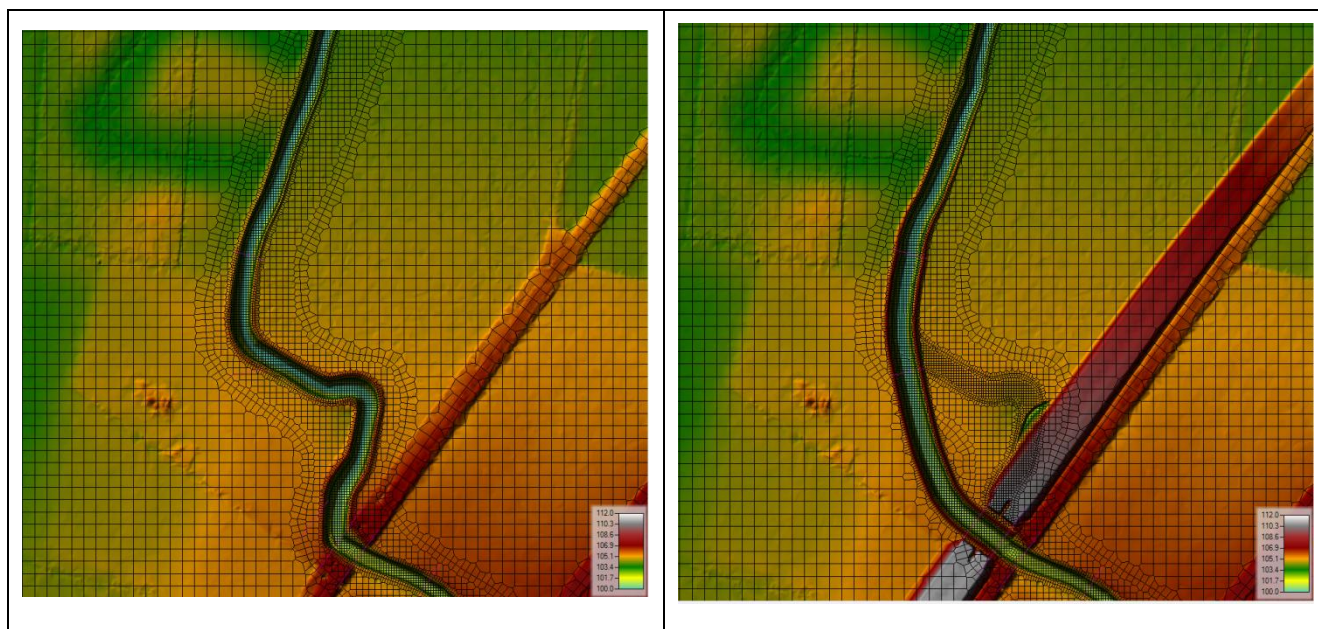


Figura 45: T. Grue - DTM e mesh in corrispondenza dell'attraversamento ferroviario e della deviazione in progetto, nelle situazioni ante operam (a sinistra) e post operam (a destra)

Le figure seguenti mostrano le aree potenzialmente inondabili, classificate in termini di tiranti idrici sul piano campagna, associate all'esonazione delle piene con tempo di ritorno pari a 50, 200 e 500 anni, nello scenario “*di progetto*”.

Si riporta anche il particolare delle aree potenzialmente inondabili (Tr200) in corrispondenza dei nuovi attraversamenti sul T. Grue e sul T. Calvenza.

Si rimanda agli elaborati specifici per la restituzione grafica dettagliata dei risultati.

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	63 di 87

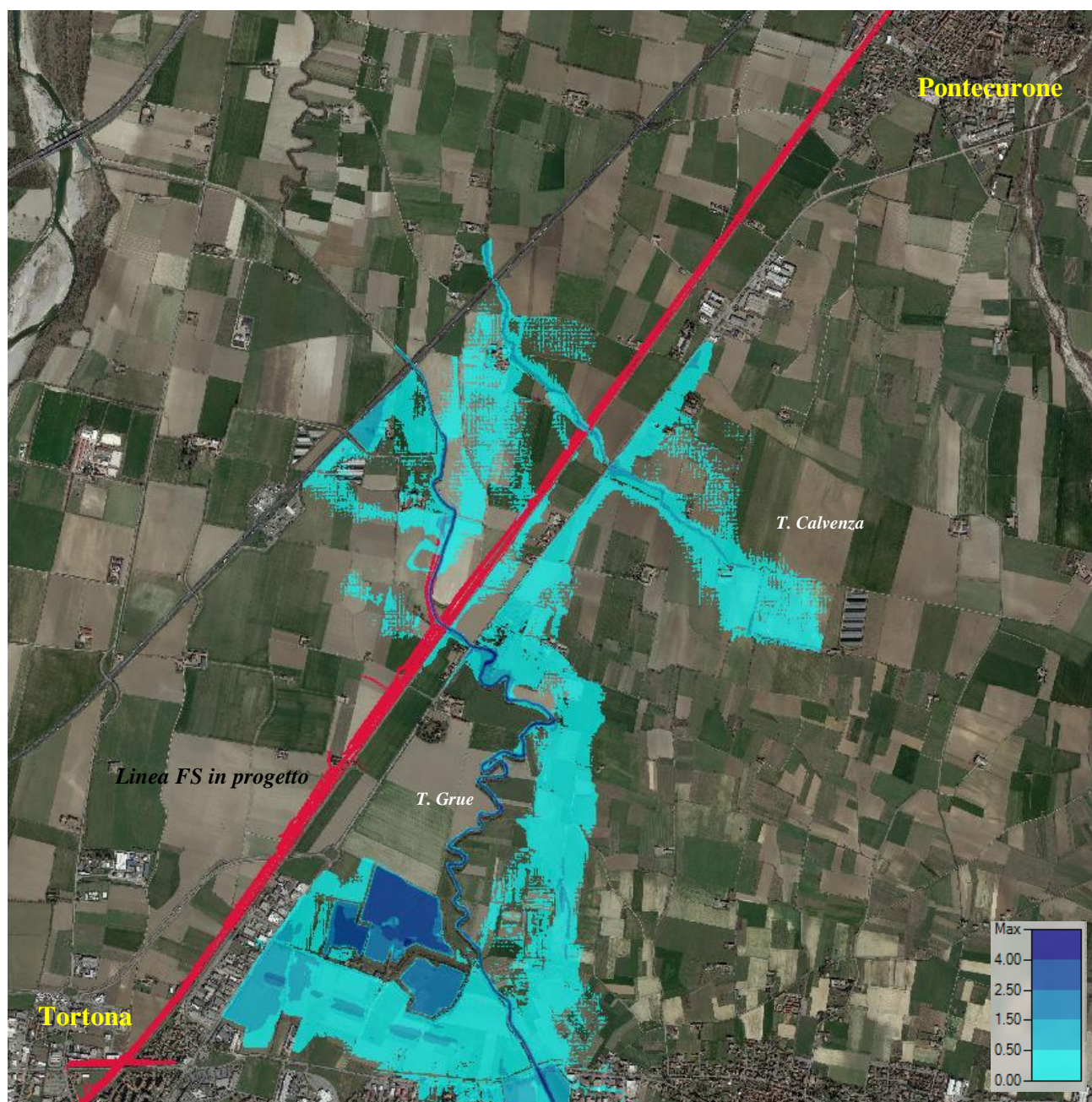


Figura 46: Modello 2D "T. Grue-T. Calvenza": aree potenzialmente inondabili, Tr = 50 anni, post operam

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	64 di 87

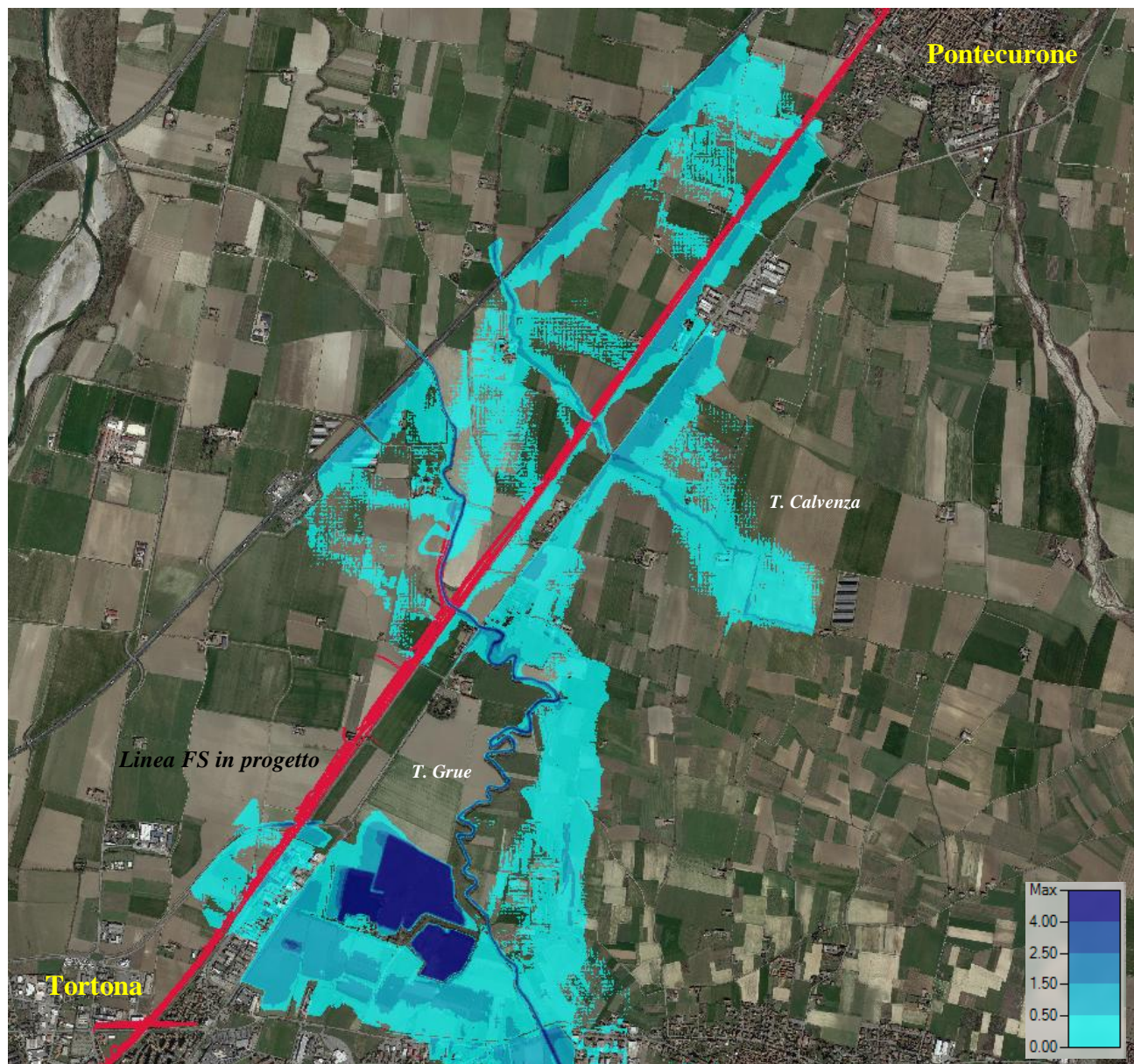


Figura 47: Modello 2D "T. Grue-T. Calvenza": aree potenzialmente inondabili, Tr = 200 anni, post operam

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	65 di 87

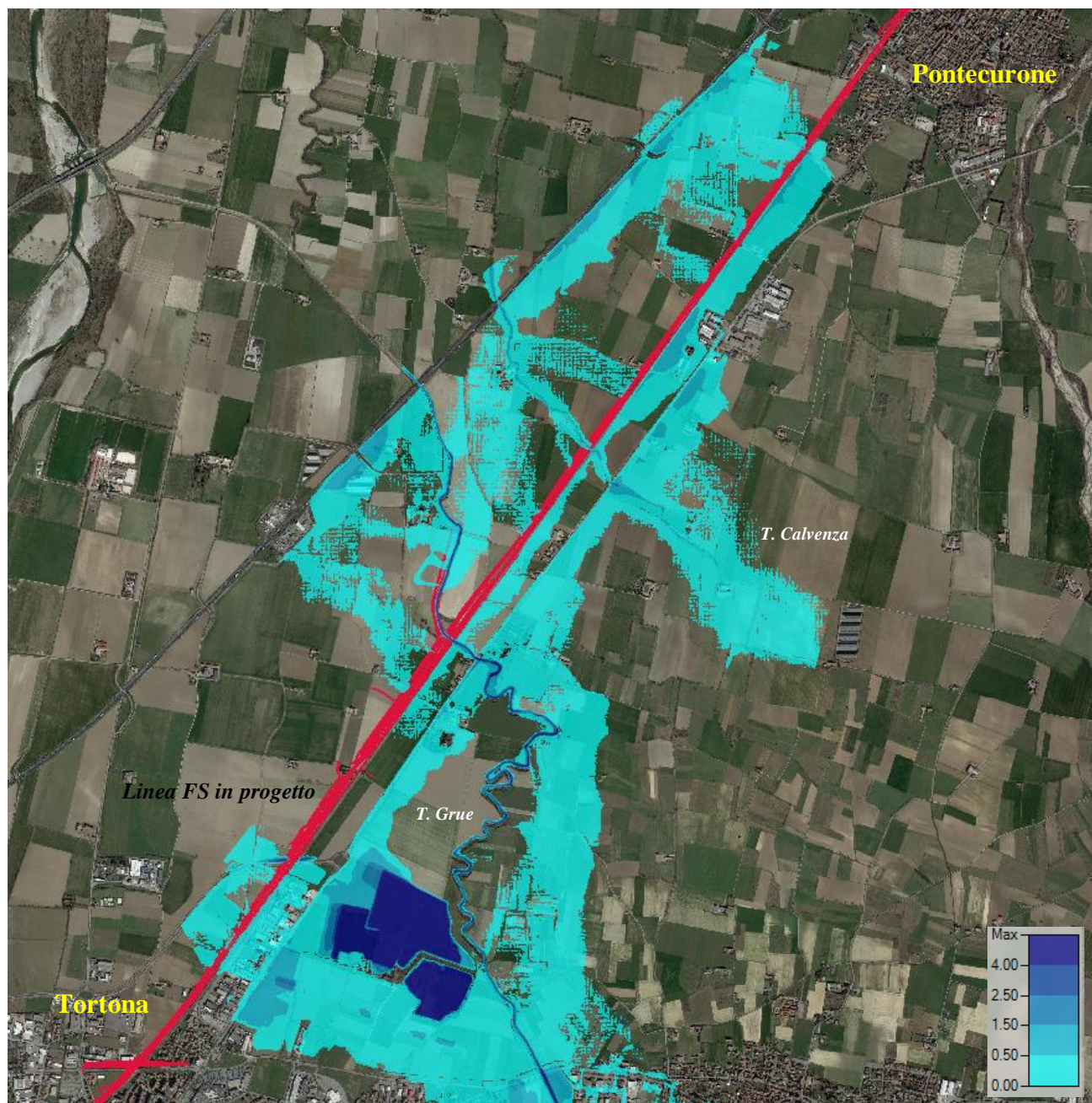



Figura 48: Modello 2D "T. Grue-T. Calvenza": aree potenzialmente inondabili, Tr = 500 anni, post operam

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

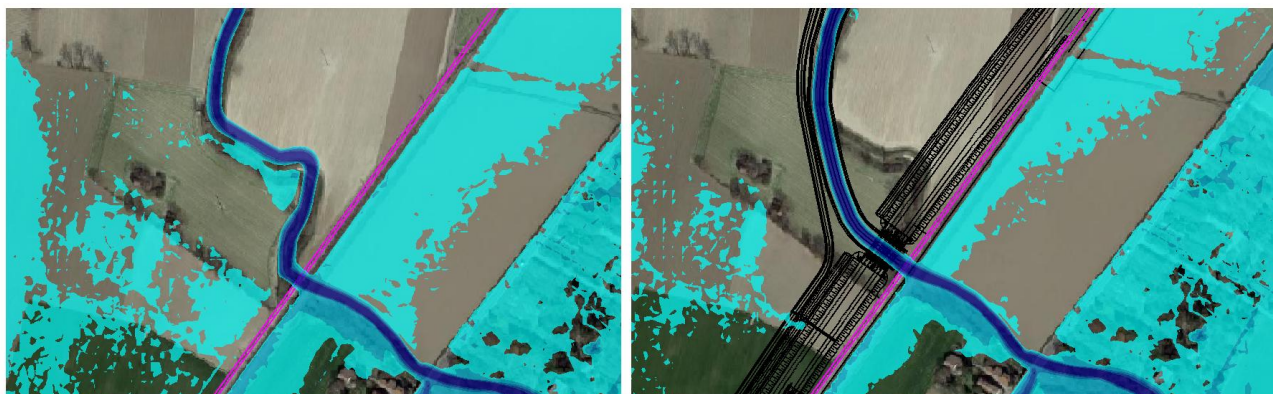


Figura 49: Modello 2D “T. Grue-T. Calvenza”: aree potenzialmente inondabili, Tr = 200 anni, in corrispondenza dell’attraversamento del Torrente Grue, nelle situazioni ante operam (a sinistra) e post operam (a destra)

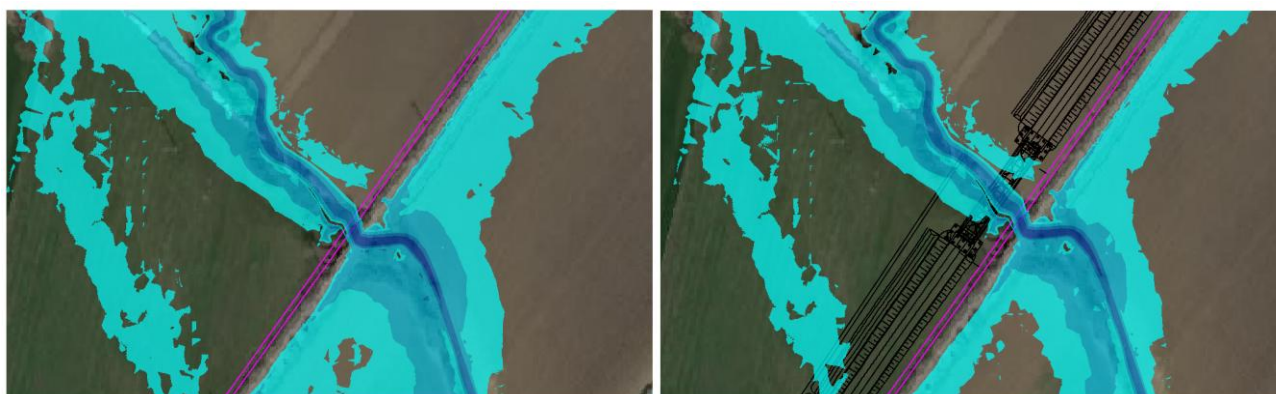



Figura 50: Modello 2D “T. Grue-T. Calvenza”: aree potenzialmente inondabili, Tr = 200 anni, in corrispondenza dell’attraversamento del Torrente Calvenza, nelle situazioni ante operam (a sinistra) e post operam (a destra)

Le opere di attraversamento in progetto sul T. Grue e T. Calvenza non interferiscono con i deflussi e non alterano le condizioni di pericolosità idraulica già esistenti.

Nella tabella seguente, si riportano i livelli idrici (da modello 2D) in corrispondenza delle nuove opere di attraversamento sul T. Grue (VI06) e sul T. Calvenza (VI07).

Tabella 2: Livelli massimi a monte dell’attraversamento ferroviario per tempo di ritorno

Tr (anni)	Livelli idrici (m s.l.m.)	
	T. Grue	T. Calvenza
50	105.33	100.25
200	105.40	100.30
500	105.44	100.34

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 67 di 87

In ragione dell'imminente realizzazione degli interventi previsti nell'ambito degli studi condotti da Anselmo Associati (2016), nello specifico le opere di protezione/difesa denominate "4a" e "3" precedentemente descritte, si è proceduto allo sviluppo di una simulazione, nella configurazione "post operam", della propagazione delle piene TR200 dei torrenti Grue e Calvenza, che consideri l'avvenuta costruzione di tali interventi, opportunamente implementati nel modello numerico 2D.

E' stato inserito quindi nel modello 2D un muro di protezione lungo la roggia Cadè per impedire l'esondazione delle piene del T. Grue lungo la SR 10 (a difesa dell'area industriale di Tortona), e i manufatti di protezione nella zona golenale destra del Torrente Grue a monte dell'attraversamento della SR 10 a difesa di alcune cascate dell'abitato Valle (frazione di Viguzzolo).

Nella figura seguente si riportano le corrispondenti aree potenzialmente inondabili.

Gli interventi denominati "4a" e "3" non influenzano i livelli in corrispondenza dei nuovi attraversamenti ferroviari.

L'intervento "4a" consente di evitare che le acque esondate del Torrente Grue, una volta sormontata la SR10, raggiungano anche la ferrovia interessando i relativi rilevati, come accade già allo stato attuale (ma senza sormonto del piano ferro).

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	68 di 87

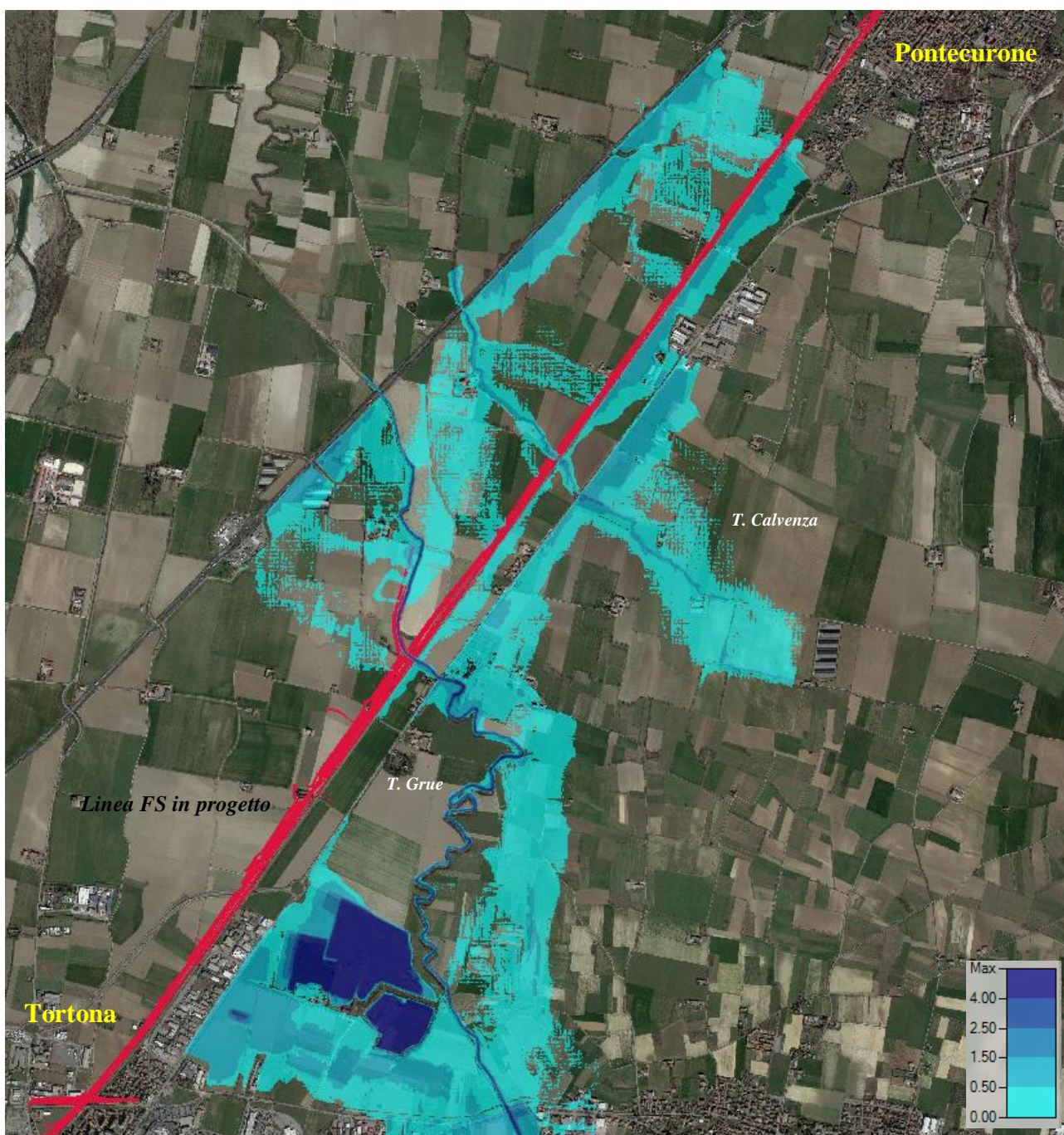



Figura 51: Modello 2D "T. Grue-T. Calvenza": aree potenzialmente inondabili, $Tr = 200$ anni, post operam con interventi di protezione idraulica (rif. Studio Anselmo Associati, 2016)

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 69 di 87

4.4.2 Modello numerico 1D

Come anticipato, in ragione delle indicazioni pervenute dalla Regione Piemonte (di cui alla nota allegata alla presente relazione) e in ottemperanza delle norme nazionali in materia di difesa del suolo (e.g. DPCM 29.09.1998 e s.m.i.), secondo le quali nelle aree a pericolosità idraulica sono consentiti gli interventi di manutenzione, ampliamento o ristrutturazione delle infrastrutture pubbliche “a condizione che essi non aumentino il livello di rischio comportando significativo ostacolo al deflusso o riduzione apprezzabile della capacità di invaso delle aree stesse e non precludano la possibilità di eliminare le cause che determinano le condizioni di rischio”, è stata verificata la compatibilità idraulica delle opere di attraversamento in progetto, ai sensi delle NTC2018 (e relativa circolare applicativa n.7/2019) e del Manuale di Progettazione Ferroviaria RFI, con riferimento ai risultati di modellazioni monodimensionali (1D) in regime di moto permanente per la cosiddetta “portata idrologica” (i.e. ad esondazioni impedito), situazione manifestabile a seguito di possibili interventi di difesa arginale (in particolare, a monte dei tratti di intervento), già in parte in corso di realizzazione sull’asta fluviale del T. Grue.

E’ tuttavia un’ipotesi molto cautelativa in quanto si dovrebbero modificare/adequare tutte le opere di attraversamento esistenti lungo il tratto fluviale di interesse o si potrebbero invece adottare soluzioni di mitigazione del rischio differenti che prevedono la laminazione del colmo di piena (e anche su questa tipologia di opere si stanno ultimamente indirizzando alcuni finanziamenti).

Premesso ciò, di seguito si riportano i criteri di verifica e dimensionamento adottati per le opere di attraversamento dei corsi d’acqua principali, nel caso specifico viadotto VI06 sul T. Grue e viadotto VI07 sul T. Calvenza, con riferimento allo scenario ipotetico futuro più cautelativo:

- **Portata di progetto** → “portata idrologica” (da curve di possibilità pluviometrica secondo Gumbel da ARPA Piemonte, al fine di non tenere conto delle esondazioni che attualmente si verificano lungo le aste fluviali dei corsi d’acqua oggetto di studio e dei loro effetti di laminazione del colmo di piena - per simulare tale scenario nel modello numerico 1D sono stati cautelativamente eliminati a monte della linea ferroviaria gli attraversamenti idraulicamente insufficienti, che influenzano fortemente il profilo di rigurgito, e aggiunti degli elementi “levee” in tutte le sezioni di calcolo)

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

- **Franco idraulico minimo (1.5 m, NTC2018)** rispetto al livello idrico Tr200 associato alla *portata idrologica* per i manufatti di attraversamento in progetto
- **Franco idraulico minimo (1 m, P.A.I. e direttiva AdB Po)** tra livello idrico Tr200 associato alla *portata idrologica* e sommità delle arginature previste (i.e. sul T. Grue), nonché tra sommità arginale e quota intradosso delle opere di attraversamento

In tale scenario ipotetico, si è fatto riferimento direttamente alla configurazione “post operam”, eccetto per il T. Grue interessato dall’intervento di deviazione, per il quale è stata analizzata anche la configurazione “ante operam” necessaria (sulla base del confronto tra livelli idrici e profili di rigurito) alla definizione dell’estensione dell’intervento di deviazione e sistemazione. Nello specifico, il tratto di “*ricalibratura/riprofilatura*” (220 m circa) successivo al tratto di deviazione (220 m circa) si è reso necessario al fine di limitare/evitare l’aumento dei livelli idrici, connesso alla *rettilineizzazione* dell’alveo, a valle dell’intervento stesso. In corrispondenza delle opere di sistemazione idraulica (con rivestimenti), sono stati adottati i valori di scabrezza di Manning pari a $0.03 \text{ s/m}^{1/3}$, per il T. Grue, e $0.05 \text{ s/m}^{1/3}$, per il T. Calvenza. Di seguito, i risultati ottenuti.

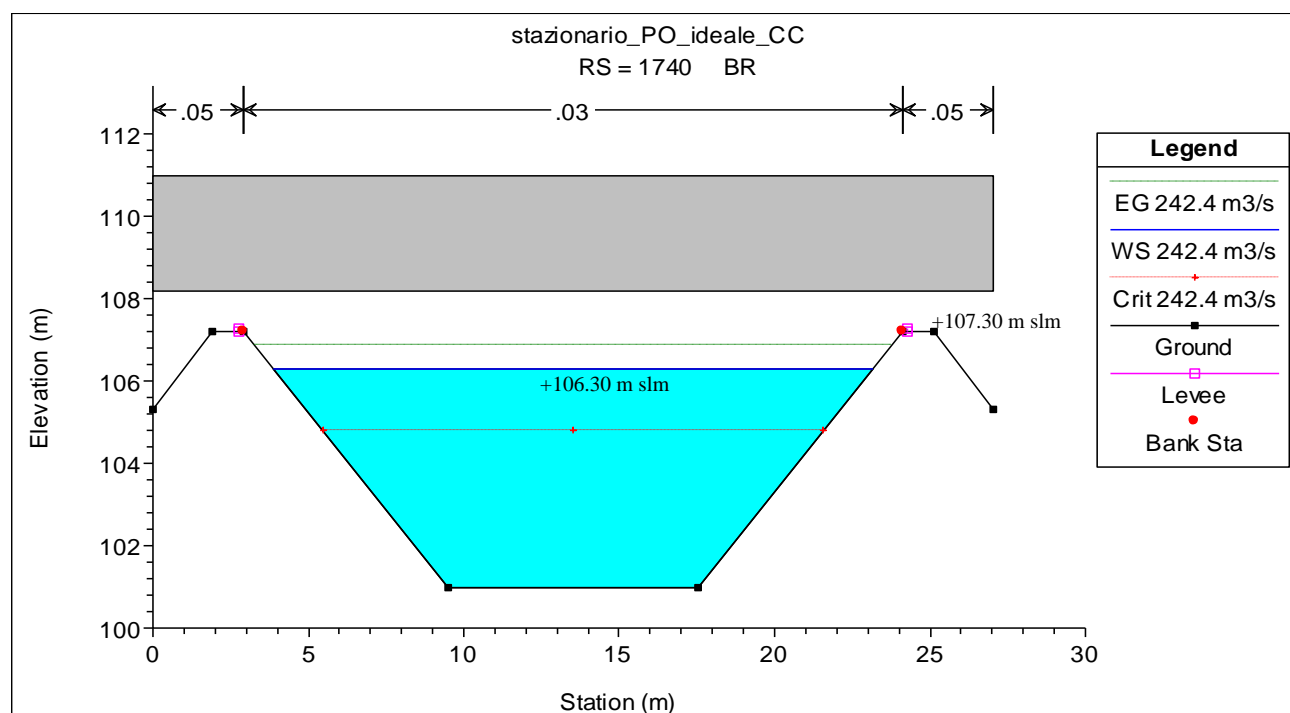


Figura 52: Modello 1D “T. Grue”: livelli idrici (portata idrologica TR200) in corrispondenza del viadotto VI06, post operam.

IDROLOGIA E IDRAULICA

 Relazione idraulica - Studio idraulico
 bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	71 di 87

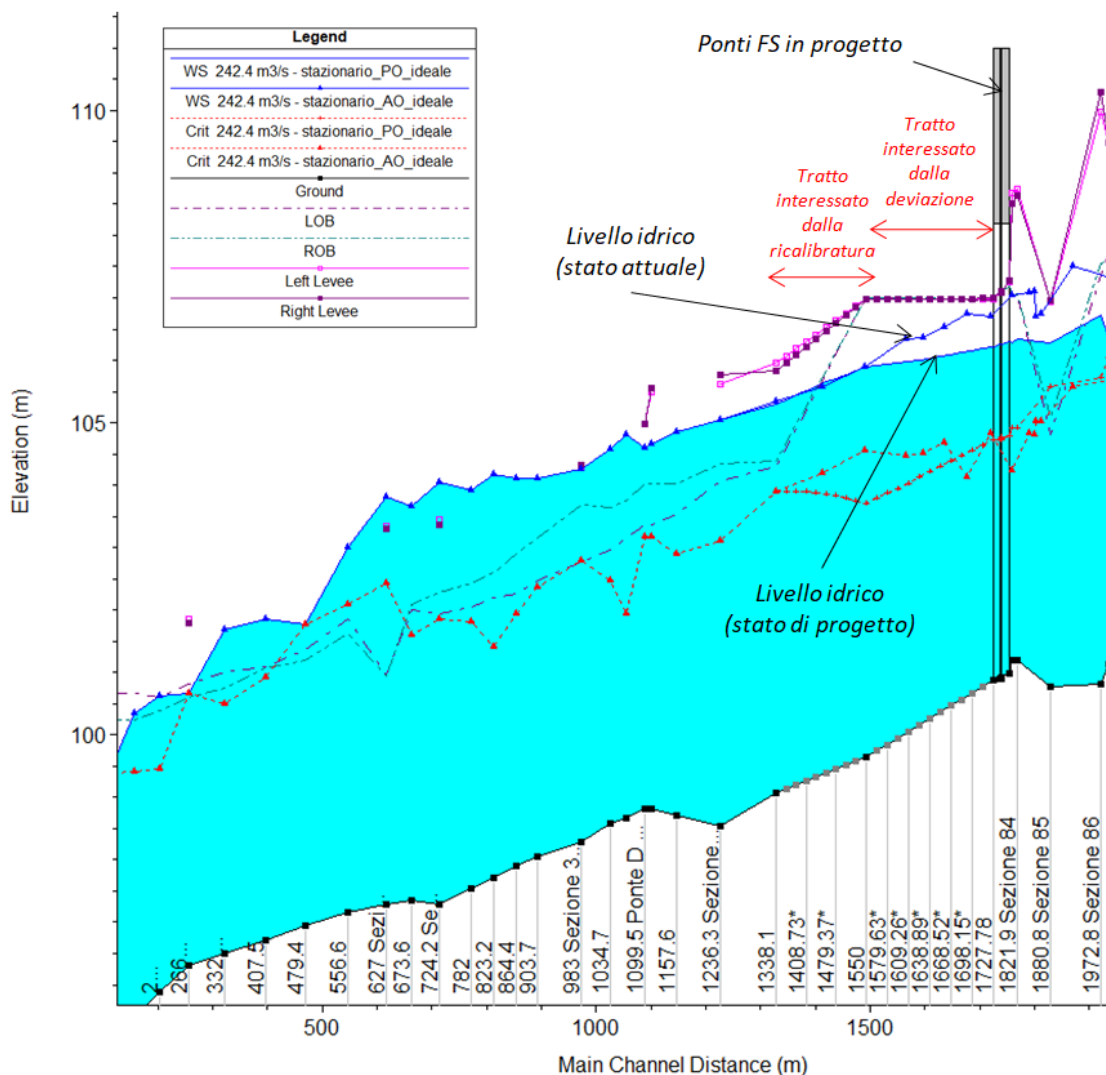



Figura 53: Modello 1D "T. Grue": profili di rigurgito (portata idrologica TR200) in corrispondenza del viadotto VI06, ante e post operam.

Relativamente al T. Grue, il livello idrico di riferimento (per la portata idrologica Tr200) in corrispondenza del nuovo VI06, nella situazione post operam, si attesta a +106.30 m slm.

Le opere di *deviazione* e *ricalibratura* proposte non alterano il profilo di rigurgito a valle del tratto di intervento, come mostrato dal confronto tra i profili di rigurgito nelle situazioni *ante operam* e *post operam*. La pendenza media del nuovo tratto si attesta al 5÷6‰ e le velocità raggiungono valori di 2.8÷3.5 m/s, del tutto paragonabili a quelli che si attuano già nello stato attuale. Le "nuove" arginature previste (che ripristinano quelle esistenti) hanno sommità a quota +107.30 m slm, con almeno un metro di franco rispetto alla quota minima di impalcato (+108.40 m slm).

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

Con riferimento invece al T. Calvenza, il livello idrico di riferimento (per la portata idrologica Tr200) in corrispondenza del nuovo VI07, nella situazione post operam, si attesta a +101.00 m slm.

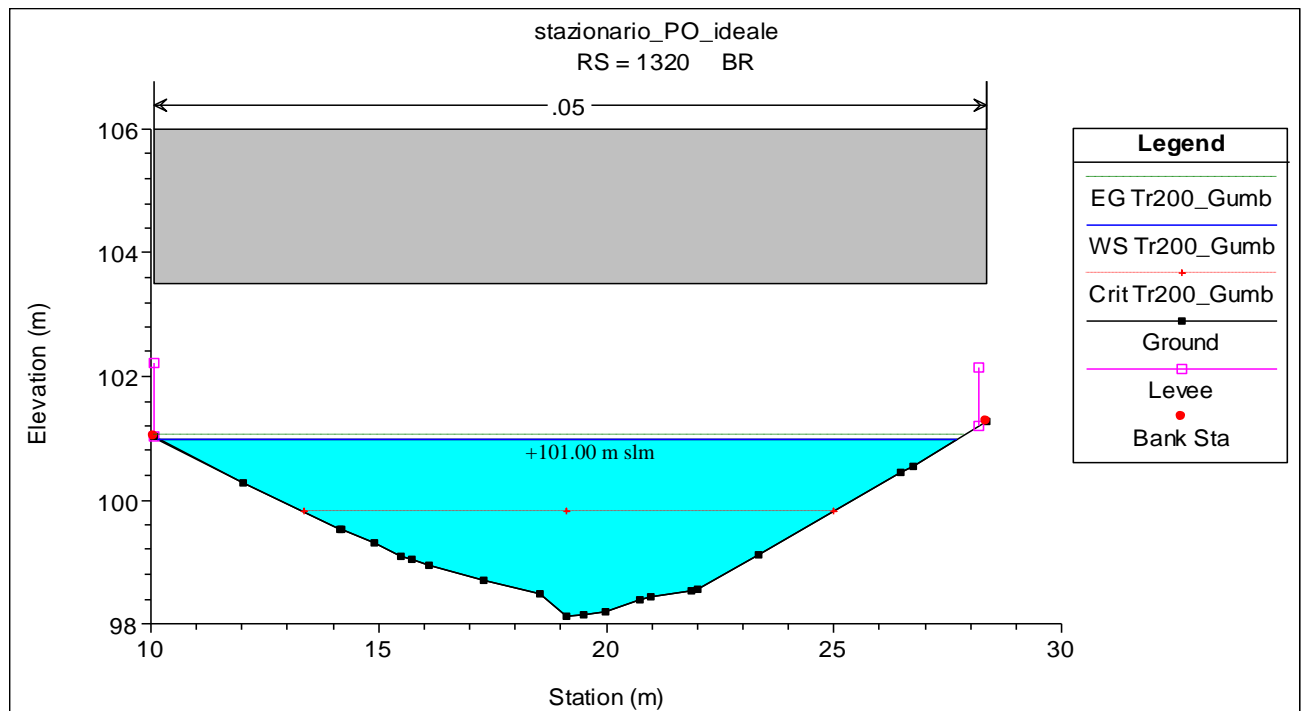



Figura 54: Modello 1D "T. Calvenza": livelli idrici (portata idrologica TR200) in corrispondenza del viadotto VI07, post operam.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

5 VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO DI PROGETTO

Nelle tabelle seguenti è riportata la verifica del franco idraulico di progetto dei nuovi viadotti VI06 (T. Grue) e VI07 (T. Calvenza), eseguita secondo le normative vigenti (i.e. NTC2018 e M.d.P. RFI 2020), con riferimento ai criteri sopra definiti.

Per completezza, oltre alla verifica rispetto al livello idrico associato alla portata idrologica Tr200 derivante da modellazioni 1D, si riporta anche quella rispetto al livello idrico Tr200 derivante da modellazioni 2D, influenzato quindi dagli effetti di laminazione delle esondazioni che si verificano nei tratti fluviali a monte, rappresentante le condizioni di deflusso esistenti che caratterizzano la configurazione attuale del territorio.


Tabella 3 – Viadotto VI06 (Torrente Grue): verifica del franco idraulico di progetto.

Tipologia di modellazione numerica	Quota minima impalcato [m slm]	Livello di piena Tr200 [m slm]	Carico totale Tr200 [m slm]	Franco sul livello Idrico Tr200 [m]	Franco sul carico totale Tr200 [m]	Verifica
1D	+108.40	+106.30	+106.90	+2.10 (> 1.50 m)	+1.50 (> 0.50 m)	OK
2D		+105.40	+106.00	+3.00 (> 1.50 m)	+2.40 (> 0.50 m)	OK

Tabella 4 – Viadotto VI07 (Torrente Calvenza): verifica del franco idraulico di progetto.

Tipologia di modellazione numerica	Quota minima impalcato [m slm]	Livello di piena Tr200 [m slm]	Carico totale Tr200 [m slm]	Franco sul livello Idrico Tr200 [m]	Franco sul carico totale Tr200 [m]	Verifica
1D	+103.40	101.00	101.10	+2.40 (> 1.50 m)	+2.30 (> 0.50 m)	OK
2D		100.30	100.40	+3.10 (> 1.50 m)	+3.00 (> 0.50 m)	OK

Inoltre, è rispettata la prescrizione di distanza minima di 6-7 m tra quota di intradosso e fondo alveo così come indicato nella circolare n.7/2019 delle NTC2018, da garantire nel caso "si possa verificare nella sezione oggetto dell'attraversamento il transito di tronchi di rilevanti dimensioni.....". Nello specifico, per il VI06 sul T. Grue, fondo alveo: +100.98 m slm, quota intradosso: +108.40 m slm, da cui una distanza "fondo alveo – sottotrave" di +7.42 m.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

6 OPERE DI SISTEMAZIONE IDRAULICA

Si è proceduto al dimensionamento delle opere di sistemazione/protezione idraulica atte a mantenere o ripristinare la sezione d'alveo in una configurazione (attuale o di progetto) inalterata e quindi proteggerla da possibili fenomeni di erosione, dopo i rimaneggiamenti dovuti alle fasi di realizzazione dei nuovi viadotti VI06 e VI07 e a contribuire alla stabilità dell'alveo inciso in corrispondenza delle opere di attraversamento in progetto.

In dipendenza della conformazione dell'alveo inciso, nonché dei parametri idraulici di riferimento (tirante e velocità, corrispondenti alla piena di progetto *Tr200*) per il relativo dimensionamento, si prevedono le seguenti tipologie di opere di sistemazione:

- *Torrente Grue (viadotto VI06)* – rivestimento flessibile con elementi in conglomerato cementizio a connessione multipla delle sponde e con massi sciolti del fondo alveo nel tratto oggetto di deviazione e ricalibratura
- *Torrente Calvenza (viadotto VI07)* – massi sciolti e/o intasati con malta

6.1 TORRENTE GRUE

Come precedentemente descritto, in ragione della conformazione del T. Grue a valle della linea FS esistente, che presenta una brusca curva verso destra proseguendo poi sub-parallelo alla linea FS stessa, si rende necessario un intervento di deviazione del corso d'acqua, per un tratto di circa 440 metri (220 m circa di deviazione e 220 m circa di riprofilatura/ricalibratura dell'alveo esistente), ai fini della realizzazione della “nuova” infrastruttura. Lungo tutto il tratto fluviale oggetto di intervento si prevede, a seguito della deviazione e della ricalibratura dell'alveo, si prevede la posa in opera di un *rivestimento flessibile, con elementi in conglomerato cementizio a connessione multipla* (rif. IQ0101R09PZID0002001A, IQ0101R09BZID0002001A), delle sponde e di un rivestimento in massi sciolti del fondo alveo.

La scelta per le sponde di utilizzare un *rivestimento flessibile, con elementi in conglomerato cementizio a connessione multipla* discende dai vantaggi offerti da tale tipologia di rivestimento quali porosità, flessibilità, possibilità di crescita della vegetazione bassa, facilità di installazione, inerodibilità, peso uniforme ed elevato, alta resistenza meccanica, che ne consentono l'utilizzo/impiego anche in presenza di elevati valori di pendenza e velocità della corrente.

IDROLOGIA E IDRAULICA
Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	75 di 87

Per il dimensionamento di tali rivestimenti, si può fare riferimento alla metodologia riportata nel manuale della FHWA “*Hydraulic Stability of Articulated Concrete Block Revetment Systems During Overtopping Flow*” (2012). Nello specifico, tale metodologia consiste nel valutare, con riferimento al singolo elemento che costituisce il rivestimento, il fattore di sicurezza (SF) nei confronti del ribaltamento/scorrimento, in dipendenza delle condizioni idrauliche al contorno (e.g. velocità della corrente) nonché delle relative caratteristiche di peso ed *interlocking* con gli elementi adiacenti, delle dimensioni e delle modalità di installazione.

Tale fattore di sicurezza, definito come il rapporto tra i momenti stabilizzanti e i momenti ribaltanti, può valutarsi mediante la seguente espressione:

$$SF = \frac{\ell_2 W_s a_\theta}{\ell_1 W_s \sqrt{1 - a_\theta^2} \cos \beta + \ell_3 F_D \cos \delta + \ell_4 F_L + \ell_3 F'_D \cos \delta + \ell_4 F'_L}$$

La definizione dei parametri da considerare per la valutazione del fattore SF è riportata nelle figure seguenti. Si raccomanda un fattore di sicurezza (SF) almeno pari a **1.10÷1.20**.

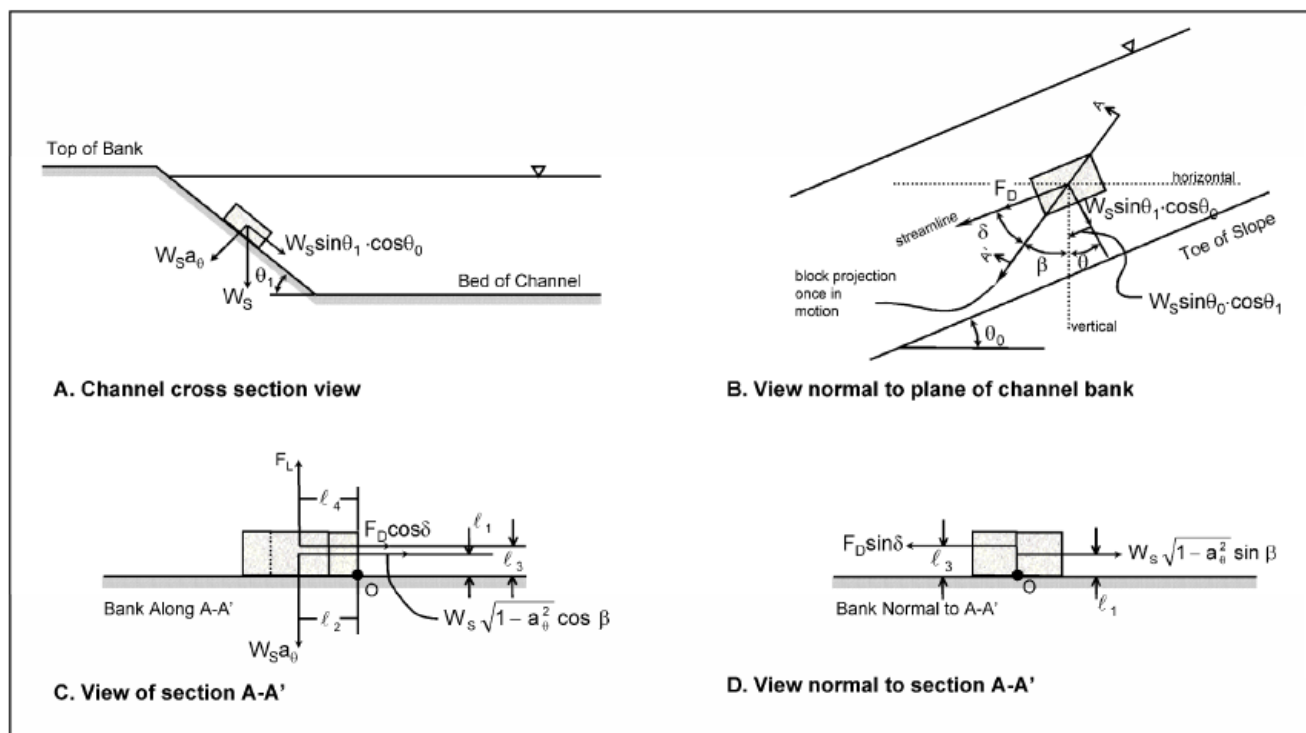


Figura 55 – Dimensionamento di rivestimenti flessibili: schema di riferimento.

IDROLOGIA E IDRAULICA

 Relazione idraulica - Studio idraulico
 bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	76 di 87

$SF = \frac{(\ell_2 / \ell_1) a_\theta}{\sqrt{1 - a_\theta^2} \cos \beta + \eta_1 (\ell_2 / \ell_1) + \frac{(\ell_3 F'_D \cos \delta + \ell_4 F'_L)}{\ell_1 W_S}}$	a_θ = Projection of W_S into subgrade beneath block b = Block width, ft F'_D & F'_L = additional drag and lift forces, lb P_x = Block moment arms, ft S_C = Specific gravity of concrete (assume 2.1) SF = Calculated factor of safety V_{des} = Design velocity, ft/s (V_{des} less than or equal to V_{test} or V_{max}) V_{max} = Maximum tested Velocity, ft/s W = Weight of block, lb W_S = Submerged weight of block, lb ΔZ = Height of block protrusion above ACB matrix, ft β = Angle of block projection from downward direction, once in motion δ = Angle between drag force and block motion η_0 = Stability number for a horizontal surface η_1 = Stability number for a sloped surface θ = Angle between side slope projection of W_S and the vertical θ_0 = Channel bed slope (degrees or radians) (less than or equal to test bed slope) θ_1 = Channel side slope (degrees or radians) Note - the equations cannot be solved for $\theta_1 = 0$ (i.e., division by 0); therefore, a negligible side slope must be entered for the case of $\theta_1 = 0$. ρ = Mass density of water, 1.94 slugs/ft ³ τ_C = Critical shear stress for block on a horizontal surface, lb/ft ² τ_{des} = Design shear stress, lb/ft ²
$\delta + \beta + \theta = 90^\circ \text{ or } \pi/2 \text{ radians}$	
$\eta_1 = \left(\frac{\ell_4 / \ell_3 + \sin(\theta_0 + \theta + \beta)}{\ell_4 / \ell_3 + 1} \right) \eta_0$	
$\beta = \arctan \left(\frac{\cos(\theta_0 + \theta)}{(\ell_4 / \ell_3 + 1) \frac{\sqrt{1 - a_\theta^2}}{\eta_0 (\ell_2 / \ell_1)} + \sin(\theta_0 + \theta)} \right)$	
$\theta = \arctan \left(\frac{\sin \theta_0 \cdot \cos \theta_1}{\sin \theta_1 \cdot \cos \theta_0} \right) = \arctan \left(\frac{\tan \theta_0}{\tan \theta_1} \right)$	
$a_\theta = \sqrt{\cos^2 \theta_1 - \sin^2 \theta_0}$	
$F'_L = F'_D = 0.5 \cdot (\Delta Z) b \rho V_{des}^2$	
$\eta_0 = \frac{\tau_{des}}{\tau_C}$	
$W_S = W \cdot \left(\frac{S_C - 1}{S_C} \right)$	

Figura 56 – Dimensionamento di rivestimenti flessibili: definizione dei parametri progettuali.

IDROLOGIA E IDRAULICA

**Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RI	ID 0002 001	A	77 di 87

Nel caso in esame, la verifica è stata condotta considerando le seguenti dimensioni degli elementi che costituiscono il rivestimento: *lunghezza* = 44 cm; *larghezza* = 39 cm; *altezza* = 23 cm, da cui: $l_1 = 11.4$ cm; $l_2 = 29.6$ cm; $l_3 = 18.3$ cm; $l_4 = l_2 = 29.6$ cm. Inoltre, è stato considerato un peso specifico dei blocchi pari a 2.5 t/m^3 (cls), da cui una tensione tangenziale critica pari a 27.9 lb/ft^2 (indicata nel manuale sopra citato). I rimanenti parametri progettuali, estratti anche dalle simulazioni numeriche idrauliche condotte, assumono i seguenti valori:

- *inclinazione sponde*, $\theta_1 = 45^\circ$
- *velocità massima della corrente*, $V = 3.5 \text{ m/s}$
- *tensione tangenziale massima agente* = 3.6 lb/ft^2

da cui un fattore di sicurezza pari a $SF = 1.60$. In definitiva, il rivestimento flessibile adottato è costituito dagli elementi/blocchi mostrati in figura.

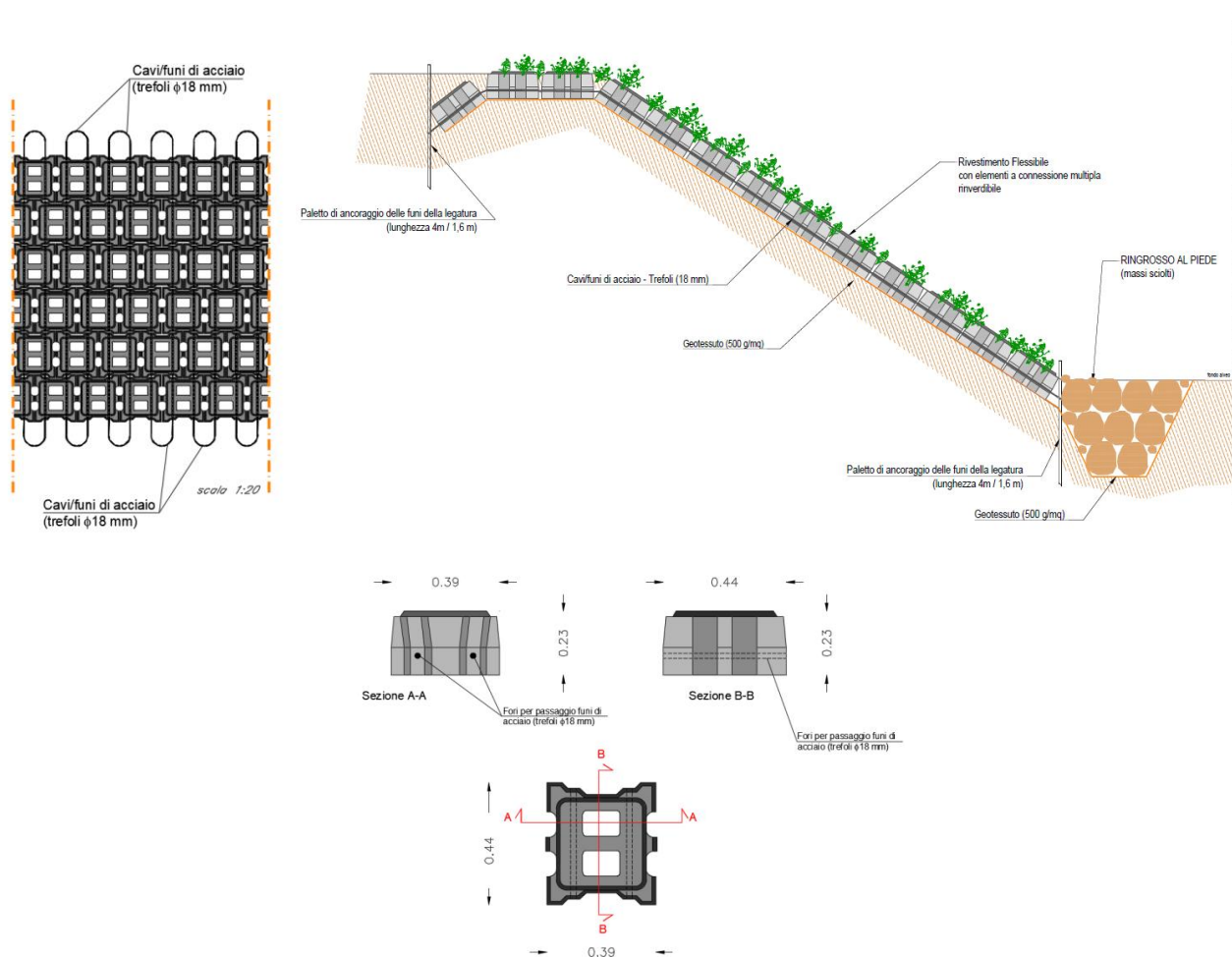



Figura 57 – Torrente Grue: particolare del rivestimento flessibile adottato.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

Per il dimensionamento dei massi sciolti di rivestimento de fondo alveo, si è fatto riferimento alla seguente formulazione (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 del corso d'acqua in esame):


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

Considerando, per il tratto fluviale oggetto di sistemazione idraulica, i seguenti parametri (*): $S_g = 2.2$ t/mc; $SF = 2$ (in via cautelativa), $\theta = 0.3^\circ$ (pendenza fondo); $\phi = 40^\circ$, $h = 6.5$ m e $v = 3.5$ m/s (per la portata di progetto $Tr200$), si ottiene $d_{50} = 0.50$ m.

Si precisa che le opere di sistemazione idraulica previste sul T. Grue (deviazione e ricalibratura) sono state verificate anche in termini di possibili loro effetti sui processi di *trasporto solido* (tendenza evolutiva dell'alveo, erosione/deposizione).

L'influenza su tali processi (in particolare di deposizione) è limitata o del tutto assente, rispetto alla configurazione attuale. Per maggiori dettagli, si rimanda alla relazione annessa cod. IQ0101R09RGID0002001A.

La costruzione del VI06 sul Torrente Grue è subordinata alla realizzazione dell'intervento di deviazione previsto per il corso d'acqua.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 79 di 87

Le lavorazioni necessarie alla messa in opera di tali interventi potranno svolgersi secondo le seguenti macro-fasi:

Fase 0

- chiusura della strada comunale Tegoreto e demolizione del relativo ponte sul T. Grue, a valle del ponte ferroviario esistente

Fase 1

- realizzazione (scavi e riprofilatura del terreno) del nuovo tratto “rettificato” del T. Grue, unitamente alla (simultanea) costruzione della spalla (fondazioni ed elevazione) lato Tortona del VI06

Fase 2

- connessione (monte-valle) del tratto “rettificato” del T. Grue al tratto fluviale esistente

Fase 3

- tombamento del tratto fluviale esistente del T. Grue “dismesso” (in corrispondenza della spalla lato Voghera del VI06, fino a prefissata quota del piano di lavoro, necessario per la realizzazione delle relative opere di fondazione)

Fase 4

- scavo e realizzazione della spalla (fondazioni ed elevazione) lato Voghera del VI06

Fase 5


- completamento delle opere di sistemazione idraulica del T. Grue in corrispondenza del VI06 (arginature e rivestimento di protezione)

Fase 6

- realizzazione/varo degli impalcati

L'esecuzione delle fasi/attività lavorative sopra individuate dovrà avvenire durante il periodo estivo o comunque nei periodi di magra del T. Grue.

Dovrà essere inoltre predisposto un sistema di allerta/allarme, sotto il coordinamento della Protezione Civile, per la necessaria interruzione preventiva delle lavorazioni, in caso di piena del corso d'acqua.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 80 di 87


6.2 TORRENTE CALVENZA

Sul Torrente Calvenza, in corrispondenza della nuova opera di attraversamento (VI07), si prevede la posa in opera di massi sciolti di protezione delle sponde e del fondo alveo del canale principale.

Per il dimensionamento dei massi sciolti di rivestimento, si è fatto riferimento alla formulazione (*) sopra introdotta (FHWA, 1989). Nello specifico, considerando, per il tratto fluviale oggetto di sistemazione idraulica, i seguenti parametri: $S_g = 2.2$ t/mc; $SF = 2$ (in via cautelativa), $\theta = 45^\circ$; $\phi = 50^\circ$, $h = 2.2$ m e $v = 2$ m/s (per la portata di progetto $Tr200$), si ottiene $d_{50} = 0.50$ m.

Si prevede inoltre la sistemazione dei fossi laterali a cui afferiscono i manufatti minori adiacenti a quello principale, mediante riprofilatura e rivestimento dei canali in pietrame/massi intasati con malta, ai fini di un deflusso *controllato* delle acque al di sotto del nuovo viadotto.

Per maggiori dettagli si rimanda all'elaborato grafico annesso cod. IQ0101R09PZID0002002A.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

7 CONSIDERAZIONI SUGLI EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI

Con riferimento allo studio idrologico annesso (rif. IQ0101R09RIID0001001A), ed in particolare ai dati di pioggia registrati presso la stazione pluviometrica di Voghera, per effetto dei cambiamenti climatici nel periodo 2061-2090 si prevede (sulla base dell'elaborazione dei risultati dei modelli meteorologici sviluppati dall'IPCC) un incremento massimo delle precipitazioni, e quindi delle portate al colmo, pari al **+23%**.

Applicando tale incremento alle portate di progetto (“*idrologiche*” ad oggi stimate con $Tr = 200$ anni, secondo Gumbel) dei corsi d'acqua Torrente Grue e Torrente Calvenza, si ottengono valori di portata di progetto nel periodo 2061-2090 prossimi a quelli delle portate al colmo ($Tr200$) derivanti dall'applicazione delle LSPP elaborate statisticamente secondo GEV, rispettivamente pari a:


- *Torrente Grue: 351.2 mc/s*
- *Torrente Calvenza: 52.20 mc/s*

Applicando tali valori di portata nei modelli numerici monodimensionali sopra descritti, nello scenario ipotetico “post operam” futuro di sistemazione idraulica del territorio, si ottengono, in corrispondenza delle opere in progetto VI06 (T. Grue) e VI07 (T. Calvenza) in esame, i seguenti valori di livello idrico e franco idraulico.


	Quota minima impalcato [m slm]	Livello di piena Tr200 [m slm] -1D	Franco sul livello idrico TR200 [m]
VI06 (T. Grue)	+108.40	+107.50	+0.90
VI07 (T. Calvenza)	+103.40	+101.80	+1.60

Sulla base delle proiezioni climatiche ad oggi disponibili, le opere previste in progetto garantirebbero (al 2090) il passaggio a pelo libero delle “*portate di riferimento/progetto incrementate*” per effetto dei cambiamenti climatici.

Si precisa che le analisi eseguite in questo capitolo, sulla base di portate incrementate per effetto del cambiamento climatico, sono finalizzate a verificare se le opere di attraversamento in progetto

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 82 di 87

consentano il transito delle piene di riferimento (a pelo libero, senza specifico franco minimo) nell'ipotesi di incremento delle precipitazioni, dedotto dalle proiezioni più cautelative (massimo scenario di emissione, massima variazione prevista, modello meteo-climatico più gravoso, massimo orizzonte temporale) ad oggi disponibili. In mancanza di una specifica normativa o linea guida di riferimento (a livello nazionale e/o locale) sul tema, si ritiene che tale criterio di verifica sia ragionevole e conforme alle indicazioni riportate nella *Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici* (MATTM, 2015).

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 83 di 87


8 COMPATIBILITA' IDRAULICA DELLE OPERE IN PROGETTO

Con riferimento alle NTC 2018, al Cap. 5 si asserisce:

“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.”

Con riferimento invece alla Direttiva n.2/1999 dell’Autorità di Bacino del Fiume Po, al paragrafo 3.2

“Portata di piena di progetto. Il tempo di ritorno della piena di progetto per le verifiche idrauliche del ponte deve normalmente rispettare i seguenti valori: a) per i corsi d’acqua interessati dalla delimitazione delle fasce fluviali, non inferiore a quello assunto per la delimitazione della Fascia B; b) per i corsi d’acqua non interessati dalla delimitazione delle fasce fluviali non inferiore a 100 anni. In casi eccezionali, quando si tratti di corsi d’acqua di piccole dimensioni e di infrastrutture di importanza molto modesta, possono essere assunti tempi di ritorno inferiori in relazione ad esigenze specifiche adeguatamente motivate; in tali situazioni è comunque necessario verificare che le opere non comportino un aggravamento delle condizioni di rischio idraulico sul territorio circostante per

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

la piena di 200 anni e definire il comportamento dell'opera stessa in rapporto alla stessa piena.....


Franco minimo. Il minimo franco tra la quota idrometrica relativa alla piena di progetto e la quota di intradosso del ponte deve essere non inferiore a 0.5 volte l'altezza cinetica della corrente e comunque non inferiore a un 1.00 m; il valore del franco deve essere assicurato per almeno 2/3 della luce quando l'intradosso del ponte non sia rettilineo e comunque per almeno 40 m, nel caso di luci superiori a tale valore. Nel caso di corsi d'acqua arginati, la quota di intradosso del ponte deve essere superiore a quella della sommità arginale. Il franco minimo tra la quota idrometrica relativa alla piena di progetto e la quota di sommità del rilevato di accesso al ponte (piano viabile) deve essere non inferiore a 0.5 volte l'altezza cinetica della corrente e comunque non inferiore a 1.00 m.

Posizionamento del ponte rispetto all'alveo. L'insieme delle opere costituenti l'attraversamento non deve comportare condizionamenti al deflusso della piena e indurre modificazioni all'assetto morfologico dell'alveo. nei casi in cui il ponte sia inserito in un tratto di corso d'acqua interessato da altre opere di attraversamento poste in adiacenza, a monte o a valle, è necessario che le pile in alveo (ed eventualmente le spalle) siano allineate con quelle esistenti in modo che le pile presenti, considerate congiuntamente, non riducano la luce effettiva disponibile, anche ai fini del rischio di ostruzione da parte del materiale trasportato in piena.....

Effetti idraulici indotti dal ponte. La soluzione progettuale per il ponte e per i relativi rilevati di accesso deve garantire l'assenza di effetti negativi indotti sulle modalità di deflusso in piena; in particolare il profilo idrico di rigurgito eventualmente indotto dall'insieme delle opere di attraversamento deve essere compatibile con l'assetto difensivo presente e non deve comportare un aumento delle condizioni di rischio idraulico per il territorio circostante.....”

I nuovi viadotti ferroviari previsti sul Torrente Grue e sul Torrente Calvenza sono caratterizzati da luci e franchi nel rispetto della normativa vigente. Nello specifico, le opere di attraversamento non interessano con spalle, pile e rilevati la sezione del corso d'acqua interessata dalla piena di progetto né corpi arginali.

E' rispettato il franco minimo di 1,5 metri rispetto al livello idrico corrispondente alla piena di progetto (Tr200), “idrologica”, nonché la distanza minima tra fondo alveo e intradosso

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 85 di 87

dell'impalcato (6-7 metri, come riportato nella circolare applicativa n.7/2019 delle NTC2018), nell'eventualità che la sezione di attraversamento sia interessata dal transito di materiali galleggianti di non trascurabili dimensioni.


Inoltre, le opere in progetto non costituiscono un elemento pregiudizievole all'attenuazione o all'eliminazione delle specifiche cause di rischio idraulico esistenti sul territorio, garantendo proprio il transito in sicurezza della cosiddetta "portata idrologica", attualmente impedito dalle opere di attraversamento esistenti, presenti a monte, e dalla scarsa officiosità idraulica della sezione di deflusso del Torrente Grue e del T. Calvenza (rif. DPCM 29.09.1998 e s.m.i.).

Infine le opere in progetto (in particolare gli interventi di sistemazione/deviazione sul T. Grue) sono conformi anche alla *Direttiva Quadro Acque 2000/60/CE*. Nello specifico, il tratto del T. Grue oggetto di intervento è tra quelli monitorati nell'ambito del *Piano Di Gestione Delle Acque – Autorità di bacino Distrettuale del Fiume PO (2016)* - che definisce "gli obiettivi ambientali per ciascun corpo idrico del distretto padano, distinti per tipologie di acque, e di riferimento per il nuovo ciclo di pianificazione 2015-2021.L'individuazione dei corpi idrici e l'assegnazione ad ognuno degli obiettivi ambientali è stata effettuata basandosi sugli esiti dei monitoraggi effettuati per le acque superficiali e sotterranee.

Nello stesso Piano di Gestione delle Acque (2016) si precisa che:

l'Art. 4.7 della Direttiva Quadro Acque 2000/60/CE s'applica nel caso di modifiche fisiche che possono alterare le caratteristiche idromorfologiche dei corpi idrici. Gli impatti possono derivare da interventi come: la realizzazione d'impianti idroelettrici, interventi per la difesa da alluvioni (arginature), dighe o manufatti per la navigazione. Gli sbarramenti creati per la produzione d'energia idroelettrica o per l'approvvigionamento idrico possono determinare alterazioni alle concentrazioni dell'ossigeno ed alla temperatura di un corpo idrico, provocando, così, il deterioramento dello stato ecologico. Il deterioramento va considerato anche nel caso di prelievi da corpi idrici sotterranei, che possono causare impatti negativi in un corpo idrico interferente superficiale.

Le opere di deviazione e ricalibratura in progetto sul T. Grue non ricadrebbero direttamente tra tali interventi (le arginature previste di fatto ripristinano quelle esistenti). Si ritiene pertanto che il

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 86 di 87

progetto proposto sia ottemperante della normativa specifica di settore attualmente vigente ed in linea con gli interventi di sistemazione idraulica attualmente previsti sul territorio.


In definitiva, è dimostrata la compatibilità idraulica delle opere di attraversamento in progetto, nonché dell'infrastruttura ferroviaria nel suo complesso, nel tratto *Tortona-Pontecurone*, oggetto di studio nella presente relazione.

9 BIBLIOGRAFIA

Pestana, R., Matias, M., Canelas, R., Araújo, A., Roque, D., Van Zeller, E., Trigo-Teixeira, A., Ferreira, R., Oliveira, R., Heleno, S., Calibration of 2D hydraulic inundation models in the floodplain region of the Lower Tagus River, 2013

Regione Piemonte, Studio idraulico dell'intero bacino del Torrente Grue, Relazione idrologico-idraulica, Studio Anselmo Associati, 2016

Supplemento ordinario n. 8 alla GAZZETTA UFFICIALE Serie generale - n. 42, CAPITOLO 5, PONTI, 2018

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RI	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 87 di 87

10 ALLEGATO – NOTA “REGIONE PIEMONTE”



Direzione Opere pubbliche, difesa del suolo, protezione civile, trasporti e logistica

Settore Tecnico Regionale – Alessandria e Asti

tecnico.regionale.al_at@regione.piemonte.it

tecnico.regionale.al_at@cert.regione.piemonte.it

Protocollo * /A1814B

Alessandria,

Allegati:

Ci: 13.160.40 / 2014NOI07_PARERI 255/2021A

Segnatura di protocollo Riportata nei metadati
del sistema documentale DOQUI ACTA e/o PEC

Spett.le

RFI spa

Direzione Investimenti Area Nord-Est

Progetti Milano

rfi-din-dpi.eo.tb@pec.rfi.it

Oggetto: Prime indicazioni in merito all'attraversamento del Torrente Grue con le opere connesse al "Quadruplicamento linea ferroviaria Tortona – Voghera", in comune di Tortona (AL)

Con riferimento alla vs nota a prot. RFI-DIN-DINE.MI\PEC\P\2021\0016 del 22/1/2021, assunta a ns prot 3169 del 22/01/2021, inerente la richiesta di espressione in merito alle valutazioni idrauliche condotte per la compatibilità del nuovo manufatto di attraversamento del T. Grue in comune di Tortona (AL), e dei successivi scambi informali, si relaziona quanto segue.

Le analisi svolte risultano esaustive e ben sviluppate sia da un punto di vista idrologico che idraulico, ed in allineamento agli studi in essere sulla zona, nonché a quanto indicato nella riunione del 17 dicembre 2020.

Ciononostante valutato che la distribuzione di probabilità che meglio si adatta alla rappresentazione delle registrazioni pluviometriche analizzate è la GEV, che le portate calcolate ed utilizzate risultano tra loro sensibilmente differenti, ma che la serie storica di Arpa Piemonte risulta limitata temporalmente all'ultimo ventennio e sensibilmente influenzata da eventi eccezionali gravosi succedutisi, si ritiene congruo non discostarsi dai valori di portata utilizzati per valutazioni condotte sull'asta del torrente Grue.

Si richiede quindi di assumere quale livello del pelo libero, quello derivante dalle simulazioni che ammettono il transito della cosiddetta "portata idrologica", a seguito di eventuali futuri interventi di sistemazione idraulica attuati sul territorio, (cfr "per simulare tale scenario nel modello numerico 1D sono stati cautelativamente eliminati a monte della linea FS gli attraversamenti idraulicamente insufficienti (che influenzano fortemente il profilo di rigurgito) e aggiunti degli elementi "levee" in tutte le sezioni di calcolo"), adottando la portata di 242.4 mc/s (simile a quella indicata negli studi idraulici ad oggi disponibili sul territorio).

Con tale assunzione si rilevano le seguenti osservazioni. La realizzazione di opere spondali di contenimento delle piene, rilevate rispetto ai piani campagna, ma dimensionate per il transito della portata di 150 mc/s (cfr “*residua, associata ad un evento di piena con $Tr = 200$ anni massima transitabile nel tratto oggetto di intervento per via degli effetti di laminazione legati alle esondazioni diffuse del T. Grue a monte*”) comporterebbe l’assenza di un franco di sicurezza e al termine della rettilineazione dell’alveo (oltre la sez 79 di rilievo cfr “monografia di calcolo idraulico e considerazioni sul tracciato di progetto”) un ovvio aumento dei livelli idrici.

Con la soluzione proposta, tenuto in conto la natura rilevante dell’opera e la possibilità di interventi strutturali a monte dell’attraversamento in oggetto che convoglierebbero di fatto la portata in adozione (242,4 mc/s), si reputa che in alternativa al solo adeguamento della quota sommitale delle sponde artificiali, possa essere associata una rivisitazione della geometria di deflusso con migliore raccordo alle sezioni indisturbate di valle.

Il franco di sicurezza deve essere comunque garantito sia sulle sponde artificiali proposte che sul nuovo manufatto, secondo le direttive emesse dall’Autorità Distrettuale del Po (ex AdBPo) e delle NTC 2018.

I rilevati arginali dovranno essere ispezionabili e mantenibili secondo le indicazioni del Vs piano di manutenzione che sarà allegato alla progettazione.

Si coglie l’occasione di precisare che la sezione trasversale del rilevato ferroviario dovrà riportare la geometria dell’alveo; per il dimensionamento degli ulteriori attraversamenti su corsi d’acqua pubblici, quali il rio Calvenza, il T. Curone ed il rio Limbione, potranno essere utilizzati analoghi criteri.

Qualora vengano adottate soluzioni progettuali differenti, questo ufficio rimane a disposizione per ogni ulteriore chiarimento. Distinti saluti.

Il Dirigente del Settore
Ing. Roberto Crivelli
(firmato digitalmente)

Funzionario Referente
Patrizia Buzzi