

COMMITTENTE:



DIREZIONE INVESTIMENTI
DIREZIONE PROGRAMMI INVESTIMENTI
DIRETTRICE SUD - PROGETTO ADRIATICA

DIREZIONE LAVORI:



APPALTATORE:

Mandataria

Mandanti



PROGETTAZIONE:

MANDATARIA

MANDANTI



PROGETTO ESECUTIVO

LINEA PESCARA - BARI
RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI - LESINA
LOTTI 2 e 3 - RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA

IDRAULICA

Relazione idraulica e di compatibilità idraulica
Modellazione bidimensionale

L'Appaltatore

A.A. DIAGOSTINO COSTRUZIONI GENERALI S.r.l.
Ing. Gianguido Babini
Disegnatore Tecnico
(Ing. Gianguido Babini)

I progettisti (il Direttore della progettazione)

Ing. Massimo Facchini

Data Ottobre 2023

firma

Data Ottobre 2023

firma

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA / DISCIPLINA	PROGR	REV	SCALA
L I O B	0 2	E	Z Z	R I	I D 0 0 0 2	1 0 1	D	---

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato/Data
A	Prima emissione	C.Cofone	Dicembre 2022	O.Caruso	Dicembre 2022	V.Secreti	Dicembre 2022	
B	Revisione a seguito di RDV	C.Cofone	Giugno 2023	O.Caruso	Giugno 2023	V.Secreti	Giugno 2023	
C	Revisione a seguito di RDV	C.Cofone	Ottobre 2023	O.Caruso	Ottobre 2023	V.Secreti	Ottobre 2023	
D	Revisione a seguito di RDV	C.Cofone	Ottobre 2023	O.Caruso	Ottobre 2023	V.Secreti	Ottobre 2023	



 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	2

INDICE

1	PREMESSA	7
2	DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO ITALFERR.....	8
3	CONDIZIONI IDROLOGICHE	10
4	EVOLUZIONE GEO-MORFOLOGIA DELL'AVEO DEL BIFERNO	13
5	MODELLAZIONE IDRAULICA BIDIMENSIONALE	24
5.1	IL MODELLO NUMERICO	24
5.2	GEOMETRIA DEL MODELLO	26
5.3	CONFIGURAZIONI GEOMETRICHE.....	32
5.4	DEFINIZIONE DELLE SCABREZZE MODELLO.....	35
6	RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE	37
6.1	SIMULAZIONI ANTE OPERAM.....	37
6.2	SIMULAZIONI POST OPERAM.....	43
7	VERIFICA DELLE OPERE IN PROGETTO	49
7.1	NUOVO VIADOTTO	49
7.2	PROTEZIONE DELLE PILE E DELLE SPALLE.....	54
7.2.1	Metodi di calcolo della verifica allo scalzamento (Pile).....	54
7.2.2	Metodi di calcolo della verifica allo scalzamento (Spalle).....	60
7.2.3	Verifica allo scalzamento (Pile).....	61
7.2.4	Verifica allo scalzamento (Spalle).....	73
7.2.5	Protezione delle pile dall'erosione: calcolo delle tensioni agenti e resistenti	73
7.2.6	Definizione delle opere di protezione spondale	75
8	CRITERI DI COMPATIBILITA' IDRAULICA	76
8.1	ANALISI DEL TRACCIATO.....	77
8.2	VERIFICHE IDRAULICHE	80
8.3	SISTEMAZIONI IDRAULICHE.....	81
8.4	ANALISI DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA	82
9	STUDIO FASE REALIZZATIVA.....	83
9.1	METODO DI SCALAMENTO TEMPORALE	83
9.2	MODELLAZIONE IDRAULICA	87
9.3	RISULTATI MODELLAZIONE BIDIMENSIONALE "FASIZZAZIONE"	90
	BIBLIOGRAFIA	94

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	3

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 – Area modellata, sezione di applicazione dell’onda di piena in ingresso.....	10
Figura 2 – Onde di piena adottate nella modellazione numerica (fonte: Autorità di Bacino)11	
Figura 3 – Idrogrammi di piena del fiume Biferno alla sezione in corrispondenza del nuovo viadotto ferroviario (fonte: Autorità di Bacino)	12
Figura 4 – Sezioni trasversali mostranti l'incisione del canale fluviale durante il periodo compreso tra il 1954 e il 2013 (da Scorpio et al. 2015): a) Fiume Trigno; b) Fiume Biferno.	13
Figura 5 – Inquadramento del bacino idrografico del Fiume Biferno.....	14
<i>Figura 6 – Evoluzione del doppio meandro posto a valle della confluenza del torrente Tentillo dal 1869 (A) al 1954 (B) e al 1992 (C)</i>	<i>16</i>
Figura 7 – A) Foto aerea 1954, B) Ortofoto 1988 (http://www.pcn.minambiente.it/viewer/). 18	
<i>Figura 8 – Foto aerea 1992.</i>	<i>19</i>
Figura 9 – A) Ortofoto 1994 (http://www.pcn.minambiente.it/viewer/), B) Ortofoto 2000 (http://www.pcn.minambiente.it/viewer/).....	20
<i>Figura 10 – A) Ortofoto 2006 (http://www.pcn.minambiente.it/viewer/), B) Ortofoto 2012 (http://www.pcn.minambiente.it/viewer/).</i>	<i>21</i>
<i>Figura 11 – Carta geomorfologica della foce del Fiume Biferno (da Roskopf & Scorpio 2013): a) carta geomorfologica del basso corso del Fiume Biferno; b) dettaglio geomorfologico della zona di interesse; c) legenda geomorfologica.</i>	<i>22</i>
Figura 12 – Inquadramento territoriale dell’area modellata con indicata la viabilità stradale principale.	27
Figura 13 – Attraversamenti del Fiume Biferno	28
Figura 14 – Tombini di attraversamento minori.	29
Figura 15 – DTM di riferimento	30
Figura 16 – Estratto della mesh di calcolo con sovrapposizione del DTM	31
Figura 17 – Configurazione Post operam AdB (fonte: Planimetria con ubicazione interventi di progetto – Tavole D.2).	33
Figura 18 – Mappa delle zone di scabrezza di Manning utilizzata nel modello	36
Figura 19 – Massima estensione dell’allagamento e massimi tiranti idrici – Ante operam 1 – TR200.....	38
Figura 20 – Massima estensione dell’allagamento e massimi tiranti idrici – Ante operam 2 –	

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A.R.L.	MANDANTI HYpro	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
		Relazione Idraulica		COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR
		LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	4

TR200.....	39
Figura 21 – In rosso: tratti in cui gli argini vengono sormontati nello scenario ante operam 2 per TR200 anni.....	40
Figura 22 – Massima estensione dell’allagamento e massimi tiranti idrici – Ante operam 1 – TR30, TR200, TR 300, TR500	42
Figura 23 – Massima estensione dell’allagamento e massimi tiranti idrici – Ante operam 2 – TR30, TR200, TR300, TR500	43
Figura 24 – Massima estensione dell’allagamento e massimi tiranti idrici – Post operam 1– TR200.....	44
Figura 25 – Massima estensione dell’allagamento e massimi tiranti idrici – Post operam 2 – TR200.....	45
Figura 26 – Differenza tra i massimi livelli idrici: Post operam 1 – ante operam 1 – TR200	46
Figura 27 – Differenza tra i massimi livelli idrici: Post operam 2 – ante operam 2 – TR200	47
Figura 28 – Tratto del fiume Biferno implementato in HEC RAS (modalità monodimensionale) e confronto tra la relazione tirante-portata nel modello monodimensionale (in rosso) e bidimensionale (in blu).....	48
Figura 29 – Differenti tipologie di pile non uniformi dotate di fondazioni	60
Figura 30 – Planimetria con indicazione delle pile in corrispondenza all’alveo e alla golena del Biferno del viadotto VI02.	62
Figura 31 – Planimetria con indicazione delle pile verificate poste all’esterno dell’alveo del Biferno (viadotto VI02, area 2).	67
Figura 32 – Planimetria con indicazione delle pile verificate poste all’esterno dell’alveo del Biferno (viadotto VI02).	68
Figura 33 – Sovrapposizione del tracciato con le aree di pericolosità idraulica del PAI.	78
Figura 34 – Sovrapposizione del tracciato con l’estensione delle aree allagate – configurazione ante operam 1 – TR 500 anni	78
Figura 35 – Sovrapposizione del tracciato con la fascia di riassetto fluviale.....	79
Figura 36 Andamento della curva di potenza che confronta le portate al colmo di piena con tempo di ritorno 30, 200, 300 e 500 anni.....	85
Figura 37 Andamento della portata al colmo di piena per il Fiume Biferno con differente tempo di ritorno.....	86

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	5

Figura 38 Andamento della portata al colmo di piena per il torrente Cigno con differente tempo di ritorno.....	86
Figura 39 Fase1, argine provvisorio lato Nord.....	89
Figura 40 Fase 2, argine provvisorio lato Sud.....	90

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 – Sintesi delle foto aeree e delle ortofoto utilizzate per l'analisi multitemporale dei principali sistemi fluviali della zona di intervento	17
Tabella 2 - Valori di scabrezza secondo le NA del PAI Biferno.	35
Tabella 3 – Tempi di ritorno richiesti per le verifiche idrauliche.	37
Tabella 4 – risultati che si ottengono per le portate massime alla sezione del viadotto	48
Tabella 5 – Franchi richiesti dalle NA – PAI Biferno e minori.....	49
Tabella 6 – Livelli e franchi per il viadotto di progetto, scenario post operam 1.	51
Tabella 7 – Livelli e franchi per il viadotto di progetto, scenario post operam 2.	53
Tabella 8 – Coefficiente correttivo K_1	56
Tabella 9 – Coefficiente correttivo K_3	56
Tabella 10 – Variabili idrauliche e dimensioni delle pile in corrispondenza del Biferno.	63
Tabella 11 – Valore dello scavo localizzato in corrispondenza delle pile del viadotto VI02 sul fiume Biferno secondo le diverse equazioni e valore medio e massimo considerando il valore del massimo tirante e della velocità ad esso associata.	63
Tabella 12 – Valore dello scavo localizzato in corrispondenza delle pile del viadotto sul fiume Biferno secondo le diverse equazioni e valore medio considerando il valore della massima velocità e il tirante ad esso associato.....	64
Tabella 13 – Diametri e lunghezze equivalenti delle pile considerando la presenza della fondazione (caso Hmax-V)	65
Tabella 14 – Diametri e lunghezze equivalenti delle pile considerando la presenza della fondazione (caso H-Vmax).....	65
Tabella 15 – Valore dello scavo localizzato in corrispondenza delle pile del viadotto VI02 sul fiume Biferno secondo le diverse equazioni e valore medio e massimo considerando la presenza della fondazione.	66
Tabella 16 – Valore dello scavo localizzato in corrispondenza delle pile del viadotto VI02 sul fiume Biferno secondo le diverse equazioni e valore medio e massimo considerando la	

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	6

presenza della fondazione.	66
Tabella 17 – Variabili idrauliche e dimensioni delle pile poste all'esterno dell'alveo del Biferno.	69
Tabella 18 – Valore dello scavo localizzato in corrispondenza delle pile poste all'esterno dell'alveo del Biferno secondo le diverse equazioni e valore medio (caso Hmax-V).....	69
Tabella 19 – Valore dello scavo localizzato in corrispondenza delle pile poste all'esterno dell'alveo del Biferno secondo le diverse equazioni e valore medio (caso Vmax-H).....	70
Tabella 20 – Diametri e lunghezze equivalenti delle pile considerando la presenza della fondazione (caso Hmax – V).....	70
Tabella 21 – Diametri e lunghezze equivalenti delle pile considerando la presenza della fondazione (caso H – Vmax).....	71
Tabella 22 – Valore dello scavo localizzato in corrispondenza delle pile poste all'esterno dell'alveo del Biferno secondo le diverse equazioni e valore medio, considerando anche la presenza della fondazione.	71
Tabella 23 – Valore dello scavo localizzato in corrispondenza delle pile poste all'esterno dell'alveo del Biferno secondo le diverse equazioni e valore medio, considerando anche la presenza della fondazione.	72
Tabella 24 – Verifica delle protezioni di sponda.	75
Tabella 25 – Verifica delle protezioni di fondo.	75
Tabella 26 – Classi di pericolosità idraulica – PAI Biferno e Minori	77
Tabella 27 Portate al colmo di piena con tempo di ritorno pari a 500, 300, 200 e 30 anni. .	85

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	7

1 PREMESSA

Questa relazione illustra uno studio idraulico effettuato mediante modellazione numerica bidimensionale del Fiume Biferno. L'obiettivo principale è la valutazione delle opere di protezione idraulica per la linea ferroviaria esistente e la verifica della compatibilità idraulica del progetto infrastrutturale pianificato.

Lo studio si basa sulle direttive fornite dal Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) del bacino dei Fiumi Trigno, Biferno e Minori, Saccione e Fortore, nonché sulle linee guida del piano di gestione del rischio alluvioni del distretto idrografico dell'Appennino Meridionale. Inoltre, si considerano gli effetti dei progetti di messa in sicurezza stabiliti dall'Autorità di Bacino.

Per condurre simulazioni idrauliche, definire le zone soggette a inondazione, calcolare i livelli dell'acqua e le velocità, è stato utilizzato il software HECRAS 6.3.1 sviluppato dallo U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center.

In merito alla modellazione e progettazione delle opere di sistemazione e difesa idraulica relative all'attraversamento dell'infrastruttura ferroviaria sul Fiume Biferno (Viadotto VI02) nell'ambito della Progettazione Esecutiva:

- si è tenuta una riunione con gli specialisti di ingegneria idraulica di ITF (Ing. Tortora e Ing. De Cianni) nella giornata dell'11.03.2023 al fine di sciogliere il nodo progettuale creato dalla contemporanea progettazione esecutiva da parte di Technital (Committente: Provincia di Campobasso e Regione Molise) della sistemazione idraulica del Fiume Biferno a monte e a valle dell'attraversamento ferroviario, non ancora conclusasi.

Difatti, le simulazioni idrauliche riportate nel PD sono state sviluppate da ITF considerando le dimensioni delle arginature contenute nel Progetto Definitivo della Regione Molise e gli idrogrammi di piena forniti dall'Autorità di Bacino; nella successiva Progettazione Esecutiva della linea Termoli-Ripalta, tali dati sulle arginature, essenziali per una simulazione dettagliata e paragonabile al PD di ITF, non sono mai stati forniti dalla Regione Molise né dai progettisti delle opere di competenza regionale.

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	8

A seguito di contraddittorio con ITF in data 02-03-04/10/2023, non avendo ricevuto riscontro ufficiale da parte della Provincia di Campobasso (soggetto attuatore dell'intervento di ripristino dell'ufficiosità idraulica del Fiume Biferno) si stabilisce di sviluppare il PE in linea con il PD approvato dalla stessa amministrazione, considerando i 4 scenari riportati nel PD:

- Ante Operam e Post Operam 1
- Ante Operam Post Operam 2

2 DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO ITALFERR

Il progetto della Linea Pescara-Bari, raddoppio tratta Termoli-Lesina, si inquadra nell'ambito degli interventi relativi alle Infrastrutture strategiche di cui al capo IV del D.Lgs. n.163/2006 (ex Legge Obiettivo n.443/2001).

Facendo seguito ad un complesso percorso progettuale e di confronto con gli Enti, nel 2013 è stato sviluppato il progetto preliminare del raddoppio della tratta Termoli-Lesina, che prevedeva la suddivisione in tre lotti funzionali:

- Lotto 1: Ripalta-Lesina, dal km 24+200 al km 31+044, sviluppo di circa 6,8 km;
- Lotto 2: Termoli-Campomarino, dal km 0+000 al km 5+940, sviluppo di circa 5,9 km;
- Lotto 3: Campomarino-Ripalta, dal km 5+940 al km 24+200, sviluppo di circa 18,3 km.

Il CIPE, con Delibera n. 2 del 28/1/2015, ha approvato il Progetto Preliminare con prescrizioni e raccomandazioni.

Per il Lotto 1 è stato sviluppato il Progetto Definitivo e, in data 23/10/2018, è stato pubblicato il bando di gara sulla Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea (GUUE n. 2018/S 204-466416).

I Lotti 2 e 3 sono stati invece interessati dalla prescrizione n. 50 che il CIPE ha formulato in sede di approvazione del Progetto Preliminare, in cui veniva richiesto di *“valutare gli impatti economici sul progetto, derivanti dalla soluzione proposta dalla Regione Molise per l'ottimizzazione urbanistica e territoriale del tracciato tra la prog. 1+940 (lotto 2) e 8+298 (lotto 3) (prescrizione n. 1 Regione Molise)”*.

Tale soluzione (cosiddetta “Variante Molise”) prevede una variante localizzativa in prossimità del Comune di Campomarino, con l'arretramento del tracciato rispetto alla costa, in luogo del raddoppio della linea esistente.

	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	9

Il 22/9/2015, con nota RFI-AD\A0011\P\2015\0002531, RFI ha inviato al Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT) lo studio relativo alla valutazione degli impatti economici sul progetto derivante dalla soluzione proposta dalla Regione Molise.

Il 16/5/2017, con nota RFI-DIN-DIS.AD\A0011\P\2017\0000365, RFI ha trasmesso lo Studio di Fattibilità della Variante Molise al MIT. In detta nota si richiedeva la convocazione di un tavolo tecnico con gli Enti interessati finalizzato alla condivisione del nuovo tracciato della “Soluzione Regione Molise”.

Il MIT, con nota *M INF.TFE.REGISTRO UFFICIALE.U.0003974* del 5/7/2017, ha convocato Regione Molise, Regione Puglia, Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo e Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM), oltre a RFI, per il giorno 25/7/2017 al fine di condividere la soluzione progettuale sviluppata.

La Regione Molise non ha formulato osservazioni al tracciato presentato.

A seguito dell’introduzione della “Variante Molise” è venuta meno la possibilità di prevedere due lotti funzionali per la tratta in oggetto, Lotto 2 e Lotto 3.

Pertanto, il presente Progetto Definitivo, considera un unico lotto funzionale (denominato Lotto 2-3) tra Termoli e Ripalta, con uno sviluppo complessivo di 24.9 km.

L’intervento prevede:

- nel tratto iniziale, tra il km 0+000 e il km 2+400, l’utilizzo del sedime ferroviario esistente. Non si prevede quindi l’ampliamento della sede ferroviaria lato mare per la realizzazione del binario di raddoppio ma si prevede l’utilizzo della linea per Campobasso. Quindi l’attuale binario Termoli-Lesina risulta essere il futuro binario dispari e l’attuale binario della linea per Campobasso risulta essere il futuro binario pari. Il collegamento verso Campobasso è garantito attraverso un bivio a raso al km 2+400 circa;
- tra il km 2+400 e il km 24+700 circa il tracciato è tutto in variante;
- tra il km 24+700 e il km 24+930 il progetto prevede l’ampliamento della sede esistente per la realizzazione del binario di raddoppio, con allaccio al raddoppio del 1° Lotto Funzionale.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	10

3 CONDIZIONI IDROLOGICHE

Nella Figura 1 è evidenziata l'estensione dell'area oggetto di analisi. Il dominio di calcolo è delimitato dai seguenti elementi geografici: a sud-est e a nord-ovest dai versanti della valle del Fiume Biferno, a nord-est dalla linea di costa adriatica, a sud-ovest da una sezione ortogonale all'asse del Fiume Biferno, situata all'altezza del ponte Tanassi, e da una sezione del Torrente Cigno, posizionata circa 1 km a monte del punto di confluenza con il Fiume Biferno.

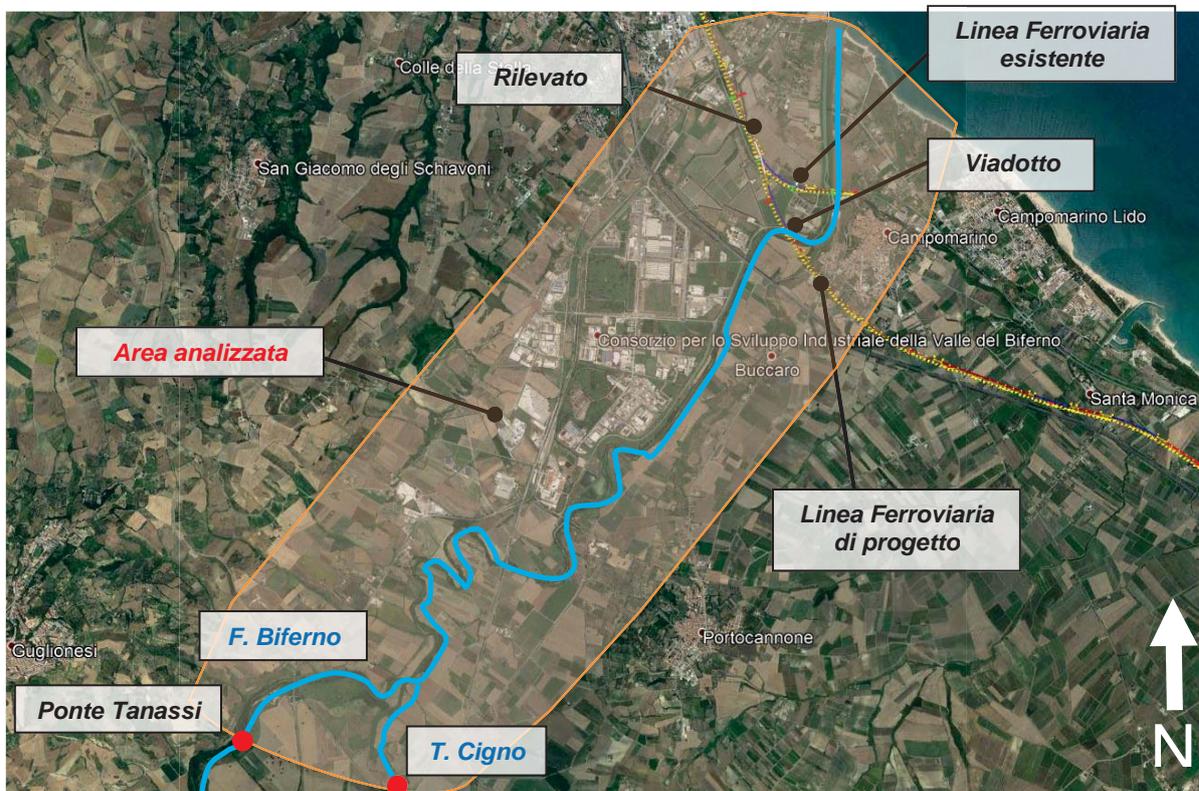


Figura 1 – Area modellata, sezione di applicazione dell'onda di piena in ingresso.

Le simulazioni idrauliche realizzate sono di tipo non stazionario, nelle sezioni di monte sono state immesse come condizioni al contorno le onde di piena fornite dall'Autorità di Bacino. In merito ai metodi di verifica le NTA del PAI stabiliscono che:

"[...] Lo schema di moto permanente può essere utilizzato qualora sia sufficiente determinare i livelli idrometrici senza compiere valutazioni circa la capacità di laminazione del corso d'acqua. La modellazione in moto vario sarà utilizzata qualora il fenomeno di laminazione sia significativo o siano presenti significative esondazioni del corso d'acqua. [...]"

MANDATARIA HUB ENGINEERING <small>CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A.R.L.</small>	MANDANTI HYpro	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
		Relazione Idraulica	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC RI	OPERA 7 DISCIPLINA ID 00 02			PROGR 101

È noto come il Fiume Biferno abbia la tendenza ad allagare ampie aree di territorio, in particolare in prossimità della foce, per cui gli effetti di laminazione delle piene non sono da ritenersi trascurabili.

Nei grafici in Figura 2 sono riportate le onde di piena applicate al modello numerico, per i diversi tempi di ritorno che caratterizzano gli eventi di piena sintetici simulati. Gli idrogrammi di piena sono stati forniti dall’Autorità di Bacino competente.

I tempi di ritorno analizzati sono: 30, 200, 300 e 500 anni in accordo con quanto previsto dalle Norme di Attuazione del PAI Biferno e minori.

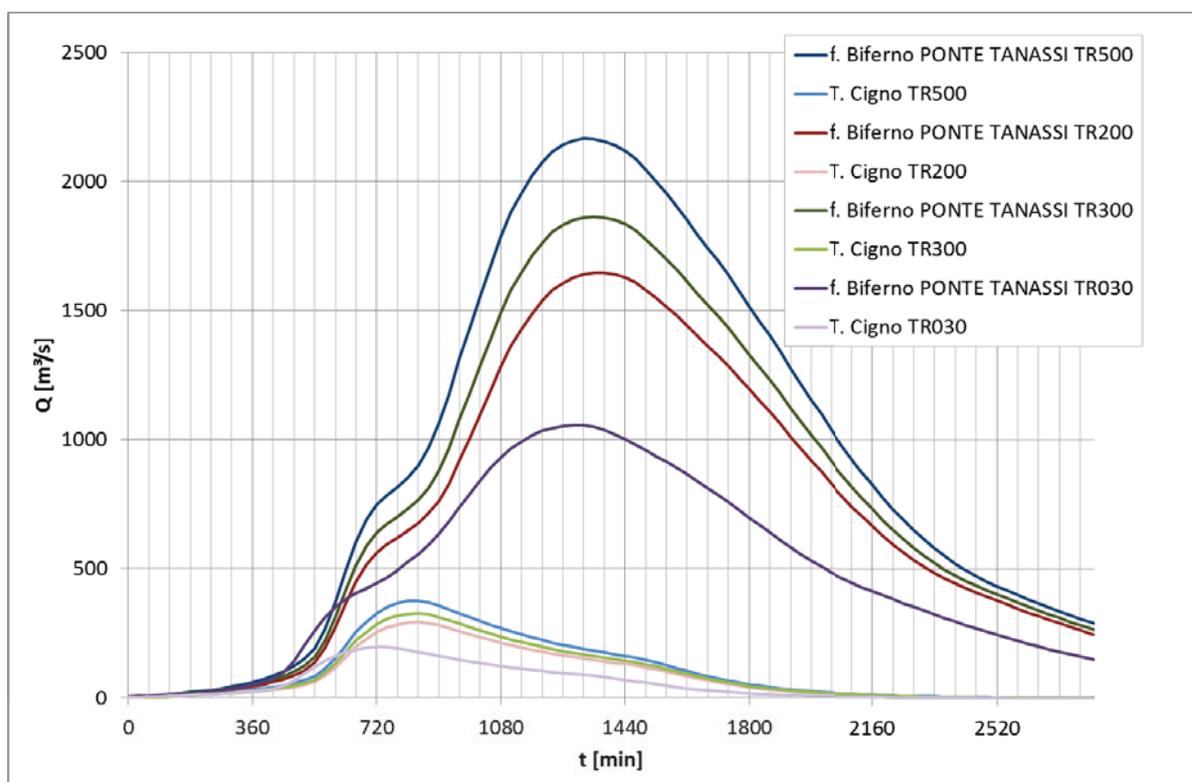


Figura 2 – Onde di piena adottate nella modellazione numerica (fonte: Autorità di Bacino)

Per ulteriori verifiche sono stati utilizzati anche gli idrogrammi idrologici (ovvero senza tener conto degli effetti idraulici di propagazione e laminazione della piena) alla sezione di interesse, in corrispondenza del nuovo viadotto ferroviario, anch’essi forniti dall’Autorità di Bacino (vedi Figura 3).

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	12

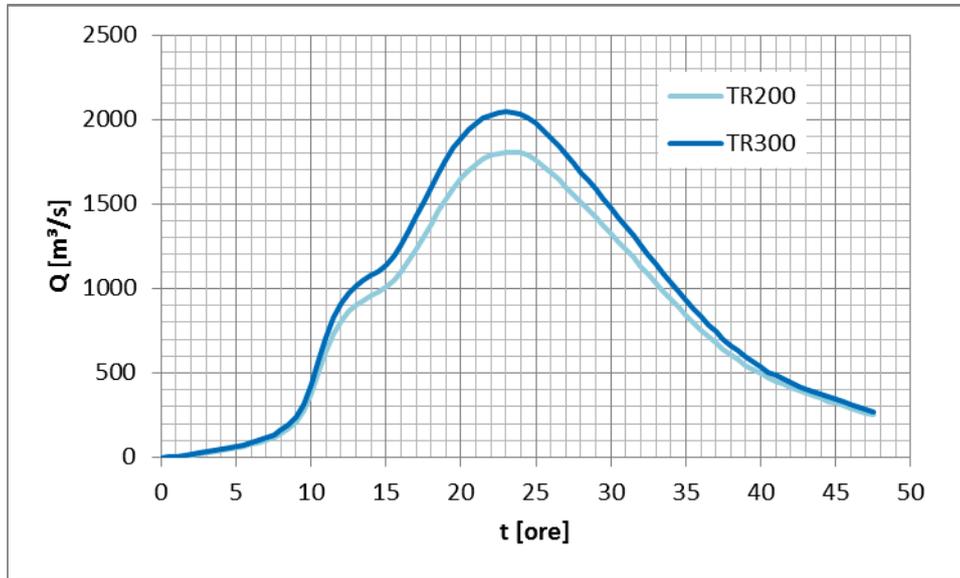


Figura 3 – Idrogrammi di piena del fiume Biferno alla sezione in corrispondenza del nuovo viadotto ferroviario (fonte: Autorità di Bacino)

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A.R.L.	MANDANTI HYpro	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
		Relazione Idraulica	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC RI	OPERA 7 DISCIPLINA ID 00 02			PROGR 101

4 EVOLUZIONE GEO-MORFOLOGIA DELL'AVEO DEL BIFERNO

Come evidenziato da numerosi studi geomorfologici (Aucelli & Roskopf 2000; Surian & Rinaldi 2003; Aucelli et al. 2009b), nel corso degli ultimi 50 anni la maggior parte dei corsi d'acqua italiani ha subito rapide e consistenti variazioni morfologiche e piano altimetriche del proprio alveo fluviale. Nella quasi totalità dei casi, si tratta di fenomeni di restringimento dell'alveo fluviale e della pianura alluvionale, oltre che di abbassamento del fondo del letto (Aucelli et al. 2009b; Ziliani & Surian 2012; Scorpio et al. 2015).

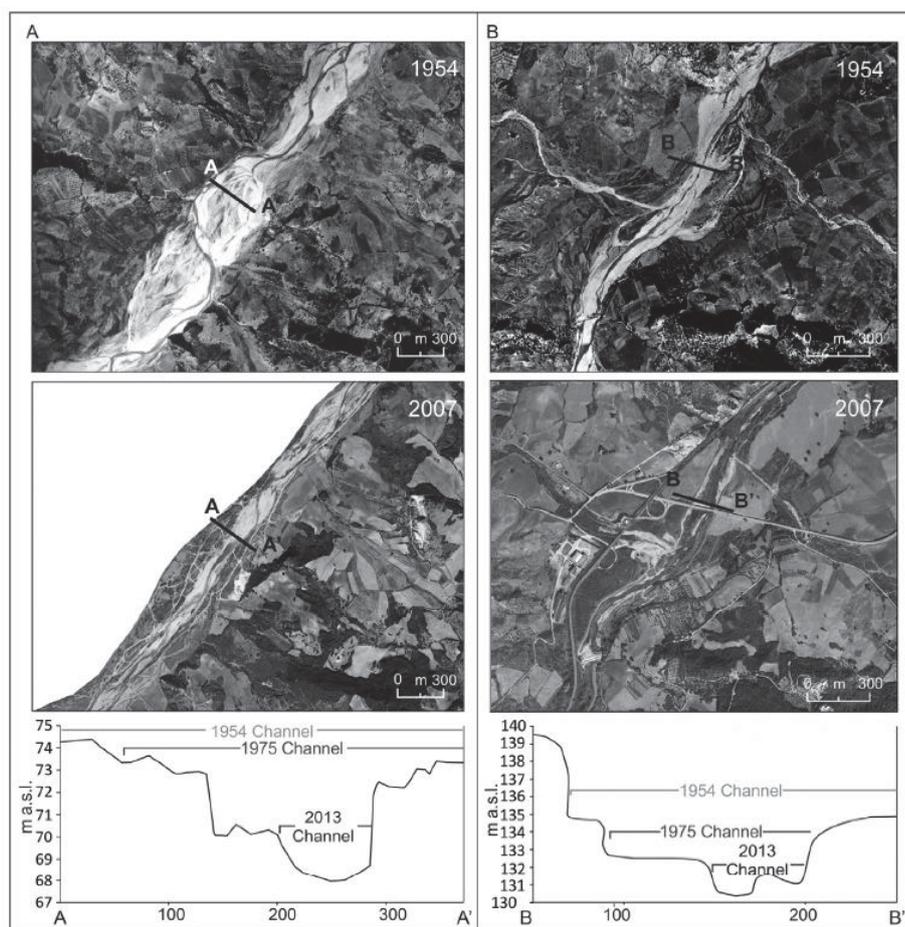


Figura 4 – Sezioni trasversali mostranti l'incisione del canale fluviale durante il periodo compreso tra il 1954 e il 2013 (da Scorpio et al. 2015): a) Fiume Trigno; b) Fiume Biferno.

La linea ferroviaria in fase di progettazione attraversa il basso corso del Fiume Biferno, estendendosi completamente a valle dell'invaso artificiale di Guardialfiera. Questa tratta ferroviaria si sviluppa per circa 22 km in direzione sud-ovest/nord-est fino a raggiungere la costa adriatica. Questa porzione di fondovalle è caratterizzata dalla presenza di quattro

MANDATARIA HUB <small>INGEGNERIA</small> <small>CONSORCIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A.R.L.</small>	MANDANTI HYpro	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
		Relazione Idraulica	<small>COMMESSA</small> LI0B	<small>LOTTO</small> 02	<small>FASE</small> E	<small>ENTE</small> ZZ	<small>TIPO DOC</small> RI	<small>OPERA 7 DISCIPLINA</small> ID 00 02			<small>PROGR</small> 101

livelli terrazzati che circondano l'attuale corso del fiume e la sua pianura alluvionale correlata (come documentato da Aucelli et al. 2009b e Roskopf & Scorpio 2013).

Le analisi morfologiche effettuate su questa zona hanno evidenziato che il tratto situato a monte (noto come tratto A nella figura 5), compreso tra la diga di Guardialfiera e la foce del Vallone delle Tortore, situata circa 2 km a monte della confluenza tra il Fiume Biferno e il Torrente Cigno, è stato soggetto alle modifiche morfologiche più significative negli ultimi decenni. Queste modifiche sono state principalmente causate dalla costruzione dell'invaso artificiale (come descritto da Aucelli et al. 2009b).

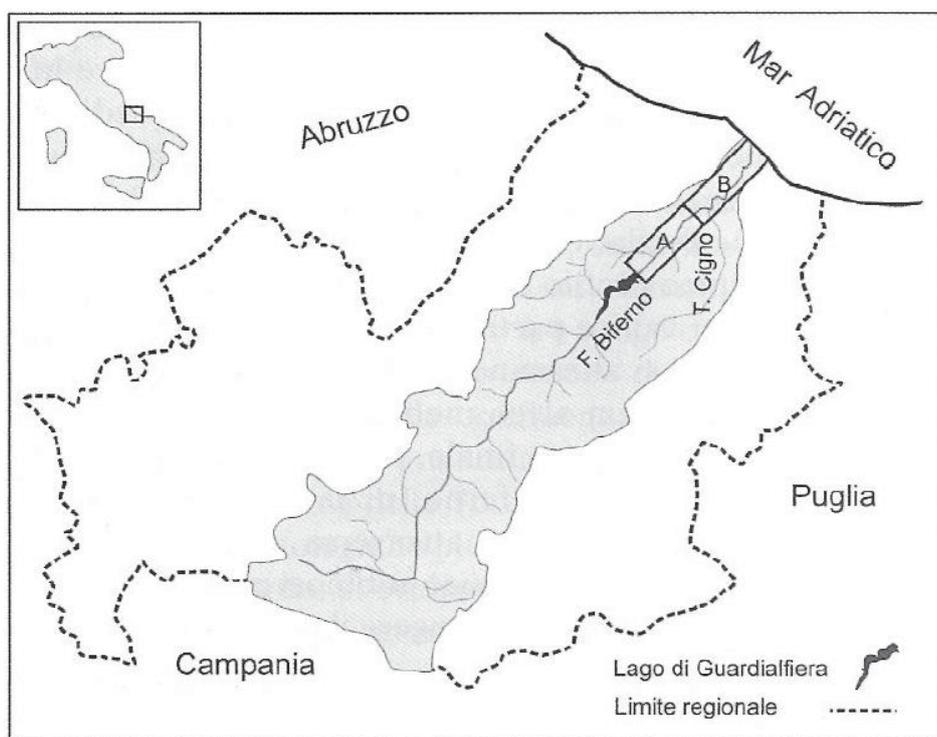


Figura 5 – Inquadramento del bacino idrografico del Fiume Biferno

Il tratto nord-occidentale del fondovalle, compreso tra lo sbocco del Vallone delle Tortore e la costa adriatica (tratto B in fig. 5) e sul quale ricade l'attraversamento in progetto, è stato invece caratterizzato da una evoluzione morfologica poco evidente nel corso degli ultimi decenni (Aucelli et al. 2009b), in quanto conserva una morfologia d'alveo di tipo meandriforme con canale monocursale a media sinuosità e subisce delle variazioni planimetriche molto limitate (Aucelli et al. 2009b; Roskopf & Scorpio 2013). Tra il 1869 e il

	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	15

1954 le variazioni morfologiche consistono essenzialmente nella formazione e nell'accentuazione di alcune anse di meandro, come quella posta immediatamente a valle della confluenza col Torrente Tentillo (Aucelli et al. 2009b). La relativa mobilità dell'alveo in questo periodo è testimoniata dai numerosi interventi di bonifica, come la realizzazione di argini lungo il Biferno, realizzati all'inizio del 1900 per proteggere il tratto terminale di fondovalle dalle frequenti inondazioni (Aucelli et al. 2009b).

Dopo il 1954, l'ansa destra che separa i due meandri subisce un taglio parziale prima con la riattivazione di un canale secondario (chute cut-off) e successivamente con l'abbandono definitivo dell'originario canale principale (fig. 6C) (Aucelli et al. 2009b). Tra il 1954 e il 1977 avviene anche il taglio artificiale del meandro di Drizzagno, in sinistra idrografica del Fiume Biferno, nella zona industriale di località Rivolta del Re (Aucelli et al. 2009b). L'evoluzione morfologica dell'alveo è stata accompagnata da un notevole restringimento sia dell'alveo attivo che della piana alluvionale, con un approfondimento della linea di fondo pari a 4-5 m (Aucelli et al. 2009b; Roskopf & Scorpio 2013), come testimoniato dai terrazzi di I e II ordine che già nel 1954 costituivano delle superficie terrazzate.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	16

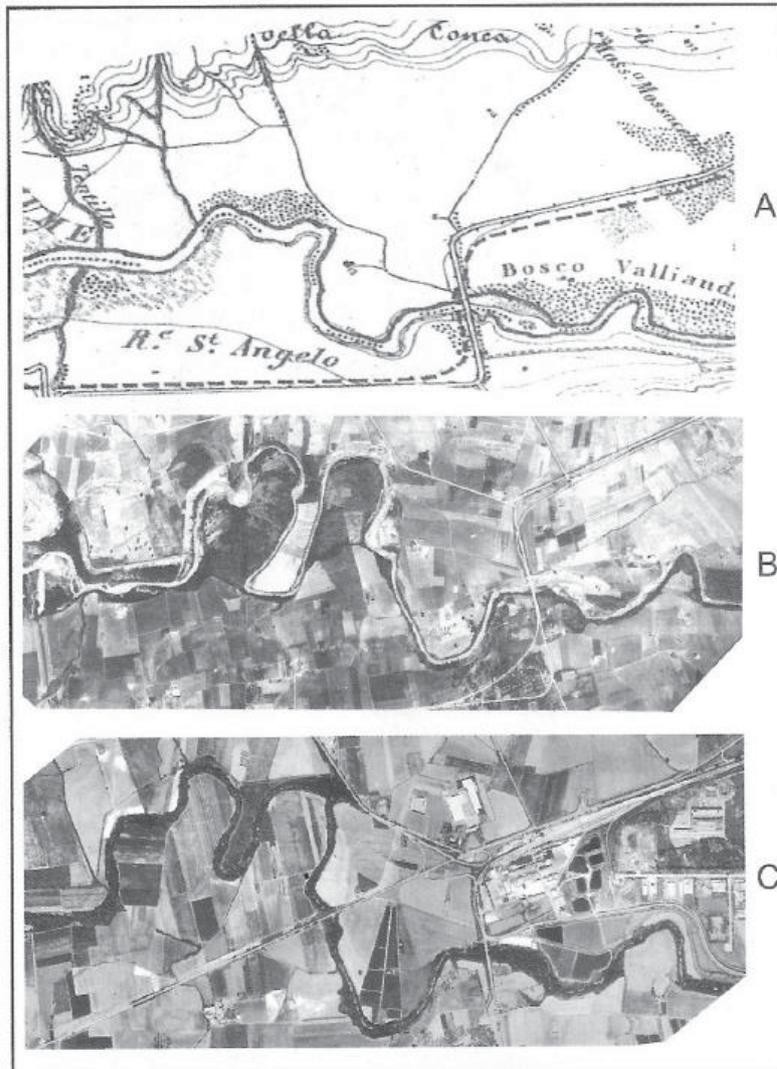


Figura 6 – Evoluzione del doppio meandro posto a valle della confluenza del torrente Tentillo dal 1869 (A) al 1954 (B) e al 1992 (C)

Per poter verificare in maniera puntuale e dettagliata l'evoluzione recente del Biferno in corrispondenza dell'attraversamento in progetto, è stata condotta un'analisi multitemporali su foto aeree e ortofoto di sette differenti voli. Le foto spaziano dal 1954 al 2012 e sono sintetizzate nella tabella seguente.

Volo	Scala	Strisciata	Fotogrammi
Volo Base 1954 (I.G.M.)	1:33.000	125	4334-4336
		126	4414-4416
Volo 1988-1989 (ortofoto)	1:33.000		

MANDATARIA  <small>CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A.R.L.</small>	MANDANTI 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
		Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR
	LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D

Volo	Scala	Strisciata	Fotogrammi
Volo Regione Molise 1992	1:13.000	8-41	204-206/59-61
Volo Italia Alta Quota 1994 (ortofoto)	1:75.000		
Volo 2000	1:5.000		
Volo Regione Abruzzo 2006 (ortofoto)	1:5.000		
Volo 2012	1:5.000		

Tabella 1 – Sintesi delle foto aeree e delle ortofoto utilizzate per l'analisi multitemporale dei principali sistemi fluviali della zona di intervento

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	18

Analisi multitemporale del Fiume Biferno

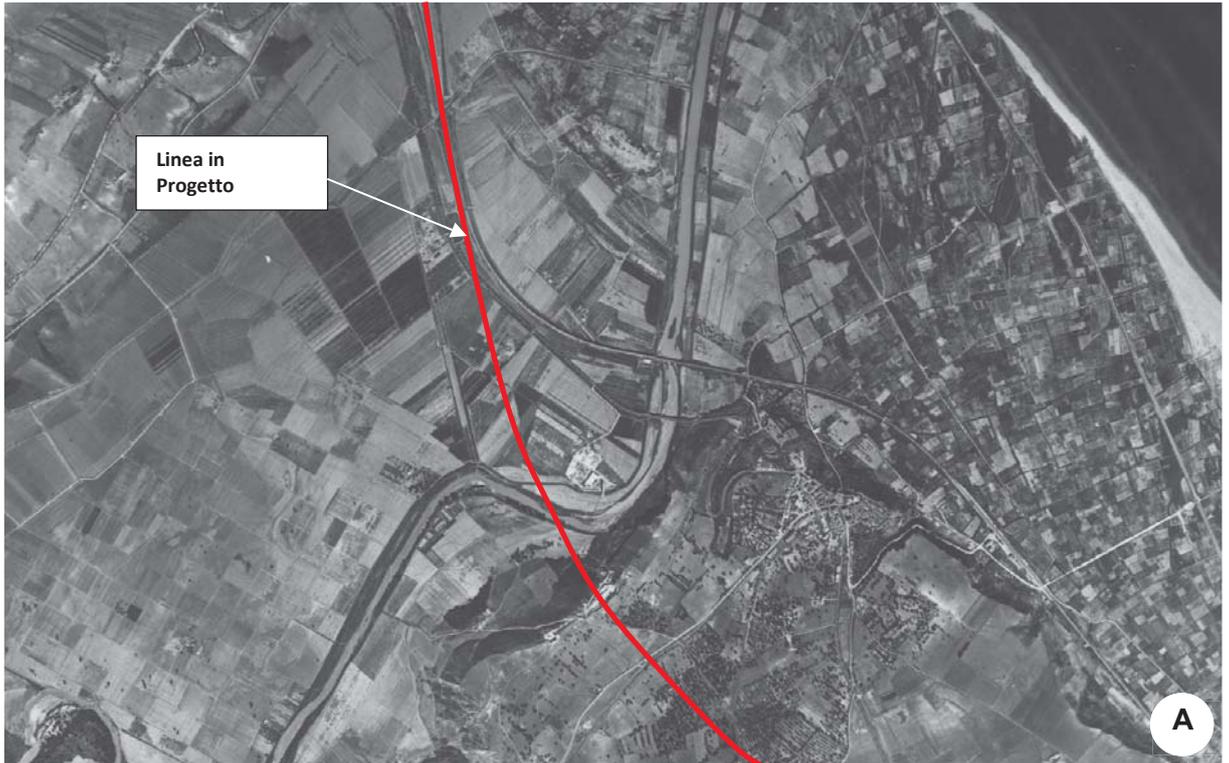


Figura 7 – A) Foto aerea 1954, B) Ortofoto 1988 (<http://www.pcn.minambiente.it/viewer/>).

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	19

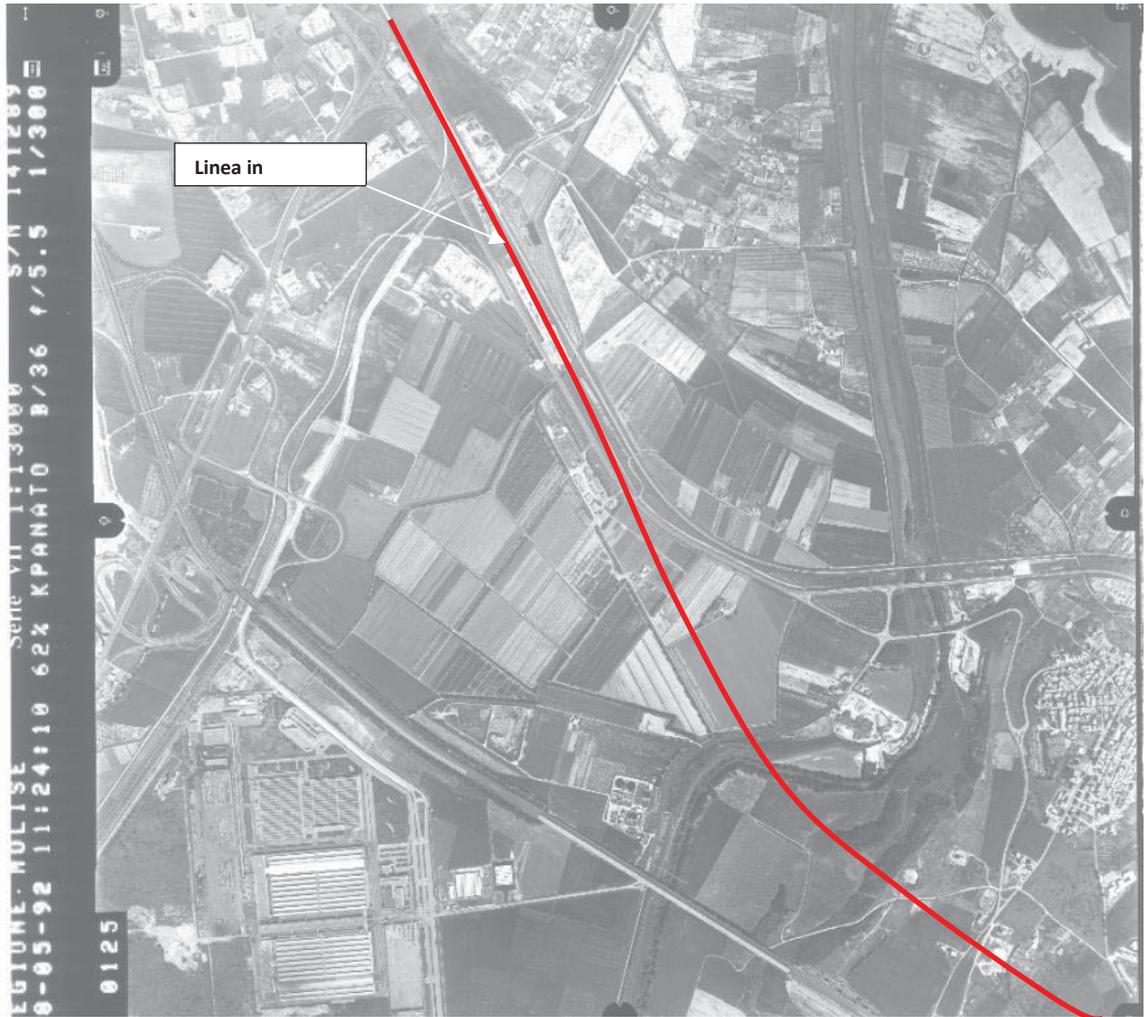


Figura 8 – Foto aerea 1992.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	20

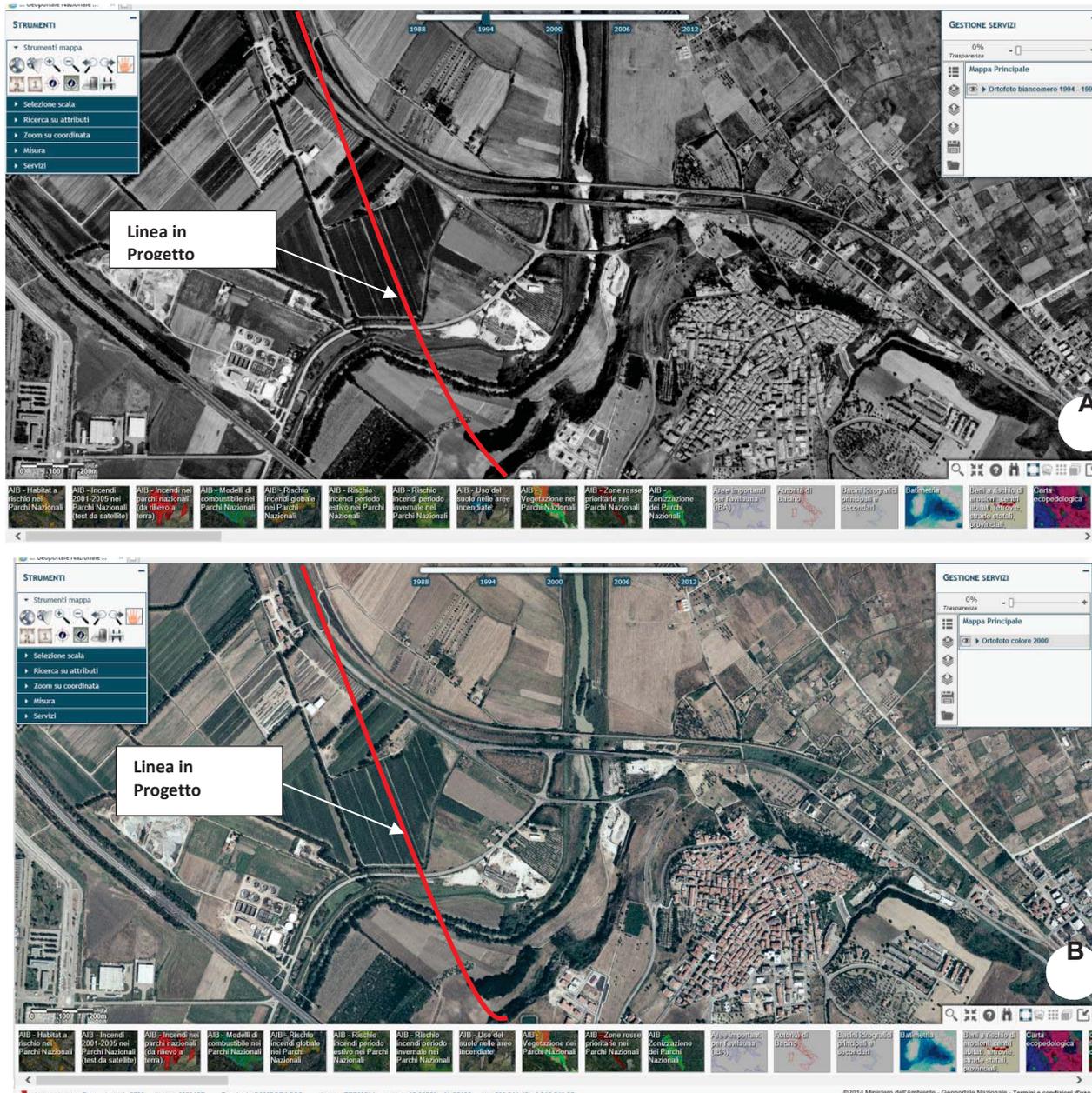


Figura 9 – A) Ortofoto 1994 (<http://www.pcn.minambiente.it/viewer/>), B) Ortofoto 2000 (<http://www.pcn.minambiente.it/viewer/>).

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	21



Figura 10 – A) Ortofoto 2006 (<http://www.pcn.minambiente.it/viewer/>), B) Ortofoto 2012 (<http://www.pcn.minambiente.it/viewer/>).

La bassa mobilità dell'alveo principale è in accordo con le informazioni geomorfologiche presenti in letteratura (Aucelli et al. 2009b; Roskopf & Scorpio 2013) e possono pertanto essere considerati stabili.

Se si osserva la mappa geomorfologica, risulta che nella zona dell'attraversamento, l'impronta dei terrazzi fluviali più recenti è più ridotta di quelli precedenti e che l'ingombro dell'alveo attivo al 2007 coincideva praticamente con quello rilevato al 1954 (Figura 11).

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	22

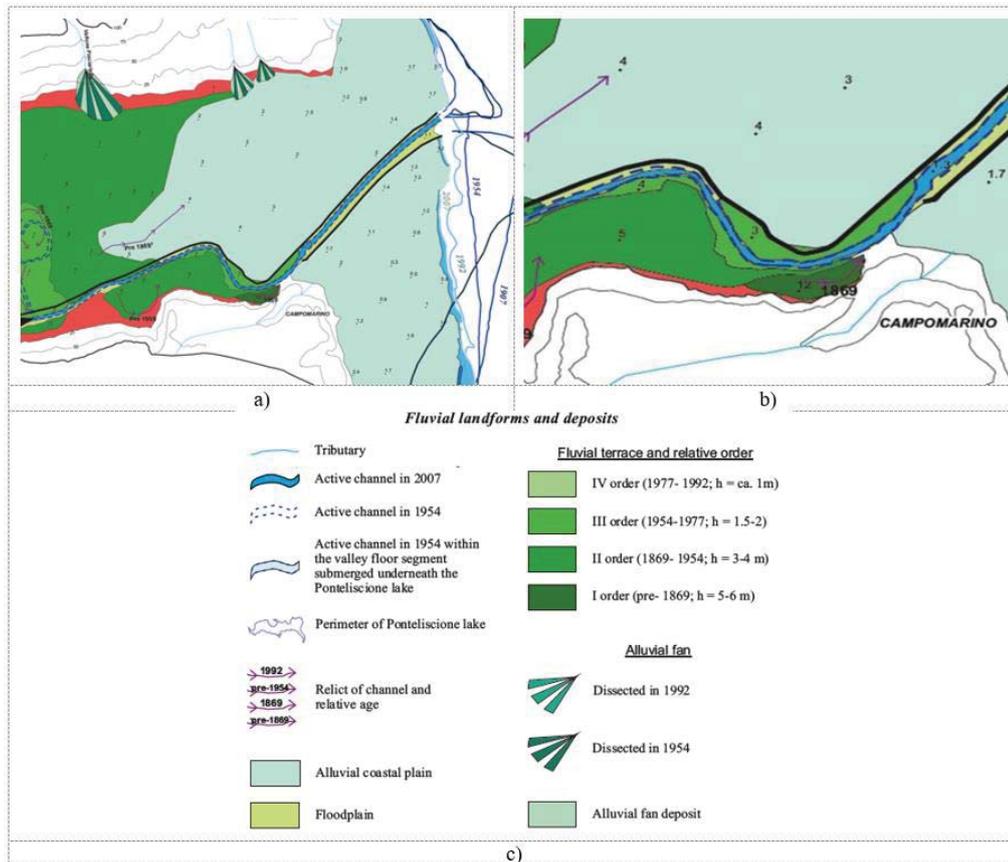


Figura 11 – Carta geomorfologica della foce del Fiume Biferno (da Roskopf & Scorpio 2013): a) carta geomorfologica del basso corso del Fiume Biferno; b) dettaglio geomorfologico della zona di interesse; c) legenda geomorfologica.

Da quanto esposto risulta evidente che i settori di piana alluvionale del Fiume Biferno sono attualmente caratterizzati da una debole tendenza evolutiva, connessa sia alle caratteristiche climatiche e geomorfologiche dell'area che alla forte attività antropica sviluppatasi sul territorio a partire dai primi anni del 1900. In particolare, le numerose opere di regimazione idraulica e di difesa spondale realizzate in questo settore di territorio hanno permesso di mantenere praticamente invariato l'andamento del suddetto corso d'acqua in tutti i settori di territorio prossimi all'attuale linea di costa. Allo stato attuale, pertanto, gli unici fenomeni fluviali che si registrano nella piana alluvionale sono connessi all'erosione puntuale delle sponde e a sporadici fenomeni di alluvionamento delle zone più depresse, mentre non si registrano importanti fenomeni erosivi o marcate variazioni di forma del fondovalle e dei meandri che lo costituiscono.

<p>MANDATARIA HUB ENGINEERING <small>CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A.R.L.</small></p> <p>MANDANTI HYpro</p>	<p>LINEA PESCARA – BARI</p> <p>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA</p> <p>LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</p>										
<p>Relazione Idraulica</p>	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
	LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	23

Le condizioni di stabilità dell'alveo saranno ulteriormente migliorate a seguito degli interventi di realizzazione di argini di contenimento, in destra e sinistra idraulica, e di risagomatura dell'alveo di magra del fiume (Progetto definitivo primo lotto della Regione Molise) previsti a cura di altra committenza.

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	24

5 MODELLAZIONE IDRAULICA BIDIMENSIONALE

La modellazione del comportamento idrodinamico delle acque del Fiume Biferno è stata sviluppata per un tratto lungo circa 15 km, compreso tra il ponte Tanassi e la foce. Questo è stato realizzato utilizzando un modello di calcolo bidimensionale basato sui volumi finiti, in grado di gestire situazioni di flusso variabile. Il software scelto per implementare questo modello è stato HECRAS 6.3.1, che offre la possibilità di eseguire calcoli sia mono-bidimensionali che bidimensionali puri.

Data la forma caratteristica del fiume, con una sezione trasversale ampia e ben definita all'interno di una pianura con chiari cambiamenti morfologici, è stata presa la decisione di adottare un modello bidimensionale. Questa modellazione bidimensionale del corso d'acqua, utilizzando le equazioni del moto variabile, consente di rappresentare con precisione la propagazione delle onde di piena nell'asta fluviale e nella pianura circostante.

Ciò permette di modellare con accuratezza il comportamento del flusso in presenza di bruschi restringimenti o allargamenti del fiume, così come di curve pronunciate. Inoltre, consente di rappresentare in dettaglio la propagazione del flusso attraverso attraversamenti o ostacoli morfologici, grazie all'uso di elementi di calcolo specifici che discretizzano tali manufatti.

La rappresentazione bidimensionale del campo di velocità consente anche di analizzare l'evoluzione delle aree allagate causate dalla propagazione delle onde di piena all'interno dell'area studiata. Durante il processo, sono state condotte diverse simulazioni numeriche, con l'imposizione di portate variabili nel tempo alla sezione di ingresso del modello. Questo approccio consente di valutare il comportamento del fiume in diverse condizioni di flusso e di studiare gli effetti delle onde di piena sulla zona circostante.

5.1 Il modello numerico

Il software utilizzato per l'implementazione del modello idraulico è HEC RAS 6.3.1 sviluppato dal Corpo degli ingegneri dell'Esercito U.S.A. presso l'Hydrologic Engineering Centre (HEC) utilizzato per la modellazione mono e bidimensionale di reti di canali naturali e artificiali (River Analysis System, RAS).

Il software HEC RAS permette di:

- effettuare simulazioni in condizioni stazionarie (steady flow) in corrente lenta, veloce o mista, calcolando i corrispettivi profili di corrente;

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	25

- effettuare simulazioni in condizioni non stazionarie (unsteady flow); - effettuare simulazioni per la classificazione e quantificazione di processi di idrodinamica del trasporto solido relativi a fenomeni di erosione o deposizione
- generalizzata e/o localizzata.

Con la versione di HEC RAS 6.3.1 vi è la possibilità di effettuare simulazioni idrauliche bidimensionali all'interno dell'analisi in regime di moto vario. Si possono eseguire simulazioni secondo modelli sia monodimensionali e bidimensionali in moto vario, sia monodimensionali integrati con modelli 2D nelle aree inondabili.

La rappresentazione bidimensionale del moto si basa sulla risoluzione delle shallow water equations (o SWE). Le ipotesi alla base per la soluzione delle SWE sono che il flusso sia orizzontale e che la variazione della velocità nella verticale rispetto alla direzione del moto sia trascurabile. Inoltre le equazioni sono sviluppate accettando a priori l'ipotesi di idrostaticità del gradiente delle pressioni lungo la direzione verticale. La formulazione delle SWE utilizzate nel software HEC RAS 6.3.1 è riassunta di seguito:

Conservazione della massa:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + u \frac{dh}{\partial x} + v \frac{dh}{\partial y} + q = 0$$

Conservazione della quantità di moto

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

(direzione x)

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

(direzione y)

in cui H è la cosiddetta "water surface elevation" ($H(x,y,t) = z(x,y) + h(x,y,t)$); h, il tirante idrico della corrente; u, v le componenti della velocità lungo le direzioni x e y; q, la portata immessa per unità di superficie; g, l'accelerazione di gravità; v_t , il coefficiente di viscosità cinematica turbolenta; c_f , il coefficiente di attrito sul fondo; f, il parametro di Coriolis.

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

	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	26

e rapidly varied flow). Le equazioni di moto bidimensionale sono risolte mediante un algoritmo implicito ai volumi finiti. L'algoritmo di risoluzione consente di utilizzare step temporali di calcolo maggiori rispetto ai metodi espliciti. L'approccio ai volumi finiti è più affidabile in termini di stabilità e robustezza rispetto alle tradizionali tecniche differenziali di soluzione basate su metodi agli elementi finiti.

Il software è progettato per gestire mesh computazionali sia strutturate che non strutturate. Questo significa che le celle computazionali possono assumere forme diverse, tra cui triangoli, quadrati, rettangoli e persino elementi con cinque o sei facce. La maglia può essere una combinazione di queste diverse forme e dimensioni delle celle. Il contorno esterno della mesh computazionale è definito da un poligono.

All'interno del software HEC-RAS, le caratteristiche delle celle e delle loro facce sono influenzate dai dati relativi al terreno sottostante, noti come Digital Terrain Model (DTM). Ogni cella nella mesh computazionale viene pre-elaborata per creare grafici dettagliati delle proprietà idrauliche basate sul terreno circostante. Inoltre, ogni faccia delle celle viene trattata come una sezione trasversale, in cui vengono calcolate le variabili idrauliche pertinenti.

Questo approccio consente agli utenti di utilizzare celle di dimensioni diverse senza sacrificare la precisione nella rappresentazione del terreno sottostante, il quale influisce sul movimento del flusso. L'importante vantaggio di questo metodo è la riduzione del numero complessivo di calcoli necessari, il che si traduce in tempi di esecuzione più rapidi durante la modellazione.

5.2 Geometria del modello

HECRAS 6.3.1 utilizza mesh non strutturate (con elementi triangolari) per rappresentare il dominio di calcolo bidimensionale.

Le caratteristiche geometriche dell'area di interesse, definita come il dominio di calcolo, sono incorporate nel modello idraulico attraverso una suddivisione del territorio in elementi generalmente poligonali, conosciuti come mesh. La mesh di calcolo ha una risoluzione spaziale variabile, che consente di riflettere in modo accurato la topografia del territorio. Questa risoluzione è sufficientemente precisa per rappresentare sia il corso d'acqua (comprendendo alvei e zone di alluvione), sia i canali secondari e le aree adiacenti potenzialmente soggette ad allagamenti. In particolare, la mesh è stata generata utilizzando una specifica funzione del software che suddivide il territorio in elementi più piccoli nelle aree con maggiori variazioni altimetriche.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	27

Nella Figura 12 è illustrata l'area di interesse in termini di estensione del dominio di calcolo. Questo dominio inizia dalla sezione di monte presso il ponte Tanassi e copre un'area di circa 23 km². Questo territorio comprende l'intero corso del Fiume Biferno all'interno del tratto analizzato, che si estende per circa 15 km. La larghezza del dominio di calcolo nella valle varia da 1.5 a 3.5 km.



Figura 12 – Inquadramento territoriale dell'area modellata con indicata la viabilità stradale principale.

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A.R.L.	MANDANTI HYpro	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
		Relazione Idraulica	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC RI	OPERA 7 DISCIPLINA ID 00 02			PROGR 101

L'area di maggiore interesse ai fini della modellazione è quella nel tratto di valle, comprendente la linea ferroviaria: sono presenti quattro attraversamenti (Figura 13), inseriti nel modello sulla base delle geometrie risultanti dai rilievi di dettaglio.



Figura 13 – Attraversamenti del Fiume Biferno

Nell'area di studio sono presenti diversi tombini di trasparenza dei rilevati. In Figura 14 sono riportate le posizioni dei tombini di trasparenza presenti allo stato attuale al di sotto dei rilevati della linea ferroviaria e della SS 16. Di tali elementi si è tenuto conto nel modello inserendo appositi elementi lineari con le relative dimensioni trasversali delle aperture.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	29

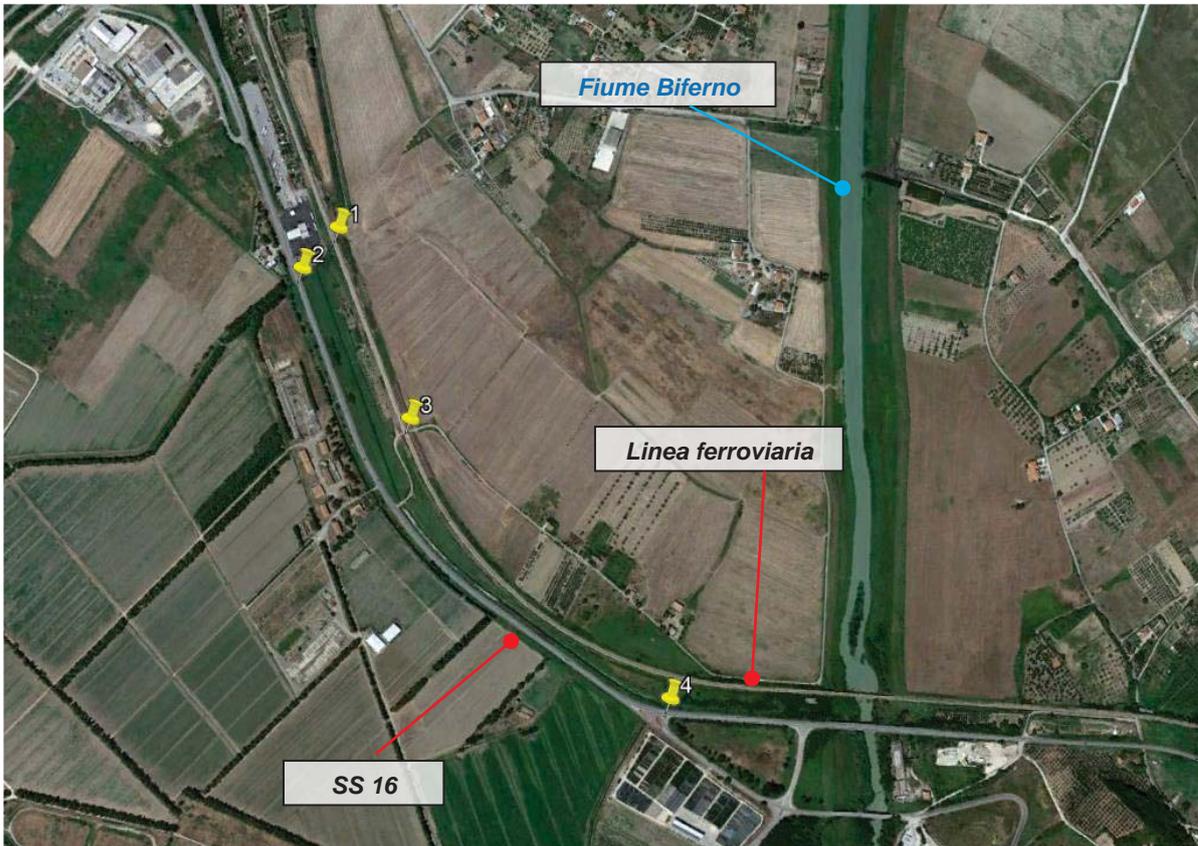


Figura 14 – Tombini di attraversamento minori.

Il profilo altimetrico dell'area di calcolo si basa sull'utilizzo di un rilievo LIDAR condotto dal Ministero dell'Ambiente, la cui risoluzione è superiore al metro. Nella Figura 15 è presente una rappresentazione del Digital Terrain Model (DTM) dell'area di studio, con un ingrandimento di una parte in cui è possibile notare un elevato livello di dettaglio. Questo dettaglio è adeguato a simulare accuratamente il comportamento idraulico dell'area di studio.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	30

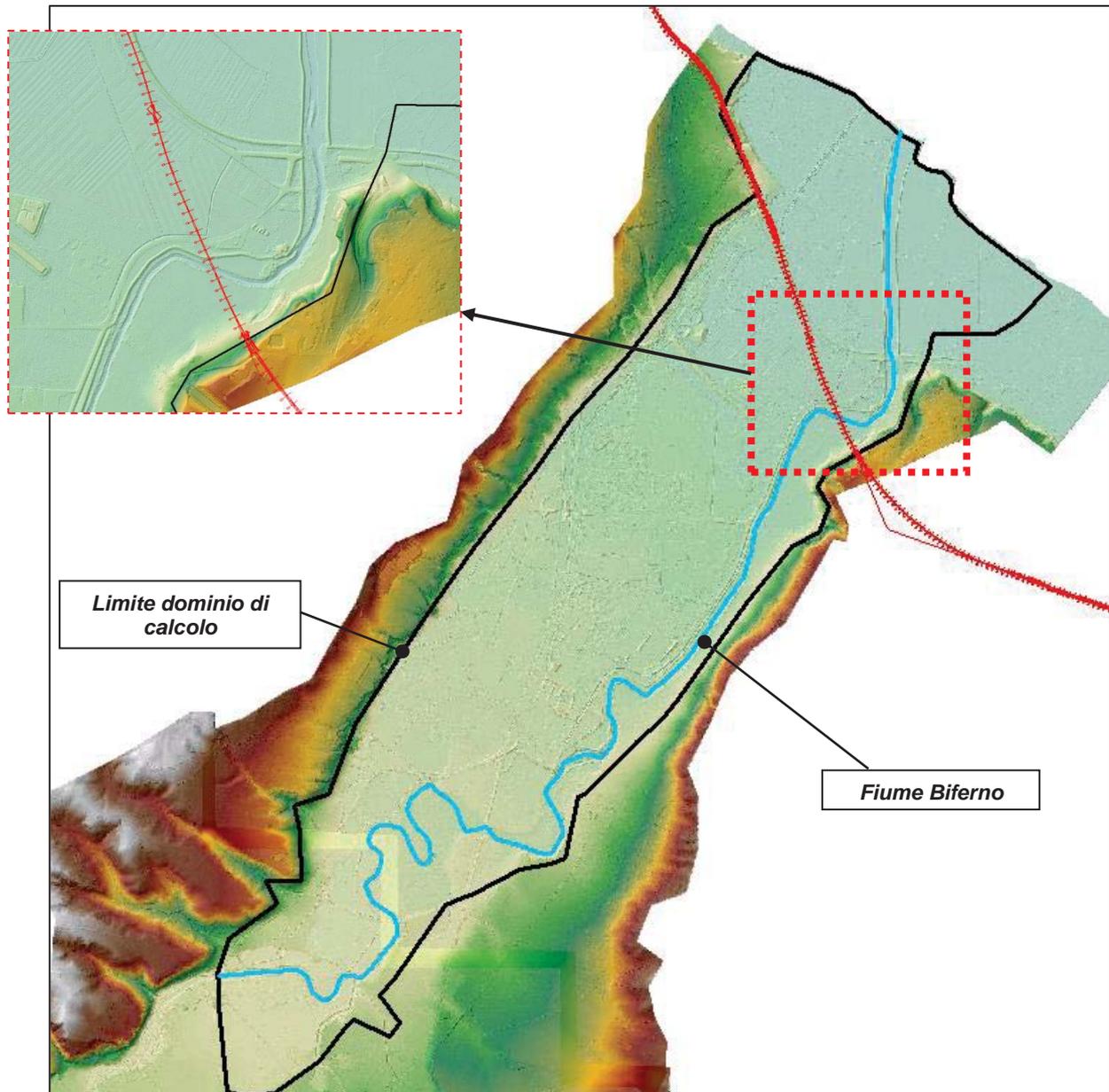


Figura 15 – DTM di riferimento

L'alveo di magra del Fiume Biferno è stato rappresentato con particolare accuratezza: è stata definita una superficie che ricostruisce nel dettaglio l'alveo inciso integrando i dati LIDAR con le sezioni di rilievo dell'Autorità di Bacino; per lo scenario "post operam AdB" sono state invece utilizzate, per integrare le informazioni del LIDAR, le sezioni degli interventi di

MANDATARIA HUB ENGINEERING <small>CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A.R.L.</small>	MANDANTI HYpro	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
		Relazione Idraulica	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC RI	OPERA 7 DISCIPLINA ID 00 02			PROGR 101

ripristino dell'efficienza idraulica lungo l'asta principale del fiume Biferno (progetto di primo lotto della Regione Molise).

Il mesh di calcolo, rappresentata in Figura 16, è costituito da circa 517'000 elementi. La creazione del mesh è stata sviluppata in modo tale che le dimensioni degli elementi che definiscono l'alveo siano comprese tra 4 e 25 m², mentre nelle aree allagabili siano comprese tra 25 m² e 400 m². Sono stati effettuati ulteriori infittimenti del mesh in corrispondenza di tombini e sottovia nel tratto di valle, dove la dimensione minima degli elementi è pari a 1 m² (Figura 16).

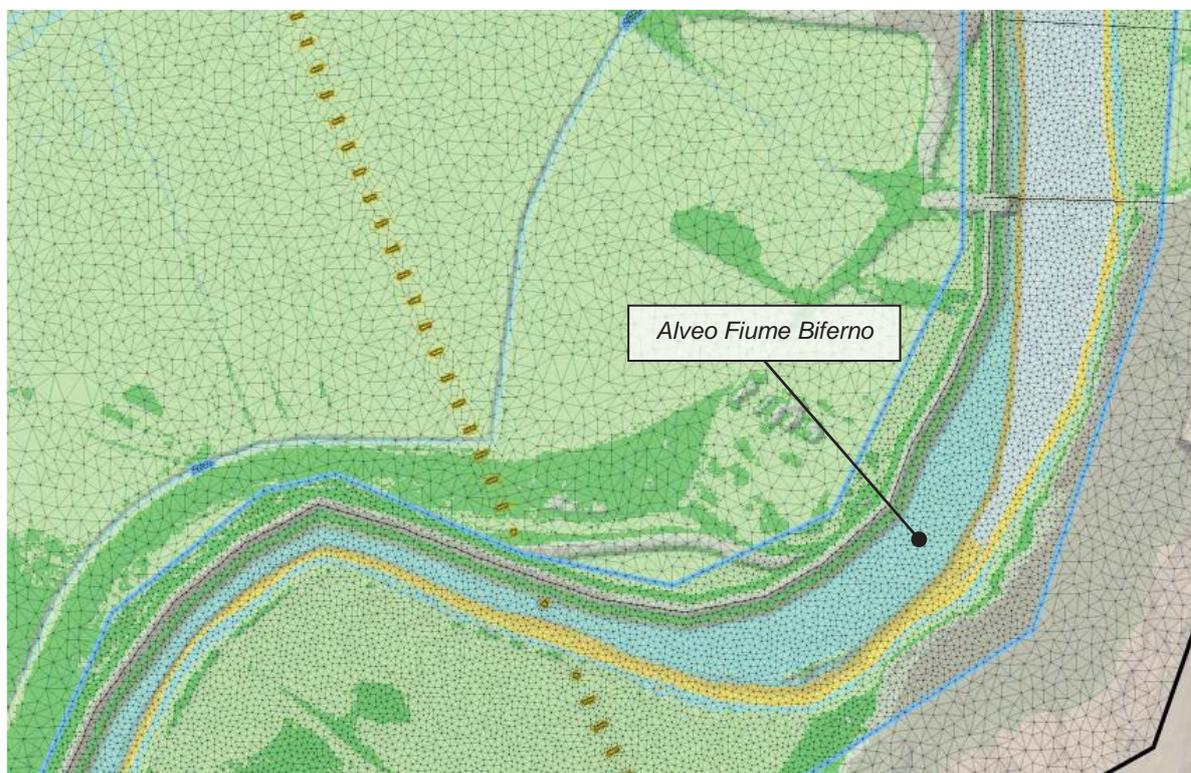


Figura 16 – Estratto della mesh di calcolo con sovrapposizione del DTM

Il dominio di calcolo risulta sufficientemente esteso verso monte per non introdurre, rispetto all'area di maggiore interesse nella presente analisi, degli effetti di bordo. In particolare, il dominio si estende da Ponte Tanassi e comprende il t. Cigno, come richiesto dall'Autorità di Bacino. Sono state quindi effettuate delle simulazioni preliminari volte ad individuare l'espansione massima delle aree allagabili e definire un dominio di calcolo che le comprende.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno del modello:

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	32

- sono stati inseriti gli idrogrammi di piena nelle due sezioni di a monte del modello (sul f. Biferno e sul t. Cigno);
- a valle lungo la linea di costa è stato imposto un livello di marea costante, pari a 0.5 m s.l.m.;
- lungo il perimetro del dominio di calcolo lato campagna, al fine di non bloccare i flussi idrici generati dall'espansione dell'allagamento è stata applicata una condizione di tipo "normal condition", ovvero il flusso che raggiunge la linea di confine esce definitivamente dal dominio di calcolo.

5.3 Configurazioni geometriche

In base a quanto indicato dalle NTA del Piano per l'Assetto Idrogeologico del Bacino del Fiume Biferno, che affermano che è necessario effettuare calcoli per determinare le condizioni di flusso in diverse situazioni, ovvero nello stato attuale, nello stato progettuale e durante le fasi intermedie, la presente analisi ha considerato e simulato quattro diverse configurazioni geometriche ante e post operam, le quali saranno descritte di seguito.

1) **Ante operam 1**: Rappresenta la condizione attuale dei siti e delle infrastrutture ferroviarie ed idrauliche, senza interventi previsti sulla tratta ferroviaria esistente. Per quanto concerne la geometria dell'alveo fluviale, si è fatto riferimento alle sezioni topografiche acquisite durante la fase di elaborazione del Progetto Definitivo per la sistemazione idraulica del fiume Biferno, Lotto I, condotto dalla Regione Molise.

2) **Ante operam 2**: come per la configurazione precedente non sono presenti interventi sulla linea ferroviaria. Vengono inseriti all'interno del modello numerico le opere di sistemazione del Fiume Biferno descritte all'interno del progetto definitivo primo lotto della Regione Molise. Tali interventi di futura realizzazione, consistono in (si veda Figura 17):

1. Realizzazione argini di contenimento, in destra e sinistra idraulica;
2. Risagomatura dell'alveo di magra del fiume.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	33

INTERVENTI I LOTTO I STRALCIO	
INTERVENTI PUNTUALI	
	Scarico idrovora presidiato
	Scarico presidiato
INTERVENTI LINEARI	
	Interventi di risagomatura dell'alveo
	Opere di contenimento longitudinale - Adeguamenti arginature
	Opere di contenimento longitudinale - Nuove arginature
INTERVENTI I LOTTO	
INTERVENTI PUNTUALI	
	Scarico presidiato
INTERVENTI LINEARI	
	Interventi di risagomatura dell'alveo e creazione scogliere
	Opere di contenimento longitudinali - Adeguamenti arginature
	Opere di contenimento longitudinali - Nuove arginature

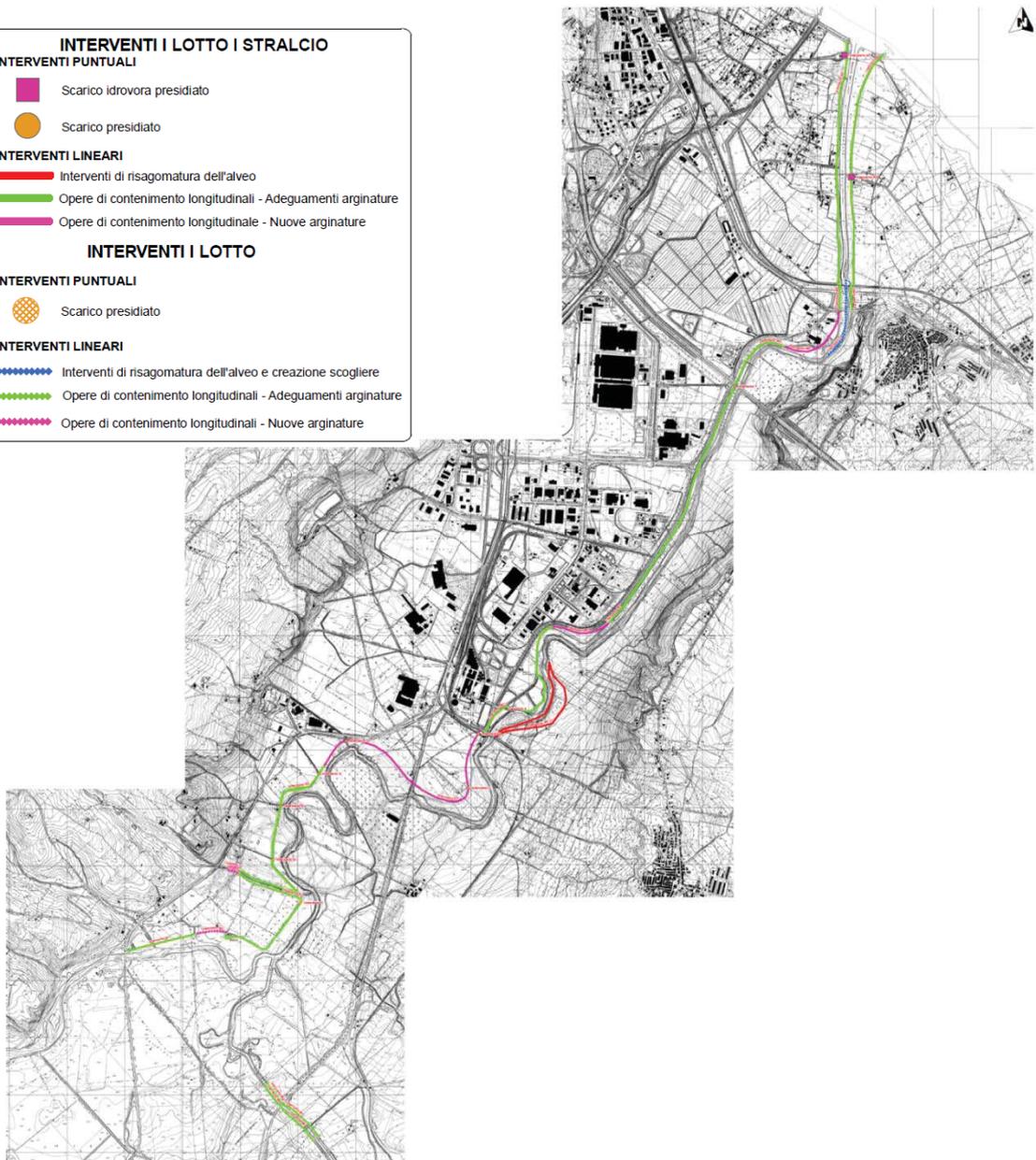


Figura 17 – Configurazione Post operam AdB (fonte: Planimetria con ubicazione interventi di progetto – Tavole D.2).

3) **Post operam 1:** In relazione alla configurazione "ante operam 1", sono stati implementati gli interventi specificati nel progetto definitivo della linea ferroviaria, che principalmente consistono nella realizzazione di nuovi viadotti, nell'adeguamento del tracciato ferroviario e nelle relative infrastrutture connesse.

4) **Post operam 2:** rispetto alla configurazione "ante operam 2", sono stati inseriti gli interventi

<p>MANDATARIA</p>  <p>MANDANTI</p> 	<p>LINEA PESCARA – BARI</p> <p>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA</p> <p>LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</p>										
<p>Relazione Idraulica</p>	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
	LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	34

previsti nel progetto definitivo della linea ferroviaria della configurazione precedente (“post operam 1”).

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A.R.L.	MANDANTI HYpro	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
		Relazione Idraulica	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC RI	OPERA 7 DISCIPLINA ID 00 02			PROGR 101

5.4 Definizione delle scabrezze modello

Per la definizione delle scabrezze dell'area in esame sono stati utilizzati i valori suggeriti all'interno della Normativa di Attuazione del PAI, riportati nella tabella che segue:

Descrizione del corso d'acqua	$K_s [m^{1/3}s^{-1}]$
Alvei naturali con forte presenza di vegetazione arbustiva e arborea, fondo mobile con materiale di grossa pezzatura, alvei in roccia con sporgenze e grossi massi	20-25
Alvei naturali tortuosi con presenza di vegetazione arbustiva e arborea, fondo mobile con sedimenti di media pezzatura	25-30
Alvei naturali rettilinei con scarsa presenza di vegetazione arbustiva e arborea, fondo mobile con sedimenti di piccola pezzatura	30-35
Alvei artificiali inerbiti in assenza di vegetazione arbustiva e arborea	35-40
Alvei artificiali rivestiti in calcestruzzo in assenza di manufatti interferenti con le acqua	40-45

Tabella 2 - Valori di scabrezza secondo le NA del PAI Biferno.

Per l'alveo di magra sono stati assegnati valori tra 0.028 e $0.033 s/m^{1/3}$ (scabrezza di Manning); per le golene invece i coefficienti utilizzati sono $0.033 - 0.04 s/m^{1/3}$; alle aree esterne agli alvei, sono stati assegnati valori di scabrezza variabili sulla base dei dati dell'uso del suolo e delle ortofoto (viabilità, zona industriale, area coltivata, area vegetata, ecc.). La figura seguente rappresenta la mappa delle zone di scabrezza inserite nel modello.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	36

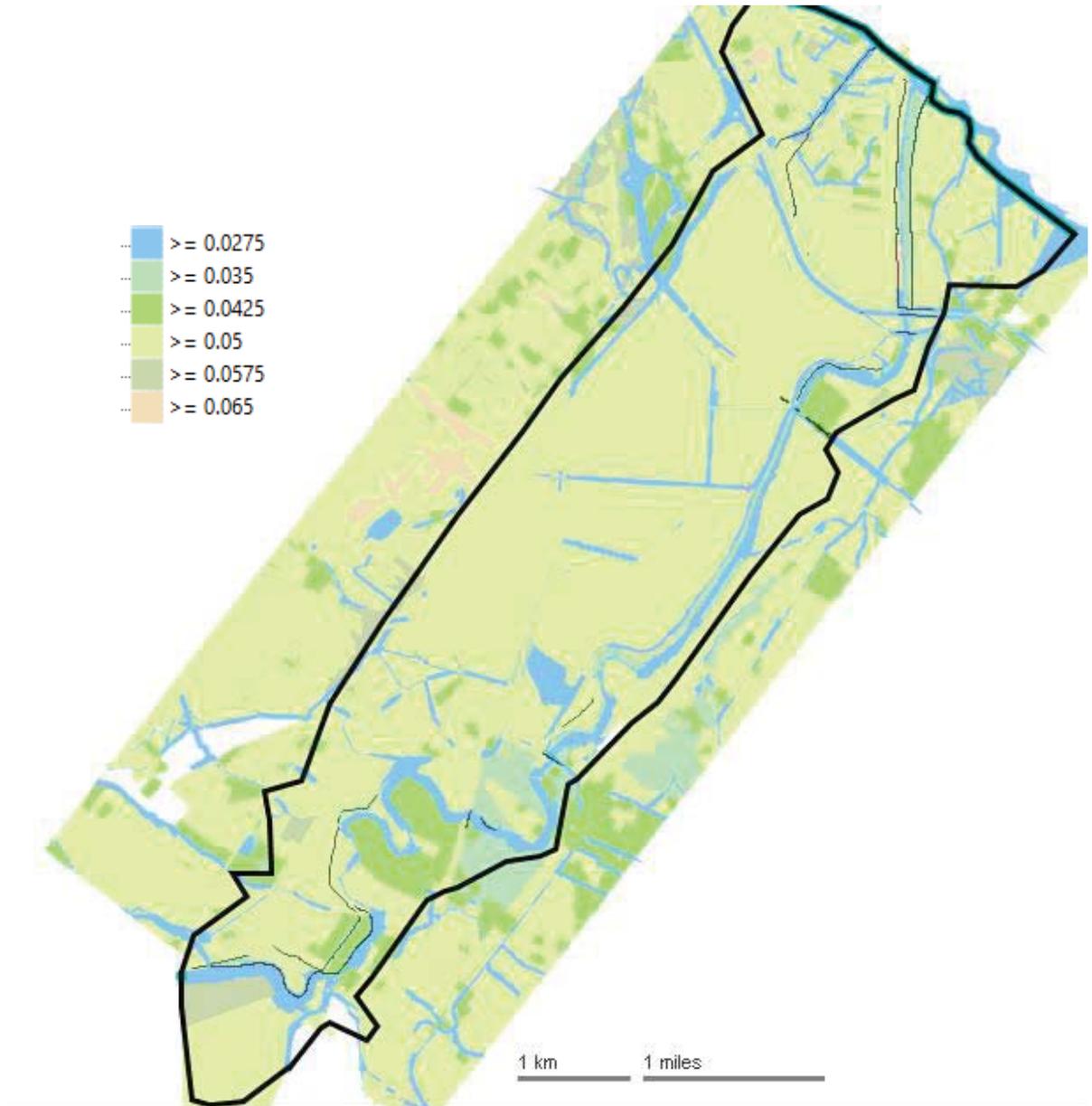


Figura 18 – Mappa delle zone di scabrezza di Manning utilizzata nel modello

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	37

6 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE

Le diverse normative – regolamenti, richiedono di eseguire le verifiche delle opere per i tempi di ritorno:

<i>Normativa</i>	<i>TR richiesto per le verifiche</i>
<i>NTC 2008</i>	<i>≥ 200 anni</i>
<i>NA – PAI Biferno</i>	<i>200 anni – 500 anni</i>
<i>Manuale di progettazione ferroviaria</i>	<i>200 anni</i>

Tabella 3 – Tempi di ritorno richiesti per le verifiche idrauliche.

I risultati delle simulazioni numeriche condotte in questa fase sono documentati nei grafici allegati, i quali contengono planimetrie raffiguranti le aree di possibile esondazione. Tali grafici riportano i dati relativi ai livelli idrici e alle velocità del flusso ottenuti mediante le simulazioni numeriche per eventi di piena con periodi di ritorno di 200 e 300 anni. Nelle predette planimetrie sono evidenziati i risultati ottenuti considerando le quattro diverse configurazioni geometriche precedentemente descritte, ossia "Ante Operam 1" e "Ante Operam 2", così come "Post Operam 1" e "Post Operam 2".

La presente relazione documenta altresì i risultati emersi nei quattro scenari relativi all'evento idrologico con periodo di ritorno quinquennale, tenendo in considerazione le revisioni apportate al manuale di progettazione ferroviaria e le prescrizioni formulate dalle Autorità di Bacino.

6.1 Simulazioni Ante Operam

Nella Figura 19 e nella Figura 20 sono presentati i valori massimi di tiranti idrici e la dimensione delle zone allagate per le configurazioni "Ante Operam 1" e "Ante Operam 2", durante l'evento di piena con un periodo di ritorno di 200 anni.

La configurazione attuale della sezione fluviale (in condizioni Ante-Operam 1) si è dimostrata carente in diversi segmenti, evidenziando l'incapacità di contenere la piena all'interno dei limiti degli argini esistenti, con conseguenti fenomeni di tracimazione in varie zone.

Rispetto alla situazione "Ante Operam 1," che rappresenta lo stato attuale, nel contesto dello scenario "Ante Operam 2", le opere di arginatura previste dal progetto della Regione

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	38

Molise hanno dimostrato di ridurre l'ampiezza delle aree soggette ad allagamento nella pianura del Fiume Biferno, sia in termini di superficie che, soprattutto, di livello dell'acqua. La Figura 21 evidenzia i tratti in cui gli argini della configurazione "Ante Operam 2" tracciati secondo le specifiche del progetto della Regione Molise vengono superati, ossia dove si verificano situazioni di tracimazione. Questi punti di tracimazione sono situati nelle vicinanze degli attraversamenti della SP84 dir e della SP87.

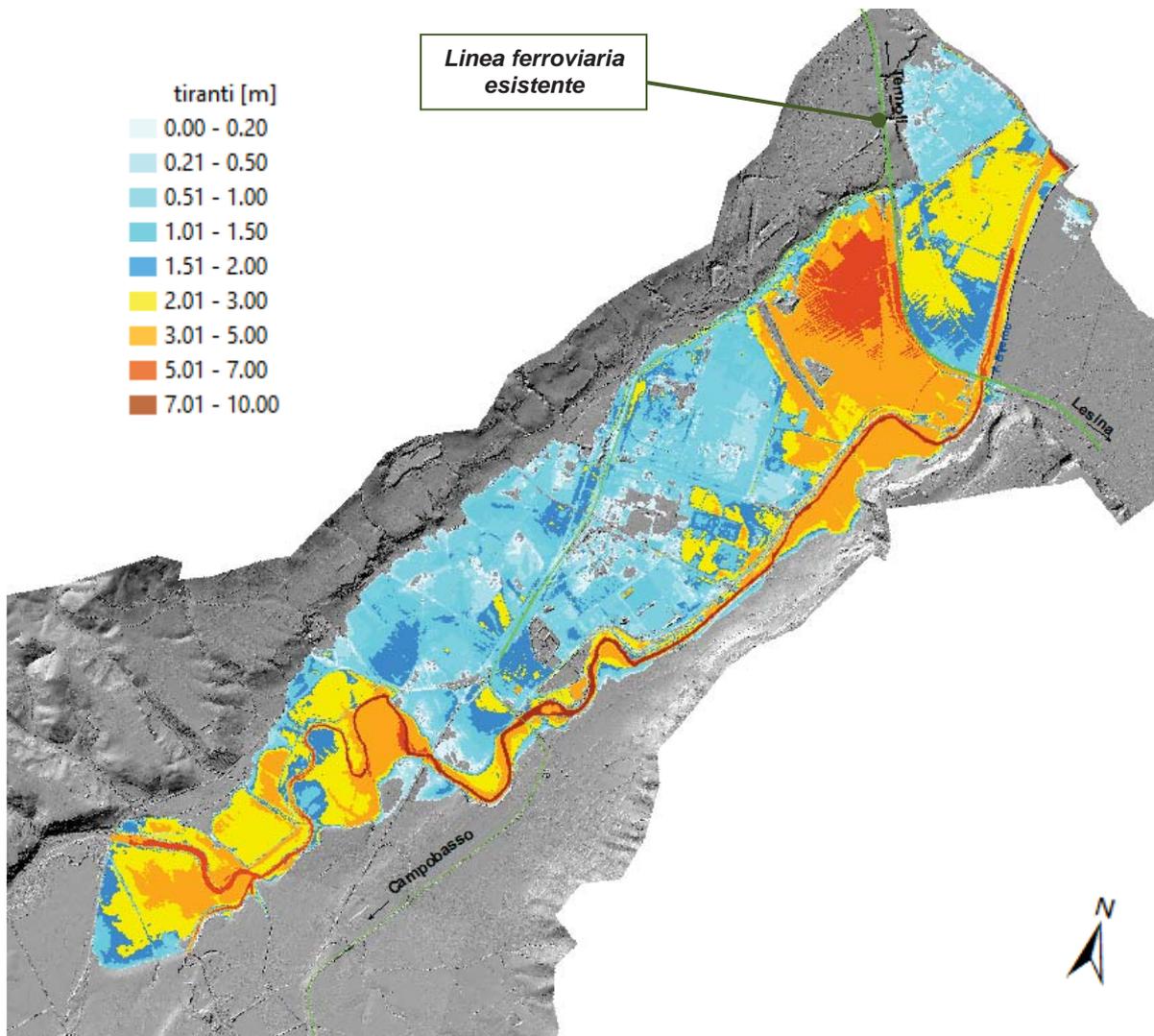


Figura 19 – Massima estensione dell'allagamento e massimi tiranti idrici – Ante operam 1 – TR200

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	39

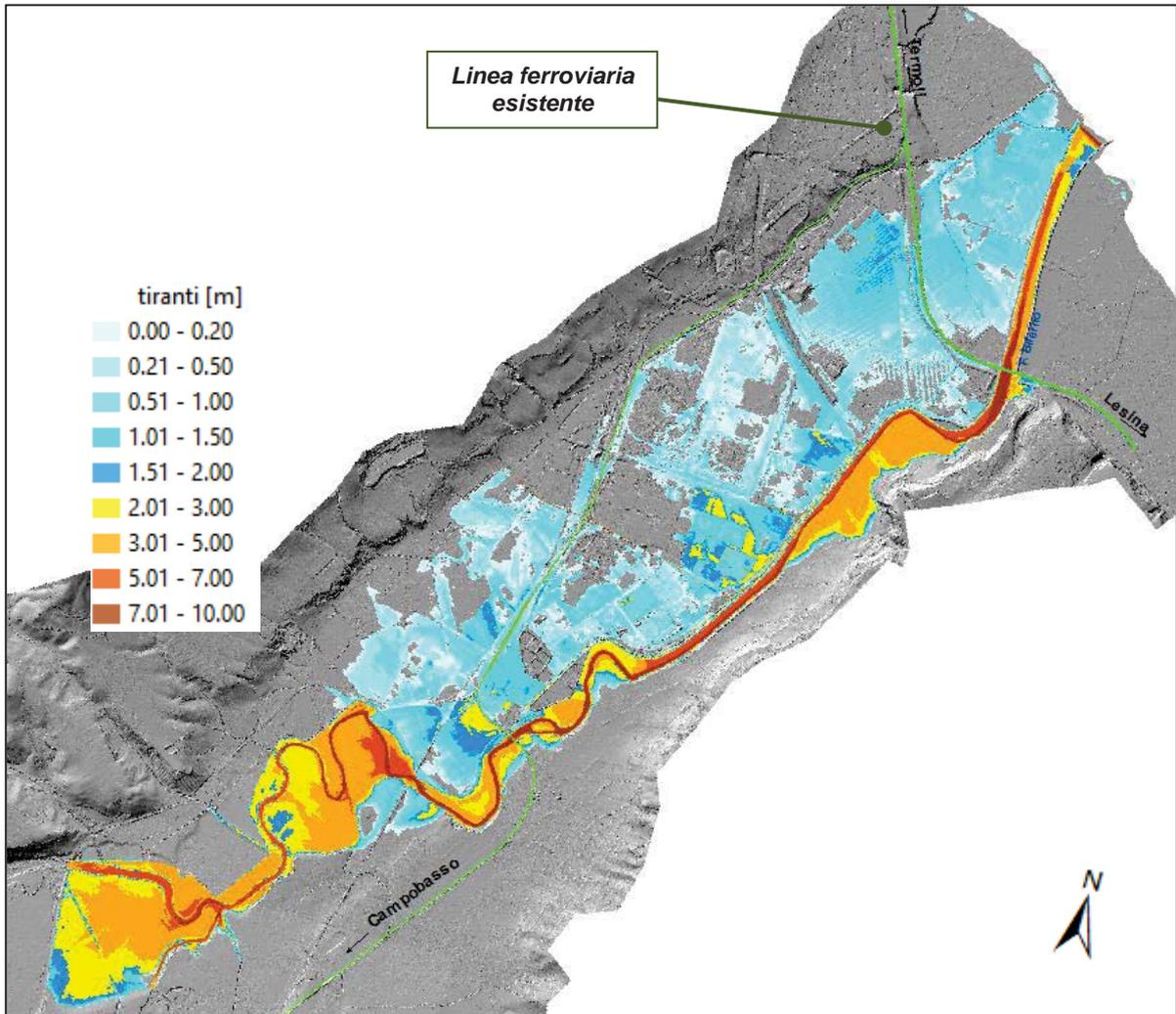


Figura 20 – Massima estensione dell'allagamento e massimi tiranti idrici – Ante operam 2 – TR200

MANDATARIA HUB ENGINEERING <small>CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A.R.L.</small>	MANDANTI HYpro	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
		Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA		PROGR	REV	FOGLIO
		LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	40

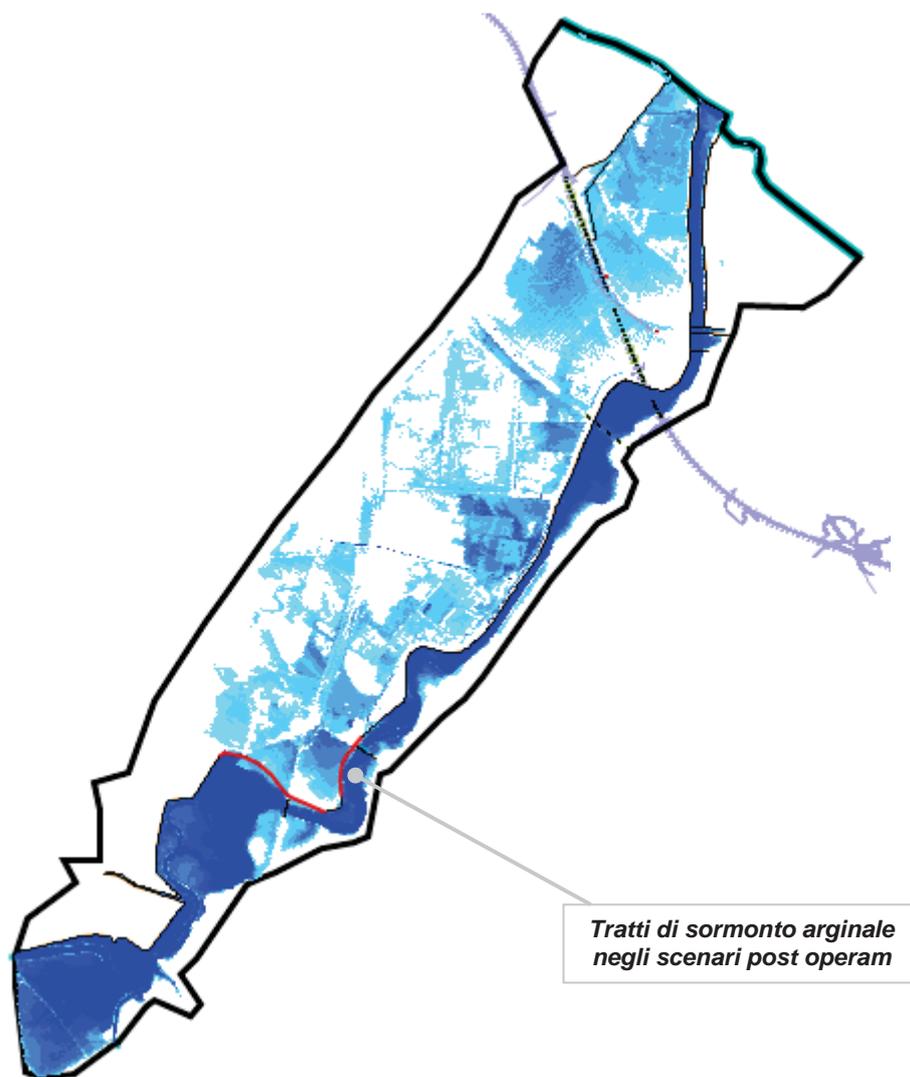


Figura 21 – In rosso: tratti in cui gli argini vengono sormontati nello scenario ante operam 2 per TR200 anni

Come si osserva nelle figure seguenti, l'estensione degli allagamenti nella configurazione ante operam 1 non presenta differenze significative tra i diversi tempi di ritorno (Figura 22), mentre differenze nei risultati più significative si verificano nella configurazione ante operam 2 (Figura 23).

I risultati ottenuti sono pertanto in linea con quanto riportato nel PAI del fiume Biferno e minori: “[...] nel tratto di valle, i primi allagamenti di una certa estensione si verificano nella zona dello svincolo Biferno Cigno presso Guglionesi, al viadotto Tanassi della S.S. Bifernina. Gli allagamenti proseguono con sensibile estensione (già per $Tr=30$ anni) fino allo svincolo

<p>MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A.R.L.</p> <p>MANDANTI HYpro</p>	<p>LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</p>										
<p>Relazione Idraulica</p>	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
	LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	41

del Biferno (zona Zuccherificio del Molise) per insufficienza arginale. A valle dello Zuccherificio del Molise, e fino alla foce, le arginature sono sufficienti a contenere la piena con $Tr=30$ anni ad eccezione del tratto adiacente al depuratore in loc. Rivolta del Re (zona viadotto autostradale): qui l'arginatura sinistra, almeno dalle risultanze dei rilievi topografici condotti nello "Studio del rischio idrogeologico nella Regione", è localmente più bassa e permette esondazioni che raggiungono la loc. Pantano Basso posta a qualche km di distanza e una parte dell'area a valle della linea ferroviaria Adriatica (per il tramite di un sottovia). Per eventi con tempo di ritorno 200 anni l'aggravio generale del quadro delle esondazioni riguarda soprattutto l'area del Bosco Tanassi a Guglionesi e l'area industriale ove è ubicato lo Zuccherificio del Molise, la Fabbrica Cavi Elettrici A.C.E., la stazione ferroviaria di Portocannone, lo Stabilimento O.S.I. Italia, lo Stabilimento Fiat e numerosi altri opifici, nonché quella agricola e residenziale a sinistra della foce del Biferno; solo in piccola misura esondazioni avvengono anche a destra della foce."

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	42

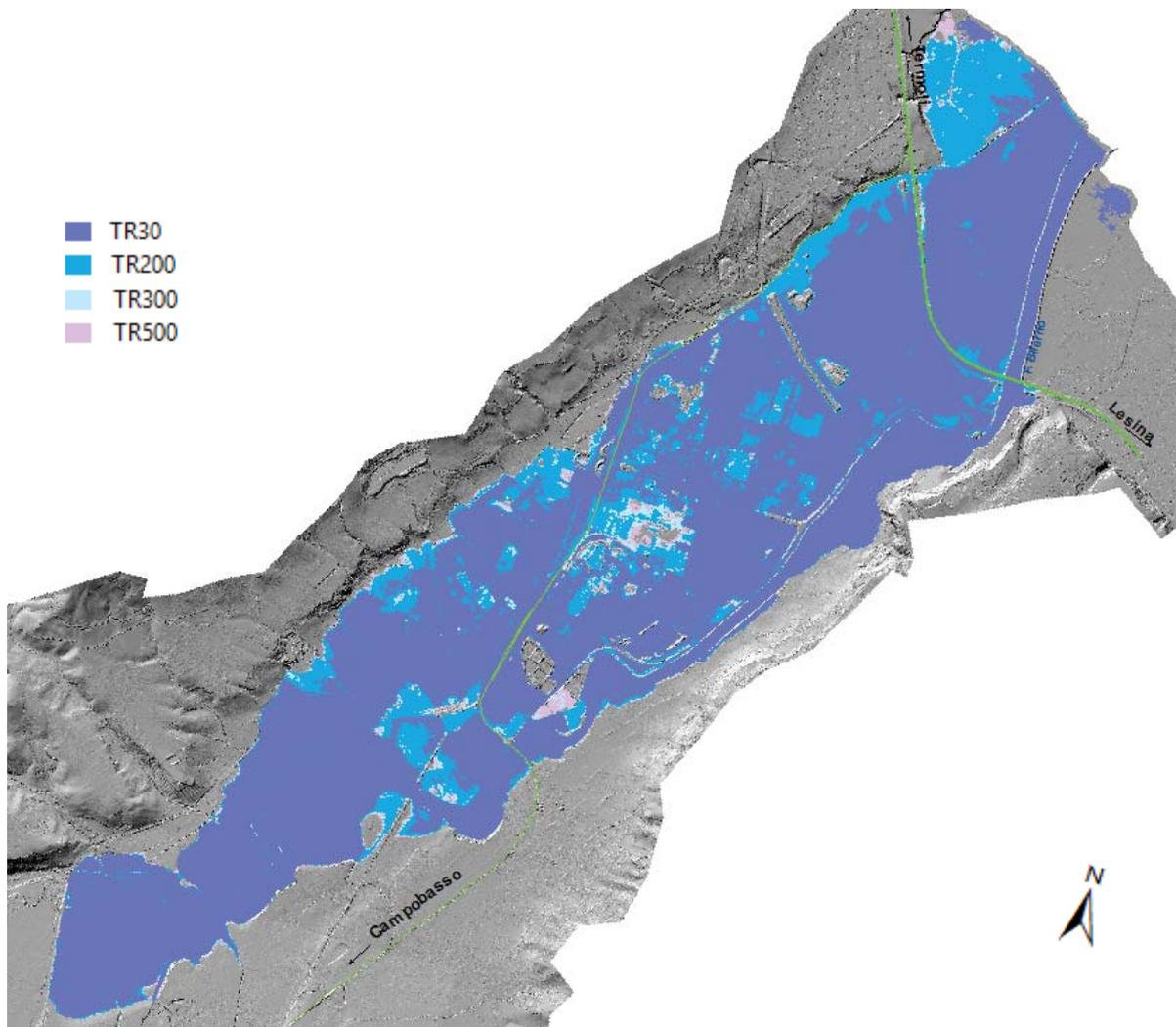


Figura 22 – Massima estensione dell'allagamento e massimi tiranti idrici – Ante operam 1 – TR30, TR200, TR 300, TR500

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	43

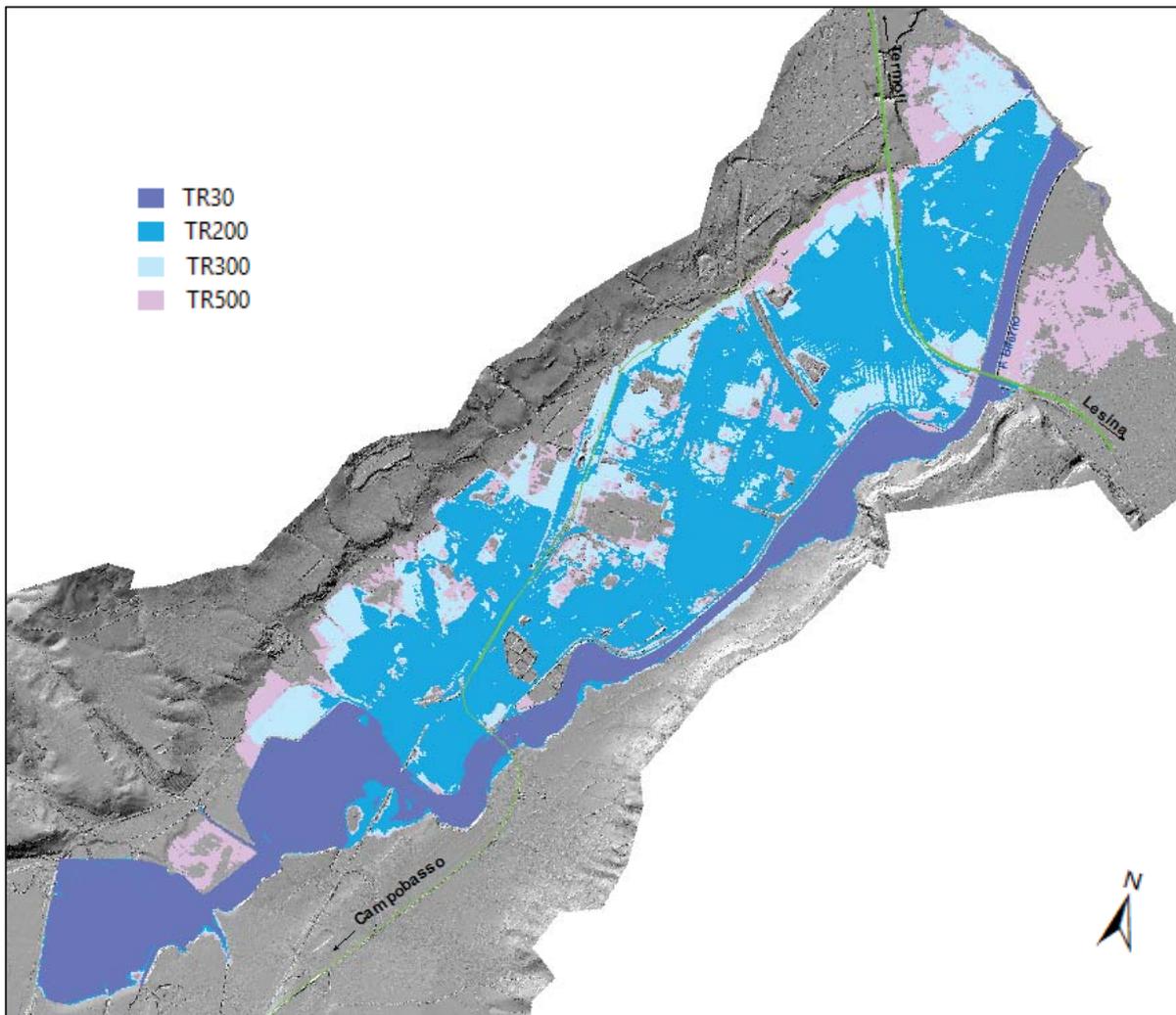


Figura 23 – Massima estensione dell'allagamento e massimi tiranti idrici – Ante operam 2 – TR30, TR200, TR300, TR500

6.2 Simulazioni Post Operam

Nella Figura 24 e nella Figura 25 vengono presentati i valori massimi dei tiranti idrici e l'ampiezza delle aree soggette a inondazione ottenuti rispettivamente per le configurazioni "Post Operam 1" e "Post Operam 2" durante l'evento di piena con un periodo di ritorno di 200 anni.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	44

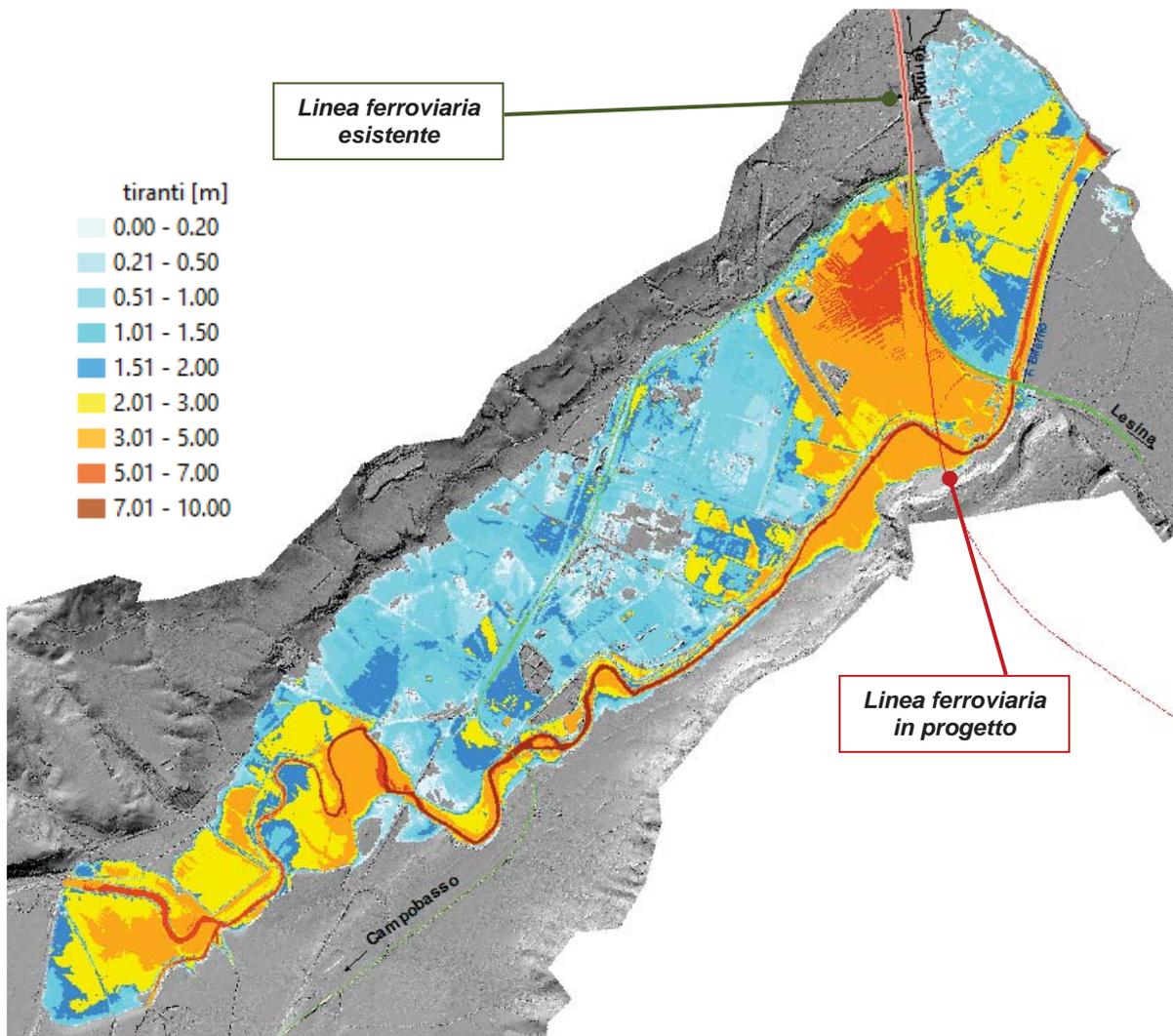


Figura 24 – Massima estensione dell'allagamento e massimi tiranti idrici – Post operam 1– TR200

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	45

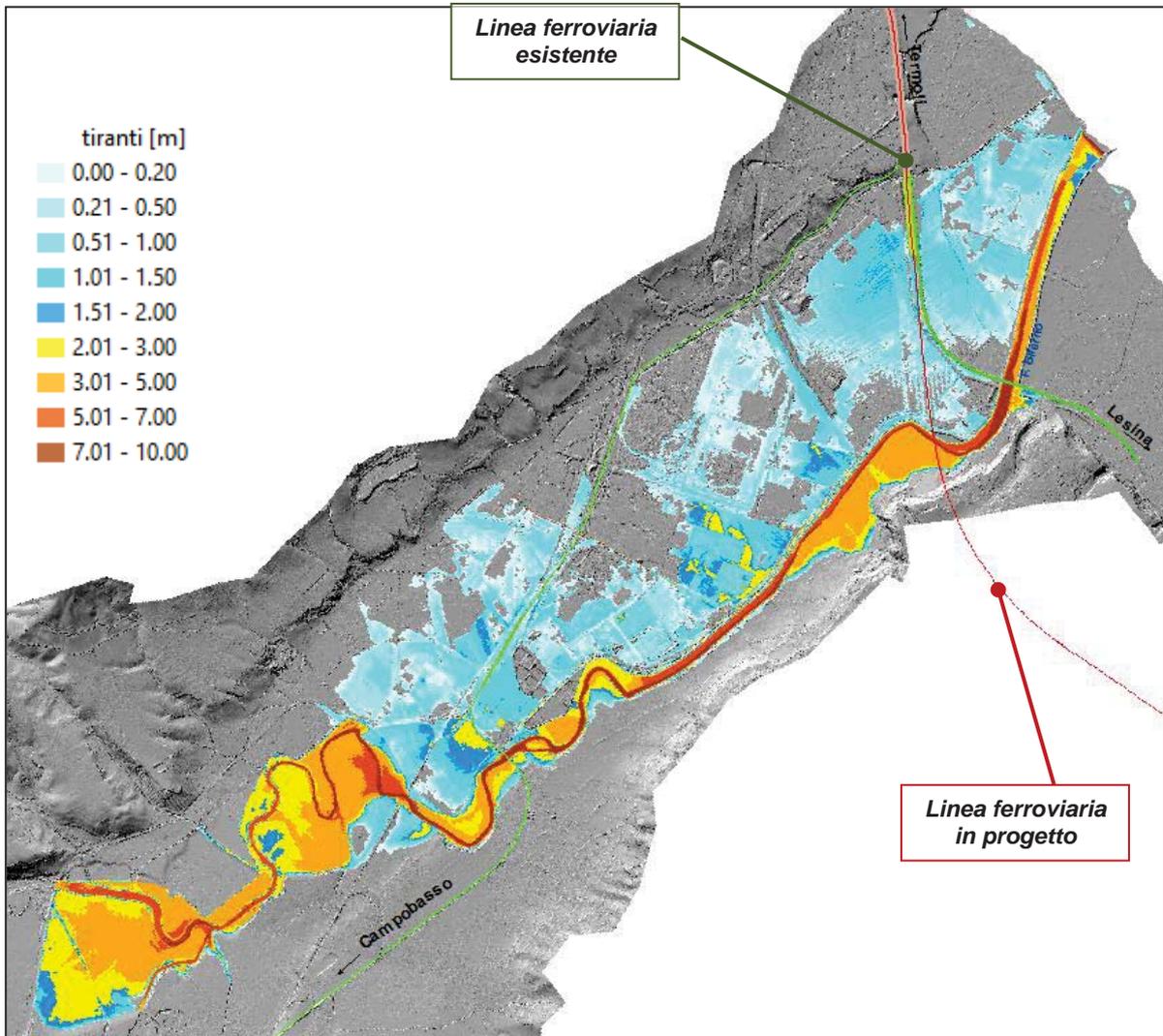


Figura 25 – Massima estensione dell'allagamento e massimi tiranti idrici – Post operam 2 – TR200

Da un confronto con i risultati delle configurazioni ante operam, si osserva che le differenze ottenute sono dovute principalmente ad un effetto numerico della magliatura oltre che a minime differenze nella propagazione della piena. Tali differenze sono considerate trascurabili in quanto non mostrano estensione diversa degli allagamenti e sono tutte comprese entro 8 cm. Nel caso delle configurazioni ante operam 1 e post operam 1 non si hanno differenze in corrispondenza del viadotto (Figura 26). Nel caso del confronto tra i risultati delle simulazioni post operam 2 e ante operam 2 le differenze che si apprezzano da un confronto puntuale dei livelli mostrano tiranti maggiori in prossimità del viadotto di circa 8 cm sia per TR200 che per TR300 nella configurazione post operam 2 (Figura 27).

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	46

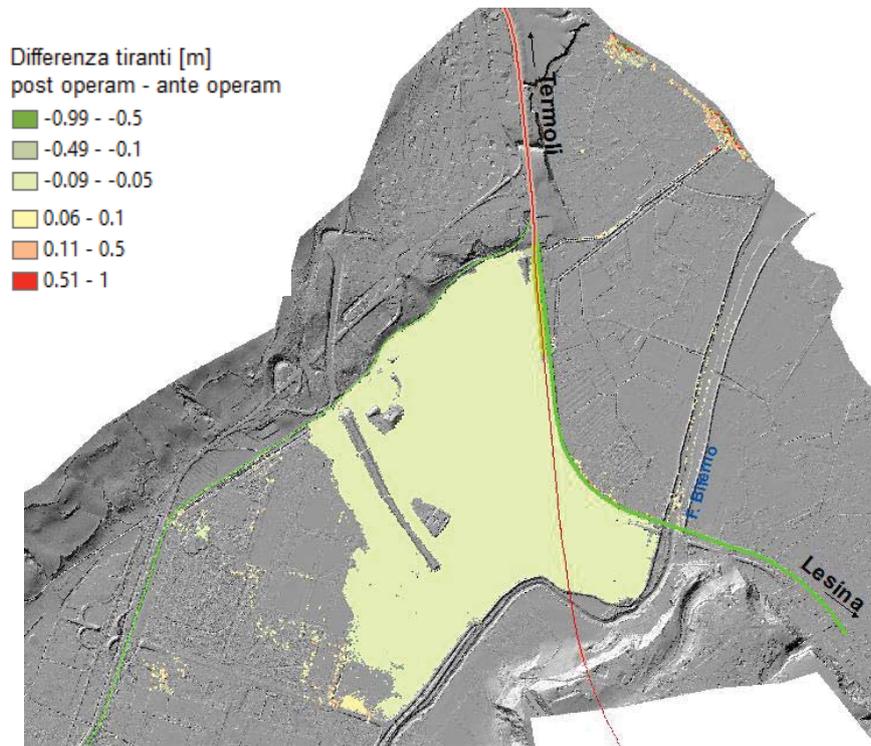
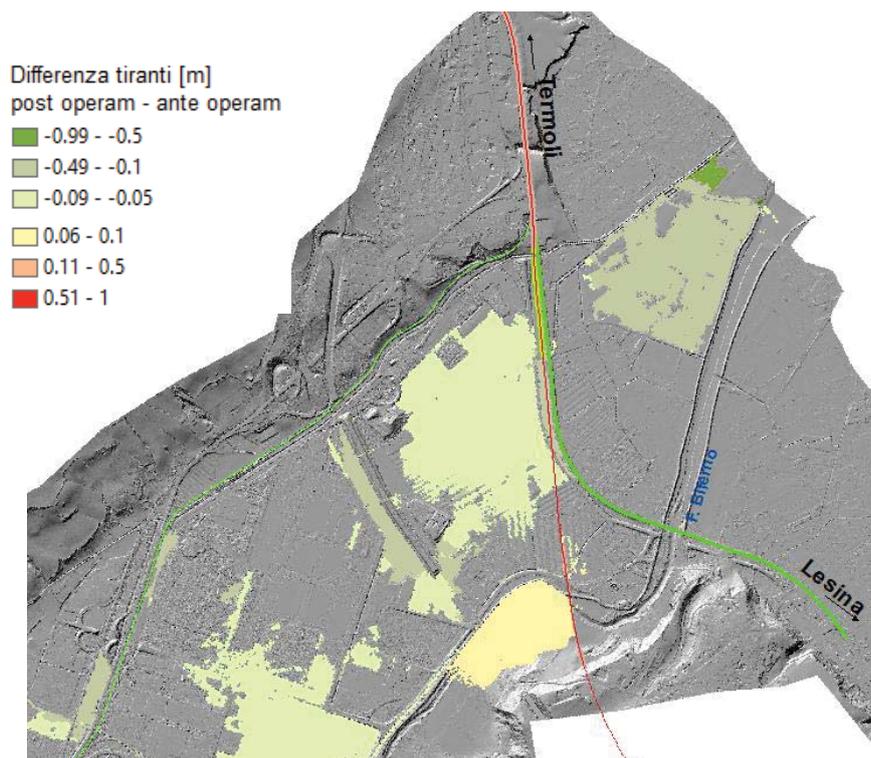


Figura 26 – Differenza tra i massimi livelli idrici: Post operam 1 – ante operam 1 – TR200



MANDATARIA  MANDANTI 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	47

Figura 27 – Differenza tra i massimi livelli idrici: Post operam 2 – ante operam 2 – TR200

Per completare l'analisi delle condizioni idrauliche che si possono instaurare in corrispondenza del viadotto in progetto, è stato valutato il tirante che si instaura per le portate idrologiche alla sezione di interesse, per TR200 e 300 anni, pari rispettivamente a 1808.1 m³/s e 2043.9 m³/s, come indicato dall'Autorità di Bacino. Tale condizione non tiene conto in alcun modo delle portate laminate lungo il tratto fluviale a monte, pertanto risulta essere la verifica più cautelativa.

È stato quindi implementato il modello monodimensionale HEC RAS per il tratto di valle del fiume Biferno, inserendo gli stessi dati topografici dello scenario post operam 2.

È stata quindi verificata la corrispondenza tra i risultati dei due modelli matematici, confrontando la scala delle portate alla sezione del viadotto. I risultati ottenuti sono ammissibili, vista la diversa natura dei modelli e la modalità di applicazione (monodimensionale e bidimensionale).

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	48

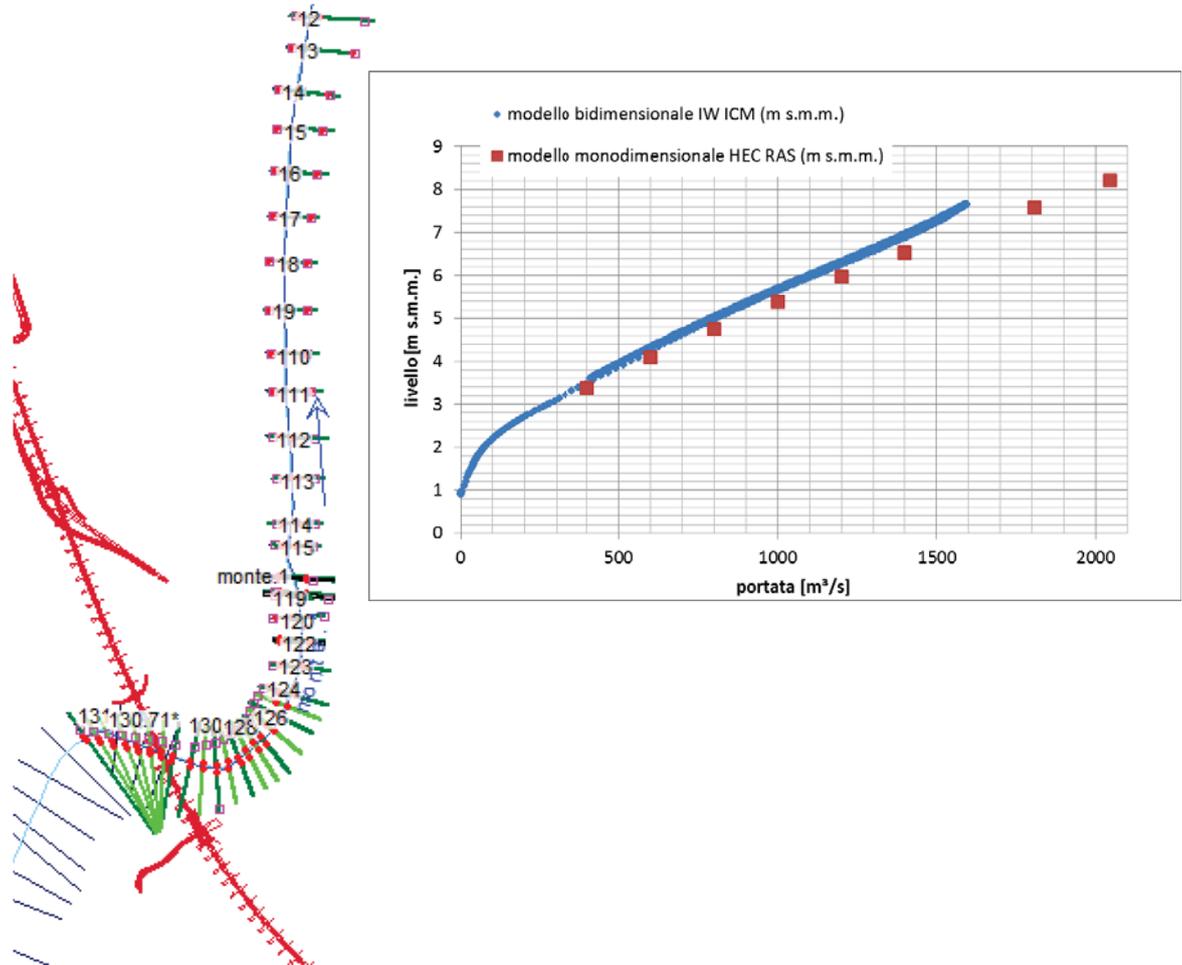


Figura 28 – Tratto del fiume Biferno implementato in HEC RAS (modalità monodimensionale) e confronto tra la relazione tirante-portata nel modello monodimensionale (in rosso) e bidimensionale (in blu).

I risultati che si ottengono per le portate massime alla sezione del viadotto sono riportati nella seguente tabella.

TR	Q	livello (m s.m.m.)	Altezza critica (m s.m.m.)	Livello energetico (m s.m.m.)
200	1808.1	7.57	5.39	7.88
300	2043.9	8.22	5.73	8.50

Tabella 4 – risultati che si ottengono per le portate massime alla sezione del viadotto

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	49

7 VERIFICA DELLE OPERE IN PROGETTO

7.1 Nuovo viadotto

Nel presente paragrafo verranno espone le verifiche dei franchi minimi del nuovo viadotto, secondo i regolamenti e le normative in vigore.

Le Norme Tecniche delle Costruzioni prevedono per gli intradossi dei ponti di nuova realizzazione un franco idraulico di almeno 1.5 m, per una piena con tempo di ritorno superiore o uguale a 200 anni.

Il Manuale tecnico di progettazione ferroviario prevede un franco minimo di 1.5 m rispetto al livello idrico e di 0.5 m rispetto al livello energetico. Per bacini con di estensione superiore a 10 km², come nel caso del Biferno, si adotta come piena di riferimento quella trecentennale.

Le Norme di Attuazione contenute all'interno del Progetto di Piano stralcio per l'assetto Idrogeologico del Fiume Biferno e minori richiedono che gli attraversamenti che interessano i corsi d'acqua debbano essere progettati tenendo conto della portata di piena con tempo di ritorno di 200 anni. I franchi minimi sono riportati nella tabella seguente.

Stato del bacino sotteso	Tipo di opere	
	Argini e difese spondali	Attraversamenti
Sufficientemente sistemato	cm 50	cm 75
Poco sistemato ma non dissestato	cm 75	cm 100
Dissestato	cm 100	cm 150

Tabella 5 – Franchi richiesti dalle NA – PAI Biferno e minori

Le NTA comunque richiedono che il franco non sia inferiore al carico cinetico della corrente; in altri termini, il franco minimo sul livello energetico deve essere superiore a zero.

In Tabella 6 e Tabella 7 sono riportati i valori dei livelli idrici ed energetici e i franchi ottenuti per le simulazioni TR 200 e 300 anni rispettivamente nelle configurazioni post operam 1 e post operam 2. I valori sono riportati in corrispondenza di ogni pila e, per convenzione, il valore dell'intradosso è relativo all'impalcato a sinistra della pila stessa.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	50

Viadotto-Pila	Quota intradosso [m s.l.m.]	TR200				TR300			
		livello idrico	Livello Energ.	Franco l.i.	Franco l.e.	livello idrico	Livello Energ.	Franco l.i.	Franco l.e.
		[m s.l.m.]	[m s.l.m.]	[m]	[m]	[m s.l.m.]	[m s.l.m.]	[m]	[m]
VI02_P01	8.42	6.90	7.33	1.52	1.09	6.91	7.69	1.51	0.73
VI02_P02	8.55	6.97	7.39	1.58	1.16	6.91	7.69	1.64	0.86
VI02_P03	8.48	6.97	7.41	1.51	1.07	6.98	7.69	1.50	0.79
VI02_P04	8.82	7.05	7.51	1.77	1.31	6.98	7.69	1.84	1.13
VI02_P05	8.95	7.31	7.52	1.64	1.43	7.32	7.69	1.63	1.26
VI02_P06	9.08	7.35	7.52	1.73	1.56	7.36	7.69	1.72	1.39
VI02_P07	9.41	7.51	7.51	1.90	1.90	7.68	7.69	1.73	1.72
VI02_P08	9.34	7.51	7.52	1.83	1.82	7.68	7.69	1.66	1.65
VI02_P09	9.45	7.51	7.52	1.94	1.93	7.68	7.69	1.77	1.76
VI02_P10	9.56	7.51	7.52	2.05	2.04	7.68	7.69	1.88	1.87
VI02_P11	9.66	7.51	7.52	2.15	2.14	7.68	7.69	1.98	1.97
VI02_P12	9.47	7.51	7.52	1.96	1.95	7.68	7.69	1.79	1.78
VI02_P13	9.88	7.51	7.52	2.37	2.36	7.68	7.69	2.20	2.19
VI02_P14	9.98	7.51	7.52	2.47	2.46	7.68	7.69	2.30	2.29
VI02_P15	10.09	7.51	7.52	2.58	2.57	7.68	7.69	2.41	2.40
VI02_P16	10.19	7.51	7.52	2.68	2.67	7.68	7.69	2.51	2.50
VI02_P17	10.30	7.51	7.51	2.79	2.79	7.68	7.68	2.62	2.62
VI02_P18	10.41	7.51	7.51	2.90	2.90	7.68	7.68	2.73	2.73
VI02_P19	10.51	7.51	7.51	3.00	3.00	7.68	7.68	2.83	2.83
VI02_P20	10.62	7.51	7.52	3.11	3.10	7.68	7.69	2.94	2.93
VI02_P21	10.73	7.51	7.52	3.22	3.21	7.68	7.69	3.05	3.04
VI02_P22	11.01	7.51	7.51	3.50	3.50	7.68	7.68	3.33	3.33
VI02_P23	11.32	7.51	7.54	3.81	3.78	7.68	7.71	3.64	3.61
VI02_P24	11.23	7.51	7.53	3.72	3.70	7.68	7.70	3.55	3.53
VI02_P25	11.34	7.51	7.52	3.83	3.82	7.68	7.70	3.66	3.64
VI02_P26	11.45	7.51	7.52	3.94	3.93	7.68	7.69	3.77	3.76
VI02_P27	11.55	7.51	7.52	4.04	4.03	7.68	7.69	3.87	3.86
VI02_P28	11.66	7.51	7.52	4.15	4.14	7.68	7.69	3.98	3.97
VI02_P29	11.76	7.51	7.52	4.25	4.24	7.68	7.69	4.08	4.07
VI02_P30	11.87	7.51	7.52	4.36	4.35	7.68	7.69	4.19	4.18
VI02_P31	11.98	7.51	7.51	4.47	4.47	7.68	7.69	4.30	4.29
VI02_P32	12.08	7.51	7.51	4.57	4.57	7.68	7.68	4.40	4.40
VI02_P33	12.19	7.51	7.51	4.68	4.68	7.68	7.68	4.51	4.51
VI02_P34	12.29	7.51	7.52	4.78	4.77	7.68	7.69	4.61	4.60
VI02_P35	12.40	7.51	7.52	4.89	4.88	7.68	7.69	4.72	4.71

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	51

Viadotto-Pila	Quota intradosso [m s.l.m.]	TR200				TR300			
		livello idrico	Livello Energ.	Franco l.i.	Franco l.e.	livello idrico	Livello Energ.	Franco l.i.	Franco l.e.
		[m s.l.m.]	[m s.l.m.]	[m]	[m]	[m s.l.m.]	[m s.l.m.]	[m]	[m]
VI02_P36	12.51	7.51	7.52	5.00	4.99	7.68	7.69	4.83	4.82
VI02_P37	12.61	7.51	7.51	5.10	5.10	7.68	7.68	4.93	4.93
VI02_P38	12.72	7.51	7.51	5.21	5.21	7.68	7.68	5.04	5.04
VI02_P39	12.83	7.51	7.51	5.32	5.32	7.68	7.68	5.15	5.15
VI02_P40	12.93	7.51	7.51	5.42	5.42	7.68	7.68	5.25	5.25
VI02_P41	13.04	7.51	7.51	5.53	5.53	7.68	7.68	5.36	5.36
VI02_P42	13.14	7.51	7.51	5.63	5.63	7.68	7.68	5.46	5.46
VI02_P43	13.24	7.51	7.51	5.73	5.73	7.68	7.68	5.56	5.56
VI02_P44	13.32	7.51	7.51	5.81	5.81	7.68	7.68	5.64	5.64
VI02_P45	13.38	7.51	7.51	5.87	5.87	7.68	7.68	5.70	5.70
VI02_P46	13.42	7.51	7.51	5.91	5.91	7.68	7.68	5.74	5.74
VI02_P47	13.43	7.51	7.51	5.92	5.92	7.68	7.68	5.75	5.75
VI02_P48	13.44	7.51	7.51	5.93	5.93	7.68	7.68	5.76	5.76
VI02_P49	13.44	7.51	7.51	5.93	5.93	7.68	7.68	5.76	5.76
VI02_P50	13.44	7.51	7.52	5.93	5.92	7.68	7.69	5.76	5.75
VI02_P51	13.44	7.51	7.52	5.93	5.92	7.68	7.69	5.76	5.75
VI02_P52	13.45	7.51	7.51	5.94	5.94	7.68	7.69	5.77	5.76
VI02_P53	13.45	7.51	7.51	5.94	5.94	7.68	7.68	5.77	5.77
VI02_P54	13.45	7.51	7.51	5.94	5.94	7.68	7.68	5.77	5.77
VI02_P55	13.46	7.51	7.51	5.95	5.95	7.68	7.68	5.78	5.78
VI02_P56	13.64	8.37	8.47	5.27	5.17	8.43	8.53	5.21	5.11
VI02_P57	13.65	8.37	8.39	5.28	5.26	8.43	8.45	5.22	5.20
VI02_P58	13.48	8.37	8.39	5.11	5.09	8.43	8.46	5.05	5.02
VI02_P59	13.48	8.37	8.40	5.11	5.08	8.42	8.45	5.06	5.03
VI02_P60	13.48	8.36	8.39	5.12	5.09	8.42	8.45	5.06	5.03
VI02_P61	13.49	8.36	8.39	5.13	5.10	8.41	8.44	5.08	5.05
VI02_P62	13.49	8.35	8.38	5.14	5.11	8.40	8.43	5.09	5.06
VI02_P63	13.49	8.35	8.38	5.14	5.11	8.40	8.43	5.09	5.06
VI02_P64	13.49	8.34	8.35	5.15	5.14	8.39	8.40	5.10	5.09

Tabella 6 – Livelli e franchi per il viadotto di progetto, scenario post operam 1.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	52

Viadotto-Pila	Quota intradosso [m s.l.m.]	TR200				TR300			
		livello idrico	Livello Energ.	Franco l.i.	Franco l.e.	livello idrico	Livello Energ.	Franco l.i.	Franco l.e.
		[m s.l.m.]	[m s.l.m.]	[m]	[m]	[m s.l.m.]	[m s.l.m.]	[m]	[m]
VI02_P01	8.42	2.70	2.76	5.72	5.66	4.67	4.73	3.75	3.69
VI02_P02	8.55	2.73	2.77	5.82	5.78	4.67	4.73	3.88	3.82
VI02_P03	8.48	2.73	2.76	5.75	5.72	4.70	4.71	3.78	3.77
VI02_P04	8.82	2.75	2.76	6.07	6.06	4.70	4.71	4.12	4.11
VI02_P05	8.95	2.76	2.76	6.19	6.19	4.70	4.71	4.25	4.24
VI02_P06	9.08	2.76	2.76	6.32	6.32	4.71	4.72	4.37	4.36
VI02_P07	9.41	2.76	2.76	6.65	6.65	4.71	4.72	4.70	4.69
VI02_P08	9.34	2.76	2.76	6.58	6.58	4.71	4.72	4.63	4.62
VI02_P09	9.45	2.76	2.76	6.69	6.69	4.71	4.72	4.74	4.73
VI02_P10	9.56	2.76	2.76	6.80	6.80	4.71	4.73	4.85	4.83
VI02_P11	9.66	2.76	2.76	6.90	6.90	4.72	4.74	4.94	4.92
VI02_P12	9.47	2.76	2.76	6.71	6.71	4.71	4.72	4.76	4.75
VI02_P13	9.88	2.76	2.76	7.12	7.12	4.71	4.72	5.17	5.16
VI02_P14	9.98	2.76	2.76	7.22	7.22	4.71	4.73	5.27	5.25
VI02_P15	10.09	2.76	2.76	7.33	7.33	4.71	4.72	5.38	5.37
VI02_P16	10.19	2.76	2.77	7.43	7.42	4.71	4.74	5.48	5.45
VI02_P17	10.30	2.76	2.76	7.54	7.54	4.72	4.73	5.58	5.57
VI02_P18	10.41	2.76	2.76	7.65	7.65	4.72	4.72	5.69	5.69
VI02_P19	10.51	2.76	2.76	7.75	7.75	4.72	4.72	5.79	5.79
VI02_P20	10.62	0.00	0.00	10.62	10.62	4.72	4.73	5.90	5.89
VI02_P21	10.73	0.00	0.00	10.73	10.73	4.72	4.72	6.01	6.01
VI02_P22	11.01	3.21	3.21	7.80	7.80	4.72	4.72	6.29	6.29
VI02_P23	11.32	3.23	3.24	8.09	8.08	4.72	4.73	6.60	6.59
VI02_P24	11.23	3.23	3.23	8.00	8.00	4.72	4.73	6.51	6.50
VI02_P25	11.34	3.24	3.24	8.10	8.10	4.72	4.73	6.62	6.61
VI02_P26	11.45	3.25	3.25	8.20	8.20	4.72	4.72	6.73	6.73
VI02_P27	11.55	3.25	3.25	8.30	8.30	4.72	4.72	6.83	6.83
VI02_P28	11.66	3.26	3.26	8.40	8.40	4.72	4.72	6.94	6.94
VI02_P29	11.76	3.27	3.27	8.49	8.49	4.72	4.72	7.04	7.04
VI02_P30	11.87	3.27	3.27	8.60	8.60	4.72	4.72	7.15	7.15
VI02_P31	11.98	3.28	3.28	8.70	8.70	4.72	4.72	7.26	7.26
VI02_P32	12.08	0.00	0.00	12.08	12.08	0.00	0.00	12.08	12.08
VI02_P33	12.19	3.29	3.29	8.90	8.90	4.72	4.72	7.47	7.47
VI02_P34	12.29	3.30	3.31	8.99	8.98	4.72	4.73	7.57	7.56
VI02_P35	12.40	3.30	3.30	9.10	9.10	4.72	4.72	7.68	7.68

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	53

Viadotto-Pila	Quota intradosso [m s.l.m.]	TR200				TR300			
		livello idrico	Livello Energ.	Franco l.i.	Franco l.e.	livello idrico	Livello Energ.	Franco l.i.	Franco l.e.
		[m s.l.m.]	[m s.l.m.]	[m]	[m]	[m s.l.m.]	[m s.l.m.]	[m]	[m]
VI02_P36	12.51	3.31	3.31	9.20	9.20	4.72	4.72	7.79	7.79
VI02_P37	12.61	3.46	3.46	9.15	9.15	4.72	4.72	7.89	7.89
VI02_P38	12.72	0.00	0.00	12.72	12.72	4.72	4.72	8.00	8.00
VI02_P39	12.83	0.00	0.00	12.83	12.83	4.72	4.72	8.11	8.11
VI02_P40	12.93	0.00	0.00	12.93	12.93	4.72	4.72	8.21	8.21
VI02_P41	13.04	0.00	0.00	13.04	13.04	4.72	4.72	8.32	8.32
VI02_P42	13.14	0.00	0.00	13.14	13.14	4.72	4.72	8.42	8.42
VI02_P43	13.24	0.00	0.00	13.24	13.24	4.72	4.72	8.52	8.52
VI02_P44	13.32	0.00	0.00	13.32	13.32	4.72	4.72	8.60	8.60
VI02_P45	13.38	0.00	0.00	13.38	13.38	4.72	4.72	8.66	8.66
VI02_P46	13.42	0.00	0.00	13.42	13.42	4.72	4.72	8.70	8.70
VI02_P47	13.43	0.00	0.00	13.43	13.43	4.72	4.72	8.71	8.71
VI02_P48	13.44	0.00	0.00	13.44	13.44	4.72	4.72	8.72	8.72
VI02_P49	13.44	4.00	4.00	9.44	9.44	4.72	4.72	8.72	8.72
VI02_P50	13.44	0.00	0.00	13.44	13.44	4.73	4.73	8.71	8.71
VI02_P51	13.44	4.13	4.14	9.31	9.30	4.73	4.74	8.71	8.70
VI02_P52	13.45	4.67	4.67	8.78	8.78	4.74	4.74	8.71	8.71
VI02_P53	13.45	0.00	0.00	13.45	13.45	0.00	0.00	13.45	13.45
VI02_P54	13.45	5.10	5.10	8.35	8.35	5.12	5.12	8.33	8.33
VI02_P55	13.46	5.10	5.10	8.36	8.36	5.12	5.12	8.34	8.34
VI02_P56	13.64	7.94	8.36	5.70	5.28	8.20	8.62	5.44	5.02
VI02_P57	13.65	7.91	8.00	5.74	5.65	8.17	8.26	5.48	5.39
VI02_P58	13.48	7.89	7.98	5.59	5.50	8.15	8.24	5.33	5.24
VI02_P59	13.48	7.87	7.98	5.61	5.50	8.14	8.25	5.34	5.23
VI02_P60	13.48	7.87	7.98	5.61	5.50	8.13	8.24	5.35	5.24
VI02_P61	13.49	7.85	7.96	5.64	5.53	8.12	8.23	5.37	5.26
VI02_P62	13.49	7.84	7.95	5.65	5.54	8.10	8.21	5.39	5.28
VI02_P63	13.49	7.81	7.91	5.68	5.58	8.08	8.18	5.41	5.31
VI02_P64	13.49	7.77	7.81	5.72	5.68	8.04	8.08	5.45	5.41

Tabella 7 – Livelli e franchi per il viadotto di progetto, scenario post operam 2.

I franchi minimi si verificano in corrispondenza della trave di impalcato che collega il S01 a P01 del viadotto VI02; l'intradosso di tale trave ha una quota assoluta di 8.42 m s.m.m.

Le prescrizioni delle Norme tecniche delle Costruzioni 2008 vengono rispettate per ogni

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	54

tempo di ritorno e per ogni configurazione progettuale analizzata.

Per la piena TR 300 anni, il franco minimo rispetto al livello idrico è sempre superiore a 1.5 m, così come il franco sul carico totale supera i 0.50 m minimi richiesti. Tale risultanza consente di verificare quanto richiesto dal manuale di progettazione ferroviario.

I franchi ottenuti per la piena duecentennale, sono superiori ai minimi richiesti dalle NTA del PAI Biferno e minori, anche ponendosi nella condizione più sfavorevole di “bacino dissestato”. Anche i carichi cinetici sono sempre superiori ai franchi sui livelli idrici richiesti dalla norma.

7.2 Protezione delle pile e delle spalle

7.2.1 Metodi di calcolo della verifica allo scalzamento (Pile)

Per la valutazione dello scalzamento prodotto dalla corrente in prossimità delle pile di un viadotto, al fine di definire la quota d'imposta delle fondazioni, non esiste una teoria univoca che consenta di interpretare il fenomeno nella sua complessità.

Il fenomeno dell'erosione localizzata dipende da numerosi parametri legati sia alle caratteristiche della corrente e dell'alveo (portata, battente, velocità della corrente, capacità di trasporto, caratteristiche del materiale dell'alveo, ecc.), che a quelle dell'ostacolo (forma e dimensioni, inclinazione rispetto alla direzione di flusso).

Di conseguenza, per ottenere delle stime le più verosimili possibili, usualmente sono utilizzate diverse metodologie di calcolo, mediando i singoli risultati ottenuti. E' da precisare che le formule generalmente utilizzate, nel caso di tiranti comparabili con la larghezza della pila, come nel caso in esame, forniscono risultati eccessivi, rispetto a quanto riscontrato nella realtà.

Per il calcolo dell'erosione localizzata dovuta alla presenza di una pila sono state utilizzate le formule riportate di seguito.

In particolare, per le pile (P56-P64) si è fatto riferimento alla formulazione *CSU* e *S/M* mentre per le pile (P01-P55) il calcolo è stato eseguito con le formulazioni *CSU* e *Froehlich*.

La scelta di adottare un differente approccio per i due gruppi di pile è legata alle caratteristiche del campo di moto nell'intorno delle pile P01-P55. Infatti, per tali pile, interessate da valori di velocità della corrente molto bassi (0.02-0.32 m/s), è stato osservato che la relazione di *S/M* portava a valori dello scalzamento prossimi allo zero e in alcuni casi nulli; per tale motivo si è scelta come seconda formulazione quella di *Froehlich*

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	55

Formula HEC-18 (CSU) in accordo a quanto previsto per il viadotto sul Fiume Fortore del lotto 1 Ripalta - Lesina

Una delle formulazioni comunemente più utilizzate, valida per singola pila, è l'equazione HEC-18 riportata nella monografia "Evaluating Scour at bridge - Fifth Edition" edita dalla Federal Highway Administration. Essa è basata sull'equazione CSU (Colorado State University, 1995) ed è raccomandata sia in presenza che in assenza di trasporto solido; tale espressione venne sviluppata sulla base sia di un'analisi dimensionale dei parametri in grado di influenzare il fenomeno, che a partire dai risultati ottenuti da sperimentazioni condotte in laboratorio. La relazione analitica proposta è la seguente:

$$\frac{Y_S}{Y_0} = 2,0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot \left(\frac{b}{Y_0} \right)^{0,65} F_0^{0,43}$$

dove:

- $Y_S [m]$: massima profondità di erosione (fase di equilibrio del processo erosivo) a partire dal fondo alveo medio locale;
- $b [m]$: larghezza della pila in metri;
- $Y_0 [m]$: profondità media della corrente di monte;
- F_0 : Numero di Froude della corrente di monte;
- K_1 : fattore di correzione per la forma della pila;
- K_2 : fattore di correzione per l'angolo di attacco della corrente;
- K_3 : fattore di correzione per le condizioni del fondo alveo;
- K_4 : fattore di correzione per il materiale che compone il fondo alveo.

Il coefficiente K_1 è stato tabulato per diversi tipi di forma del fronte della pila mentre il coefficiente K_3 considera le condizioni morfologiche del fondo.

Le tabelle seguenti riportano invece i fattori correttivi K_1 e K_3 :

Forma della pila	K_1
Squadrata	1.10
Arrotondata	1.00
Circolare	1.00

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	56

Gruppo di pali	1.00
Triangolare	0.90

Tabella 8 – Coefficiente correttivo K_1

Configurazione fondo alveo	Altezza dune (m)	K_3
Clear – water	-	1.10
Piatto	-	1.10
Piccole dune	$0.60 \leq H < 3.00$	1.10
Dune medie	$3.00 \leq H < 9.00$	$1.10 \div 1.20$
Dune grandi	$H \geq 9.00$	1.30

Tabella 9 – Coefficiente correttivo K_3

Il coefficiente K_2 è stimato attraverso l'espressione seguente:

$$K_2 = \left(\cos\theta + \frac{L}{a} \sin\theta \right)^{0.65}$$

dove L è la lunghezza della pila in direzione della corrente e θ angolo di attacco della corrente rispetto all'asse di simmetria della stessa pila.

Se $\frac{L}{a} \geq 12$ il rapporto assume il valore massimo pari a 12.

Il coefficiente K_4 rappresenta un fattore correttivo dello scalzamento che tiene conto della protezione di fondo (armouring) costituita da granulometrie grossolane presenti in alveo o ad una certa profondità. La stima di tale parametro può essere fatta applicando la seguente formula:

$$K_4 = \left[1 - 0.89(1 - V_R)^2 \right]^{0.5}$$

$$V_R = \left[\frac{V_1 - V_i}{V_{C90} - V_i} \right]$$

$$V_i = 0.645 \left[\frac{D_{50}}{b} \right]^{0.053} \cdot V_{C50}$$

dove:

- V_R : carico cinetico;
- V_1 : velocità media in alveo o in golena nella sezione subito a monte del ponte;
- V_i : velocità di incipiente movimento;
- b [m]: larghezza della pila;

	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	57

- V_{C90} : velocità critica per le particelle con diametro D_{90} ;
- V_{C50} : velocità critica per le particelle con diametro D_{50} .

È possibile calcolare la velocità critica V_C come:

$$V_C = 10.95 y_0^{1/6} D_C^{1/3}$$

dove:

y_0 [m] : tirante d'acqua subito a monte delle pile;

- D_C [m] : dimensione critica delle particelle per la velocità critica.

Il valore K_4 deve essere sempre superiore a 0.7, mentre il materiale del fondo che produce protezione dallo scalzamento non deve essere inferiore a 0.06 m.

Nel caso di pile tozze con basse profondità della corrente tale relazione può essere utilizzata introducendo un fattore correttivo inferiore all'unità.

Formula di Froehlich

$$y_s = 0.32 \cdot \varphi \cdot g^{-0.1} V_1^{0.2} \cdot y_1^{0.36} \cdot s^{0.62} \cdot D_{50}^{-0.08}$$

dove:

- y_s è la massima profondità di erosione (fase di equilibrio del processo erosivo) a partire dal fondo alveo medio locale [m];
- φ è un coefficiente pari a 1.30 per rostri rettangolari, 1.00 per rostri circolari, 0.70 per rostri triangolari;
- s , larghezza della pila efficace (proiezione larghezza b nella direzione ortogonale alla corrente) [m];
- y_1 , altezza idrica a monte della pila [m];
- V_1 , velocità della corrente a monte della pila [m/s];
- D_{50} , diametro medio del materiale di fondo alveo [m];
- g , accelerazione di gravità [m/s²].

Formula (SM) di Sheppard-Melville (2013):

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	58

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

con

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

Tale formulazione risulta applicabile al corso d'acqua studiato: i valori di tirante e velocità, le dimensioni effettive delle pile e la granulometria del fondo alveo rientrano nei campi dei valori, o comunque sono dello stesso ordine di grandezza dei valori, per i quali ne è stata valutata l'attendibilità e l'affidabilità.

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

- $\frac{V_1}{V_c} = 1; 3$
- $\frac{y_1}{a} = 0.33; 1; 3$

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	59

- $d_{50} = 0.2; 3 \text{ mm}$
- $a = 0.05; 1; 10 \text{ m}$

Per tutte le suddette formulazioni, qualora la pila non possa essere considerata di geometria uniforme, ovvero non sia caratterizzata da una sezione costante, è necessario fare riferimento ad una sezione equivalente: tale è il caso di pile da ponte dotate di fondazione oppure aventi sezione tronco – conica.

Sulla base delle precedenti considerazioni è possibile riscontrare quattro differenti scenari di erosione localizzata (Figura 29):

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

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

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

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

dove:

h_0 : profondità media della corrente rispetto al fondo alveo;

Y : altezza massima della buca erosiva;

b^* : larghezza della fondazione.

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

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	60

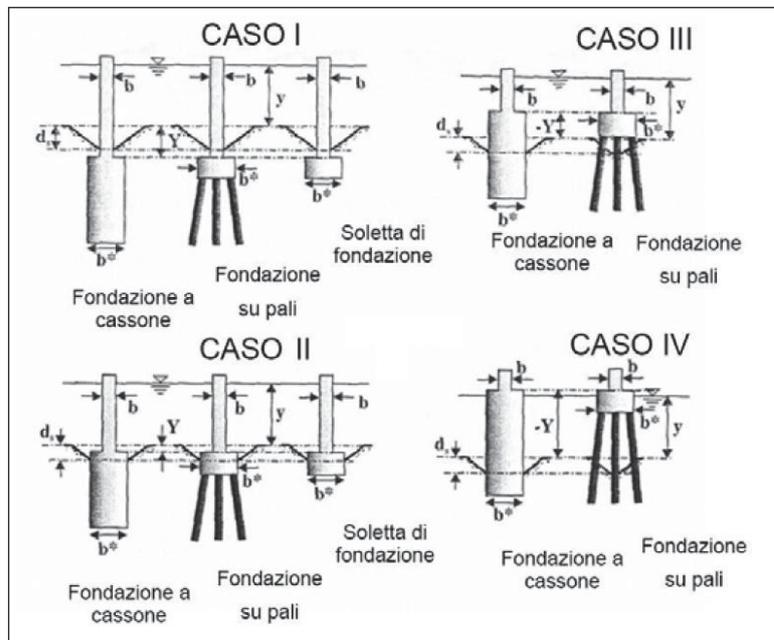


Figura 29 – Differenti tipologie di pile non uniformi dotate di fondazioni

7.2.2 Metodi di calcolo della verifica allo scalzamento (Spalle)

Analogamente al caso dello scavo al piede delle pile degli attraversamenti, il fenomeno dell'escavazione alla base delle spalle dell'impalcato può essere rilevante ai fini della valutazione della stabilità della configurazione geometrica della sezione, e conseguentemente della sicurezza strutturale con rispetto alla scopertata delle fondazioni.

Per la valutazione della profondità di scavo in corrispondenza delle spalle dell'attraversamento si è fatto riferimento alla seguente equazione, prediligendo quella più diffusa.

Equazioni di Melville

La formulazione di Melville è valida per ostacoli posti perpendicolarmente al flusso della corrente indisturbata, e stima lo scavo in funzione della sola configurazione geometrica delle spalle, nonché del tirante indisturbato y e della corrente in piena che vi incide. In particolare, definita L la lunghezza sporgente in alveo della spalla, la profondità di scavo d_s è valutabile da:

$$d_s = 2KL \text{ per } \frac{L}{y} < 1$$

	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	61

$$d_s = 2K^*(yL)^{0.5} \text{ per } 1 \leq \frac{L}{y} \leq 25$$

$$d_s = 10y \text{ per } \frac{L}{y} > 25$$

Il coefficiente K è funzione della tipologia geometrica della spalla, assumendosi pari a 0.75 per spalla con fronte arrotondata o con muri d'ala, pari a 1 per paramenti verticali, e variabile fra 0.45 e 0.60 nel caso di spalle con scarpata avente inclinazione compresa fra 1:2 e 3:2.

Il coefficiente modificato K^* è invece valutabile in funzione di K dall'espressione:

$$K^* = K + (1 - K) \left(\frac{0.1L}{y} - 1.5 \right)$$

7.2.3 Verifica allo scalzamento (Pile)

L'analisi dell'escavazione localizzata per le pile del viadotto è stata eseguita con riferimento ad una piena con tempo di ritorno pari a 300 anni, nelle condizioni più gravose tra la condizione post operam 1 e la condizione post operam 2.

Tutte le pile del viadotto hanno forma rettangolare di lunghezza 10.4 m e larghezza 3.50 m tranne le tre pile in corrispondenza all'attraversamento sul Biferno (P55, P56 e P57 in Figura 30) e dell'attraversamento sulla SS16 (P22-P23) che hanno forma circolare di diametro 5 m. L'interasse tra le pile è di 25 m, tranne quello tra le pile P55-P56, P56-P57 e P22-P23 che è di 70 m.

Pile P55-P64

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	62

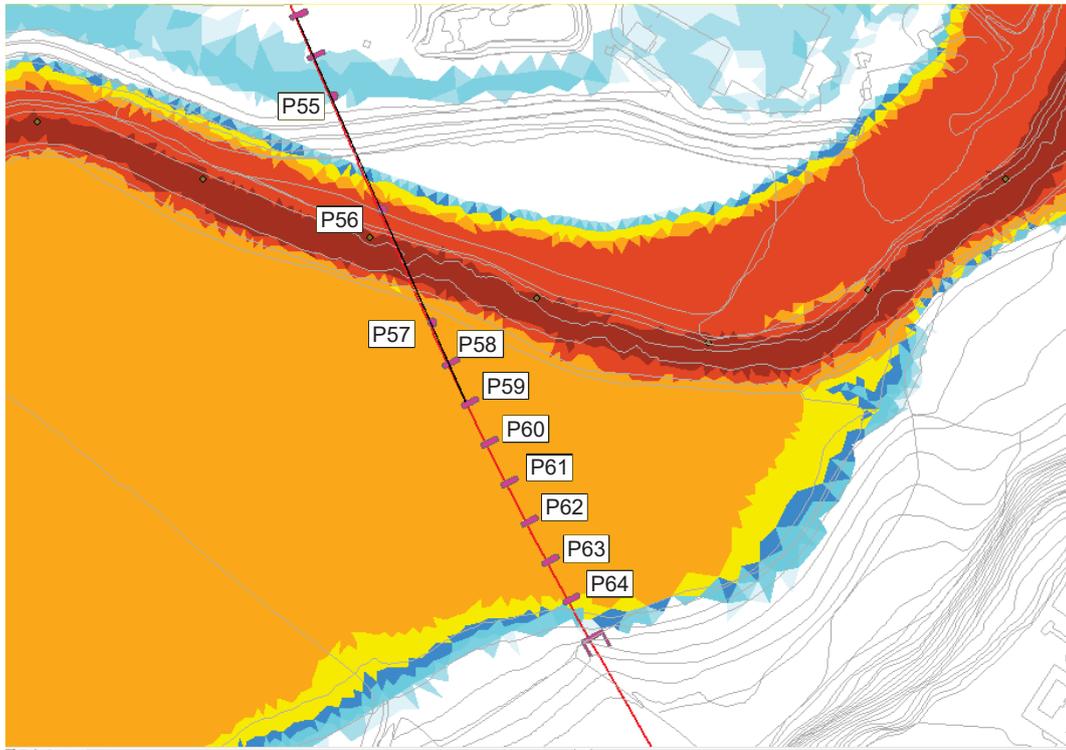


Figura 30 – Planimetria con indicazione delle pile in corrispondenza all'alveo e alla golena del Biferno del viadotto VI02.

La tabella seguente riporta i dati utilizzati per la determinazione della massima profondità di scavo per le pile in corrispondenza all'attraversamento sul Biferno. In particolare, sono state eseguite due verifiche: una considerando il valore del tirante e della velocità della corrente che si verificano in concomitanza al massimo livello d'acqua e una considerando il valore del tirante e della velocità della corrente che si verificano in concomitanza alla massima velocità dell'acqua.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	63

N° pila	Quota terreno [m s.l.m.]	Massimo tirante		Massima velocità		Incidenza pila-corrente [°]	Lunghezza della pila [m]	Larghezza della pila [m]	d50 [mm]
		Tirante idraulico [m]	Velocità [m/s]	Tirante idraulico [m]	Velocità [m/s]				
P56	3.60	4.83	0.83	3.0	2.2	0	5	5	0.13
P57	3.72	4.71	0.69	3.0	1.1	0	5	5	0.13
P58	3.85	4.58	0.71	3.20	1.26	0	10.4	3.5	0.13
P59	3.71	4.71	0.76	3.50	1.24	0	10.4	3.5	0.13
P60	3.92	4.50	0.77	3.20	1.08	0	10.4	3.5	0.13
P61	3.99	4.42	0.81	3.00	1.12	0	10.4	3.5	0.13
P62	4.32	4.08	0.81	2.80	1.37	0	10.4	3.5	0.13
P63	4.20	4.20	0.77	3.20	1.14	10	10.4	3.5	0.13
P64	5.89	2.50	0.51	2.89	0.83	40	10.4	3.5	0.13

Tabella 10 – Variabili idrauliche e dimensioni delle pile in corrispondenza del Biferno.

Di seguito si riportano i valori dello scavo localizzato calcolato con le formulazioni CSU e S/M indicate al paragrafo precedente.

In particolare, la

Tabella **11** riporta i risultati nello scenario in cui si ha il valore del massimo tirante d'acqua nella sezione e la velocità ad esso associata, mentre la

Tabella **12** riporta i risultati nello scenario in cui si ha il valore della massima velocità nella sezione e i tiranti d'acqua associati. La situazione più gravosa è quella relativa al massimo valore di velocità.

N° pila	Profondità di scavo [m] Hmax - V			
	CSU	Melville - Sheppard	Massimo	Media
P56	4.4	3.5	4.4	4.0
P57	4.3	3.3	4.3	3.8
P58	3.2	2.9	3.2	3.0
P59	3.2	2.9	3.2	3.1
P60	3.2	2.9	3.2	3.1
P61	3.2	3.0	3.2	3.1
P62	3.1	3.0	3.1	3.0
P63	3.1	3.4	3.4	3.2
P64	2.6	3.5	3.5	3.0

Tabella 11 – Valore dello scavo localizzato in corrispondenza delle pile del viadotto VI02 sul fiume Biferno secondo

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	64

le diverse equazioni e valore medio e massimo considerando il valore del massimo tirante e della velocità ad esso associata.

N° pila	Profondità di scavo [m] Vmax - H			
	CSU	Melville - Sheppard	Massimo	Media
P56	6.2	5.6	6.2	5.9
P57	6.2	3.8	6.2	5.0
P58	4.8	3.5	4.8	4.1
P59	4.9	3.5	4.9	4.2
P60	4.8	3.2	4.8	4.0
P61	4.7	3.3	4.7	4.0
P62	4.6	3.6	4.6	4.1
P63	4.8	3.9	4.8	4.3
P64	3.7	3.7	3.7	3.7

Tabella 12 – Valore dello scavo localizzato in corrispondenza delle pile del viadotto sul fiume Biferno secondo le diverse equazioni e valore medio considerando il valore della massima velocità e il tirante ad esso associato.

Per realizzare le fondazioni delle pile P56 e P57 saranno realizzati paratie di pali compenetrati ai lati della fondazione stessa che saranno poi demoliti fino ad una profondità di 2.0 m dal p.c. ovvero ad una profondità minore della quota di scalzamento calcolata. Per le restanti invece l'estradosso della fondazione risulta comunque ad una quota minore della profondità di scalzamento calcolata. Il calcolo dello scalzamento deve quindi essere ripetuto considerando una fondazione il cui ingombro complessivo presenta le seguenti dimensioni:

- P56 - P57: 15.70 x 18.70 m
- P58 – P64: 15.70 x 15.70 m

Nel calcolo dello scalzamento sono quindi stati usati i valori del diametro e della lunghezza equivalente riportati in

Tabella **13** e Tabella 14, ottenendo i valori degli scavi riportati in Tabella 15 e Tabella **16**.

MANDATARIA HUB ENGINEERING <small>CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A.R.L.</small>	MANDANTI HYpro	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
		Relazione Idraulica		COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR
		LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	65

N° pila	Lunghezza equivalente Le [m]	Diametro equivalente De [m]
P56	11.85	11.86
P57	11.85	11.91
P58	12.20	10.76
P59	12.20	10.70
P60	12.20	10.79
P61	12.20	10.82
P62	12.20	10.97
P63	12.20	10.91
P64	12.20	11.71

Tabella 13 – Diametri e lunghezze equivalenti delle pile considerando la presenza della fondazione (caso Hmax-V)

N° pila	Lunghezza equivalente Le [m]	Diametro equivalente De [m]
P56	11.85	12.60
P57	11.85	12.60
P58	12.20	11.36
P59	12.20	11.22
P60	12.20	11.36
P61	12.20	11.46
P62	12.20	11.56
P63	12.20	11.36
P64	12.20	12.25

Tabella 14 – Diametri e lunghezze equivalenti delle pile considerando la presenza della fondazione (caso H-Vmax)

N° pila	Profondità di scavo [m] Hmax - V			
	CSU	Melville - Sheppard	Massimo	Media
P56	7.7	6.0	7.7	6.8
P57	7.6	5.5	7.6	6.6
P58	7.1	5.9	7.1	6.5
P59	7.1	6.1	7.1	6.6
P60	7.0	6.1	7.0	6.6
P61	7.0	6.2	7.0	6.6
P62	6.9	6.2	6.9	6.5

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	66

N° pila	Profondità di scavo [m] Hmax - V			
	CSU	Melville - Sheppard	Massimo	Media
P63	6.9	5.9	6.9	6.4
P64	6.0	4.7	6.0	5.4

Tabella 15 – Valore dello scavo localizzato in corrispondenza delle pile del viadotto VI02 sul fiume Biferno secondo le diverse equazioni e valore medio e massimo considerando la presenza della fondazione.

N° pila	Profondità di scavo [m] H - Vmax			
	CSU	Melville - Sheppard	Massimo	Media
P56	11.4	10.1	11.4	10.7
P57	11.4	6.5	11.4	8.9
P58	10.9	7.5	10.9	9.2
P59	11.1	7.4	11.1	9.3
P60	10.9	6.8	10.9	8.9
P61	10.7	7.0	10.7	8.8
P62	10.5	7.9	10.5	9.2
P63	10.9	6.9	10.9	8.9
P64	8.8	5.1	8.8	6.9

Tabella 16 – Valore dello scavo localizzato in corrispondenza delle pile del viadotto VI02 sul fiume Biferno secondo le diverse equazioni e valore medio e massimo considerando la presenza della fondazione.

Pile P01-P54

Poiché si verificano esondazioni anche al di fuori dell'alveo del Biferno, il calcolo dello scalzamento è stato eseguito per alcune pile, rappresentative delle altre, poste nell'area interclusa tra la linea FS esistente e la SS16: pile P04, P13, P15, P17 (Figura 31) nonché nel piano campagna a nord del Biferno: pile P33, P39, P46, P55 (Figura 32).

Come detto in precedenza, per le pile al di fuori dell'alveo il calcolo dello scalzamento è stato eseguito con riferimento alla formulazione *CSU* e *Froehlich*.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	67

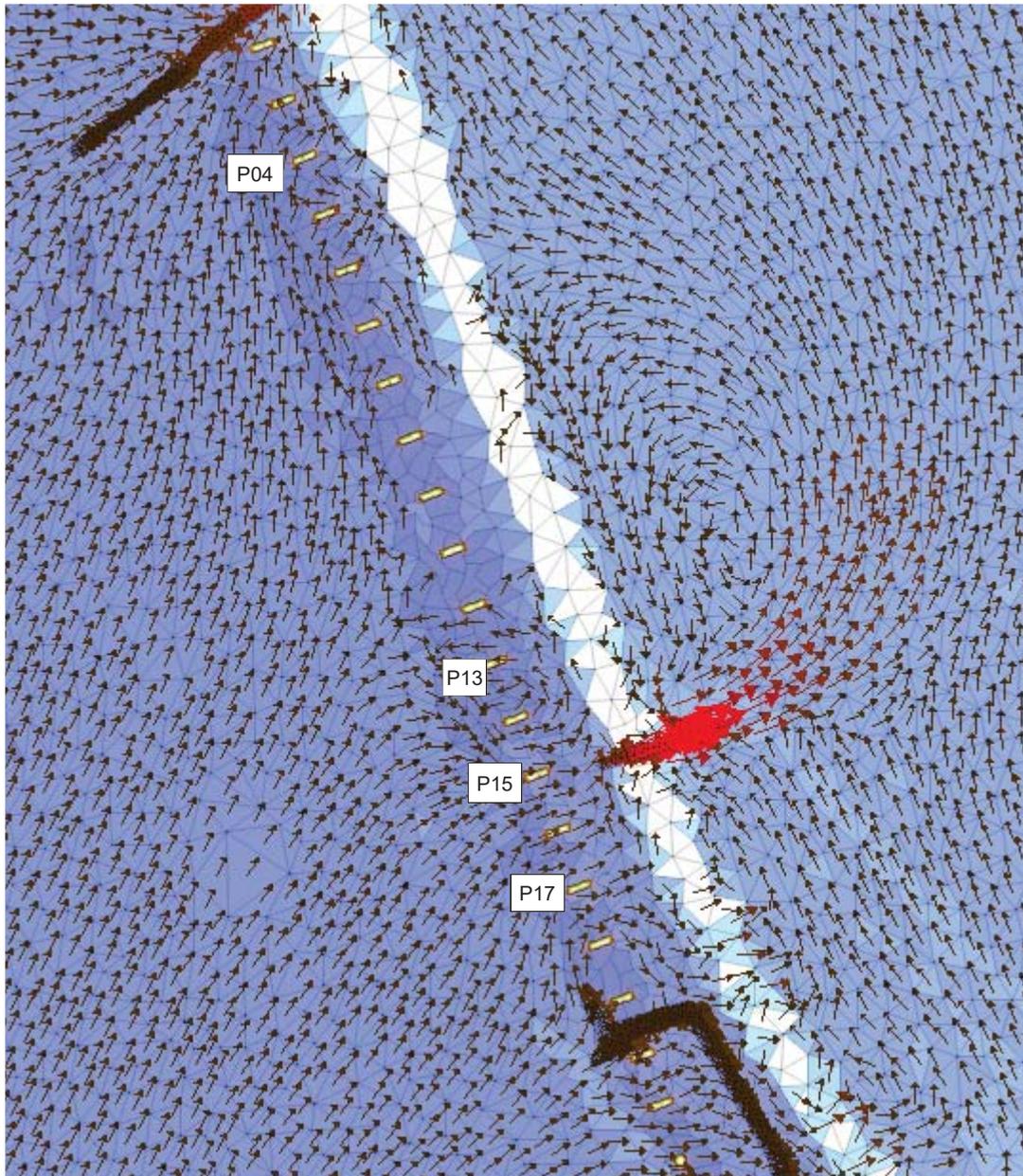


Figura 31 – Planimetria con indicazione delle pile verificate poste all'esterno dell'alveo del Biferno (viadotto VI02, area 2).

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A.R.L.	MANDANTI HYpro	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA											
		Relazione Idraulica			COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR
			LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	68

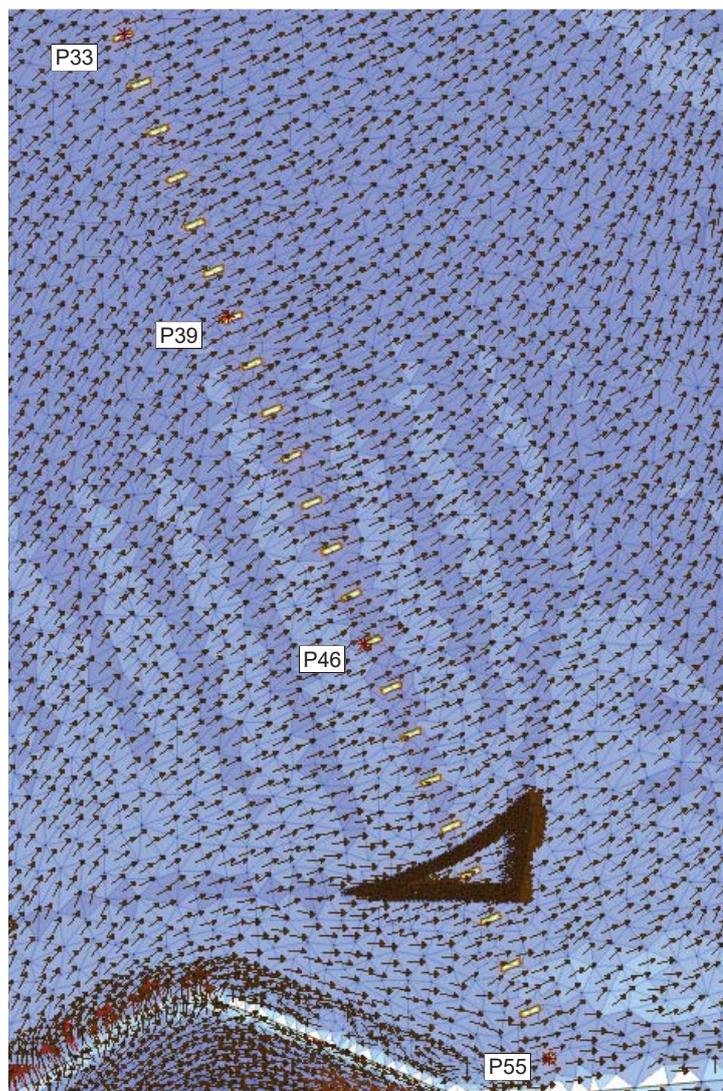


Figura 32 – Planimetria con indicazione delle pile verificate poste all'esterno dell'alveo del Biferno (viadotto VI02).

La tabella seguente riporta i dati utilizzati per la determinazione della massima profondità di scavo per le pile poste a nord del Biferno.

Viadotto	N° pila	Quota terreno [m s.l.m.]	Massimo tirante		Massima Velocità		Incidenz a pila-corrente [°]	Lunghes za della pila [m]	Larghez za della pila [m]	d50 [mm]
			Tirante idraulic o [m]	Velocit à [m/s]	Tirante idraulic o [m]	Velocità [m/s]				
V10	P04	1.56	5.42	0.11	1.50	0.32	45	10.4	3.5	0.002
	P13	1.44	6.24	0.02	1.00	0.26	45	10.4	3.5	0.003

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	69

Viadotto	N° pila	Quota terreno [m s.l.m.]	Massimo tirante		Massima Velocità		Incidenz a pila-corrente [°]	Lunghezza della pila [m]	Larghezza della pila [m]	d50 [mm]
			Tirante idraulico [m]	Velocità [m/s]	Tirante idraulico [m]	Velocità [m/s]				
	P15	1.75	5.93	0.22	1.48	0.32	0	10.4	3.5	0.003
	P17	1.75	5.93	0.12	1.80	0.20	0	10.4	3.5	0.003
	P22	3.65	4.13	0.10	0.33	0.21	0	5	5	0.004
	P33	3.00	4.68	0.22	0.70	0.27	0	10.4	3.5	0.004
	P39	3.26	4.42	0.15	4.40	0.15	0	10.4	3.5	0.004
	P46	3.66	4.02	0.10	0.31	0.25	0	10.4	3.5	0.004
	P55	5.57	2.11	0.07	0.73	0.27	0	5	5	0.026

Tabella 17 – Variabili idrauliche e dimensioni delle pile poste all'esterno dell'alveo del Biferno.

In Tabella 18 e Tabella 19 si riportano i valori dello scavo localizzato calcolato con le formulazioni indicate al paragrafo precedente.

Viadotto	N° pila	Rappresentativa delle pile	Profondità di scavo [m] Hmax-V			
			CSU	Froehlich	Massimo	Media
VI02	P04	P01-P09	2.2	2.53	2.53	2.36
	P13	P10-P14	1.9	1.76	1.90	1.83
	P15	P15	2.2	2.79	2.79	2.50
	P17	P16-P21	2.3	2.47	2.47	2.39
	P22	P22-P23	1.7	2.01	2.01	1.85
	P33	P24-P35	1.7	2.51	2.51	2.10
	P39	P36-P40	3.2	2.27	3.20	2.74
	P46	P41-P54	1.3	2.03	2.03	1.66
	P55	P55	2.3	1.24	2.30	1.77

Tabella 18 – Valore dello scavo localizzato in corrispondenza delle pile poste all'esterno dell'alveo del Biferno secondo le diverse equazioni e valore medio (caso Hmax-V).

Viadotto	N° pila	Rappresentativa delle pile	Profondità di scavo [m] Vmax-H			
			CSU	Froehlich	Massimo	Media
VI02	P04	P01-P09	2.2	1.89	2.20	2.05
	P13	P10-P14	1.9	1.52	1.90	1.71
	P15	P15	2.2	1.83	2.20	2.01
	P17	P16-P21	2.3	1.78	2.30	2.04
	P22	P22-P23	0.7	0.87	0.87	0.79

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	70

Viadotto	N° pila	Rappresentativa delle pile	Profondità di scavo [m] Vmax-H			
			CSU	Froehlich	Massimo	Media
	P33	P24-P35	1.7	1.32	1.70	1.51
	P39	P36-P40	3.2	2.27	3.20	2.73
	P46	P41-P54	1.3	0.97	1.30	1.13
	P55	P55	2.3	1.10	2.30	1.70

Tabella 19 – Valore dello scavo localizzato in corrispondenza delle pile poste all'esterno dell'alveo del Biferno secondo le diverse equazioni e valore medio (caso Vmax-H)..

Le fondazioni delle pile P01-P54 del viadotto VI02 sono posizionate generalmente con un estradosso posto ad un metro sotto il p.c... In ogni caso, in molti casi (6 su 9 nel caso di altezza massima e velocità corrispondente, e 7 su 9 nel caso di velocità massima e altezza corrispondente), la quota di imposta risulta inferiore rispetto agli scalzamenti calcolati considerando la presenza delle sole pile. Il calcolo deve essere quindi ripetuto considerando anche la fondazione che risulta di base quadrata di lato 12.0 m.

La pila circolare P55 presenta invece un plinto di fondazione rettangolare 12.0 x 16.5 m.

Nel calcolo dello scalzamento sono quindi stati usati i valori del diametro e della lunghezza equivalente riportati in Tabella 20 e Tabella 21, ottenendo i valori degli scavi riportati in Tabella 22 e in Tabella 23.

Viadotto	N° pila	Lunghezza equivalente Le [m]	Diametro equivalente De [m]
VI02	P04	11.20	8.57
	P13	11.20	8.51
	P15	11.20	8.60
	P17	11.20	8.60
	P22	8.50	9.77
	P33	11.20	9.00
	P39	11.20	9.10
	P46	11.20	9.24
	P55	10.75	10.46

Tabella 20 – Diametri e lunghezze equivalenti delle pile considerando la presenza della fondazione (caso Hmax – V)

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	71

Viadotto	N° pila	Lunghezza equivalente Le [m]	Diametro equivalente De [m]
VI02	P04	11.20	10.37
	P13	11.20	10.65
	P15	11.20	10.38
	P17	11.20	10.21
	P22	8.50	11.24
	P33	11.20	10.82
	P39	11.20	9.10
	P46	11.20	11.06
	P55	10.75	11.05

Tabella 21 – Diametri e lunghezze equivalenti delle pile considerando la presenza della fondazione (caso H – Vmax)

Viadotto	N° pila	Rappresentativa delle pile	Profondità di scavo [m] Hmax-V			
			CSU	Froehlich	Massimo	Media
VI02	P04	P01-P09	6.7	4.40	6.70	5.55
	P13	P10-P14	6.8	3.05	6.80	4.93
	P15	P15	6.7	4.87	6.70	5.79
	P17	P16-P21	6.7	4.32	6.70	5.51
	P22	P22-P23	2.4	3.96	3.96	3.18
	P33	P24-P35	6.3	4.50	6.30	5.40
	P39	P36-P40	6.3	4.11	6.30	5.21
	P46	P41-P54	6.1	3.70	6.10	4.90
	P55	P55	5.3	2.54	5.30	3.92

Tabella 22 – Valore dello scavo localizzato in corrispondenza delle pile poste all'esterno dell'alveo del Biferno secondo le diverse equazioni e valore medio, considerando anche la presenza della fondazione.

Viadotto	N° pila	Rappresentativa delle pile	Profondità di scavo [m] Vmax-H			
			CSU	Froehlich	Massimo	Media
VI02	P04	P01-P09	7.9	3.30	7.90	5.60
	P13	P10-P14	6.9	2.64	6.90	4.77
	P15	P15	7.8	3.19	7.80	5.49
	P17	P16-P21	8.3	3.11	8.30	5.71
	P22	P22-P23	3.06	1.85	3.06	2.45

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	72

	P33	P24-P35	6.2	2.37	6.20	4.28
	P39	P36-P40	10.5	4.10	10.50	7.30
	P46	P41-P54	4.7	1.77	4.70	3.23
	P55	P55	6.4	2.27	6.40	4.33

Tabella 23 – Valore dello scavo localizzato in corrispondenza delle pile poste all'esterno dell'alveo del Biferno secondo le diverse equazioni e valore medio, considerando anche la presenza della fondazione.

Scalzamento di riferimento

I risultati ottenuti mostrano che la formulazione CSU fornisce valori dello scalzamento sempre maggiori di quelli desunti con le restanti due relazioni considerate. Le differenze variano dal 6% al 22%, per le il gruppo di pile P56-P64, e dal 20% al 32% per le restanti. Inoltre, si osserva uno scarto non trascurabile tra i valori massimi e medi, mediamente dell'ordine del 45% e con picchi anche superiori del 60% per il gruppo di pile P01-P55.

Pertanto, sulla base di quanto osservato, tenuto conto della lunghezza del viadotto in oggetto e quindi del numero di pile in progetto e considerato che il Fiume Biferno sarà oggetto di interventi di arginatura da parte della regione Molise che renderanno le aree oggi soggette a inondazione esenti dal rischio idraulico, si assume quale valore di riferimento per il dimensionamento delle fondazioni lo scalzamento massimo tra le due correlazioni a scopo cautelativo.

Pile P56-P64

N° pila	Profondità di scavo [m] H - Vmax			
	CSU	Melville - Sheppard	Massimo	Media
P56	11.4	10.1	11.4	10.7
P57	11.4	6.5	11.4	8.9
P58	10.9	7.5	10.9	9.2
P59	11.1	7.4	11.1	9.3
P60	10.9	6.8	10.9	8.9
P61	10.7	7.0	10.7	8.8
P62	10.5	7.9	10.5	9.2
P63	10.9	6.9	10.9	8.9
P64	8.8	5.1	8.8	6.9

Pile P01-P55

	N° pila	Rappresentativa delle pile	Profondità di scavo [m] Vmax-H
--	---------	----------------------------	--------------------------------

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	73

Viadotto			CSU	Froehlich	Massimo	Media
VI02	P04	P01-P09	7.9	3.30	7.90	5.60
	P13	P10-P14	6.9	2.64	6.90	4.77
	P15	P15	7.8	3.19	7.80	5.49
	P17	P16-P21	8.3	3.11	8.30	5.71
	P22	P22-P23	3.06	1.85	3.06	2.45
	P33	P24-P35	6.2	2.37	6.20	4.28
	P39	P36-P40	10.5	4.10	10.50	7.30
	P46	P41-P54	4.7	1.77	4.70	3.23
	P55	P55	6.4	2.27	6.40	4.33

7.2.4 Verifica allo scalzamento (Spalle)

Si riporta di seguito il valore dello scalzamento atteso per la spalla S01 valutato con la formulazione riportata al paragrafo 7.2.2. La spalla S02 non è interessata dalla corrente idrica.

<i>Spalla S01</i>				
y [m]	K [-]	L [m]	L/y	ds [m]
6.91	0.6	5.9	0.85	7.08

7.2.5 Protezione delle pile dall'erosione: calcolo delle tensioni agenti e resistenti

Ai fini della valutazione dell'efficacia anti-erosiva di una protezione del fondo e/o delle sponde di un alveo è necessario verificare la resistenza al trascinamento dei massi, garantita dal peso del materiale costituente la protezione. Per una scogliera non si ha crisi della protezione finché non viene raggiunta la tensione tangenziale critica di inizio movimento, che dipende esclusivamente dalla forma del pietrame e dalle sue dimensioni.

La tensione tangenziale agente massima al fondo è funzione del raggio idraulico R, del peso specifico dell'acqua γ_w e della pendenza del fondo i_f :

$$\tau_m = \gamma_w \cdot R \cdot i_f$$

Nel caso di alvei larghi e poco profondi si compie un errore trascurabile sostituendo R

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	74

(raggio idraulico) con h (tirante idraulico rispetto al fondo); questa semplificazione può essere effettuata per esempio nelle aree golenali, dove l'ampiezza della sezione di deflusso è sufficientemente elevata rispetto al tirante.

Per quanto riguarda la resistenza al trascinamento si definisce tensione massima di trascinamento τ_{cr} il massimo sforzo tangenziale oltre il quale il materiale di fondo comincia a muoversi. Per i materiali non coesivi la formula generalmente utilizzata è la formula di Shields:

$$\tau_{cr} = C^* \cdot (\gamma_m - \gamma_w) \cdot d_{75}$$

dove:

τ_{cr} = tensione massima di trascinamento (kg/m²);

C^* = coefficiente di Shields, adimensionale;

γ_m = peso specifico del materiale d'alveo;

γ_w = peso specifico dell'acqua (1000 kg/m²);

d_{75} = diametro del vaglio che consente il passaggio del 75 % del materiale d'alveo (m).

Nel caso di pietrame sciolto il coefficiente di Shields vale 0.047 e il peso specifico γ_m può essere assunto pari a 2600 kg/m³.

Per il materiale non coesivo situato su un fondo non orizzontale, occorre tenere conto della riduzione della tensione massima di trascinamento $\tau_{cr,s}$ (dovuta all'effetto della pendenza della sponda) mediante un coefficiente correttivo:

$$\tau_{cr,s} = \tau_{cr} \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \varphi}{\sin^2 \theta}}$$

in cui:

φ = angolo di attrito interno del materiale (non coesivo) che costituisce la sponda;

θ = angolo di inclinazione della sponda sull'orizzontale.

L'equazione scritta in precedenza si presta ad alcune semplici osservazioni che risultano tuttavia essere di interesse pratico. La prima riguarda l'angolo θ che deve risultare minore di quello di attrito interno φ del materiale poiché il termine sotto radice ha significato solo se positivo; condizione questa necessaria ma non sufficiente per la stabilità del materiale.

La seconda osservazione riguarda la tensione critica sulla sponda $\tau_{cr,s}$, superata la quale prende origine il moto delle particelle, che è minore di quella τ_{cr} sul fondo. Quando cioè sul fondo si verifichi la condizione limite $\tau \cong \tau_{cr}$ il materiale della sponda è esposto alla rimozione per essere $\tau_{cr,s} \leq \tau_{cr}$; pertanto la sponda va protetta e rivestita con materiale di maggiore

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	75

pezzatura rispetto a quello posto come protezione al fondo.

Le verifiche eseguite per le sistemazioni idrauliche del viadotto oggetto dello studio sono riportate di seguito.

7.2.6 Definizione delle opere di protezione spondale

Le opere di protezione assecondano il tracciato planimetrico del viadotto e la dislocazione delle pile: prima della realizzazione delle protezioni spondali è da prevedersi la rimozione della porzione ritenuta interferente delle opere provvisoriale (diaframature o pali) previste per la costruzione delle pile.

Per le protezioni spondali e di fondo si prevede l'utilizzo di massi sciolti di diametro 0.8 m.

Le verifiche delle protezioni sono riportate nella tabella seguente, considerando un valore della pendenza del fondo di 0.17% e un raggio idraulico ottenuto dalla modellazione idraulica pari a 6.2:

Sponda	Tensione agente [daN/m ²]	Tensione resistente [daN/m ²]	Coeff. di sicurezza
Sinistra (Pila P32)	7.91	46.01	5.8
Destra (Pila P33)	7.91	46.01	5.8

Tabella 24 – Verifica delle protezioni di sponda.

Nella seguente tabella si verifica la protezione al fondo di progetto con riferimento alle pile poste sul piano campagna in sinistra idrografica (viadotto VI02, pile P01-P54), la pila posta in golena sinistra (viadotto VI02, pila P56) e le pile in golena destra (viadotto VI02, pile P57-P64).

Viadotto	Pila	Rappresentativo delle pile	Pendenza	Tirante [m]	RH [m]	Tensione agente [daN/m ²]	Diametro massi [m]	Tensione resistente [daN/m ²]	Coeff. di sicurezza
VI02	P17	P01-P54	0.001	6.00	6.00	6.00	0.8	60.16	10.0
VI02	P33		0.0016	4.91	4.91	7.86	0.8	60.16	7.7
VI02	P56	P56	0.0017	4.80	6.2	10.54	0.8	60.16	5.7
VI02	P60	P57-P64	0.0017	4.50	3.0	5.10	0.8	60.16	11.8

Tabella 25 – Verifica delle protezioni di fondo.

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	76

8 CRITERI DI COMPATIBILITA' IDRAULICA

Il progetto ha lo scopo di supportare il raddoppio della ferrovia Termoli - Lesina nel tratto compreso tra Termoli e Ripalta.

Questa tratta attraversa sia le zone fluviali che perfluviali del Fiume Biferno. Nel nostro studio, abbiamo esaminato se l'infrastruttura proposta sia compatibile dal punto di vista idraulico con il territorio circostante.

Abbiamo anche condotto un'analisi dettagliata della sicurezza del corpo ferroviario, identificando le strutture di controllo idraulico più adeguate a migliorare la gestione delle interferenze tra le infrastrutture ferroviarie esistenti e quelle in fase di progettazione con il normale flusso delle acque.

Gli strumenti normativi presi a riferimento nella valutazione della compatibilità idraulica delle opere di progetto sono:

- Progetto di Piano Stralcio per l'Assetto idrogeologico del Bacino Regionale del Fiume Biferno e Minori (PAI) – *Relazione Generale* – assetto di versante e assetto idraulico – redatto dall'Autorità di Bacino dei fiumi Trigno, Biferno e Minori, Saccione e Fortore – documento adottato nell'ottobre 2005;
- Progetto di Piano Stralcio per l'Assetto idrogeologico del Bacino Regionale del Fiume Biferno e Minori (PAI) – *Norme di Attuazione* – assetto di versante e assetto idraulico – redatto dall'Autorità di Bacino dei fiumi Trigno, Biferno e Minori, Saccione e Fortore – documento adottato nell'ottobre 2005.

Il PAI individua porzioni di territorio caratterizzate da una condizione di pericolosità idraulica. In sede di redazione del piano, la valutazione della pericolosità idraulica è stata condotta utilizzando sia i risultati dell'analisi idraulica (per le aree di fondovalle più importanti, oggetto di rilievo topografico) sia quelli dell'analisi geomorfologica storico-inventariale (per le rimanenti, meno importanti), in modo da coprire tutta l'area di studio.

Tale individuazione è un importante strumento che ha condotto alla delimitazione delle aree a potenziale rischio inondazione.

La linea ferroviaria in progetto attraversa tali aree principalmente in viadotto con il fine di rendere idraulicamente trasparente il tratto interessato.

Congiuntamente all'analisi della cartografia del PAI, nel presente studio è stato realizzato un modello bidimensionale del Fiume Biferno, al fine di verificare con maggior precisione

	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	77

l'effettiva estensione delle aree a potenziale allagamento del fiume, assieme a una stima accurata dei livelli idrici e delle velocità.

8.1 Analisi del tracciato

Il tracciato ferroviario in parte si sviluppa in aree a diversa pericolosità idraulica (Figura 27). In Tabella 26 sono riportate le definizioni della relazione generale del PAI – Biferno e Minori. Nel caso in esame le aree sono state studiate dall'AdB su base idraulica, attraverso una modellazione numerica.

Classe di Pericolosità	Tempo di ritorno area inondabile (per le aree studiate su base idraulica)	Tipologia area (per le aree studiate su base geomorfologica)
P3	Inferiore a 30 anni	Alveo attivo, aree golenali e alluvioni inserite nella dinamica fluviale di breve periodo.
P2	Tra 30 anni e 200 anni	Alveo attivo, aree golenali e alluvioni inserite nella dinamica fluviale di medio periodo.
P1	Tra 200 anni e 500 anni	Alveo attivo, aree golenali e alluvioni di fondovalle inserite nella dinamica fluviale di lungo periodo

Tabella 26 – Classi di pericolosità idraulica – PAI Biferno e Minori

Secondo le carte di pericolosità il tracciato ricade all'interno dell'area di pericolosità P2 e P3 (Figura 33).

Confrontando le aree pubblicate all'interno del PAI (Figura 33) con quelle dedotte dalle simulazioni numeriche (Figura 34, per la piena TR 500 anni, per la configurazione ante operam 1), si osserva una buona corrispondenza tra le estensioni delle aree allagabili.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	78

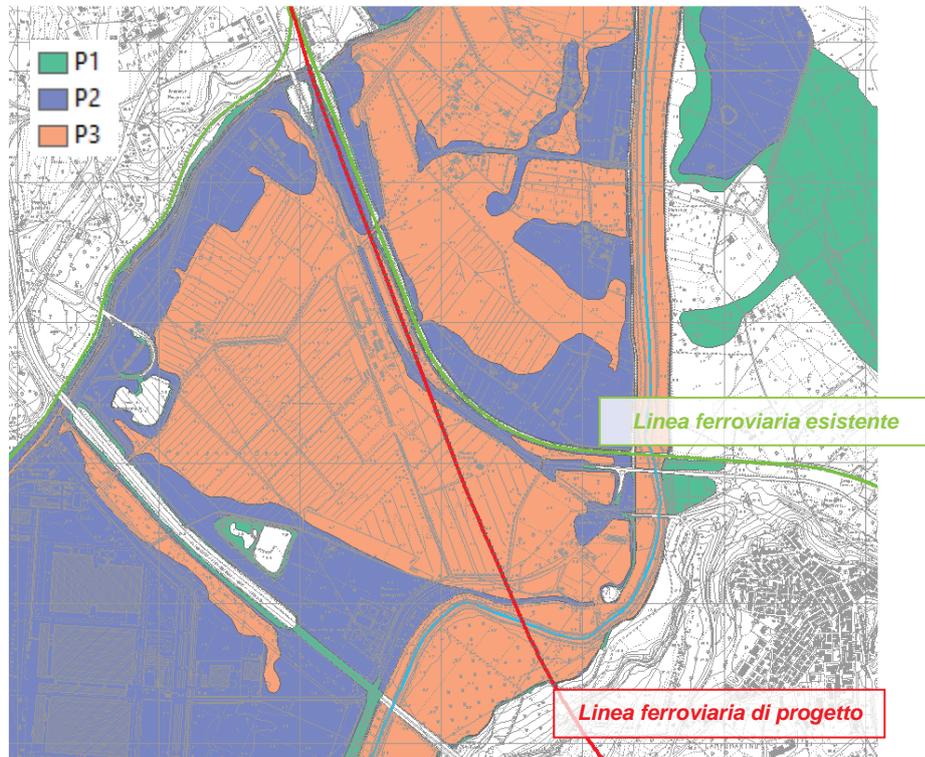


Figura 33 – Sovrapposizione del tracciato con le aree di pericolosità idraulica del PAI.

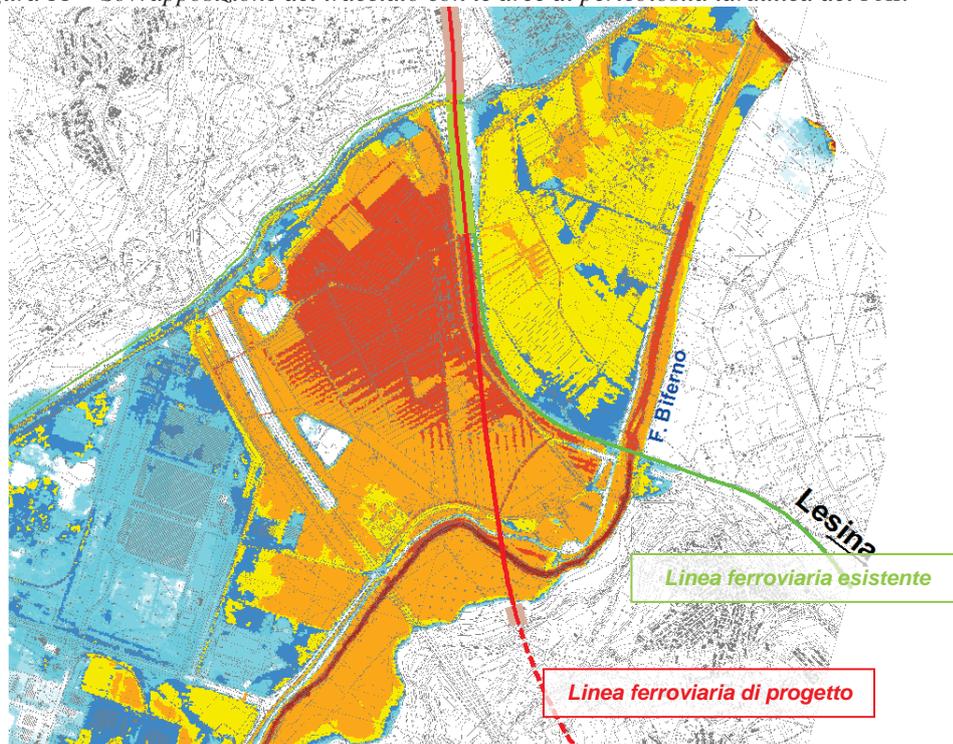


Figura 34 – Sovrapposizione del tracciato con l'estensione delle aree allagate – configurazione ante operam 1 – TR 500 anni

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	79

Si riporta di seguito la sovrapposizione dell'asse del tracciato di progetto con la fascia di riassetto fluviale definita dell'AdB del Biferno e Minori. All'interno delle NTA, è contenuta la seguente definizione di tale area:

"...Fascia di riassetto fluviale: insieme delle aree all'interno delle quali si possono far defluire con sicurezza le portate caratteristiche di un corso d'acqua, comprese quelle relative ad eventi estremi e ad eventi con tempi di ritorno (TR) di 200 anni, mediante la realizzazione di tutte le opere necessarie all'assetto definitivo del corso d'acqua come previsto dal presente PAI in funzione del ripristino di una adeguata sezione idraulica, della realizzazione degli interventi di laminazione, della riqualificazione ambientale del corso d'acqua, della difesa di aree di particolare pregio ambientale connesse al corso d'acqua e di tutela della pubblica incolumità".

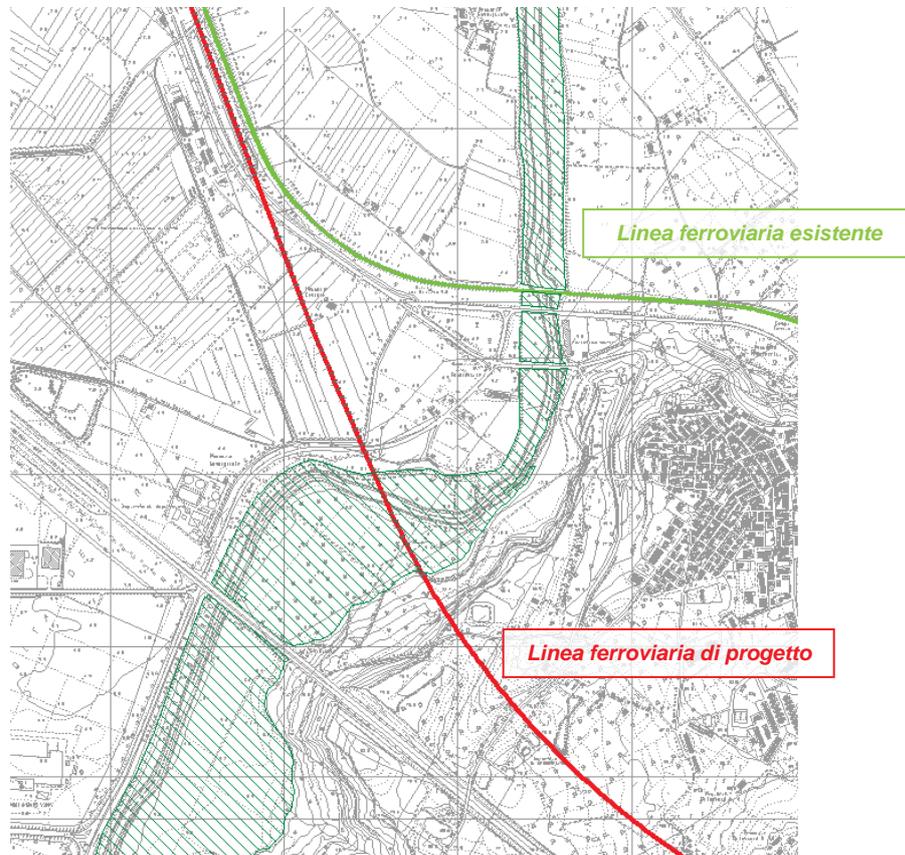


Figura 35 – Sovrapposizione del tracciato con la fascia di riassetto fluviale.

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	80

Tale fascia viene occupata del tracciato solo in corrispondenza dell'attraversamento del Fiume Biferno.

La disciplina relativa alle fasce di riassetto fluviale prevale, in caso di sovrapposizione, sulla disciplina relativa alle aree a diversa pericolosità.

Nella fascia di riassetto fluviale, tra gli altri, sono consentiti i seguenti interventi:

“adeguamento e ristrutturazione delle opere relative alle reti dei trasporti ed alle reti di adduzione e distribuzione dei servizi esistenti, sia pubbliche che di interesse pubblico, non delocalizzabili purché approvati dalla Autorità idraulica competente previo parere del Comitato Tecnico della Autorità di Bacino senza aggravare le condizioni di pericolosità idraulica e pregiudicare gli interventi previsti dal PAI.”

8.2 Verifiche idrauliche

In base a quanto richiesto delle NTA del PAI – Biferno e Minori ed al manuale di progettazione ferroviaria, lo studio idraulico è stato condotto per i seguenti tempi di ritorno: 30, 200, 300 e 500 anni. In accordo al PAI Biferno e Minori, la portata di progetto di opere strutturali è quella con tempo di ritorno di 200 anni. Il manuale di progettazione ferroviaria richiede che per la verifica degli attraversamenti di corsi d'acqua con bacino imbrifero superiore a 10 kmq, si debba adottare 300 anni come tempo di ritorno.

Gli idrogrammi utilizzati sono riportati al Capitolo 3 e nella Relazione Idrologica annessa al progetto.

Per gli attraversamenti principali, il Manuale di Progettazione ferroviaria prevede che:

“Relativamente ai requisiti idraulici nei confronti dei livelli di massima piena si specifica quanto segue:

- *franco minimo tra l'intradosso dell'opera e la quota del carico idraulico totale corrispondente al livello idrico di massima piena, calcolato come precedentemente descritto, pari a 0.50 m e comunque non inferiore ad 1.5 m sul livello idrico;*

- *posizionamento delle spalle del viadotto in modo tale da non ridurre significativamente la sezione di deflusso in alveo ed in golena;*

- *posizionamento e geometria delle pile in alveo ed in golena in modo da non provocare significativi fenomeni di rigurgito ovvero fenomeni di erosione localizzati sulle sponde ed in alveo;*

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	81

– Il calcolo dello scalzamento localizzato indotto dalle opere di sostegno deve essere valutato considerando le dimensioni delle pile; nel caso in cui il plinto di fondazione venga messo allo scoperto dall'erosione, le dimensioni maggiori e le forme più tozze dello stesso provocano un ulteriore scalzamento e pertanto, in tale condizione, il calcolo dell'erosione localizzata va ripetuto considerando le dimensioni del plinto invece che quelle della pila.”

Le Norme di Attuazione del PAI Biferno e Minori esprimono a riguardo le modalità con cui eseguire le verifiche idrauliche:

“Le verifiche idrauliche saranno condotte a seconda dei casi con modelli di moto permanente, vario monodimensionale, vario bidimensionale.

Lo schema di moto permanente può essere utilizzato qualora sia sufficiente determinare i livelli idrometrici senza compiere valutazioni circa la capacità di laminazione del corso d’acqua.

La modellazione in moto vario sarà utilizzata qualora il fenomeno di laminazione sia significativo o siano presenti significative esondazioni del corso d’acqua.

La relazione idraulica dovrà evidenziare le condizioni al contorno che si sono assunte e le scabrezze. Si dovrà determinare la massima portata smaltibile in alveo e le aree inondabili con tempi di ritorno di 30, 100, 200 e 500 anni.

Negli studi connessi alla realizzazione di opere idrauliche vanno condotti calcoli per definire le condizioni di deflusso allo stato attuale, allo stato di progetto e nelle eventuali fasi intermedie. I progetti che non garantiscono la messa in sicurezza per tempo di ritorno 200 anni devono stimare il rischio residuo”.

Vista la non trascurabilità degli effetti di laminazione, la presenza di esondazioni significative, per il Fiume Biferno si è scelto di sviluppare un modello idraulico a moto vario di tipo bidimensionale. Sono state considerate diverse configurazioni progettuali, ante e post operam che comprendono configurazioni attuali, intermedie e progettuali.

I coefficienti di scabrezza adottati sono quelli previsti delle Norme di Attuazione del PAI – Biferno e Minori (si veda il paragrafo 5.4), così come i franchi minimi per le verifiche idrauliche (si veda paragrafo 7.1).

8.3 Sistemazioni idrauliche

Gli interventi previsti sono stati definiti applicando, laddove possibile, criteri di ingegneria

	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	82

naturalistica ed utilizzando laddove possibile, opere di protezione di tipo “elastico” quali massi sciolti, che costituiscono un’affidabile protezione degli stessi dall’azione erosiva della corrente di piena.

Le sistemazioni idrauliche sono state progettate in generale con lo scopo di:

- assicurare con il periodo di ritorno previsto la sicurezza dell’infrastruttura ferroviaria;
- non alterare le condizioni di deflusso idrico e solido nel tratto oggetto di studio;
- impedire divagazioni che possano andare ad interessare le opere di fondazione delle pile o delle spalle;
- evitare le conseguenze derivanti dai fenomeni di erosione localizzata.

8.4 Analisi di compatibilità idraulica

L’infrastruttura ferroviaria di progetto in parte insiste sulle aree di pericolosità idraulica P1, P2 e P3.

Sulla base delle risultanze dello studio idrologico – idraulico sono stati definiti:

- manufatti di trasparenza del rilevato ferroviario, laddove necessario;
- adeguate protezioni dei rilevati ferroviari;
- la rete di drenaggio per la piattaforma ferroviaria e stradale;
- la protezione delle pile, relativamente a quelle interessate da azioni della corrente.

Si rimanda ai paragrafi precedenti per la descrizione degli interventi di presidio previsti.

Le soluzioni prescelte seguono gli indirizzi indicati nelle norme nazionali ed in quelle riportate nelle norme di attuazione del PAI, in quanto:

- ✓ il potenziamento della linea ferroviaria in progetto risponde a specifiche esigenze di sviluppo ed è legata a fattori di pubblico interesse;
- ✓ le opere previste non aggravano lo stato di dissesto, piuttosto migliorano l’efficienza idrogeologica del suolo, tenendo in conto gli impatti sull’ambiente fluviale e sul paesaggio;
- ✓ sono state preferite, laddove possibile, tecniche di ingegneria naturalistica finalizzata alla rinaturalizzazione degli alvei;
- ✓ gli studi idrologici-idraulici sviluppati per verificare la compatibilità delle opere rispettano le indicazioni delle Norme di Attuazione del PAI, della Normativa nazionale;
- ✓ per il viadotto la protezione delle pile con massi sciolti garantisce la sicurezza dell’opera rendendo stabile il fondo e prevenendo eventuali dissesti da erosione;

MANDATARIA  MANDANTI 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	83

Alla luce delle precedenti considerazioni, la configurazione finale di progetto risulta idraulicamente compatibile con le norme della legislazione vigente di protezione dai rischi idraulici e con la conformazione odierna dei luoghi.

9 STUDIO FASE REALIZZATIVA

All'interno della fase di realizzazione, è in corso uno studio idraulico che si concentra sulla realizzazione di un canale transitorio progettato per consentire la cantierizzazione dell'area di interesse. Questo studio si basa sulla progettazione di argini in grado di contenere una portata massima durante eventi di piena con un tempo di ritorno di 5 anni. L'idrogramma di piena a 5 anni è stato ottenuto attraverso un'analisi di regressione utilizzando il metodo di scalamento temporale. Questa analisi si basa su gli idrogrammi noti forniti dall'Autorità di Bacino competente, con tempi di ritorno di 500, 300, 200 e 30 anni.

Per la verifica dei componenti del progetto, è stato utilizzato un modello idraulico bidimensionale (2D) in regime di moto vario mediante l'uso del software HEC-RAS. La superficie oggetto di studio è stata adattata in base ai dati topografici forniti dalla Regione, utilizzando un modello digitale del terreno (DTM) con una risoluzione superiore al metro.

Questo approccio tecnico consente di ottimizzare la progettazione del canale transitorio e degli argini per garantire una gestione adeguata delle piene con un tempo di ritorno di 5 anni, utilizzando dati idrologici dettagliati e strumenti di modellazione avanzati.

9.1 Metodo di Scalamento Temporale

Il metodo di scalamento temporale, in ambito idrologico, è una procedura tecnica utilizzata per stimare idrogrammi di portata a tempi di ritorno diversi a partire da dati idrologici noti a tempi di ritorno superiori. Questo approccio si basa sulla premessa che la relazione tra il tempo di ritorno e la portata possa essere approssimata come una funzione potenziale. In termini tecnici, l'idrogramma noto a un tempo di ritorno maggiore (ad esempio, 200 anni) viene ridimensionato o scalato in base al rapporto tra i tempi di ritorno noti e il tempo di ritorno desiderato (ad esempio, 5 anni). Il valore dell'esponente della funzione potenziale, solitamente denominato "a," influenza la forma dell'idrogramma scalato e può variare a seconda delle condizioni idrologiche specifiche del bacino.

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	84

$$Q_{Tr5} = Q_{Trx} \left(\frac{Tr_5}{Tr_x} \right)^a$$

Dove:

Q_{Tr5} è la portata al tempo di ritorno desiderato in m³/s;

Q_{Trx} è la portata nota con tempo di ritorno maggiore in m³/s;

$\frac{Tr_5}{Tr_x}$ è in rapporto tra il tempo di ritorno desiderato e il tempo di ritorno noto, espresso in anni.

a è il valore esponente della funzione potenziale, che influenza la forma dell'idrogramma scalato (adimensionale).

Questo metodo consente di ottenere una stima dell'idrogramma per il tempo di ritorno desiderato, consentendo la valutazione dei potenziali impatti delle piene o delle precipitazioni a tempi di ritorno diversi da quelli direttamente osservati nei dati storici. La corretta applicazione del metodo richiede dati idrologici completi e affidabili e l'impiego di analisi statistiche adeguate a ottenere risultati accurati.

Sono stati utilizzati gli idrogrammi di piena a 30, 200, 300 e 500 anni, disponibili dalla Autorità di Bacino competente, che ha indicato quanto segue nella nota di invio dei dati da utilizzare (prot. n.2624/2018 del 08-01-2018):

“Si precisa che gli idrogrammi di piena (a favore di sicurezza) sono desunti dal solo modello idrologico e non tengono conto di fenomeni di esondazione e/o possibili fenomeni di rotture arginali. Attesa l'impossibilità di prevedere eventuali fenomeni di rotture arginali per tempi di ritorno superiori a 200 anni (tr di dimensionamento delle opere in progetto) si ritiene che qualsiasi opera infrastrutturale possa essere dimensionata a vantaggio di sicurezza considerando le portate di piena dal solo modello idrologico.”

È stata condotta un'analisi di calibrazione dei parametri di scalamento, impiegando tutti i dati disponibili relativi agli idrogrammi. In particolare, è stata effettuata un'interrogazione degli idrogrammi per determinare la portata massima in condizioni di piena, variando il periodo di ritorno. Successivamente, è stata condotta un'analisi di regressione e applicata una curva di legge di potenza. Il risultato ottenuto ha determinato il valore del parametro “ a ” pari a 0.2516 per il Fiume Biferno, mentre “ a ” è pari a 0.2254 per il Torrente Cigno.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	85

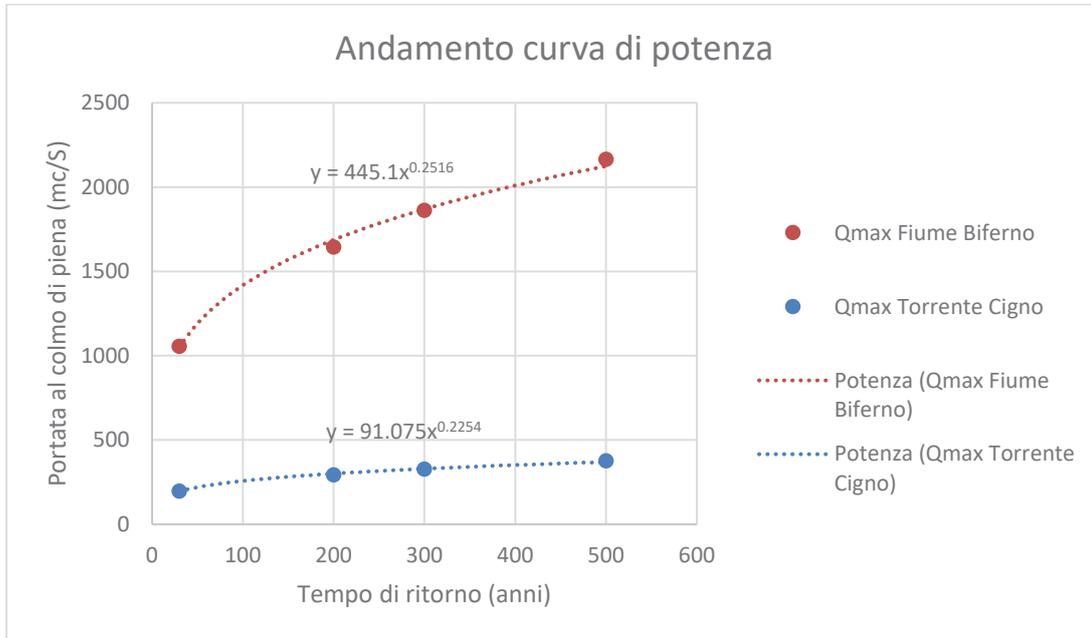


Figura 36 Andamento della curva di potenza che confronta le portate al colmo di piena con tempo di ritorno 30, 200, 300 e 500 anni.

	F. Biferno	t. Cigno
Tr (anni)	Q (mc/s)	Q (mc/s)
500	2165.7	376.7
300	1863.9	328.3
200	1646.4	293.6
30	1056.2	197.7

Tabella 27 Portate al colmo di piena con tempo di ritorno pari a 500, 300, 200 e 30 anni.

Una volta ottenuto il parametro a è stato possibile ricostruire l'idrogramma al colmo di piena con tempo di ritorno pari a 5 anni sia per il fiume Biferno che per il torrente Cigno.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	86

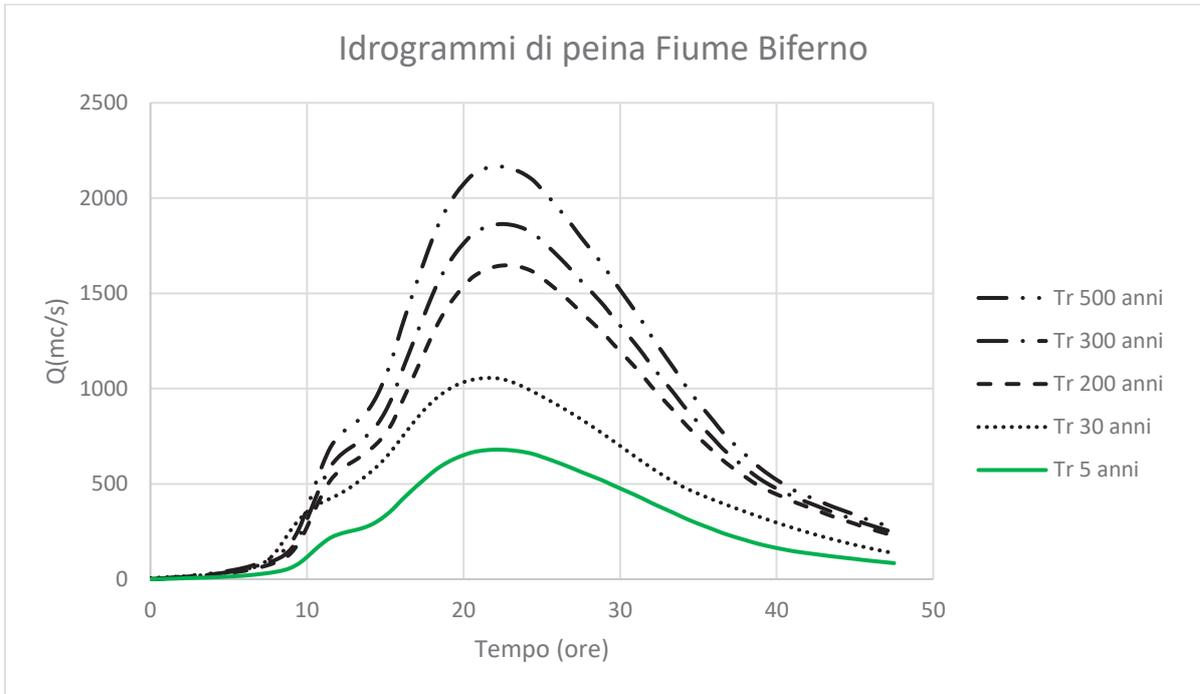


Figura 37 Andamento della portata al colmo di piena per il Fiume Biferno con differente tempo di ritorno.

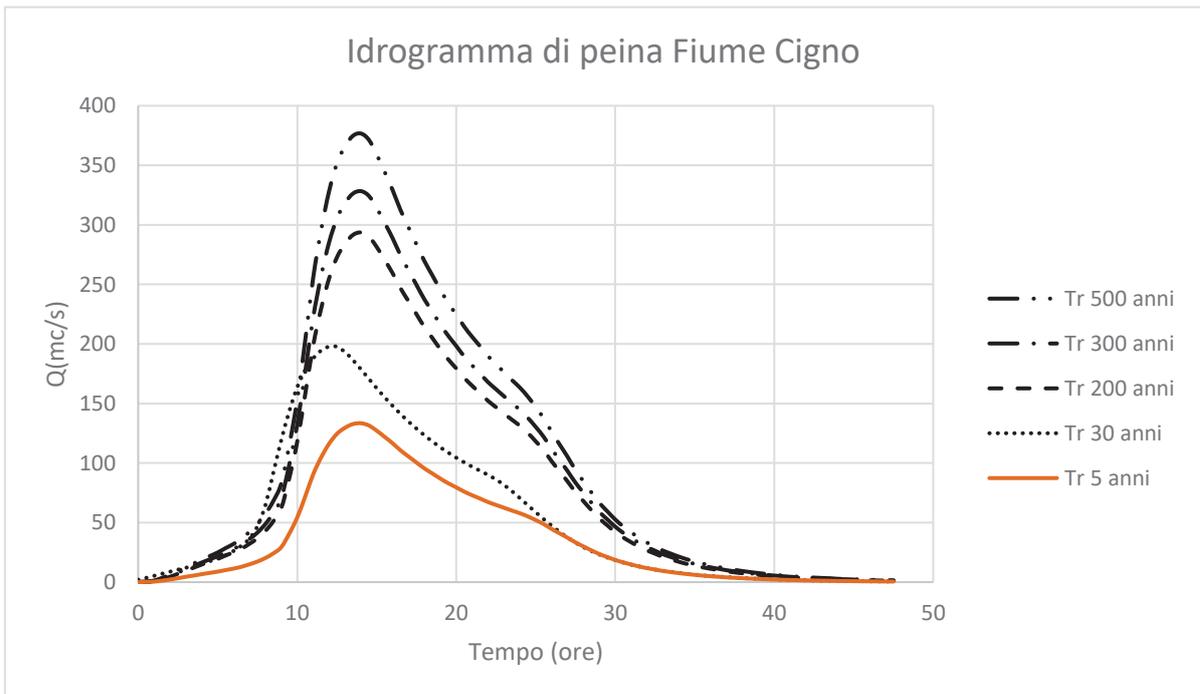


Figura 38 Andamento della portata al colmo di piena per il torrente Cigno con differente tempo di ritorno.

	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	87

9.2 Modellazione idraulica

Per condurre un'approfondita valutazione dei componenti del progetto, è stato utilizzato un modello idraulico bidimensionale (2D) per esaminare il flusso idrico in diverse condizioni.

Questa analisi è stata condotta attraverso l'impiego del software HEC-RAS. Sono stati formulati cinque scenari distinti al fine di valutare il comportamento idraulico in situazioni di piena.

Questi scenari comprendono:

- **Stato di Fatto:** Rappresenta la situazione attuale o il contesto idraulico esistente con portata a tempo di ritorno 5 anni.
- **Fase 1:** Indica la prima fase del progetto o intervento pianificato con portata a tempo di ritorno 5 anni.
- **Fase 2:** Rappresenta la seconda fase del progetto con portata a tempo di ritorno 5 anni.
- **Fase 1.1:** Questo scenario è una sottosezione in cui viene realizzata una verifica idraulica della Fase 1 con portata a tempo di ritorno 200 anni.
- **Fase 2.1:** Analogamente al caso precedente, rappresenta una sottosezione all'interno della Fase 2 per valutare il comportamento idraulico delle strutture con portata a 200 anni.

La superficie specifica oggetto dell'indagine è stata adattata in conformità ai dati topografici forniti dalla Regione. Questo adattamento è stato realizzato utilizzando un modello digitale del terreno (DTM) caratterizzato da una risoluzione estremamente dettagliata, superiore al metro. Si richiama la figura 15 che rappresenta il dominio della modellazione. Vengono utilizzati gli stessi parametri di condizioni al contorno come realizzato nelle modellazioni precedenti sulla sezione 5 di questo studio.

Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	88

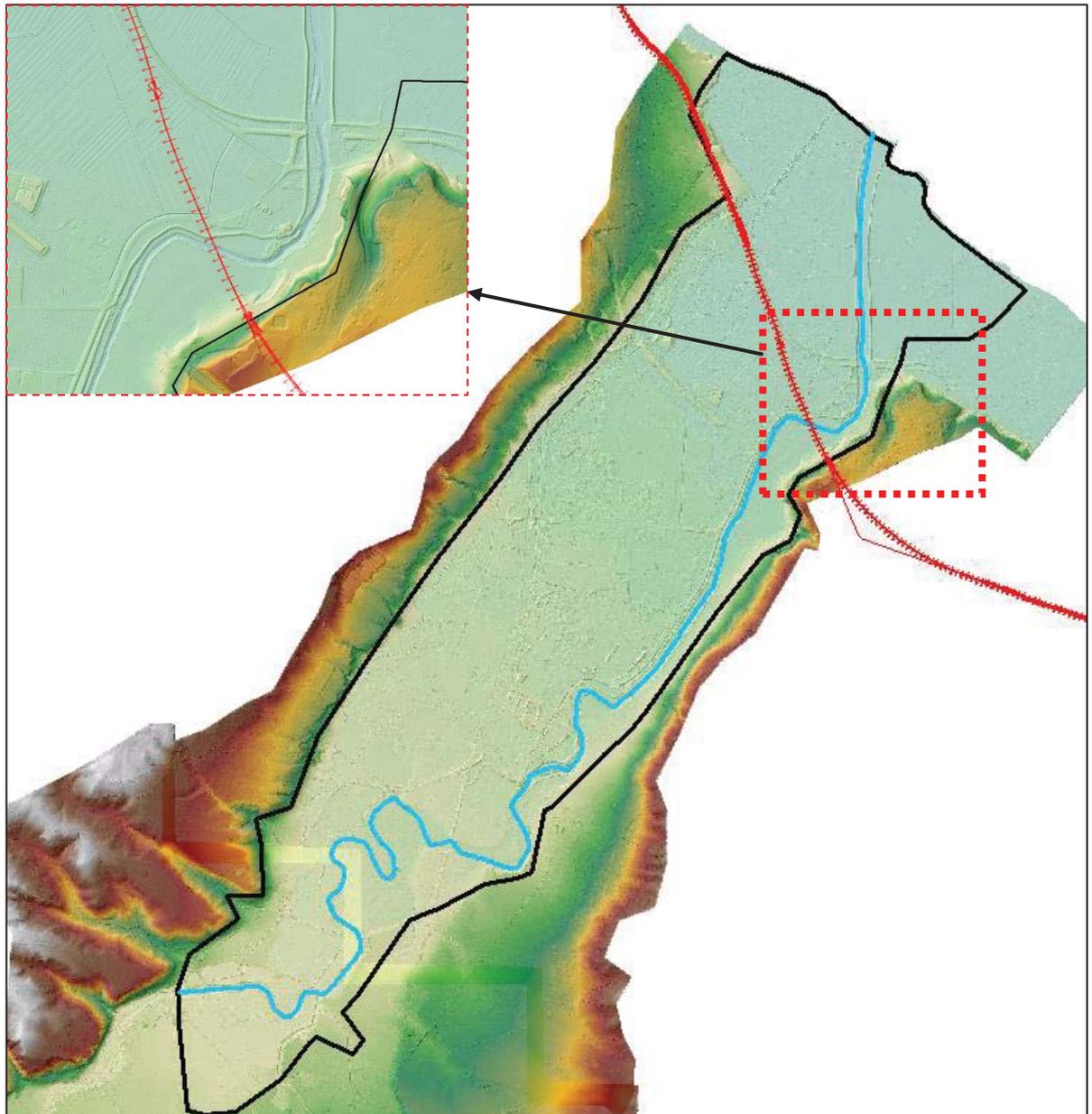


Figura 15 Dominio della modellazione

Mediante l'impiego degli idrogrammi di piena con un periodo di ritorno di 5 anni, ottenuto tramite il metodo di scalamento temporale precedentemente descritto, sono stati ipotizzati alcuni scenari di fasizzazione concernenti la modifica della posizione dell'alveo del fiume Biferno. Questa modifica è finalizzata a consentire la realizzazione delle strutture di fondazione e l'innalzamento della struttura VI02 in condizioni di sicurezza idraulica accettabile durante le stesse operazioni. Il piano idraulicamente più idoneo per tale scopo

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A.R.L.	MANDANTI HYpro	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
		Relazione Idraulica	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC RI	OPERA 7 DISCIPLINA ID 00 02			PROGR 101

comporta la realizzazione in fasi distinte di due argini temporanei all'interno del letto del fiume Biferno, insieme all'escavazione deviante delle acque di magra. In particolare, si illustra:

FASE 1 (Lato NORD):

- Realizzazione di scavo trapezio (base minore 15.00m, sponde 1:1 con altezza di circa 3.50m) con sezione pari a 70mq/ml per uno sviluppo longitudinale di 280m; lo scavo è utilizzato per spostare le acque di magra e rendere agevole la realizzazione delle due pile della campata principale;
- Realizzazione di un argine provvisorio trapezio con testa larga 2.00m, sponde 1:1 e altezza 4.50m, sezione pari a 27mq/ml per uno sviluppo totale di 360.00m;

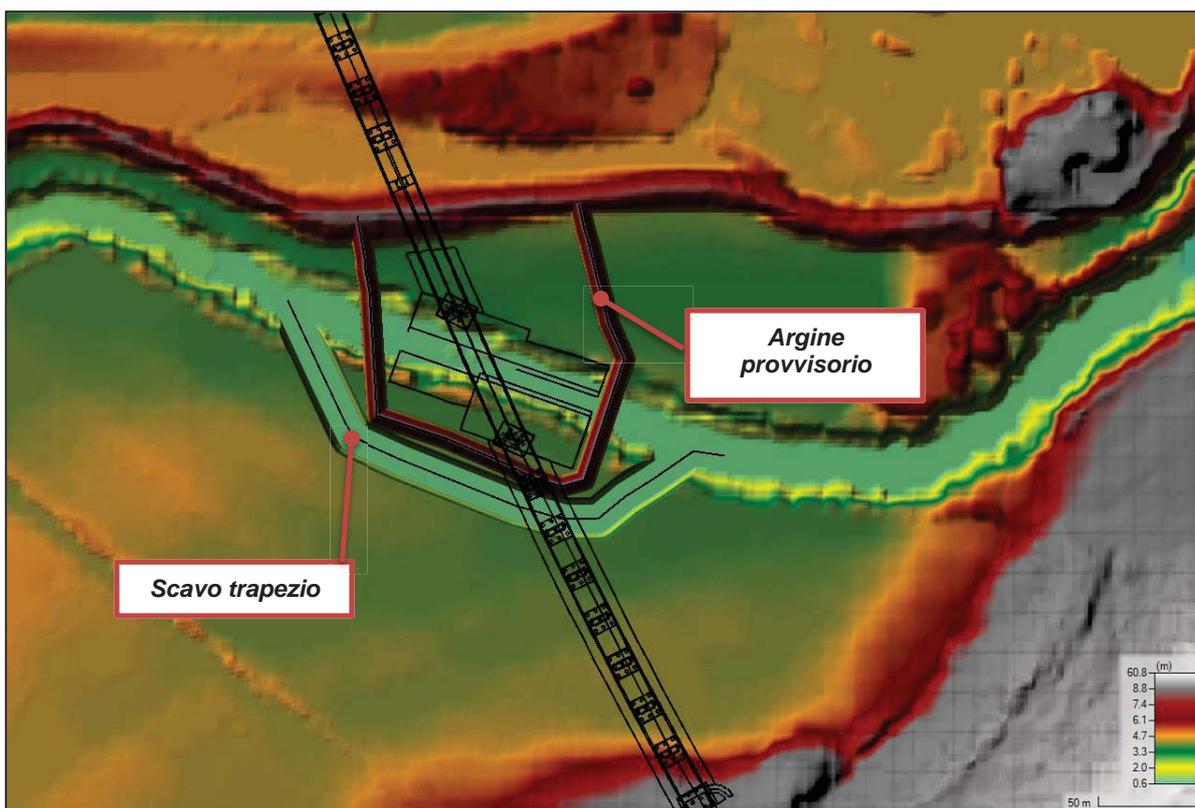


Figura 39 Fase1, argine provvisorio lato Nord.

FASE 2 (Lato SUD):

- Rinterro canale provvisorio della fase 1;

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A.R.L.	MANDANTI HYpro	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
		Relazione Idraulica	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC RI	OPERA 7 DISCIPLINA ID 00 02			PROGR 101

- Realizzazione di un argine provvisorio trapezoidale con testa larga 2.00m, sponde 1:1 e altezza 4.50m, sezione pari a 27mq/ml per uno sviluppo totale di 450.00m;
- Demolizione argine provvisorio fase 1

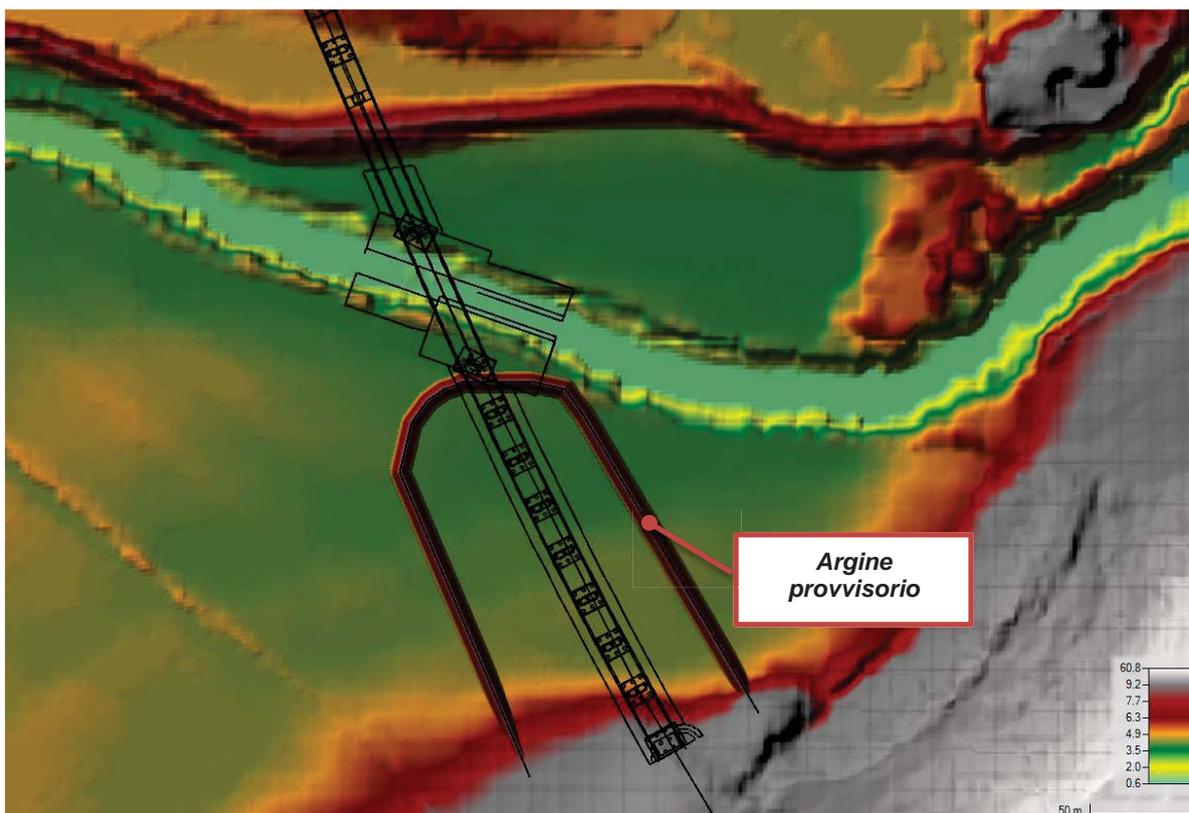


Figura 40 Fase 2, argine provvisorio lato Sud..

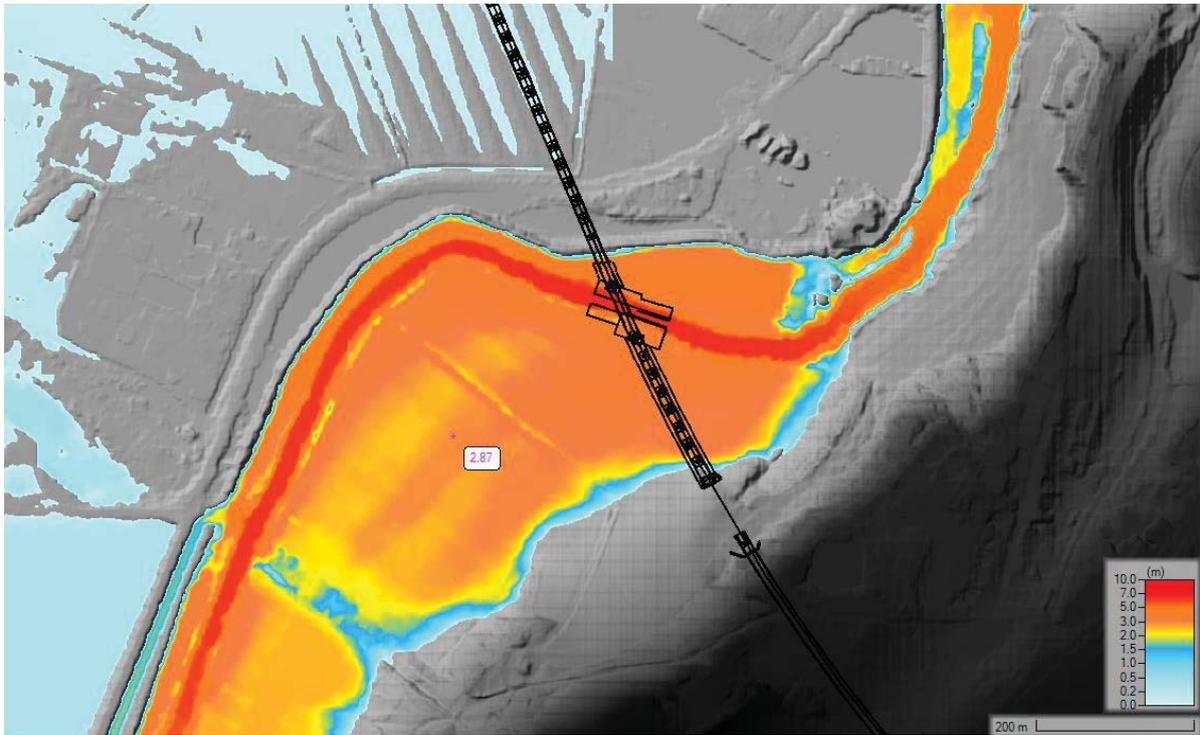
9.3 Risultati modellazione bidimensionale “Fasizzazione”.

Il manuale di progettazione ferroviaria prescrive che sia necessario condurre verifiche delle strutture temporanee di fase, in questo caso una verifica di no esondazione dell'area per un periodo di ritorno di 5 anni. Allo stesso modo, è richiesta una verifica idraulica delle opere provvisorie per la possibilità di cedimento in condizioni estreme, con un periodo di ritorno a 200 anni. Questi controlli e verifiche sono essenziali per garantire la sicurezza e la stabilità delle strutture temporanee durante il processo di costruzione e per garantire che resistano in modo adeguato a situazioni di piena idraulica.

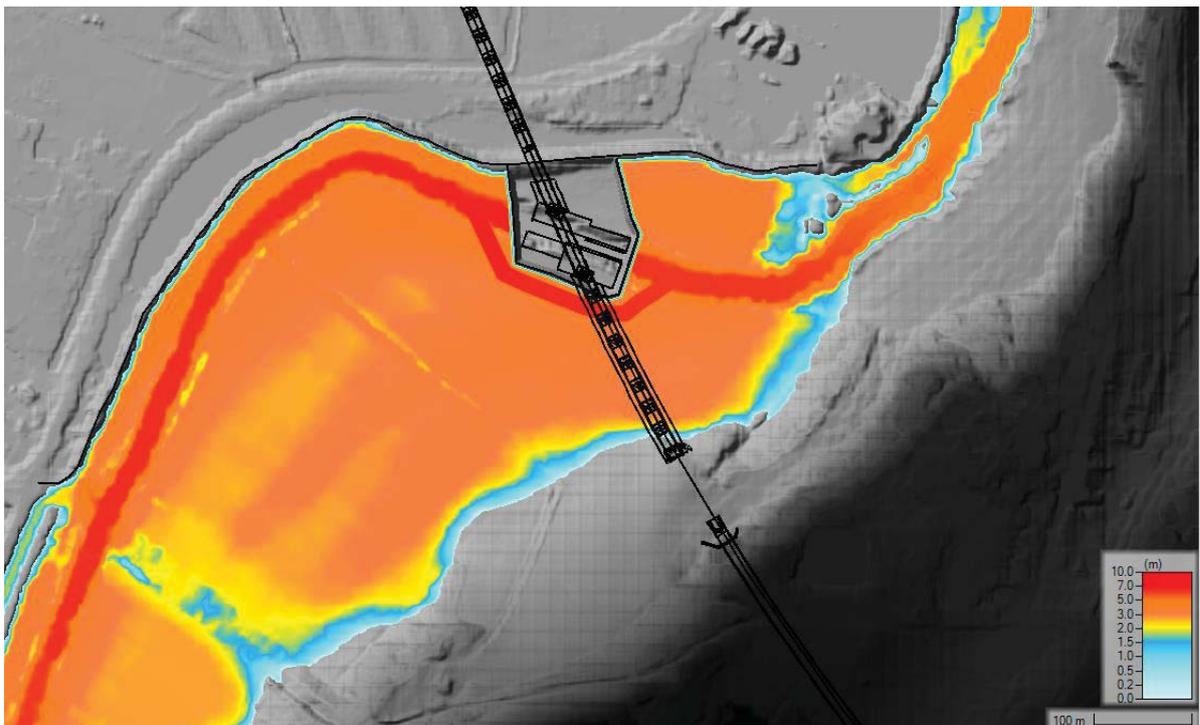
Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	91

Stato di fatto TR 5 anni



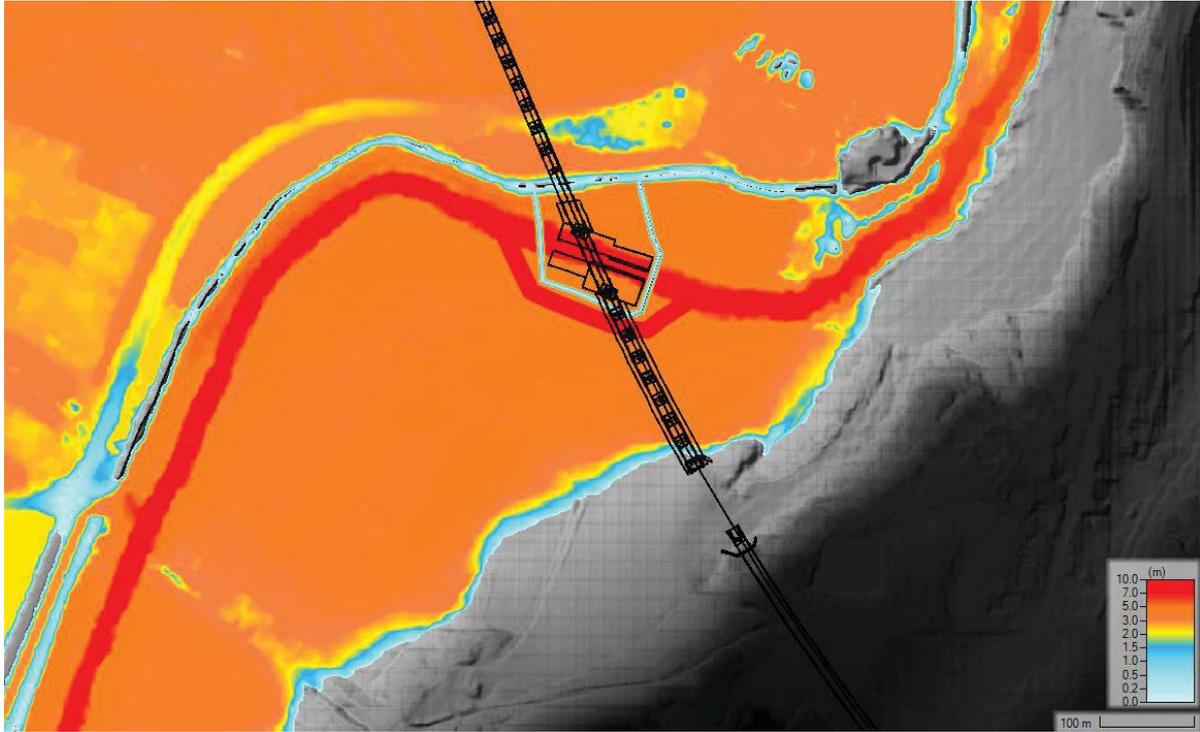
Fase 1 TR 5 anni



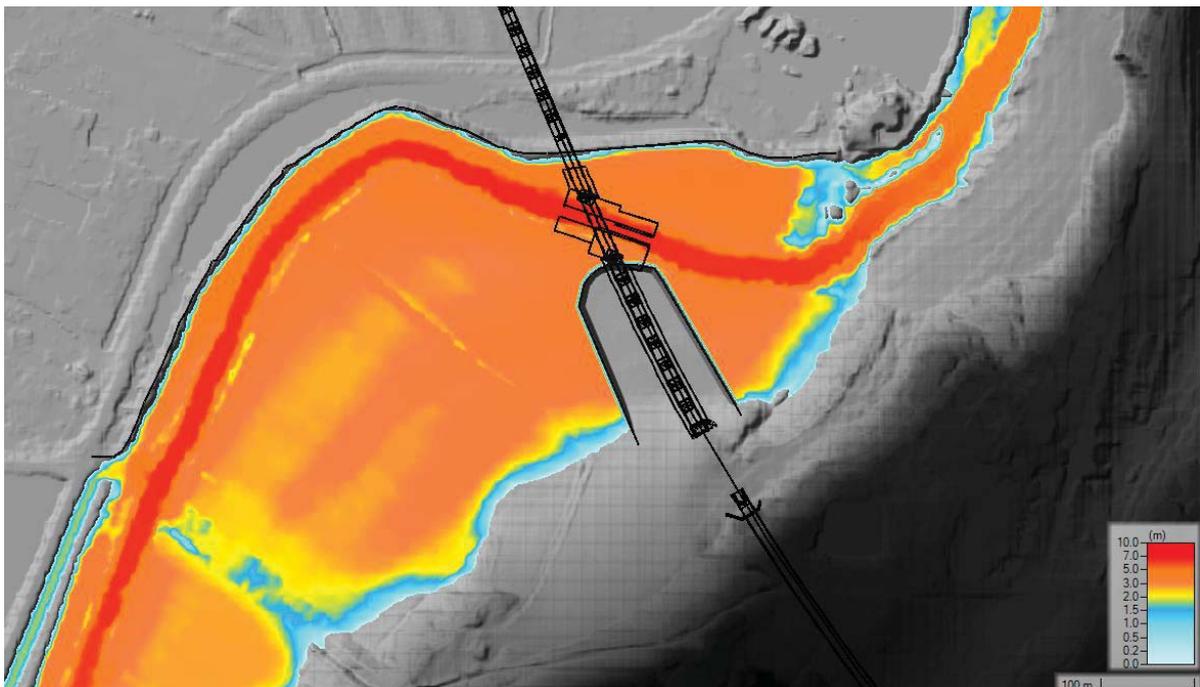
Relazione Idraulica

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	92

Fase 1.1 TR 200 anni

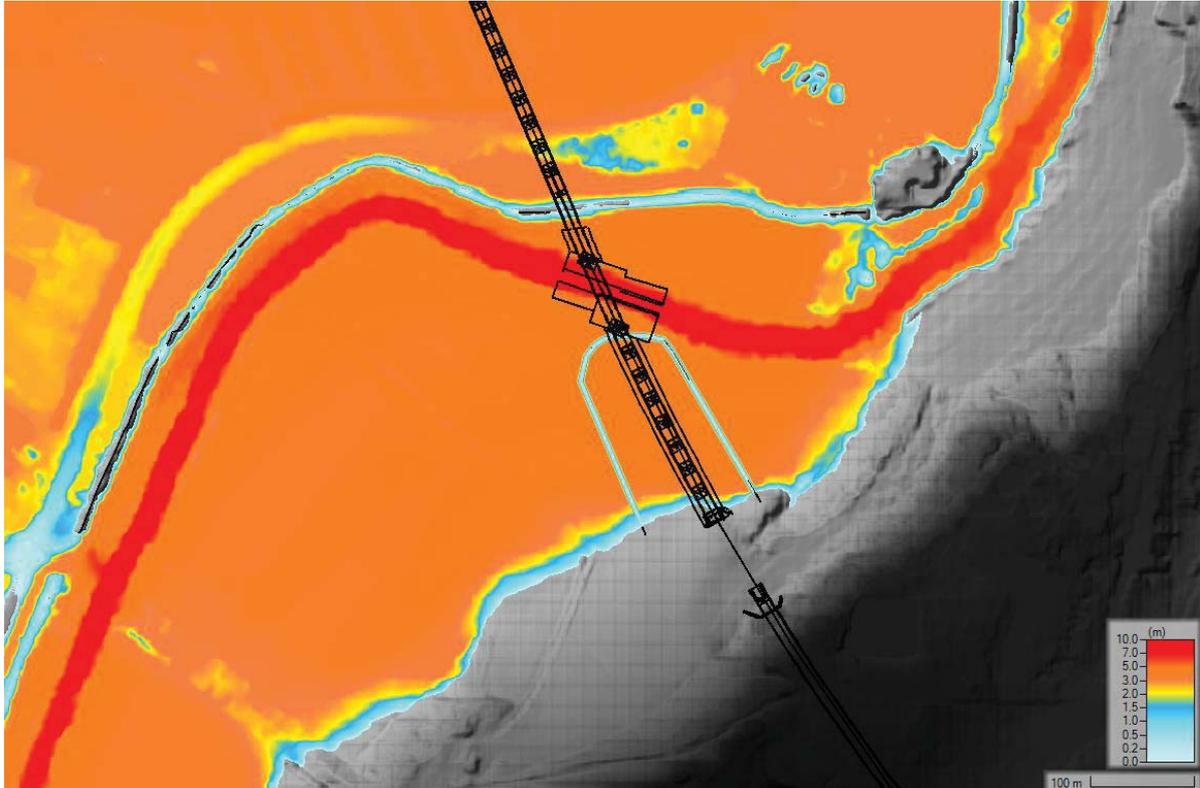


Fase 2 TR 5 anni



MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A.R.L.	MANDANTI HYpro	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
		Relazione Idraulica	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC RI	OPERA 7 DISCIPLINA ID 00 02			PROGR 101

Fase 2.1 TR 200 anni



Conclusioni

Le strutture temporanee destinate alla fase di realizzazione dimostrano un'eccellente adattabilità al comportamento idraulico del fiume Biferno in presenza di eventi di piena con un periodo di ritorno di 5 anni. Questo periodo di ritorno è ampiamente congruente con il cronoprogramma del cantiere nella zona. Inoltre, tali strutture soddisfano completamente i requisiti del manuale ferroviario, che prevede che queste strutture debbano essere progettate per cedere in caso di evento di piena di 200 anni, al fine di consentire il normale deflusso del corpo idrico.

 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
	Relazione Idraulica	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
LI0B		02	E	ZZ	RI	ID	00	02	101	D	94

BIBLIOGRAFIA

- AA.VV., *Manuale di ingegneria Civile e ambientale*, vol. 1, IV edizione, Zanichelli-ESAC.
- Cavalli M., Tarolli Paolo, *Application of LIDAR technology for river analysis, Italian Journal of engineering Geology and Environment. Special Issues 1 (2011)*.
- Chow V. T. (1959). *Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill, New York*.
- Da Deppo L., Datei C. e Salandin P. (2005) *Sistemazione dei corsi d'acqua*, V edizione, Libreria internazionale Cortina, Padova.
- King I. P., and Norton W. R. (1978). "Recent application of RMA's finite element models for twodimensional hydrodynamic and water quality". *Finite elements in Water Resources II, Pentech Press, London, 2.81-2.99*.
- Rodi W. (1993), "Turbulence models and their application in hydraulics - A state of the art Review". *International Association for Hydraulic Research*.
- Shioni K., and Knight D. W. (1991). "Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel". *J. Fluid. Mech.*, 222, 617-646.
- Zanichelli G., Caroni e Fiorotto V.(2004) On parameter selection in 2D numerical modeling of a River bifurcation, *ASCE Journal of hydraulics engineering, vol. 130 n.3*