

PROVINCIA DI GENOVA

Direzione Pianificazione generale e di bacino

# APPROFONDIMENTO IDRAULICO DEI PIANI DI BACINO DEI TORRENTI BISAGNO E CHIARAVAGNA

Estensione del contratto n.53/2013



## Torrente Bisagno e Rio Fereggiano



CODICE ELABORATO

2 2 8 0 0 8 9 8 - 0 1 - 0 0 1 0 0



00	LUGLIO 2014	M. LOMAZZI	D.PERSI	D.PERSI	
REV.	DATA	REDAZIONE	VERIFICA	AUTORIZZAZIONE	MODIFICHE

This report has been prepared under the DHI Business Management System certified by DNV to comply with ISO 9001 (Quality Management)



DNV Business Assurance, Danmark A/S

## INDICE

<b>1</b>	<b>Premessa .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Descrizione delle attività.....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Individuazione degli attraversamenti critici .....</b>	<b>2</b>
3.1	Attraversamenti nei tratti di studio.....	3
3.1.1	Torrente Bisagno.....	3
3.1.2	Rio Fereggiano.....	14
3.2	Criticità idraulica degli attraversamenti .....	17
<b>4</b>	<b>Determinazione delle occlusioni parziali.....</b>	<b>19</b>
<b>5</b>	<b>Risultati delle simulazioni di ostruzione.....</b>	<b>36</b>
5.1	Ponte Feritore .....	36
5.1.1	TR=200 anni .....	36
5.2	Ponte Guglielmetti.....	41
5.2.1	TR=50 anni .....	41
5.2.2	TR=200 anni .....	44
5.3	Ponte Carrega.....	47
5.3.1	TR=200 anni .....	47
5.4	Ponte Bezzecca .....	54
5.4.1	TR=50 anni .....	54
5.4.2	TR=200 anni .....	55
5.5	Ponte Campanella .....	63
5.5.1	TR=50 anni .....	63
5.5.2	TR=200 anni .....	65
5.6	Copertura di Marassi.....	74
5.6.1	TR=200 anni .....	74
5.7	Ponte Castelfidardo .....	76
5.7.1	TR=50 anni .....	76
5.8	Copertura terminale del Rio Fereggiano.....	78
5.8.1	TR=50 anni .....	78
<b>6</b>	<b>Conclusioni.....</b>	<b>84</b>

## ALLEGATI

### **ALLEGATO A–MIKE 11 HD**

Descrizione tecnica

### **ALLEGATO B–MIKE 21 HD**

Descrizione tecnica

## 1 Premessa

Con provvedimento di aggiudicazione n°2953/69732 del 28 giugno 2013, la Provincia di Genova, ufficio Direzione di Pianificazione Generale e di Bacino, ha incaricato il raggruppamento di imprese formato da DHI Italia e Art Ambiente Risorse e Territorio dell'esecuzione di un approfondimento idraulico dei Piani di Bacino del torrente Bisagno, del Rio Fereggiano e del torrente Chiaravagna.

Il contratto ha avuto come oggetto l'affidamento delle attività necessarie a valutare l'adeguatezza dei contenuti dei Piani di Bacino con specifico riguardo all'assetto del territorio in relazione agli eventi alluvionali verificatisi nel Comune di Genova rispettivamente il 4 ottobre 2010 e il 4 novembre 2011.

In funzione delle risultanze dello studio è emersa la necessità di una serie di approfondimenti di dettaglio, per l'esecuzione dei quali la Provincia ha deliberato una specifica estensione di incarico, con Determinazione n° 2431 del 12 giugno 2014.

In particolare le attività integrative previste sono nel seguito elencate:

- a) *simulazione bidimensionale a fondo fisso di tutti gli interventi previsti nel progetto preliminare del Comune di Genova del 2001 sul torrente Chiaravagna, compreso l'abbassamento del fondo alle quote proposte nei progetti definitivi dei vari lotti già predisposti, raccordate al completamento dell'abbassamento alveo proposto nell'ambito del progetto preliminare (TR50, TR200, TR500); predisposizione delle carte delle nuove fasce A, B, C.;*
- b) *valutazione del trasporto solido per il bacino di monte del torrente Chiaravagna per la valutazione del quantitativo di materiale che potenzialmente può raggiungere il tratto oggetto di studio. La valutazione, che comprende l'analisi dei sedimenti attraverso operazioni di campionatura, ha lo scopo di disporre di un dato di confronto in relazione alla portata solida che può defluire verso valle in caso di vasca di sedimentazione di progetto piena. L'analisi mira anche alla valutazione dell'adeguatezza del volume della vasca stessa;*
- c) *determinazione del profilo di equilibrio su lungo periodo per il torrente Chiaravagna, attraverso modellazione a fondo mobile dell'alveo in ipotesi di fondo abbassato, a valle della costruenda vasca di sedimentazione, per le portate ordinarie di lungo periodo (eventi di piena non eccezionali). Le configurazioni di studio saranno le seguenti:*
  - *configurazione A: vasca di sedimentazione vuota, mantenuta pulita ed in grado di garantire la sedimentazione del materiale in arrivo da monte (portata solida verso valle nulla);*
  - *configurazione B: vasca di sedimentazione già piena e quindi ininfluente ai fini dell'intercettazione del trasporto solido (portata solida pari alla massima capacità di portata solida nel tratto immediatamente a monte, previo confronto sul quantitativo di materiale potenziale precedentemente calcolato);*
- d) *modellazione monodimensionale a fondo mobile del torrente Chiaravagna, nelle 2 configurazioni di vasca di sedimentazione (vuota e piena come specificato precedentemente), profilo di fondo iniziale pari a quello di progetto, portate di piena pari a TR50 e TR200 per la valutazione dell'eventuale stato di criticità del Chiaravagna nel caso di evento con tempo di ritorno di progetto, simulando in contemporanea la portata liquida e la corrispondente portata solida e conseguenti variazioni del fondo;*
- e) *modellazione idraulica bidimensionale su Bisagno e Fereggiano con scenari di ostruzione: analisi di sensitività dei risultati del modello idraulico rispetto alla carenza di franco idraulico,*

*attraverso ipotesi di ostruzioni o riduzioni della sezione di deflusso in corrispondenza di ponti o coperture per valutare i conseguenti effetti sull'estensione delle aree inondabili. Predisposizione di una proposta di fasce, a seguito delle risultanze delle analisi, derivante dall'inviluppo delle pericolosità ottenute nelle varie simulazioni.*

Il presente elaborato riporta la descrizione delle analisi effettuate sul Torrente Bisagno (attività e), mentre si rimanda all'elaborato 22800898-01-00200 per quanto riguarda le risultanze delle valutazioni sul Torrente Chiaravagna (attività a-d).

## 2 Descrizione delle attività

Nell'ambito dell'incarico relativo all'aggiornamento delle analisi idrologiche e idrauliche relative al Torrente Bisagno e al Rio Fereggiano contenute nel Piano di Bacino è stato richiesto un approfondimento riguardante l'effetto sulla pericolosità idraulica di eventuali ostruzioni della luce degli attraversamenti più critici in base al franco idraulico di sicurezza. Un'alta percentuale di eventi alluvionali storici, tra i quali l'ultimo di notevole entità verificatosi il 4 novembre 2011, è infatti caratterizzata dalla presenza di materiale flottante in alveo che, a causa dell'alto numero di ponti e passerelle e della loro geometria spesso non adeguata, comporta frequentemente una parziale occlusione della luce libera al di sotto degli attraversamenti con conseguente incremento dei tiranti in alveo e dunque maggiori volumi esondati.

Si è dunque proceduto a un'analisi di dettaglio degli effetti di ipotesi di ostruzione e sulla conseguente modellazione idrodinamica della specifica configurazione. Come setup modellistico si è utilizzato quello elaborato nell'ambito del precedente incarico, opportunamente modificato per tenere conto delle riduzioni di sezione.

Il presente elaborato descrive le attività svolte nell'ambito dell'estensione di incarico. Il Cap. 3 individua le strutture oggetto di modellazione in caso di ostruzione, selezionate sulla base di valutazioni sulla geometria dell'attraversamento e sulle risultanze delle modellazioni effettuate nell'ambito del precedente incarico di aggiornamento della mappatura della pericolosità idraulica.

Il Cap. 4 descrive nel dettaglio gli attraversamenti oggetto del presente studio e la metodologia seguita per determinare la percentuale di ostruzione per ogni struttura. Il quinto capitolo illustra i risultati delle modellazioni, con particolare riferimento alla variazione di area allagata, del tirante idrico in alveo e nelle zone di espansione e dei valori di velocità. Nel capitolo conclusivo si offre una panoramica riassuntiva dei risultati dello studio, fornendo indicazioni relative alla criticità a una potenziale configurazione di ostruzione relativamente agli attraversamenti indagati.

## 3 Individuazione degli attraversamenti critici

Il presente capitolo illustra sommariamente tutte le strutture di attraversamento presenti nei tratti di studio. Si identificano inoltre le strutture selezionate come oggetto di analisi di dettaglio relativa all'occlusione parziale. L'individuazione degli attraversamenti critici è stata effettuata dai tecnici della Provincia di Genova.

Il tratto oggetto di studio è costituito dagli ultimi 7 km circa del Torrente Bisagno, a partire da poche centinaia di metri a monte di Ponte Feritore sino allo sbocco a mare, e gli ultimi 1,5 km circa del Rio Fereggiano, a partire dalla copertura di Largo Merlo sino alla confluenza nel Torrente Bisagno. L'identificazione delle strutture oggetto di approfondimento è stata svolta sulla base delle risultanze delle modellazioni idrodinamiche svolte nell'ambito del precedente incarico di aggiornamento delle fasce di pericolosità idraulica del Torrente Bisagno e Rio Fereggiano e descritte nel dettaglio nell'elaborato 22800503-01-0202, già consegnato al Committente. Gli eventi di piena considerati sono quelli associati ai tempi di ritorno di 50, 200 e 500 anni.

## 3.1 Attraversamenti nei tratti di studio

### 3.1.1 Torrente Bisagno

Il tratto in esame del Torrente Bisagno è caratterizzato dalla presenza di 13 attraversamenti, pedonali e/o carrabili, e 3 coperture. Le geometrie delle strutture è variabile in funzione, tipicamente, dell'epoca di costruzione, ma la quasi totalità presenta pile in alveo con notevole influenza sul deflusso alveato.

In Figura 3.1 e Figura 3.2 si riporta la localizzazione delle strutture di attraversamento sul tratto del Torrente Bisagno analizzato.

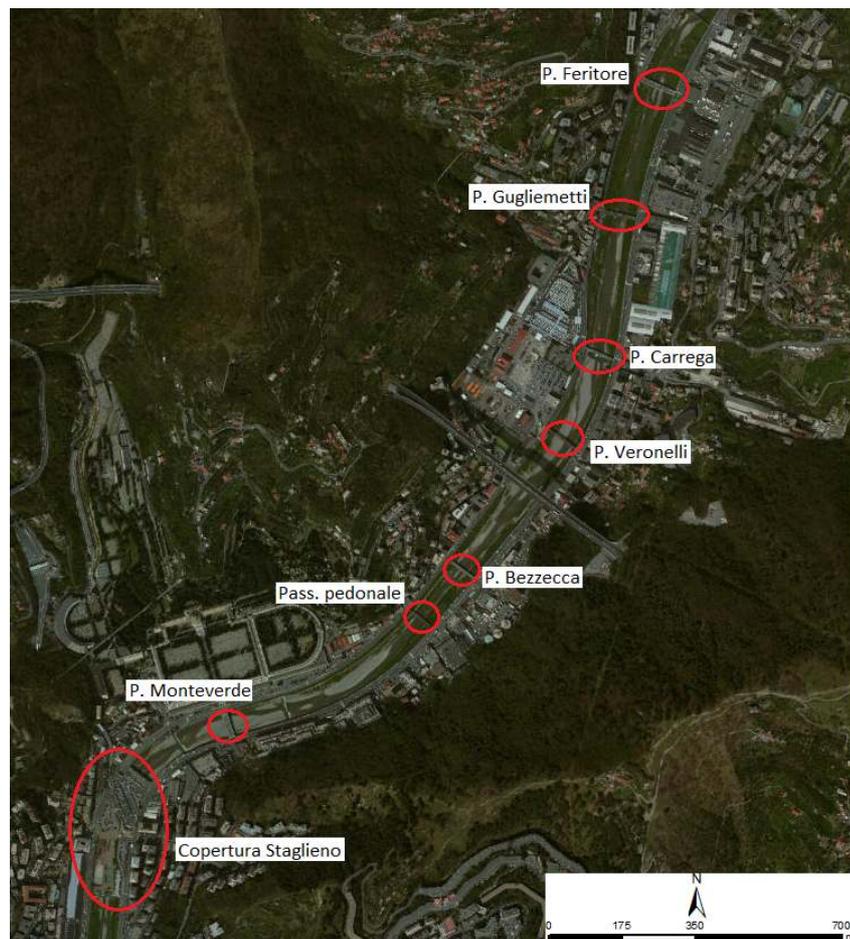


Figura 3.1 Localizzazione degli attraversamenti sul Torrente Bisagno nel tratto compreso tra Ponte Feritore e la copertura di Staglieno.



Figura 3.2 Localizzazione degli attraversamenti sul Torrente Bisagno nel tratto compreso tra Ponte Campanella e la copertura di Brignole.

Di seguito si illustrano gli attraversamenti e le coperture presenti sul tratto in esame.

### Ponte Feritore (progr. 661)

Ponte Feritore è la prima struttura di attraversamento del tratto indagato. È un ponte carrabile con un impalcato leggermente arcuato e, come illustrato nell'immagine fotografica di Figura 3.3, presenta 5 pile in alveo; l'estremità destra poggia su una spessa base di calcestruzzo.



Figura 3.3 Ponte Feritore, vista da monte.

### Ponte Guglielmetti (progr. 979)

Ponte Guglielmetti presenta una struttura simile a quella di Ponte Feritore, con una pendenza relativamente accentuata dalla sponda sinistra verso quella destra. Come il precedente è un ponte carrabile e presenta 5 pile in alveo.



Figura 3.4 Ponte Guglielmetti, vista da monte.

### Ponte Carrega (progr. 1355)

Ponte Carrega è un attraversamento pedonale di epoca precedente rispetto ai due ponti di monte e la cui geometria si discosta in larga misura da quella di questi ultimi. In particolare, la struttura è ad arco con 7 campate e pile in alveo di notevole spessore.



Figura 3.5 Ponte Carrega, vista da valle.

### Ponte Veronelli (progr. 1580)

Ponte Veronelli è un ponte pedonale, di recente rifacimento, che presenta 3 pile in alveo a sezione circolare e un impalcato orizzontale. La sua geometria risulta decisamente meno impattante sul deflusso alveato rispetto alle strutture di monte.



Figura 3.6 Ponte Veronelli, vista da monte.

### Ponte Bezzecca (progr. 1980)

Ponte Bezzecca presenta una struttura simile a quella dei ponti Feritore e Guglielmetti: poggia su 5 pile ed è caratterizzato da un impalcato orizzontale. È un ponte carrabile, a carreggiata singola.



Figura 3.7 Ponte Bezzecca, vista da valle.

### Passerella pedonale (progr. 2132)

Circa 150 m a valle di Ponte Bezzecca è presente una passerella pedonale. Presenta due pile in alveo la cui sommità è a quota superiore rispetto al piano strada, determinando una quota di intradosso nel punto centrale piuttosto elevata rispetto a quella degli attraversamenti di monte.



Figura 3.8 Passerella pedonale a valle di Ponte Bezzecca, vista da monte.

### Ponte Monteverde (progr. 2675)

In corrispondenza del cimitero monumentale di Staglieno è localizzato Ponte Monteverde. Presenta una geometria a impalcato rettilineo e in leggera pendenza verso la sponda sinistra, con due pile in alveo. La sua dimensione longitudinale consente la presenza di tre carreggiate, rendendolo l'attraversamento più largo a monte della copertura di Staglieno.



Figura 3.9 Ponte Monteverde, vista da monte.

### Copertura di Staglieno (progr. 2936-3246)

Circa 250 m a valle di Ponte Monteverde comincia una tombinatura che termina in corrispondenza del deposito AMT, per una lunghezza totale pari a circa 300 m. La copertura è suddivisa in quattro canne di pari larghezza e presenta un impalcato con quota centrale superiore rispetto alle estremità laterali di poco meno di 1 m.



Figura 3.10 Imbocco della copertura di Staglieno.



Figura 3.11 Sbocco della copertura di Staglieno.

### Ponte Campanella (progr. 3382)

Ponte Campanella è un attraversamento carrabile a tre corsie. La struttura presenta una geometria a cinque campate di pari dimensione, con estradosso orizzontale.



Figura 3.12 Ponte Campanella, vista da valle.

### Passerella pedonale (progr. 3590)

Circa 200 m a valle di Ponte campanella è localizzata una passerella pedonale i cui accessi sono sopraelevati rispetto al piano strada, caratteristica che comporta un livello di intradosso piuttosto elevato rispetto al fondo alveo. La struttura si regge su due pile in alveo.



Figura 3.13 Passerella pedonale a valle di Ponte campanella, vista da valle.

### Passerella pedonale (progr. 3929)

La seconda passerella pedonale nel tratto compreso tra le due coperture di Staglieno e Marassi presenta, come la precedente, un intradosso piuttosto elevato. Anche tale struttura prevede due pile in alveo, ma ha lunghezza inferiore rispetto alla precedente in quanto in sponda destra è presente un parcheggio pensile, posto su quella che costituirà la quarta canna della copertura di Marassi.



Figura 3.14 Passerella pedonale a monte della copertura di Marassi, vista da monte.

### Copertura di Marassi (progr. 4113-4383)

La copertura di Marassi è costituita da quattro canne parallele, la prima delle quali in destra ha inizio circa 250 m a monte dell'imbocco della copertura. L'impalcato ha un andamento leggermente arcuato.



Figura 3.15 Imbocco della copertura di Marassi.



Figura 3.16 Sbocco della copertura di Marassi.

### Ponte Serra (progr. 4556)

Ponte Serra è localizzato in corrispondenza dello sbocco della copertura terminale del Rio Fereggiano, come si nota sul margine destro dell'immagine fotografica di Figura 3.17.

L'attraversamento presenta una struttura a cinque pile in alveo di spessore poco inferiore a 2,5 m e un impalcato orizzontale.



Figura 3.17 Ponte Serra, vista da valle.

#### Passerella Firpo (progr. 4860)

La passerella Firpo presenta una struttura simile a quella delle due passerelle a monte della copertura di Marassi, caratterizzata da due pile in alveo che sorreggono un impalcato centrale a quota superiore rispetto al piano strada.



Figura 3.18 Passerella Firpo, vista da valle.

#### Ponte Castelfidardo (progr. 5216)

Ponte Castelfidardo è l'ultimo attraversamento prima della copertura di Brignole, se si escludono i resti in rovina di Ponte S. Agata. È un ponte carrabile ad impalcato che poggia su tre pile.



Figura 3.19 Ponte Castelfidardo, vista da monte.

### Copertura di Brignole (progr. 5410-6898)

La copertura di Brignole si estende per gli ultimi 1,5 km circa del Torrente Bisagno e termina con lo sbocco a mare. È costituita da quattro canne parallele e per i primi 130 m circa corre al di sotto del binari della stazione Brignole, con geometria ad arco per ogni canna. A valle del piano ferroviario la luce libera di ogni canna si riduce sensibilmente e assume una geometria approssimativamente rettangolare sino allo sbocco a mare.



Figura 3.20 Imbocco della copertura di Brignole.



Figura 3.21 Sbocco della copertura di Brignole, corrispondente alla sbocco del Torrente Bisagno in mare.

### 3.1.2 Rio Fereggiano

Il tratto di studio del Rio Fereggiano, corrispondente agli ultimi 2,9 km circa del corso d'acqua, vede la presenza di due coperture (Largo Merlo e quella terminale) inframezzate da due attraversamenti.

In Figura 3.22 è riportata la localizzazione planimetrica delle strutture di attraversamento.

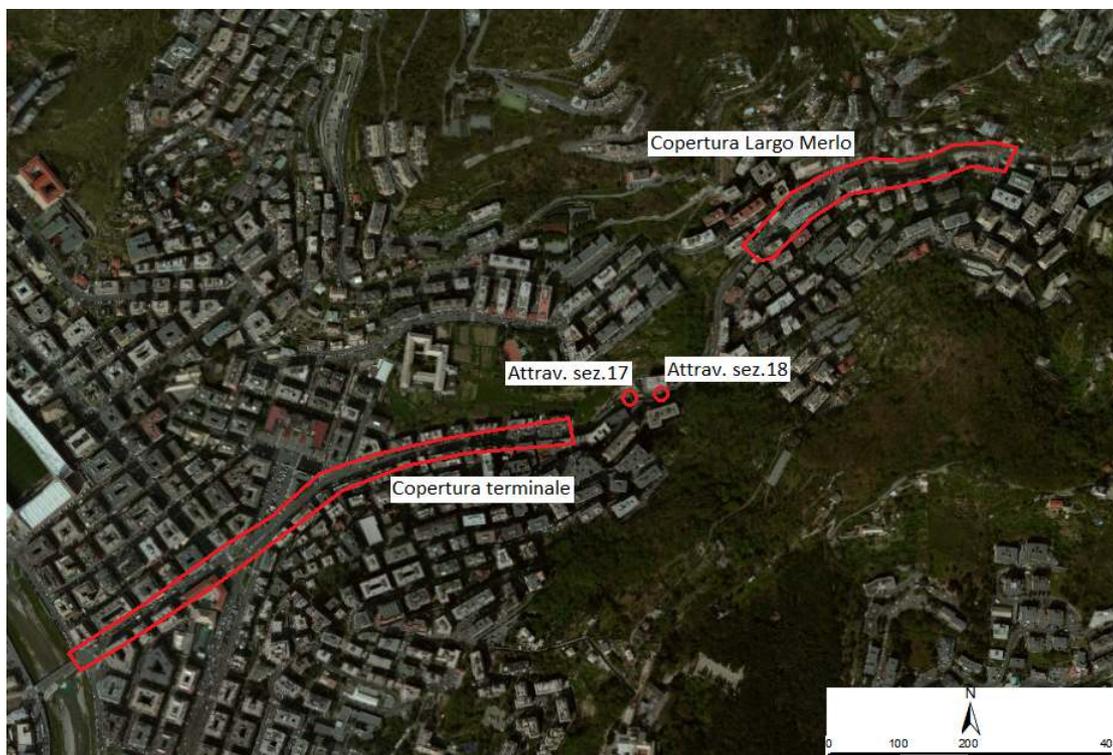


Figura 3.22 Localizzazione degli attraversamenti sul Rio Fereggiano nel tratto a valle della copertura di Largo Merlo.

### Copertura di Largo Merlo (progr. 1192-1589)

La copertura di Largo Merlo è stata recentemente oggetto di un ammodernamento, completato poco prima dell'evento del novembre 2011. Data la ridotta larghezza trasversale del corso d'acqua, la tombinatura non è suddivisa in canne parallele, come nel caso delle coperture sul Torrente Bisagno. La sezione di imbocco (Figura 3.23) prevede un intradosso a una quota circa 7 m superiore rispetto al fondo alveo, caratteristica che rende la tombinatura relativamente a basso rischio rispetto ad eventi di piena.



Figura 3.23 Imbocco della copertura di Largo Merlo.



Figura 3.24 Sbocco della copertura di Largo Merlo.

### Attraversamento sez.18 (progr. 1853)

Il primo attraversamento a valle della copertura di Largo Merlo prevede un impalcato orizzontale e, a causa della ridotta dimensione trasversale del corso d'acqua, nessuna pila di alveo. È un attraversamento carrabile con 2 corsie di marcia.



Figura 3.25 Attraversamento sez.18, vista da valle.

#### Attraversamento sez.17 (progr. 1893)

Il secondo attraversamento è contraddistinto da una geometria molto simile alla precedente, dunque con impalcato orizzontale e privo di pile in alveo. È anch'esso carrabile.



Figura 3.26 Attraversamento sez.17, vista da valle.

#### Copertura terminale (progr. 1992-2789)

Gli ultimi 800 m circa del Rio Fereggiano sono tombinati: l'estradosso della copertura costituisce il piano strada di via Fereggiano. Come illustrato al par. 5.8, il fondo della tombinatura decrementa la sua pendenza a partire da circa 350 m a monte dello sbocco nel torrente Bisagno, che avviene in corrispondenza di Ponte Serra.

Così come la copertura di Largo Merlo, anche in questo caso la struttura è composta da una sola canna.



Figura 3.27 Imbocco della copertura terminale.



Figura 3.28 Sbocco della copertura terminale, in corrispondenza di Ponte Serra sul Torrente Bisagno.

## 3.2 Criticità idraulica degli attraversamenti

L'analisi idrologico-idraulica condotta nell'ambito del precedente incarico, e descritta nell'elaborato di consegna 22800503-01-00202, ha consentito di definire per ogni struttura una situazione di pericolosità, sulla base principalmente del franco idraulico rispetto all'intradosso e all'eventuale sormonto dell'estradosso. In Tabella 3.1 e Tabella 3.2 si riportano, per i tratti

rispettivamente del Torrente Bisagno e Rio Fereggiano, i valori di livello massimo del pelo libero e i relativi franchi idraulici rispetto all'intradosso per i tre tempi di ritorno analizzati.

**Tabella 3.1** Livello di intradosso, estradosso, pelo libero e franco idraulico degli attraversamenti lungo il tratto del Torrente Bisagno per i tre tempi di ritorno considerati.

BISAGNO										
Struttura			Stato attuale							
Nome Sezione	PROGR.	SEZIONE	Intradosso	Estradosso	TR50		TR200		TR500	
	[m]	ID			P.L.	Franco	P.L.	Franco	P.L.	Franco
			[m]	[m]	[m sm]	[m]	[m sm]	[m]	[m sm]	[m]
Ponte Feritore - monte	656	78.3	38.94	40.25	37.34	1.60	38.72	0.22	39.85	-0.91
Ponte Guglielmetti - monte	974	73.3	36.06	37.43	35.41	0.65	37.14	-1.08	38.36	-2.30
Ponte Carrega - monte	1353	67.3	35.02	37.04	34.07	0.95	35.72	-0.70	36.70	-1.68
Ponte Veronelli - monte	1578	63.3	33.81	34.01	29.99	3.82	30.98	2.83	31.59	2.22
Ponte Bezzecca - monte	1976	58.3	28.36	29.45	27.67	0.69	28.94	-0.58	30.22	-1.86
Passerella pedonale - monte	2131	55.4	29.65	30.87	26.53	3.12	27.39	2.26	28.45	1.20
Ponte Monteverde - monte	2666	45.1	24.85	26.35	22.00	2.85	23.09	1.76	24.10	0.75
Copertura Staglieno - monte	2936	38	24.35	25.45	20.49	3.86	22.06	2.29	22.88	1.47
Ponte Campanella - monte	3374	35.2	20	21	20.30	-0.30	21.77	-1.77	22.70	-2.70
Passerella pedonale - monte	3588	32.2	20.5	21.7	17.82	2.68	18.89	1.61	19.75	0.75
Passerella pedonale - monte	3927	26.8	18.7	19.9	14.72	3.98	15.83	2.87	16.83	1.87
Copertura Marassi - monte	4113	25	15.42	16.52	13.63	1.79	14.89	0.53	15.95	-0.53
Ponte Serra - monte	4549	19.2	14	15.2	12.68	1.32	14.16	-0.16	15.18	-1.18
Passerella Firpo - monte	4858	13.2	11.9	13.1	10.98	0.92	12.41	-0.51	13.60	-1.70
Ponte Castelfidardo - monte	5207	5.2	8.9	10.5	10.17	-1.27	12.10	-3.20	13.17	-4.27
Copertura Brignole (imbocco)	5410	0.9	10.4	13.5	9.90	0.50	11.99	-1.59	13.24	-2.84
Copertura Brignole (sezione critica)	5550	0.96	7.62	-	7.62	0.00	7.62	0.00	7.62	0.00
Copertura Brignole (inizio 1° lotto)	6243	0.69	5.8	-	4.58	1.22	5.14	0.66	5.46	0.34

Dai valori riportati si può osservare come due attraversamenti, Ponte Campanella e Ponte Castelfidardo, e la copertura di Brignole risultino andare in pressione già per un evento cinquantennale. Relativamente a un evento duecentennale, la maggior parte delle strutture risultano associate a franchi inferiori a 1 m.

**Tabella 3.2** Livello di intradosso, estradosso, pelo libero e franco idraulico degli attraversamenti lungo il tratto del Rio Fereggiano per i tre tempi di ritorno considerati.

FEREGGIANO										
Struttura			Stato attuale							
Nome Sezione	PROGR.	SEZIONE	Intradosso	Estradosso	TR50		TR200		TR500	
	[m]	ID			P.L.	Franco	P.L.	Franco	P.L.	Franco
			[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m.s.m.]	[m]
Imbocco copertura Largo Merlo	1189	38	52.77	54	46.78	5.99	47.20	5.57	47.56	5.21
Ponte sez.18 - monte	1849	18	26.95	27.2	26.85	0.10	27.82	-0.87	28.30	-1.35
Ponte sez.17 - monte	1892	17	26.35	27.1	25.69	0.66	26.62	-0.27	27.45	-1.10
Imbocco copertura terminale	1986	14	22.9	24	24.30	-1.40	25.85	-2.95	26.79	-3.89

I valori di pelo libero relativo alle strutture sul Rio Fereggiano descrivono una situazione di forte criticità della tombinatura terminale, che risulta andare in pressione già per l'evento cinquantennale, mentre la tombinatura di Largo Merlo risulta verificata anche per l'evento cinquecentennale. I due attraversamenti intermedi risultano sormontati per l'evento duecentennale.

Sulla base dei valori di pelo libero e franco idraulico, i tecnici della Provincia di Genova hanno eseguito un'analisi al fine di individuare quali strutture fossero più critiche a un eventuale ostruzione parziale della luce libera sottesa all'impalcato. I principali parametri che si sono considerati per la selezione delle strutture e dei tempi di ritorno sono il franco idraulico, la geometria e la localizzazione della struttura.

Sono così state individuate le seguenti strutture, per i tempi di ritorno specificati, come oggetto della presente analisi:

Torrente Bisagno:

- Ponte Feritore (progr. 661), TR=200 anni;
- Ponte Guglielmetti (progr. 979), TR=50 e 200 anni;
- Ponte Carrega (1355), TR=200 anni;
- Ponte Bezzecca (progr. 1980), TR=50 e 200 anni;
- Ponte Campanella (progr. 3382), TR=50 e 200 anni;
- Copertura di Marassi (progr. 4113-4382), TR=200 anni;
- Ponte Castelfidardo (progr. 5216), TR=50 anni.

Rio Fereggiano:

- Copertura terminale (progr. 1992-2789), TR=50 anni.

## 4 Determinazione delle occlusioni parziali

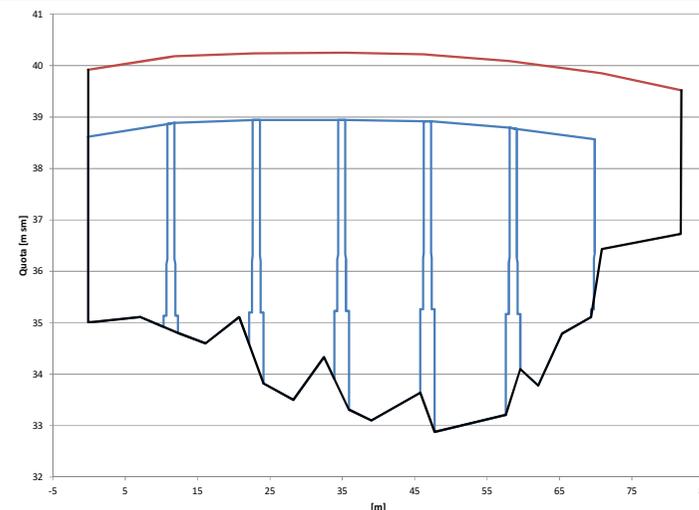
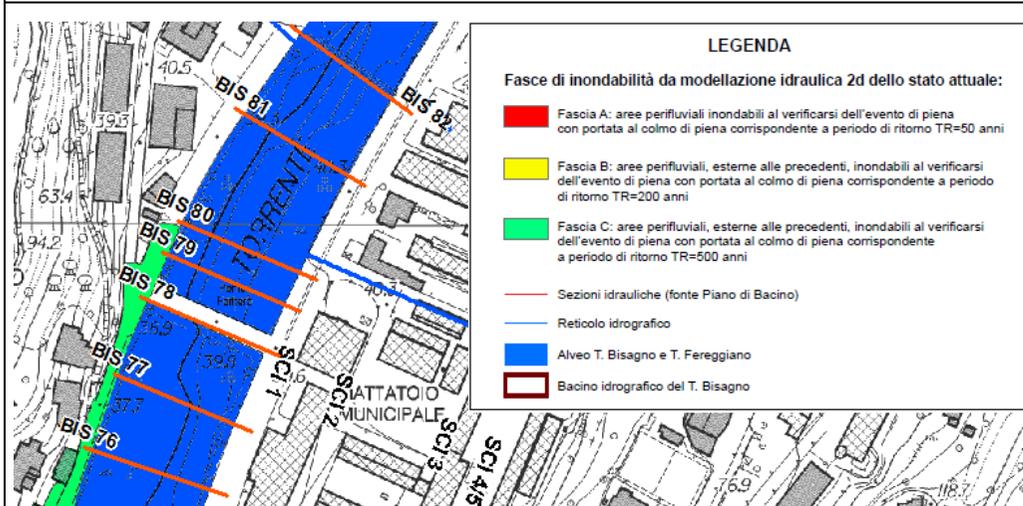
Di seguito si riporta, in forma schematica, la descrizione delle strutture oggetto di analisi e i parametri esaminati per la stima della percentuale di ostruzione.

Le schede riportano i seguenti elementi di caratterizzazione delle strutture:

- l'estensione delle attuali fasce, in alto a sinistra, nella prima pagina;
- il prospetto della struttura, in alto a destra, prima pagina;
- la foto del manufatto, in basso a sinistra, prima pagina;
- le caratteristiche geometriche dell'opera (geometria dell'impalcato, quote di intradosso ed estradosso, numero pile e campate, forma delle pile, portata di progetto da Piano di Bacino, parametri relativi al comportamento idraulico del manufatto), in basso a destra, prima pagina;
- il profilo idraulico in alto a sinistra nella seconda pagina;
- la tabella con i dati del profilo idraulico (quote del pelo libero e franchi idraulici) in alto a destra, seconda pagina;
- la valutazione sul grado di vulnerabilità, nella parte bassa della seconda pagina.

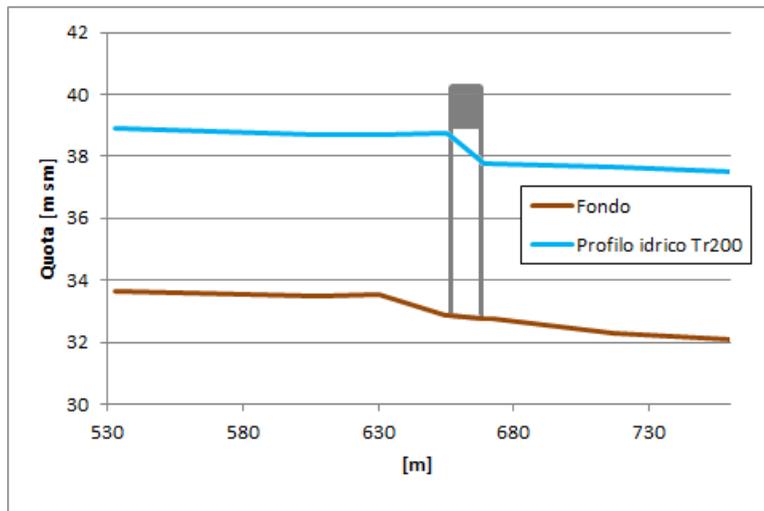
Per ogni ponte sono quindi riportate le valutazioni sui vari parametri di rischio, riassunti da una valutazione sintetica (grado di vulnerabilità moderato, medio, elevato o molto elevato), funzione del franco idraulico e dell'effettiva interferenza sul deflusso. La valutazione è accompagnata dalla definizione di una possibile percentuale di ostruzione, sulla base della quale viene definito il tipo di occlusione reale ipotizzata nelle verifiche idrauliche (singola campata, due campate laterali, elevazione del fondo alveo, etc.).

# Ponte Feritore



## Geometria della struttura

Lunghezza dell'impalcato (m)	82	
Larghezza dell'impalcato (m)	12	
Quota max. intradosso (m s.m.)	38.94	
Quota min intradosso (m s.m.)	38.22	
Quota fondo alveo (m s.m.)	minimo	32.88
	medio	34.49
Numero delle campate	6	
Numero delle pile / di cui in alveo	5/4	
Tipologia delle pile		
Portata di progetto (m <sup>3</sup> /s - tempo di ritorno)	1106 - 200	
Velocità media in alveo (m/s)	3,15	
Effetto di rigurgito del ponte (m)	0,95	
% di restringimento dell'alveo di piena	21	

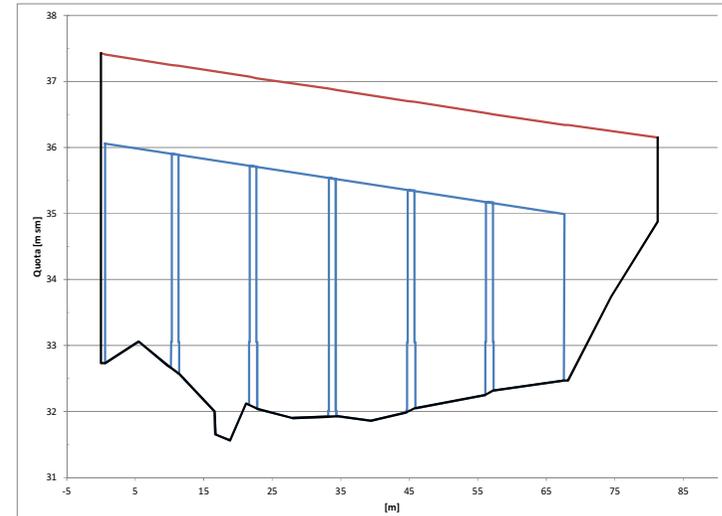
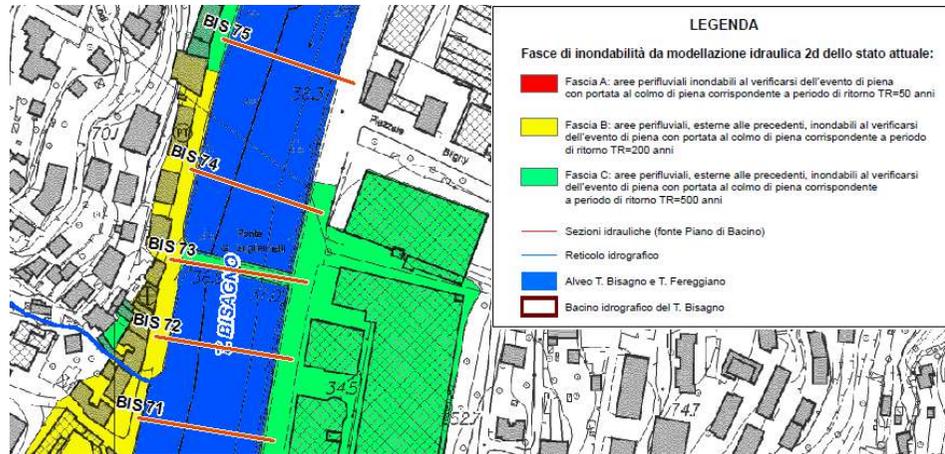


BISAGNO					
Struttura		Stato attuale			
PROGR.	SEZIONE	TR50		TR200	
		P.L.	Franco	P.L.	Franco
[m]	ID	[m.s.m.]	[m]	[m.s.m.]	[m]
630	79	37.34	2.38	38.69	1.03
655	78.4	37.35	2.24	38.73	0.87
656	Ponte Feritore - monte (78.3)	37.34	1.6	38.72	0.22
669	78.2	36.6	2.86	37.77	1.69
672	78.1	36.58	2.9	37.75	1.72

### GRADO DI VULNERABILITA' RISPETTO ALLE CARATTERISTICHE PROPRIE DELLA STRUTTURA

grado di vulnerabilità	MODERATO	MEDIO	ELEVATO	MOLTO ELEVATO
a - franco minimo sulla piena di progetto	adeguato (>1,0 m)	insufficiente (0,3 - 1,0 m)	inadeguato (<0,3 m)	sormonto
b - interferenze con il corso d'acqua:				
- rigurgito	moderato (<0.3 m)	medio (0.3 - 1.0 m)	elevato (1,0 - 2,0 m)	molto elevato (>2,0 m)
- ostruzione luci	moderata	media	elevata	molto elevata
Valutazione complessiva della criticità della struttura	<b>ELEVATA</b>			
% ostruzione ipotizzata:	30	Occlusione delle due campate laterali.		

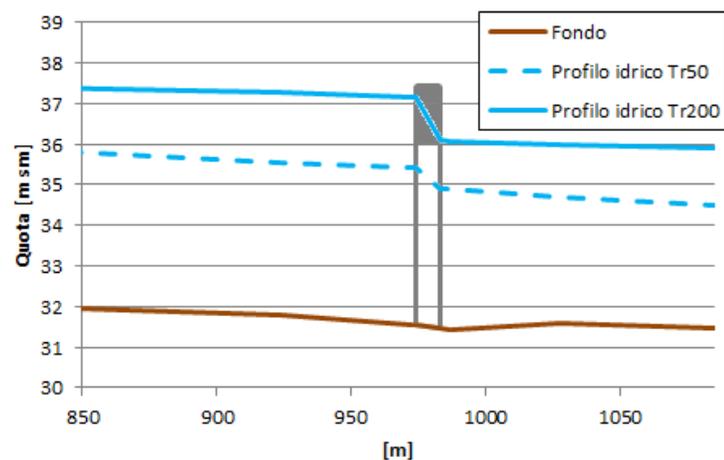
# Ponte Guglielmetti



Ponte Guglielmetti, vista da monte

## Geometria della struttura

Lunghezza dell'impalcato (m)	81	
Larghezza dell'impalcato (m)	9	
Quota intradosso (m s.m.)	massima	36,06
	minima	34,99
Quota fondo alveo (m s.m.)	media	32,4
	minima	31,56
Numero delle campate	6	
Numero delle pile / di cui in alveo	5/4	
Tipologia delle pile		
Portata di progetto (m <sup>3</sup> /s - tempo di ritorno)	673 - 50	
	1104 - 200	
Velocità media in alveo (m/s - tempo di ritorno)	3,09 - 50	
	3,38 - 200	
Effetto di rigurgito del ponte (m - tempo di ritorno)	0,52 - 50	
	1,05 - 200	
% di restringimento dell'alveo di piena	23	

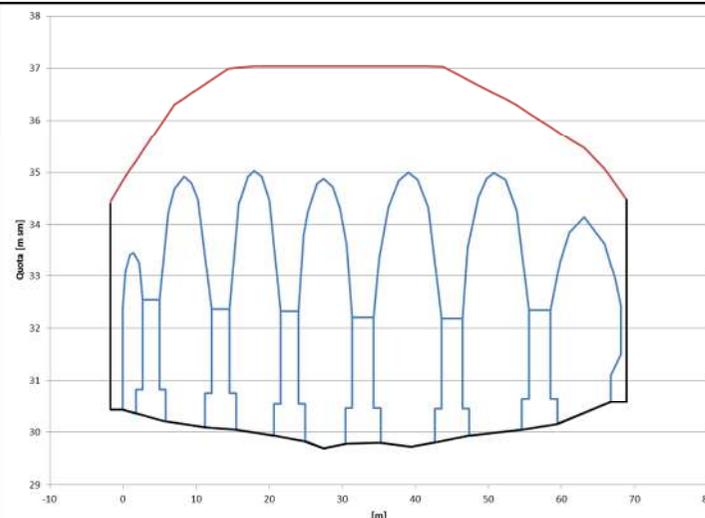
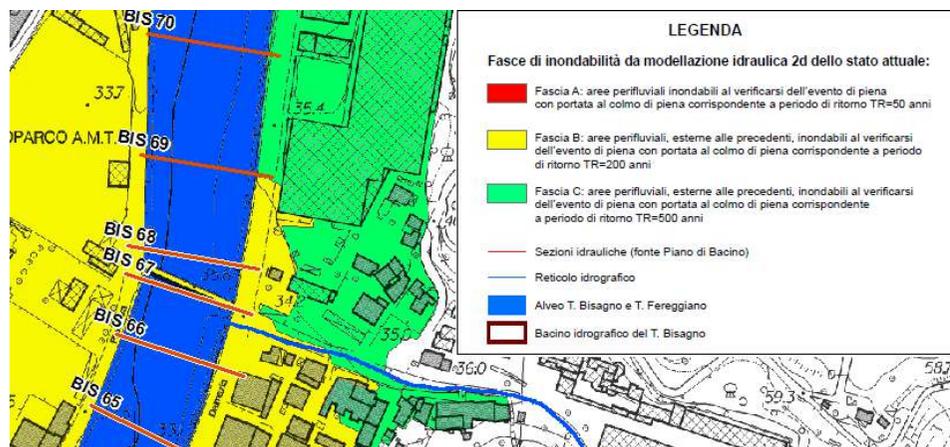


BISAGNO					
Struttura		Stato attuale			
PROGR.	SEZIONE	TR50		TR200	
		P.L.	Franco	P.L.	Franco
[m]	ID	[m.s.m.]	[m]	[m.s.m.]	[m]
924	74	35.55	1.25	37.26	-0.46
973	73.4	35.42	0.88	37.15	-0.85
974	Ponte Guglielmetti - monte (73.3)	35.41	0.65	37.14	-1.08
983	73.2	34.89	1.41	36.09	0.21
987	73.1	34.88	1.42	36.08	0.22
1028	72	34.7	0.95	35.97	-0.32

### GRADO DI VULNERABILITA' RISPETTO ALLE CARATTERISTICHE PROPRIE DELLA STRUTTURA

grado di vulnerabilità		MODERATO	MEDIO	ELEVATO	MOLTO ELEVATO
a - franco minimo sulla piena di progetto	Tr=50 anni	adeguato (>1,0 m)	insufficiente (0,3 - 1,0 m)	inadeguato (<0,3 m)	sormonto
	Tr=200 anni	adeguato (>1,0 m)	insufficiente (0,3 - 1,0 m)	inadeguato (<0,3 m)	sormonto
b - interferenze con il corso d'acqua:					
- rigurgito	Tr=50 anni	moderato (<0.3 m)	medio (0.3 - 1.0 m)	elevato (1,0 - 2,0 m)	molto elevato (>2,0 m)
	Tr=200 anni	moderato (<0.3 m)	medio (0.3 - 1.0 m)	elevato (1,0 - 2,0 m)	molto elevato (>2,0 m)
- ostruzione luci	Tr=50 anni	moderata	media	elevata	molto elevata
	Tr=200 anni	moderata	media	elevata	molto elevata
Criticità complessiva della struttura	Tr=50 anni	ELEVATA	Considerazioni simili rispetto a quelle di Ponte Feritore. La dimensione e il distanziamento delle pile sono coerenti con quelle del precedente attraversamento, e lo stesso vale per il tipo di geometria.		
	Tr=200 anni	ELEVATA			
% ostruzione ipotizzata:	Tr=50 anni	30	Occlusione delle due campate laterali.		
	Tr=200 anni	30			

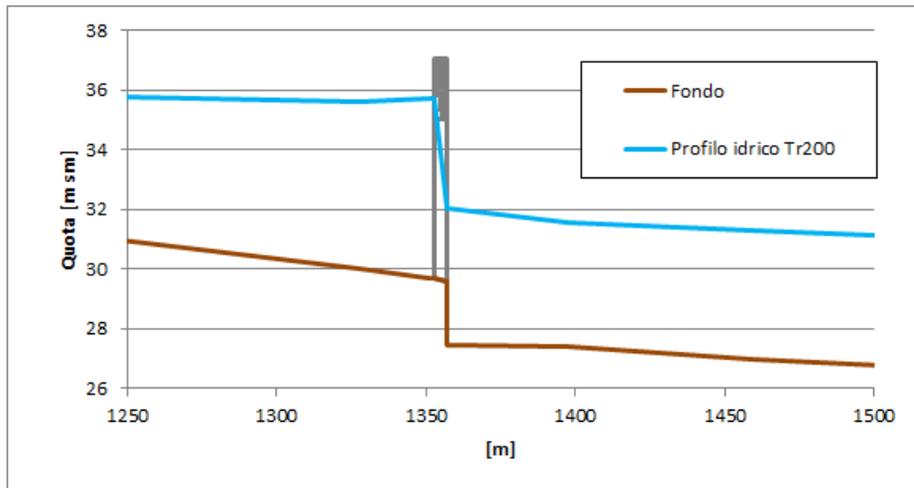
## Ponte Carrega



Ponte Carrega, vista da valle

### Geometria della struttura

Lunghezza dell'impalcato (m)	71	
Larghezza dell'impalcato (m)	4	
Quota intradosso (m s.m.)	massima	35,02
	minima	33,42
Quota fondo alveo (m s.m.)	media	30,04
	minima	29,69
Numero delle campate	7	
Numero delle pile / di cui in alveo	6/6	
Tipologia delle pile		
Portata di progetto (m <sup>3</sup> /s - tempo di ritorno)	1058 - 200	
Velocità media in alveo (m/s)	2,62	
Effetto di rigurgito del ponte (m)	3,67	
% di restringimento dell'alveo di piena	26	

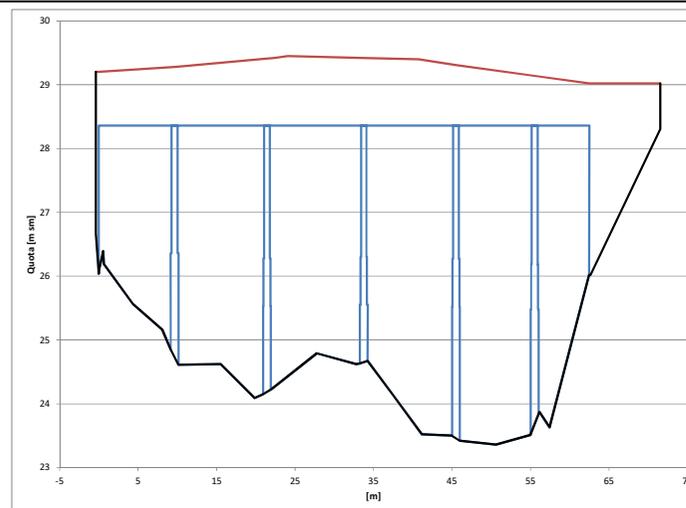
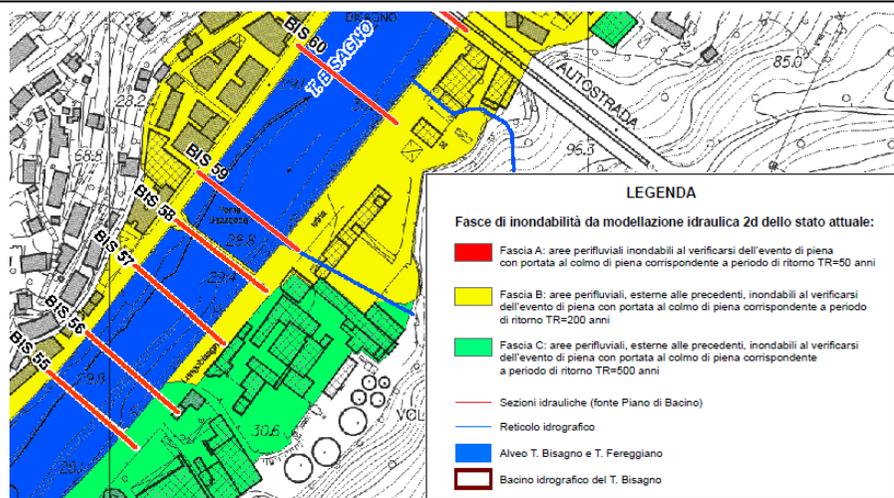


BISAGNO					
Struttura		Stato attuale			
PROGR.	SEZIONE	TR50		TR200	
		P.L.	Franco	P.L.	Franco
[m]	ID	[m.s.m.]	[m]	[m.s.m.]	[m]
1328	68	34	0.65	35.62	-0.97
1351	67.4	34.07	0.33	35.72	-1.32
1353	Ponte Carrega - monte (67.3)	34.07	0.95	35.72	-0.7
1357	67.2	31.39	2.91	32.05	2.25
1398	66	30.69	2.7	31.58	1.81
1460	65	30.39	2.7	31.29	1.8

### GRADO DI VULNERABILITA' RISPETTO ALLE CARATTERISTICHE PROPRIE DELLA STRUTTURA

grado di vulnerabilità	MODERATO	MEDIO	ELEVATO	MOLTO ELEVATO
a - franco minimo sulla piena di progetto	adeguato (>1,0 m)	insufficiente (0,3 - 1,0 m)	inadeguato (<0,3 m)	sormonto
b - interferenze con il corso d'acqua:				
- rigurgito	moderato (<0.3 m)	medio (0.3 - 1.0 m)	elevato (1,0 - 2,0 m)	molto elevato (>2,0 m)
- ostruzione luci	moderata	media	elevata	molto elevata
Criticità complessiva della struttura	<b>MOLTO ELEVATA</b> La geometria dell'attraversamento pedonale comporta una notevole interferenza col deflusso, sia per la significativa dimensione delle pile in alveo sia per la geometria ad arco. La ridotta luce verticale delle due arcate alle estremità aumenta la criticità della struttura.			
% ostruzione ipotizzata:	40		Occlusione delle prime due campate in sinistra e della prima in destra.	

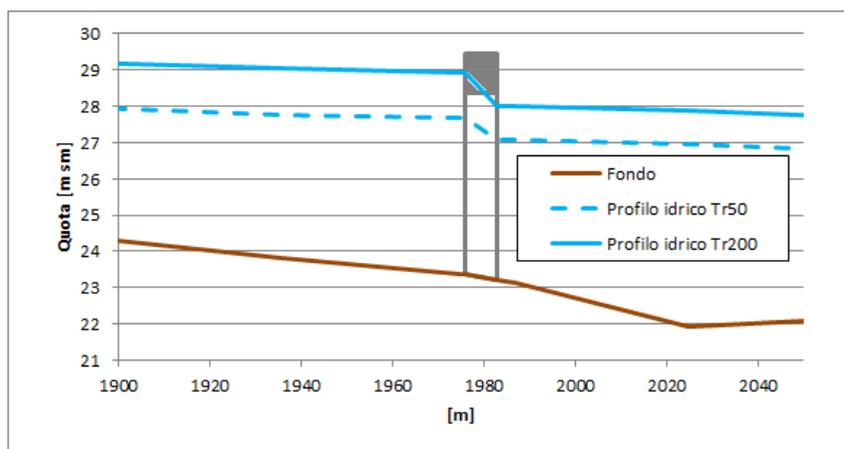
## Ponte Bezzecca



Ponte Bezzecca, vista da valle

### Geometria della struttura

Lunghezza dell'impalcato (m)	72	
Larghezza dell'impalcato (m)	6,5	
Quota intradosso (m s.m.)	28,36	
Quota fondo alveo (m s.m.)	media	24,75
	minima	23,36
Numero delle campate	6	
Numero delle pile / di cui in alveo	5/4	
Tipologia delle pile		
Portata di progetto (m³/s - tempo di ritorno)	684 - 50	
	1124 - 200	
Velocità media in alveo (m/s - tempo di ritorno)	3,33 - 50	
	3,94 - 200	
Effetto di rigurgito del ponte (m - tempo di ritorno)	0,61 - 50	
	0,94 - 200	
% di restringimento dell'alveo di piena	18	

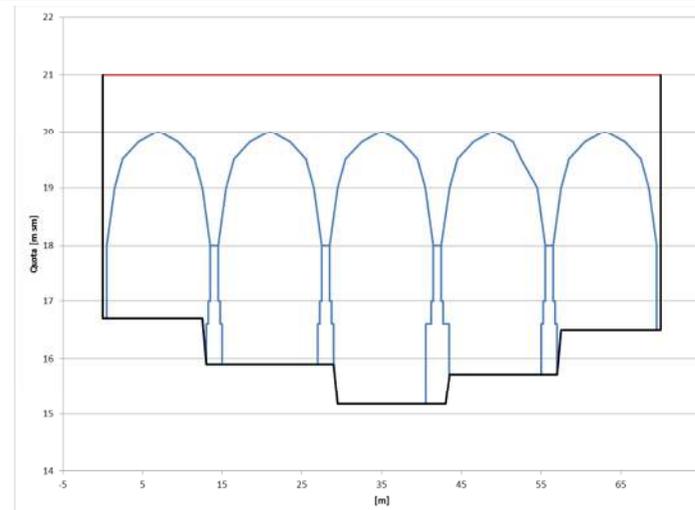
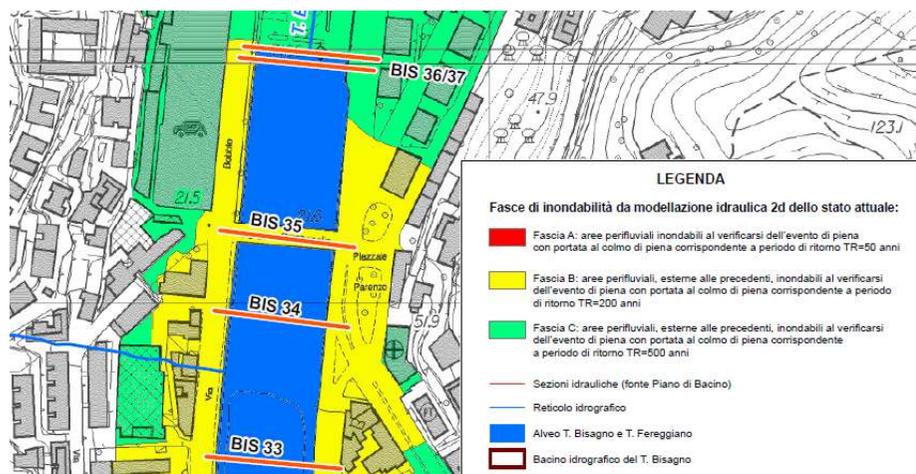


BISAGNO					
Struttura		Stato attuale			
PROGR.	SEZIONE	TR50		TR200	
		P.L.	Franco	P.L.	Franco
[m]	ID	[m.s.m.]	[m]	[m.s.m.]	[m]
1936	59	27.77	1.21	29.05	-0.07
1975	58.4	27.66	1.36	28.93	0.09
1976	Ponte Bezzecca - monte (58.3)	27.67	0.69	28.94	-0.58
1983	58.2	27.06	1.96	28	1.02
1987	58.1	27.06	1.96	27.99	1.03
2025	57	26.94	1.45	27.86	0.53

### GRADO DI VULNERABILITA' RISPETTO ALLE CARATTERISTICHE PROPRIE DELLA STRUTTURA

grado di vulnerabilità		MODERATO	MEDIO	ELEVATO	MOLTO ELEVATO	
a - franco minimo sulla piena di progetto	Tr=50 anni	adeguato (>1,0 m)	insufficiente (0,3 - 1,0 m)	inadeguato (<0,3 m)	sormonto	
	Tr=200 anni	adeguato (>1,0 m)	insufficiente (0,3 - 1,0 m)	inadeguato (<0,3 m)	sormonto	
b - interferenze con il corso d'acqua:						
	- rigurgito	Tr=50 anni	moderato (<0.3 m)	medio (0.3 - 1.0 m)	elevato (1,0 - 2,0 m)	molto elevato (>2,0 m)
	Tr=200 anni	moderato (<0.3 m)	medio (0.3 - 1.0 m)	elevato (1,0 - 2,0 m)	molto elevato (>2,0 m)	
	- ostruzione luci	Tr=50 anni	moderata	media	elevata	molto elevata
	Tr=200 anni	moderata	media	elevata	molto elevata	
Criticità complessiva della struttura		Tr=50 anni	MEDIA	Ponte Bezzecca presenta affinità geometriche con Ponte Feritore, inclusa l'occlusione in destra. Il differente grado di criticità per i due eventi considerati è legato al diverso valore di franco: per l'evento a frequenza inferiore la struttura risulta funzionare in pressione.		
		Tr=200 anni	ELEVATA			
% ostruzione ipotizzata:		Tr=50 anni	20	Occlusione della prima campata in sinistra.		
		Tr=200 anni	30	Occlusione delle due campate laterali.		

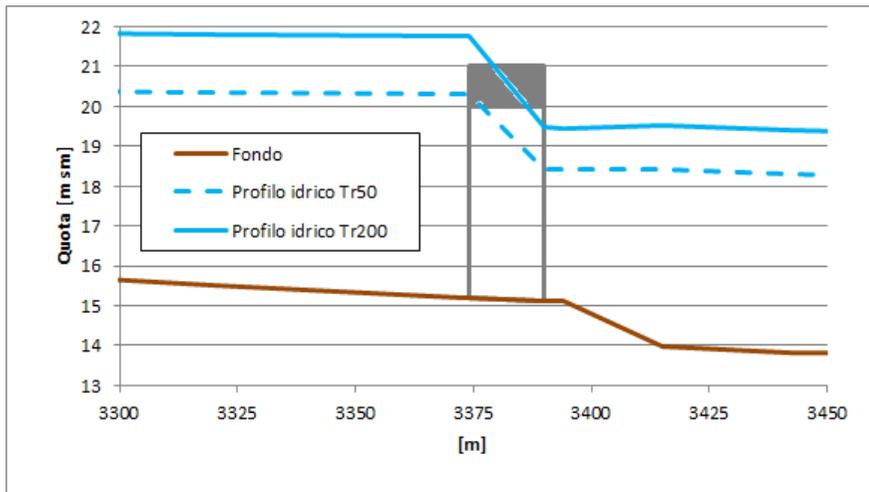
## Ponte Campanella



Ponte Campanella, vista da

### Geometria della struttura

Lunghezza dell'impalcato (m)		70
Larghezza dell'impalcato (m)		15
Quota intradosso (m s.m.)		20
Quota fondo alveo (m s.m.)	media	15,98
	minima	15,18
Numero delle campate		5
Numero delle pile / di cui in alveo		4/4
Tipologia delle pile		
Portata di progetto (m³/s - tempo di ritorno)		715 - 50
		1152 - 200
Velocità media in alveo (m/s - tempo di ritorno)		2,36 - 50
		2,84 - 200
Effetto di rigurgito del ponte (m - tempo di ritorno)		1,87 - 50
		2,29 - 200
% di restringimento dell'alveo di piena		7



BISAGNO					
Struttura		Stato attuale			
PROGR.	SEZIONE	TR50		TR200	
		P.L.	Franco	P.L.	Franco
[m]	ID	[m.s.m.]	[m]	[m.s.m.]	[m]
3320	35.35	20.34	1	21.78	-0.44
3366	RilARPAL_86	20.34	0.68	21.81	-0.79
3373	35.3	20.3	0.7	21.77	-0.77
3374	Ponte Campanella - monte (35.2)	20.3	-0.3	21.77	-1.77
3390	35.1	18.43	2.52	19.48	1.47
3394	35	18.4	2.6	19.44	1.56
3415	RilARPAL_88	18.4	2.63	19.52	1.5

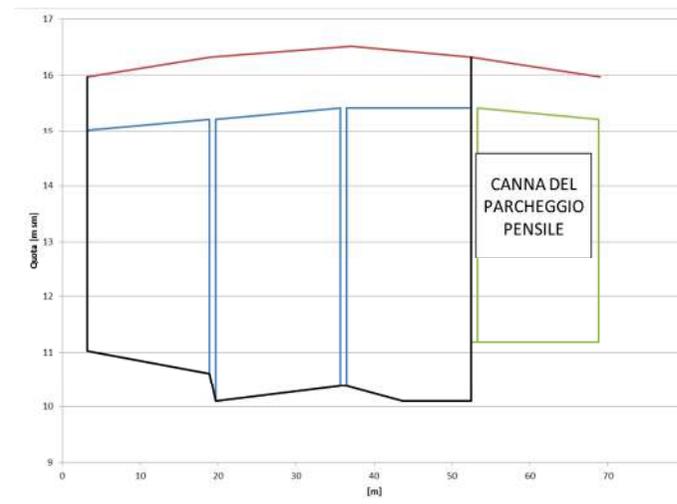
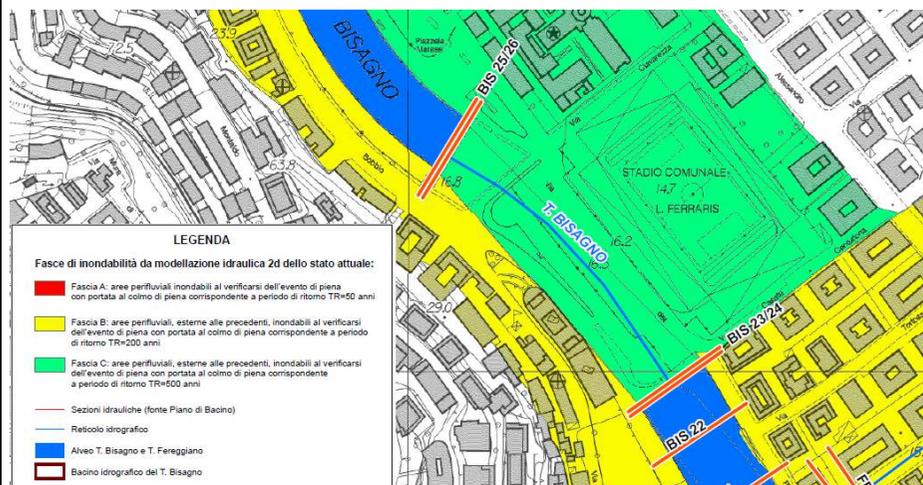
### GRADO DI VULNERABILITA' RISPETTO ALLE CARATTERISTICHE PROPRIE DELLA STRUTTURA

grado di vulnerabilità		MODERATO	MEDIO	ELEVATO	MOLTO ELEVATO
a - franco minimo sulla piena di progetto	Tr=50 anni	adeguato (>1,0 m)	insufficiente (0,3 - 1,0 m)	inadeguato (<0,3 m)	sormonto
	Tr=200 anni	adeguato (>1,0 m)	insufficiente (0,3 - 1,0 m)	inadeguato (<0,3 m)	sormonto
b - interferenze con il corso d'acqua:					
- rigurgito	Tr=50 anni	moderato (<0,3 m)	medio (0,3 - 1,0 m)	elevato (1,0 - 2,0 m)	molto elevato (>2,0 m)
	Tr=200 anni	moderato (<0,3 m)	medio (0,3 - 1,0 m)	elevato (1,0 - 2,0 m)	molto elevato (>2,0 m)
- ostruzione luci	Tr=50 anni	moderata	media	elevata	molto elevata
	Tr=200 anni	moderata	media	elevata	molto elevata
Criticità complessiva della struttura	Tr=50 anni	<b>MOLTO ELEVATA</b>			
	Tr=200 anni	<b>MOLTO ELEVATA</b>			
% ostruzione ipotizzata:	Tr=50 anni	40			
	Tr=200 anni	40			

Ponte Campanella rappresenta una struttura fortemente critica, a causa della sua geometria ad archi. L'insufficiente luce libera comporta il suo funzionamento in pressione già per l'evento cinquantennale.

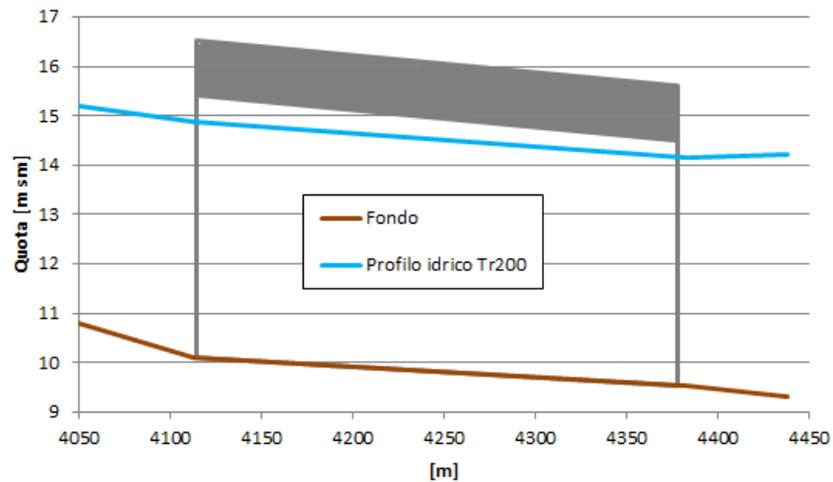
Occlusione delle due campate laterali.

## Copertura Marassi



### Geometria della struttura

Dimensione trasversale della struttura (m)	49	
Dimensione longitudinale della struttura (m)	260	
Quota intradosso (m s.m.)	massima	15,42
	minima	15,02
Quota fondo alveo (m s.m.)	media	10,4
	minima	10,1
Numero delle luci	3 (+1 con sezione di imbocco a monte)	
Numero delle pile / di cui in alveo	2/2	
Tipologia delle pile		
Portata di progetto (m <sup>3</sup> /s - tempo di ritorno)	967 - 200	
Velocità media in alveo (m/s)	4,43	
Effetto di rigurgito del ponte (m)	0,14	
% di restringimento dell'alveo di piena	3	

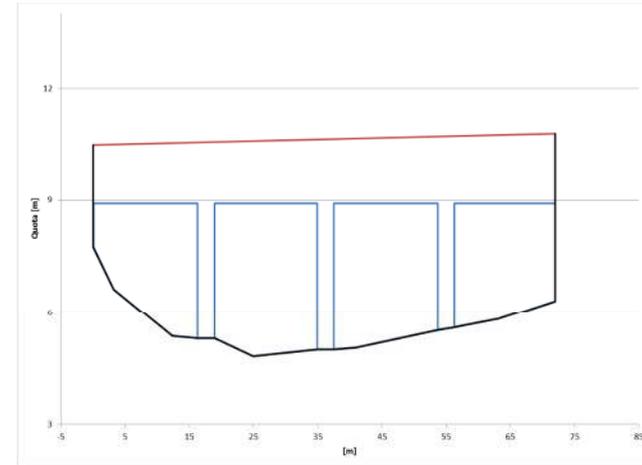


BISAGNO					
Struttura		Stato attuale			
PROGR. [m]	SEZIONE ID	TR50		TR200	
		P.L. [m.s.m.]	Franco [m]	P.L. [m.s.m.]	Franco [m]
3932	26.3	14.69	2.01	15.8	0.9
4113	Copertura Marassi - monte (25)	13.63	1.79	14.89	0.53
4384	23	12.97	2.13	14.44	0.66
4438	22	12.78	2.42	14.21	0.99

#### GRADO DI VULNERABILITA' RISPETTO ALLE CARATTERISTICHE PROPRIE DELLA STRUTTURA

grado di vulnerabilità	MODERATO	MEDIO	ELEVATO	MOLTO ELEVATO
a - franco minimo sulla piena di progetto	adeguato (>1,0 m)	insufficiente (0,3 - 1,0 m)	inadeguato (<0,3 m)	sormonto
b - interferenze con il corso d'acqua:				
- rigurgito	moderato (<0.3 m)	medio (0.3 - 1.0 m)	elevato (1,0 - 2,0 m)	molto elevato (>2,0 m)
- ostruzione luci	moderata	media	elevata	molto elevata
Criticità complessiva della struttura	MODERATA	La moderata criticità della copertura è legata alla luce tra le pile relativamente ampia e alla ridotta dimensione di queste ultime. La dimensione verticale della struttura risulta sufficiente a non attivare il funzionamento in pressione della struttura per l'evento a T=200 anni.		
% ostruzione ipotizzata:	15	Ostruzione parziale (1/2) della prima campata in sinistra.		

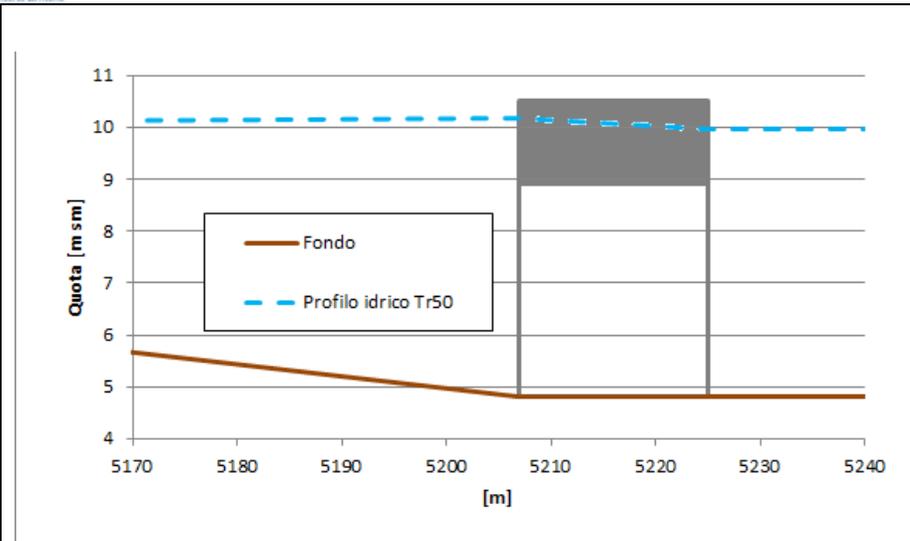
# Ponte Castelfidardo



Ponte Castelfidardo, vista da monte

## Geometria della struttura

Lunghezza dell'impalcato (m)			72
Larghezza dell'impalcato (m)			14
Quota intradosso (m s.m.)			8,90
Quota fondo alveo (m s.m.)	media		5,51
	minima		4,81
Numero delle campate			4
Numero delle pile / di cui in alveo			3/3
Tipologia delle pile			
Portata di progetto (m <sup>3</sup> /s - tempo di ritorno)			803 - 50
Velocità media in alveo (m/s)			2,38
Effetto di rigurgito del ponte (m)			0,20
% di restringimento dell'alveo di piena			11

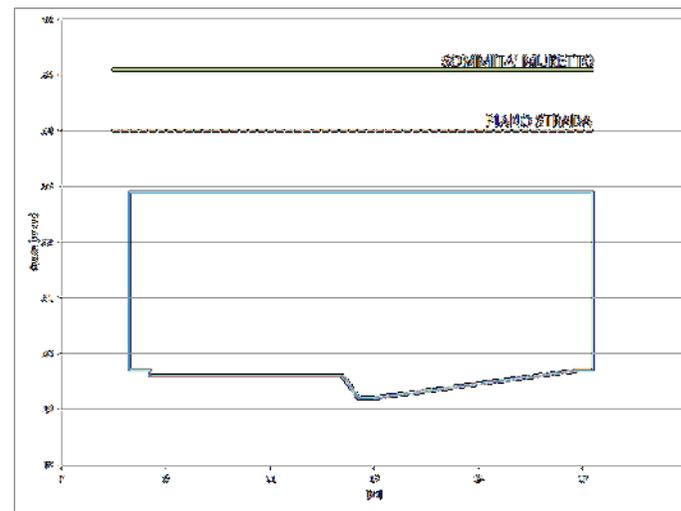
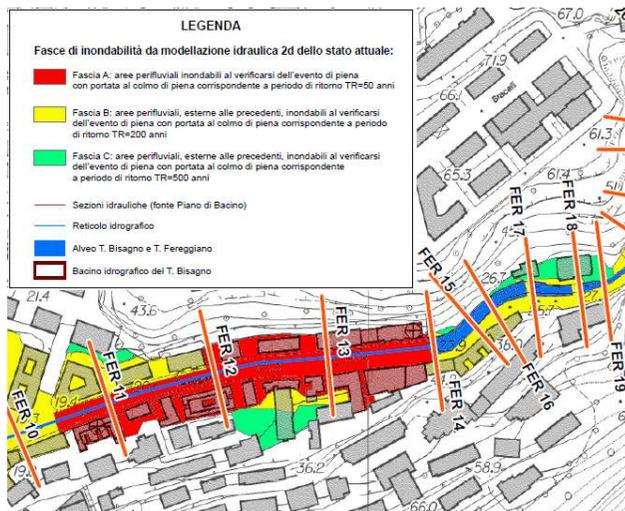


BISAGNO					
Struttura		Stato attuale			
PROGR.	SEZIONE	TR50		TR200	
		P.L.	Franco	P.L.	Franco
[m]	ID	[m.s.m.]	[m]	[m.s.m.]	[m]
5156	7	10.11	0.5	11.97	-1.36
5201	6	10.1	0.66	12.04	-1.28
5207	Ponte Castelfidardo - monte (5.2)	10.17	-1.27	12.1	-3.2
5225	5.1	9.97	0.68	11.89	-1.24
5230	5	9.96	0.69	11.89	-1.24

### GRADO DI VULNERABILITA' RISPETTO ALLE CARATTERISTICHE PROPRIE DELLA STRUTTURA

<i>grado di vulnerabilità</i>	MODERATO	MEDIO	ELEVATO	MOLTO ELEVATO
a - franco minimo sulla piena di progetto	adeguato (>1,0 m)	insufficiente (0,3 - 1,0 m)	inadeguato (<0,3 m)	sormonto
b - interferenze con il corso d'acqua:				
- rigurgito	moderato (<0.3 m)	medio (0.3 - 1.0 m)	elevato (1,0 - 2,0 m)	molto elevato (>2,0 m)
- ostruzione luci	moderata	media	elevata	molto elevata
Criticità complessiva della struttura	<b>MEDIA</b> L'attraversamento presenta un numero relativamente basso di campate, ma con dimensione significativa delle pile. Il deflusso risulta fortemente influenzato dall'impalcato già alla frequenza cinquantennale. Rispetto agli attraversamenti a monte della copertura di Marassi tale struttura presenta un'inferiore criticità all'occlusione.			
% ostruzione ipotizzata:	20 Occlusione della prima campata in destra (legata anche alla presenza pochi metri a valle dei resti di Ponte S.Agata).			

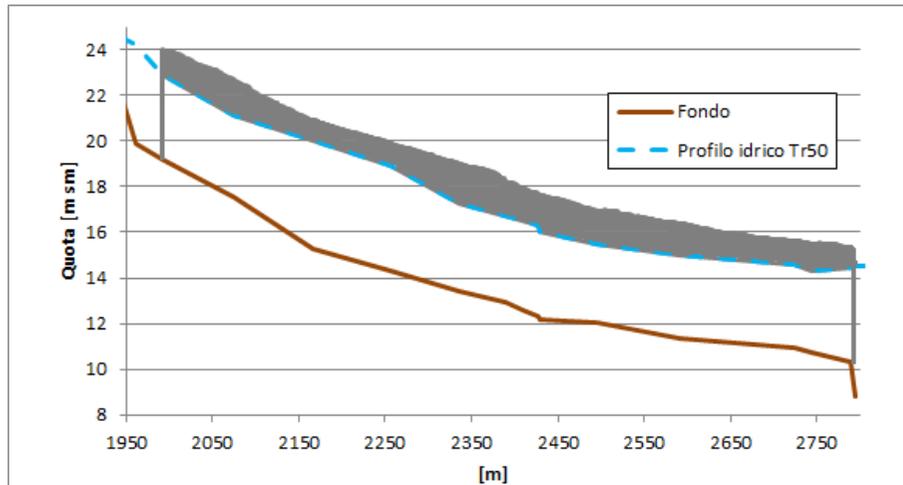
## Rio Fereggiano – Copertura terminale



Imbocco copertura terminale

### Geometria della struttura

Dimensione trasversale della struttura (m)	9,9	
Dimensione longitudinale della struttura (m)	800	
Quota intradosso (m s.m.)	22,90	
Quota fondo alveo (m s.m.)	media	19,52
	minima	19,2
Numero delle luci	1	
Numero delle pile / di cui in alveo	0	
Portata di progetto (m <sup>3</sup> /s - tempo di ritorno)	74 - 50	
Velocità media in alveo (m/s - tempo di ritorno)	3,78 - 50	
Effetto di rigurgito del ponte (m - tempo di ritorno)	-	
% di restringimento dell'alveo di piena	0	



FEREGGIANO					
Struttura		Stato attuale			
PROGR.	SEZIONE	TR50		TR200	
		P.L.	Franco	P.L.	Franco
[m]	ID	[m.s.m.]	[m]	[m.s.m.]	[m]
1961	15	24.22	0.61	25.68	-0.85
1992	Copertura terminale - monte (14)	24.3	-1.4	25.85	-2.95
2074	13	21.1*	0	21.1*	0
2167	12	20*	0	20*	0
2257	11	18.9*	0	18.9*	0
2336	10	17.3*	0	17.3*	0
2389	9	16.75*	0	16.75*	0
2410	8	16.5*	0	16.5*	0
2428	7	16.3*	0	16.3*	0
2429	6	16*	0	16*	0
2496	5	15.5*	0	15.5*	0
2592	4	15*	0	15*	0
2725	3	14.6*	0	14.6*	0
2744	2	14.3*	0	14.3*	0
2789	1	14.45*	0	14.45*	0

**GRADO DI VULNERABILITA' RISPETTO ALLE CARATTERISTICHE PROPRIE DELLA STRUTTURA**

<i>grado di vulnerabilità</i>	MODERATO	MEDIO	ELEVATO	MOLTO ELEVATO
a - franco minimo sulla piena di progetto	adeguato (>1,0 m)	insufficiente (0,3 - 1,0 m)	inadeguato (<0,3 m)	sormonto
b - interferenze con il corso d'acqua:				
- ostruzione luci	moderata	media	elevata	molto elevata
Criticità complessiva della struttura	MOLTO ELEVATA	Nonostante l'assenza di restringimento della sezione di imbocco alla copertura, la criticità è stata valutata molto elevata per la forte insufficienza della struttura a smaltire anche la portata cinquantennale.		
% ostruzione ipotizzata:	40	Ostruzione parziale della luce disponibile al deflusso.		

## 5 Risultati delle simulazioni in presenza di ostruzione

Il presente capitolo illustra i risultati delle simulazioni nella configurazione di occlusione descritta al capitolo precedente, per tutte le strutture di attraversamento selezionate.

Per ogni simulazione si riporta il confronto con lo stato attuale indisturbato. Sono indicati inoltre i valori di pelo libero e franco idraulico relativi al tempo di ritorno immediatamente superiore a quello considerato nell'analisi: ciò al fine di consentire una più completa valutazione dell'effetto dell'ostruzione ipotizzata.

### 5.1 Ponte Feritore

#### 5.1.1 TR=200 anni

La diminuzione di luce libera di progetto per Ponte Feritore consiste nell'ipotesi di occlusione delle due campate laterali, pari a circa il 30% di ostruzione. L'evento considerato è quello con tempo di ritorno duecentennale.

In Tabella 5.1 si riportano i livelli del pelo libero e i franchi idraulici in corrispondenza dell'attraversamento relativi allo stato indisturbato per i tempi di ritorno duecentennale e cinquecentennale. Si riportano inoltre i valori associati alla configurazione di occlusione parziale per Tr=200 anni. In Figura 5.1 sono graficati i valori per l'evento duecentennale tabellati.

Tabella 5.1 Ponte Feritore - Livelli del pelo libero e franco idraulico relativi allo stato attuale indisturbato (Tr=200 e 500 anni) e alla configurazione di occlusione parziale (Tr=200 anni).

BISAGNO										
PROGR.	SEZIONE	TR=200 anni						TR=500 anni		
		Stato indisturbato			Occlusione 30%			Stato indisturbato		
		P.L.	Franco sx	Franco dx	P.L.	Franco sx	Franco dx	P.L.	Franco sx	Franco dx
[m]	ID	[m.s.m.]	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m]
630	79	38.69	1.57	1.03	40.36	-0.10	-0.64	39.81	0.45	-0.09
655	78.4	38.73	1.26	0.86	40.39	-0.39	-0.79	39.85	0.14	-0.26
656	Ponte Feritore - monte (78.3)	38.72	0.22 (intr.) 1.27 (sp.)	0.22 (intr.) 0.87 (sp.)	40.39	-1.45 (intr.) -0.39 (sp.)	-1.45 (intr.) -0.79 (sp.)	39.85	-0.91 (intr.) 0.14 (sp.)	-0.91 (intr.) -0.26 (sp.)
669	78.2	37.77	2.09	1.69	37.77	2.09	1.69	38.83	1.03	0.63
672	78.1	37.75	2.11	1.71	37.76	2.11	1.71	38.81	1.05	0.65

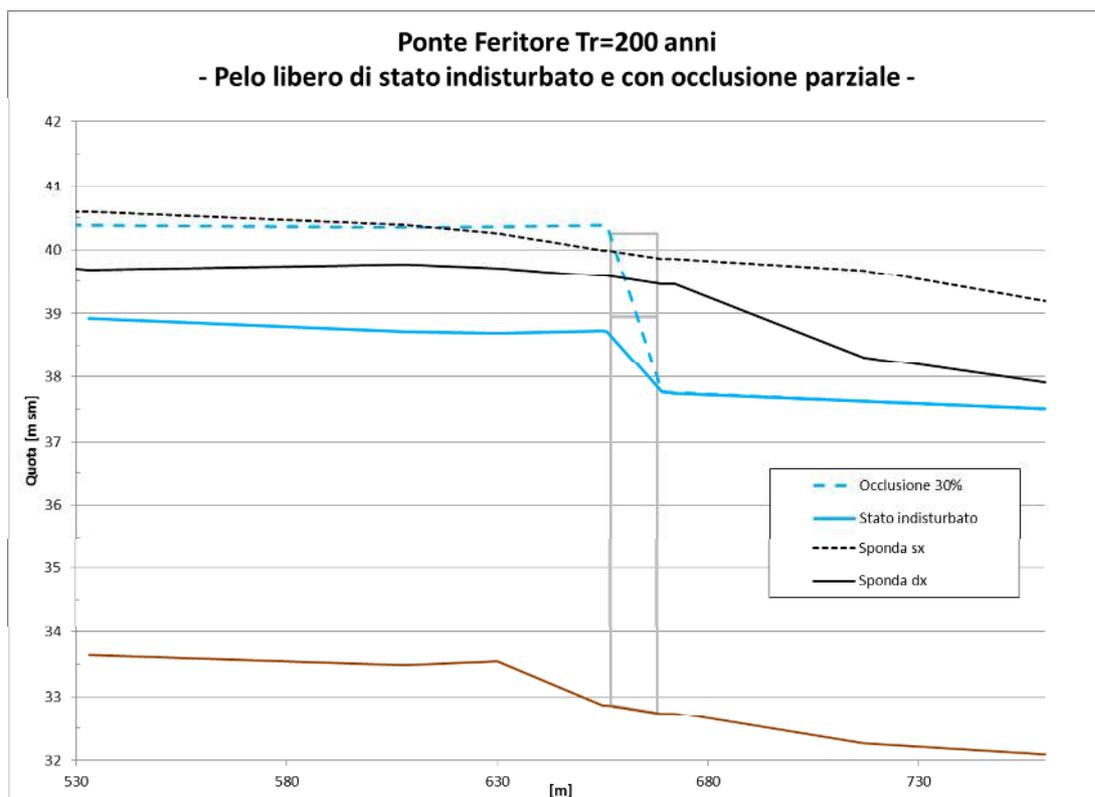


Figura 5.1 Ponte Feritore, TR=200 anni – Profili longitudinali del pelo libero relativi allo stato attuale indisturbato e alla configurazione di occlusione parziale.

Dai dati in tabella si rileva come l'occlusione delle due campate laterali comporti un innalzamento del pelo libero a monte della struttura poco superiore a 1,5 m. Ciò risulta in un livello idrico superiore a quello associato all'evento cinquecentennale di circa 0,5 m.

L'occlusione di progetto determina un deciso aggravio della pericolosità idraulica rispetto alla configurazione indisturbata. Mentre in assenza di occlusione non si riportano esondazioni, il rigurgito causato dalla struttura ostruita comporta il sormonto delle quote spondali sia in destra sia in sinistra, con tiranti massimi rispetto al piano strada circa pari a 80 cm in sponda destra e a 40 cm in sinistra.

In Figura 5.2 e Figura 5.3 si riporta la mappa di tiranti massimi relativa, rispettivamente, allo stato indisturbato e alla configurazione di occlusione.

A fronte di un'assenza di esondazione nello stato indisturbato, si osserva una propagazione delle acque esondate in sponda destra a monte sino alla passerella pedonale posta circa 190 m a monte e sino a 200 m circa a valle, andando così a congiungersi alle acque fuoriuscite in corrispondenza di ponte Guglielmetti. Relativamente al tratto a monte di Ponte Feritore, le acque esondate interessano l'area immediatamente a ridosso di via Emilia con tiranti generalmente non superiori a 0,5 m, ma che localmente raggiungono il metro e, in pochi punti circostanziati, lo superano. A valle le acque rimangono confinate sul piano strada con tiranti inferiori a 0,5 m.

L'area interessata dall'esondazione in sponda sinistra è decisamente meno estesa di quella in destra, coerentemente con la differenza di tirante idrico di sormonto. Le acque risultano invadere il Lungobisagno per una striscia di circa 100 m a cavallo dell'attraversamento, con battenti idrici in generale inferiori a 0,5 m

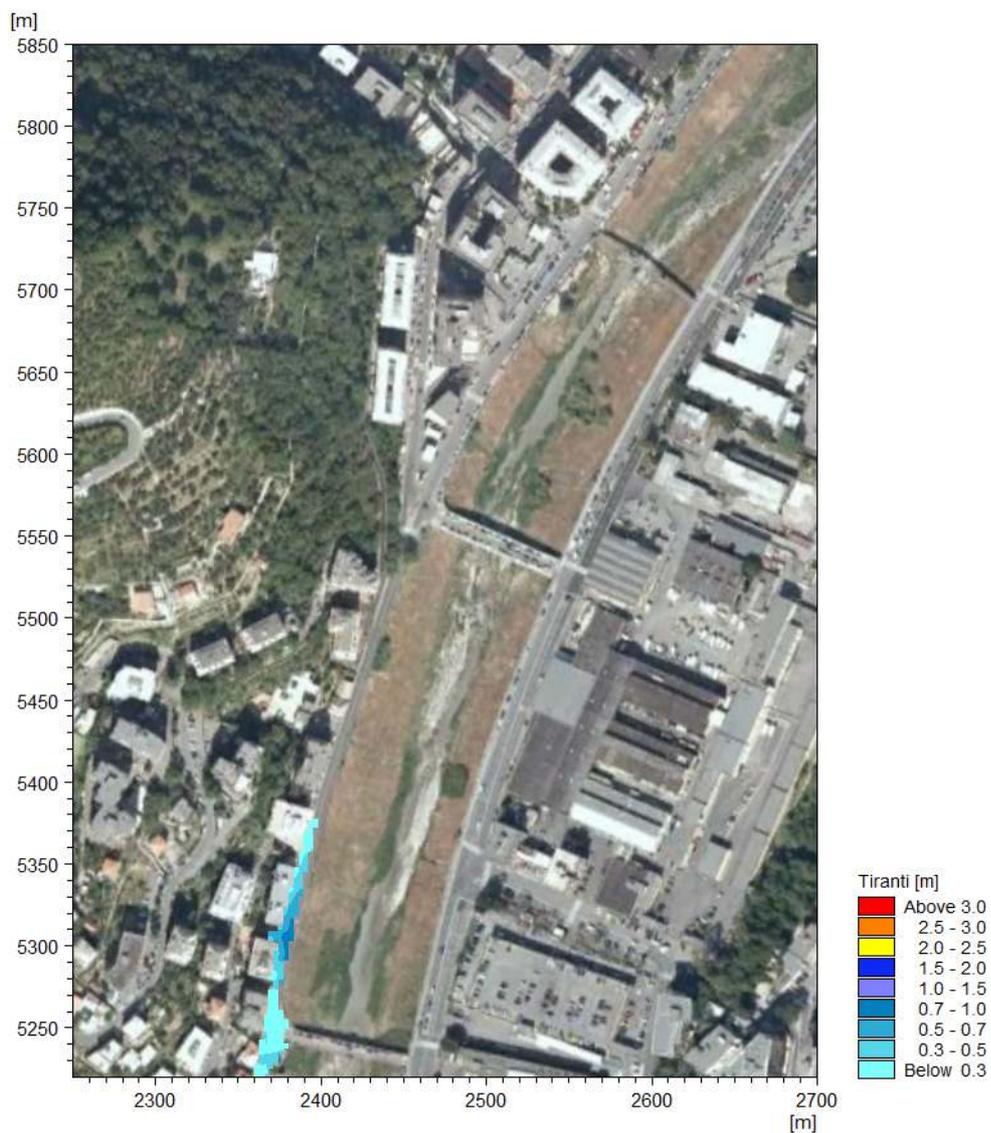


Figura 5.2 Ponte Feritore senza occlusioni, TR=200 anni – Tiranti idrici massimi.

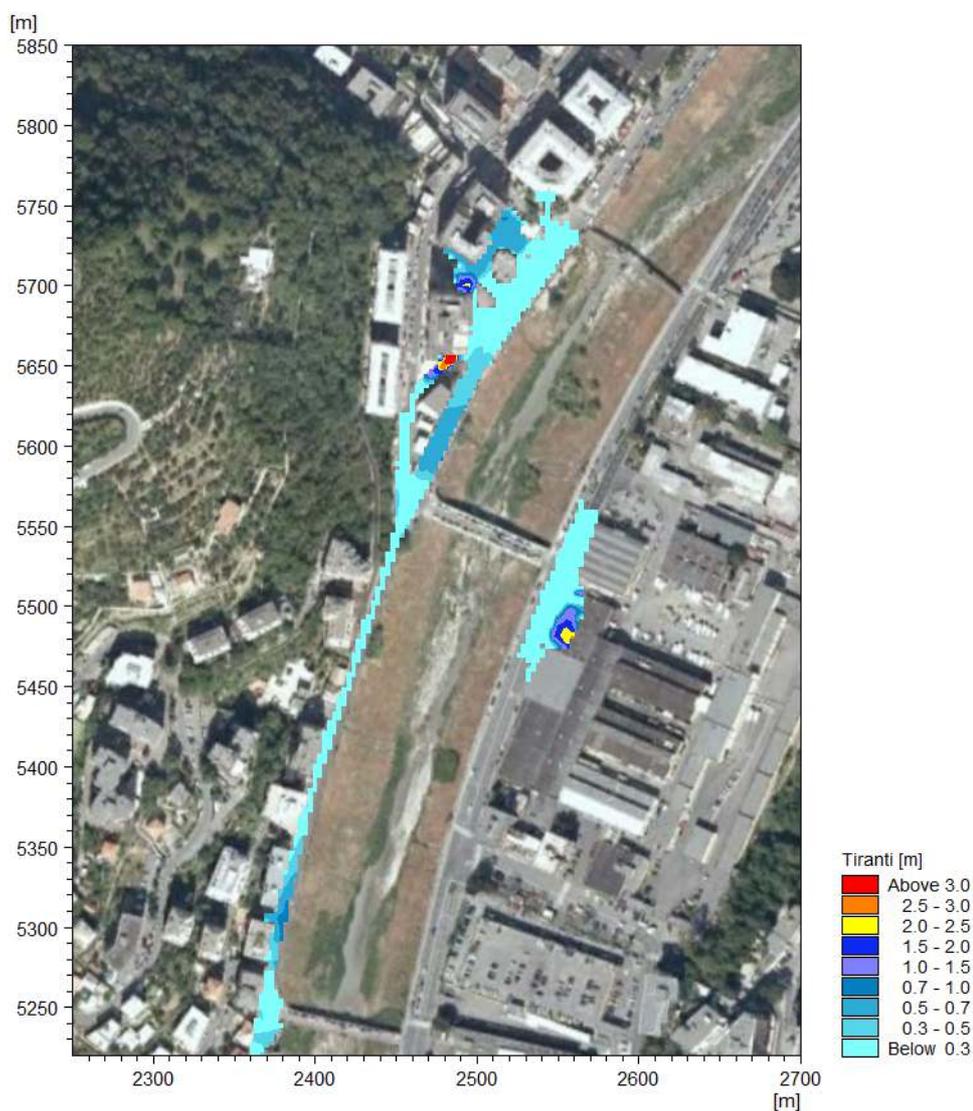


Figura 5.3 Ponte Feritore con occlusioni, TR=200 anni – Tiranti idrici massimi.

A titolo di confronto, si sono analizzati i risultati relativi all'evento cinquecentennale nello scenario indisturbato. Relativamente alle aree allagate per TR=500 anni (Figura 5.4), si osserva come, coerentemente con i valori di tirante idrico in alveo, l'evento duecentennale con occlusioni comporti una maggiore estensione delle aree interessate dall'esondazione sia in sinistra, dove l'evento a frequenza minore non determina sormonti spondali, sia in destra.

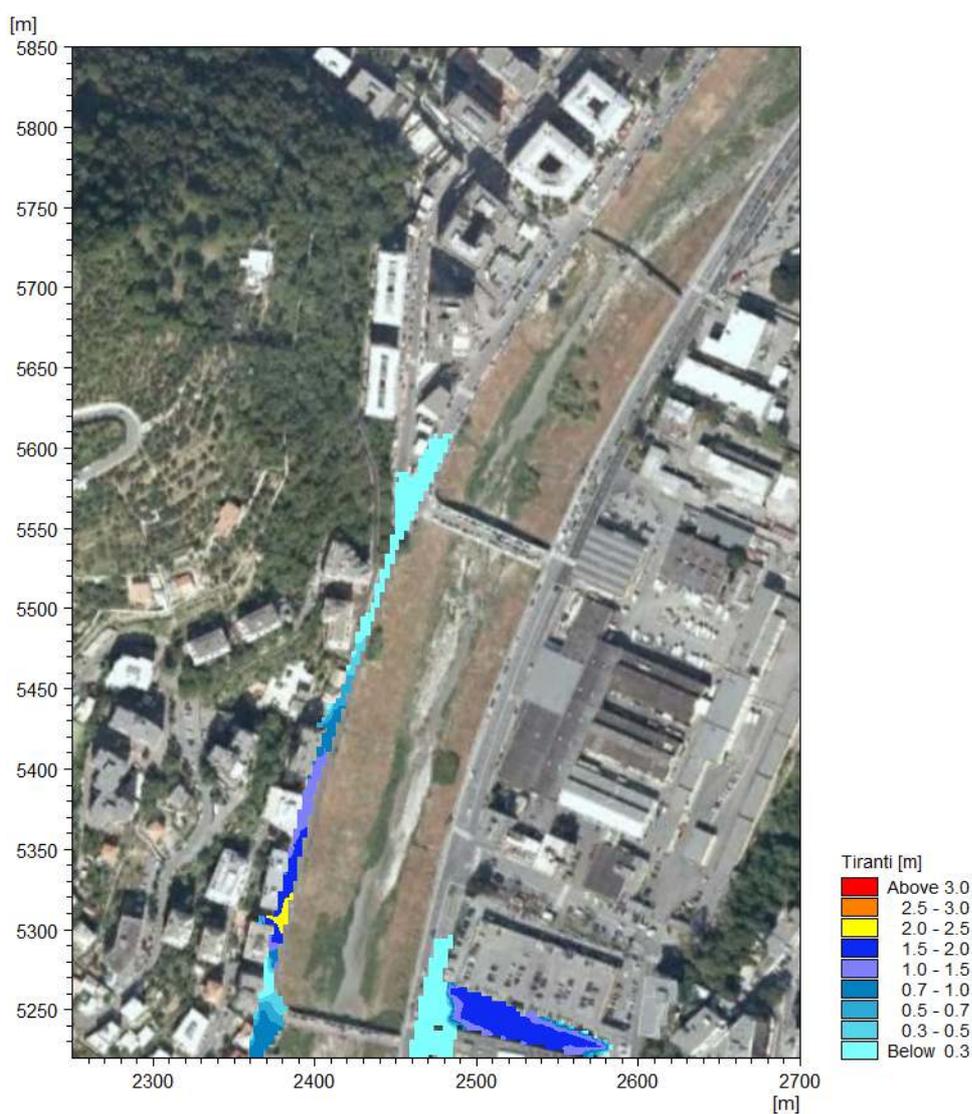


Figura 5.4 Ponte Feritore senza occlusioni, TR=500 anni – Tiranti idrici massimi.

Come si osserva in Figura 5.5, le velocità rimangono inferiori a 0,5 m/s, con l'eccezione del punto di sormonto in sponda destra immediatamente a monte del ponte, dove localmente i valori superano i 2 m/s.

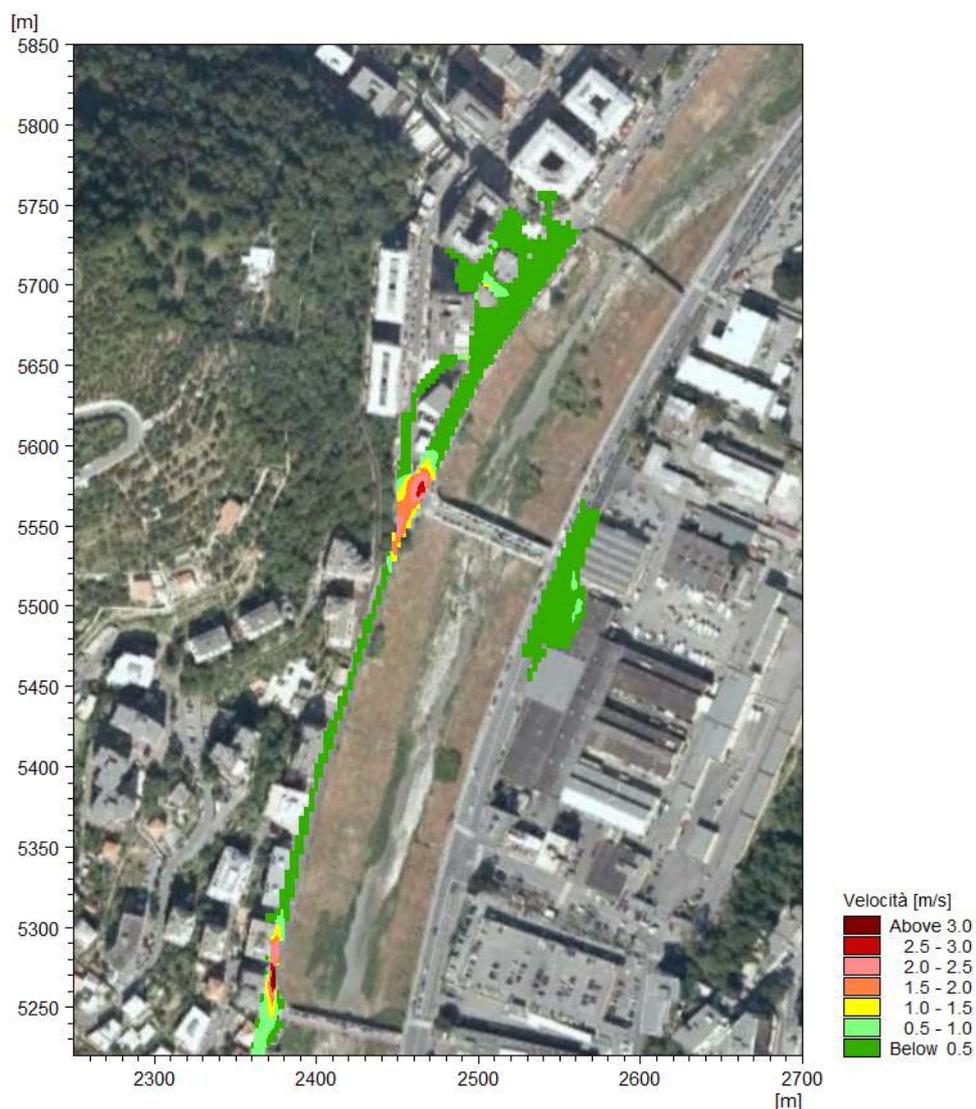


Figura 5.5 Ponte Feritore con occlusioni, TR=200 anni – Velocità massime.

## 5.2 Ponte Guglielmetti

La configurazione di studio di Ponte Guglielmetti prevede, come per Ponte Feritore, l'occlusione delle due campate laterali, per una percentuale di ostruzione circa pari al 30%. In tale configurazione si sono simulati gli eventi con tempo di ritorno cinquantennale e duecentennale.

### 5.2.1 TR=50 anni

I valori riportati in Tabella 5.2 e graficati in Figura 5.6 mostrano come, per l'evento cinquantennale, l'occlusione assunta per Ponte Guglielmetti comporti un innalzamento del pelo libero a monte della struttura di circa 1,2 m. I tiranti in alveo non risultano comunque raggiungere quelli associati all'evento duecentennale.

Tale incremento di tirante determina l'esondazione in sponda destra, mentre il deflusso rimane confinato entro la sponda sinistra.

Tabella 5.2 Ponte Guglielmetti - Livelli del pelo libero e franco idraulico relativi allo stato attuale indisturbato (Tr=50 e 200 anni) e alla configurazione di occlusione parziale (Tr=50 anni).

BISAGNO										
Struttura		TR=50 anni						TR=200 anni		
PROGR.	SEZIONE	Stato indisturbato			Occlusione 30%			Stato indisturbato		
		P.L.	Franco sx	Franco dx	P.L.	Franco sx	Franco dx	P.L.	Franco sx	Franco dx
[m]	ID	[m.s.m.]	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m]
924	74	35.55	2.98	1.25	36.71	1.82	0.09	37.26	1.27	-0.46
973	73.4	35.42	2.06	0.88	36.66	0.82	-0.36	37.15	0.33	-0.85
974	Ponte Guglielmetti - monte (73.3)	35.41	0.65 (intr.) 2.07 (sp.)	-0.42 (intr.) 1.15 (sp.)	36.66	-0.60 (intr.) 0.82 (sp.)	-1.67 (intr.) -0.10 (sp.)	37.14	-1.08 (intr.) 0.34 (sp.)	-2.15 (intr.) -0.84 (sp.)
983	73.2	34.89	2.49	1.41	34.89	2.488	1.41	36.09	1.29	0.21
987	73.1	34.88	2.47	1.42	34.88	2.47	1.42	36.08	1.27	0.22
1028	72	34.7	2.43	0.95	34.70	2.43	0.95	35.97	1.16	-0.32

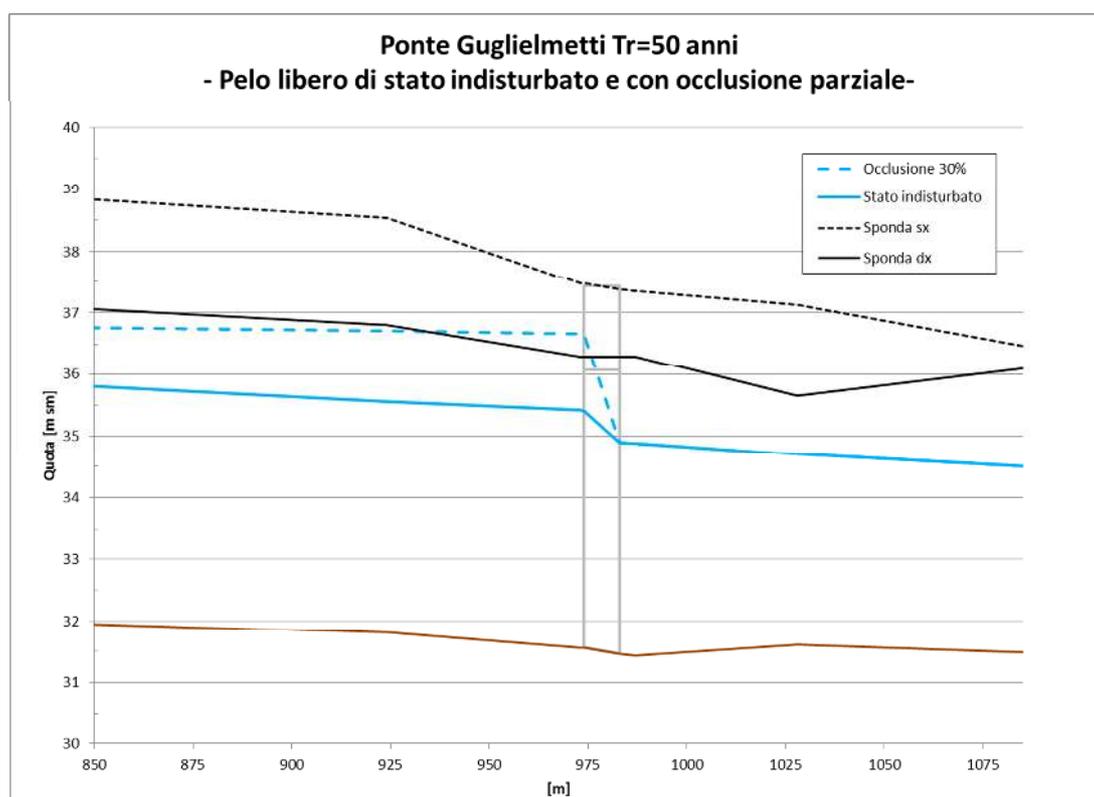


Figura 5.6 Ponte Guglielmetti, TR=50 anni – Profili longitudinali del pelo libero relativi allo stato attuale indisturbato e alla configurazione di occlusione parziale.

In Figura 5.7 e Figura 5.8 sono visualizzati i valori massimi rispettivamente di tirante idrico e velocità delle acque esondate. Non sono invece presenti le immagini relative alla configurazione in assenza di occlusioni in quanto priva di esondazione.

Coerentemente con il profilo di pelo libero di Figura 5.6, la sola sponda destra è interessata dalle acque di piena. Queste ultime risultano confinate sul piano stradale del Lungobisagno, ad eccezione di qualche inserimento lungo le ortogonali via Riva e Salita Preli. A monte le acque risalgono per circa 70 m, mentre a valle si propagano per circa 140 m, sino a via Lodi. I tiranti non risultano superare i 30 cm.

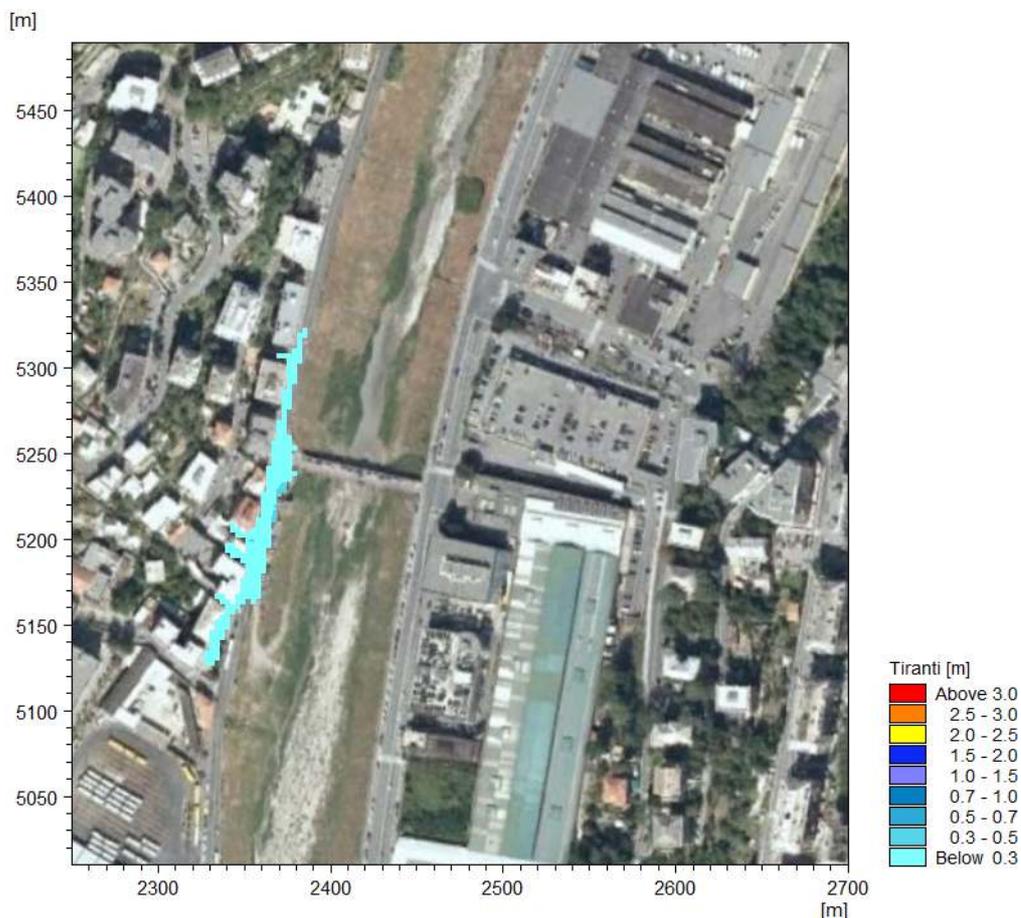


Figura 5.7 Ponte Guglielmetti con occlusione, TR=50 anni – Tiranti idrici massimi.

Anche le velocità massime, al pari dei tiranti, risultano non significative, con valori generalmente inferiori a 0,5 m/s ad eccezione del breve tratto subito a monte della struttura dove localmente si supera 1 m/s.



Figura 5.8 Ponte Guglielmetti con occlusione, TR=50 anni – Velocità massime.

### 5.2.2 TR=200 anni

L'occlusione di Ponte Guglielmetti comporta un innalzamento significativo per la portata duecentennale. Il tirante a monte della struttura presenta un incremento di circa 1 m determinando, a differenza dello scenario indisturbato, esondazione anche in sponda sinistra. I tiranti in alveo risultano inferiori, anche se di poco, rispetto ai valori associati a TR=500 anni. Il franco in sinistra risulta poco superiore a 0,5 m, mentre in destra supera 1,5 m.

Tabella 5.3 Ponte Guglielmetti - Livelli del pelo libero e franco idraulico relativi allo stato attuale indisturbato (Tr=200 e 500 anni) e alla configurazione di occlusione parziale (Tr=200 anni).

BISAGNO										
Struttura		TR=200 anni						TR=500 anni		
PROGR.	SEZIONE	Stato indisturbato			Occlusione 30%			Stato indisturbato		
		P.L.	Franco sx	Franco dx	P.L.	Franco sx	Franco dx	P.L.	Franco sx	Franco dx
[m]	ID	[m.s.m.]	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m]
924	74	37.26	1.27	-0.46	38.22	0.31	-1.42	38.48	0.43	-1.35
973	73.4	37.15	0.33	-0.85	38.16	-0.68	-1.86	38.36	0.17	-1.56
974	Ponte Guglielmetti - monte (73.3)	37.14	-1.08 (intr.) 0.34 (sp.)	-2.15 (intr.) 0.84 (sp.)	38.16	-2.10 (intr.) 0.68 (sp.)	-3.17 (intr.) 1.86 (sp.)	38.36	-2.30 (intr.) 0.88 (sp.)	-3.37 (intr.) 2.06 (sp.)
983	73.2	36.09	1.29	0.21	36.11	1.27	0.19	36.86	0.62	-0.56

BISAGNO										
Struttura		TR=200 anni						TR=500 anni		
PROGR.	SEZIONE	Stato indisturbato			Occlusione 30%			Stato indisturbato		
		P.L.	Franco sx	Franco dx	P.L.	Franco sx	Franco dx	P.L.	Franco sx	Franco dx
[m]	ID	[m.s.m.]	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m]
987	73.1	36.08	1.27	0.22	36.10	1.25	0.20	36.85	0.53	-0.55
1028	72	35.97	1.16	-0.32	35.97	1.16	-0.32	36.74	0.61	-0.44

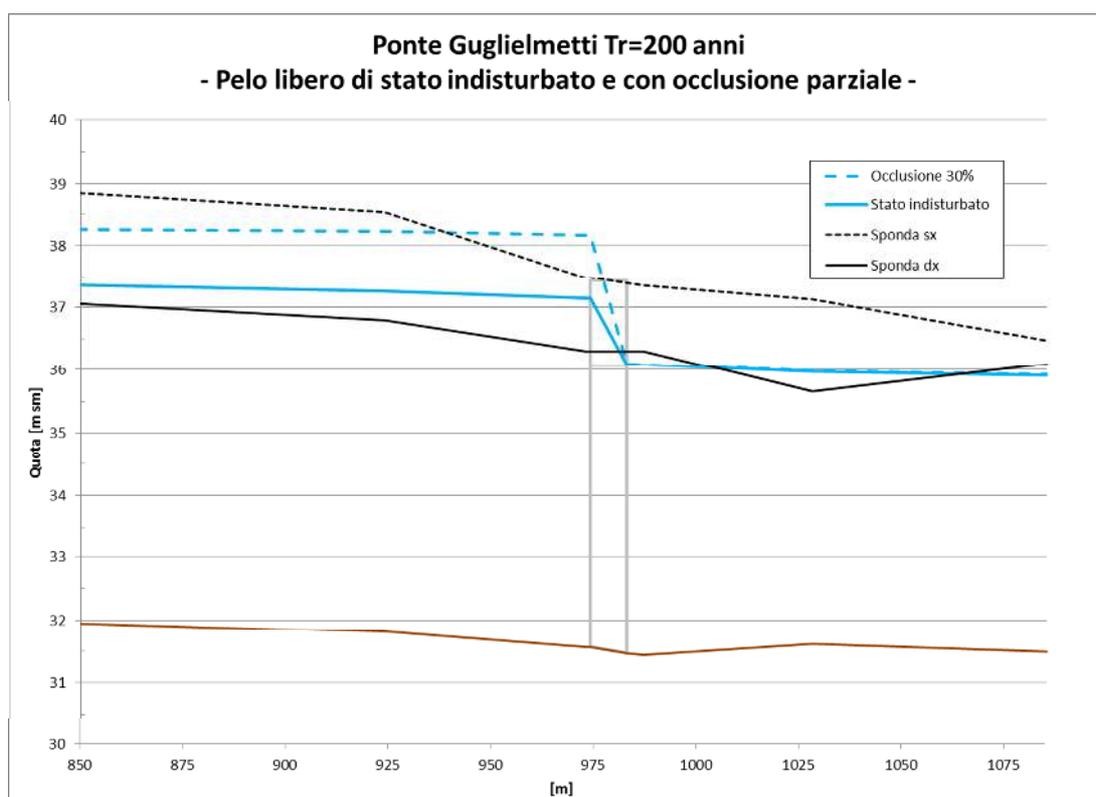


Figura 5.9 Ponte Guglielmetti, TR=200 anni – Profili longitudinali del pelo libero relativi allo stato attuale indisturbato e alla configurazione di occlusione parziale.

Per quanto riguarda l'estensione delle aree allagate, la configurazione con occlusioni (Figura 5.11) determina in sponda destra l'allagamento del piano stradale di via Piacenza a partire da circa 200 m a monte della struttura sino a poco più di 100 m a valle, lambendo le acque esondate per effetto del rigurgito di Ponte Carrega. I tiranti a monte dell'attraversamento presentano valori massimi superiori a 1,5 m, per poi diminuire sensibilmente a valle della struttura.

Relativamente all'esondazione in sponda sinistra, le acque di sormonto trovano un volume di immagazzinamento nell'area di pertinenza del centro commerciale subito a monte dell'attraversamento. Il volume liquido residuale si propaga a monte, per circa 60 m, e a valle, per poco meno di 100 m, con tiranti non superiori a 0,5 m.

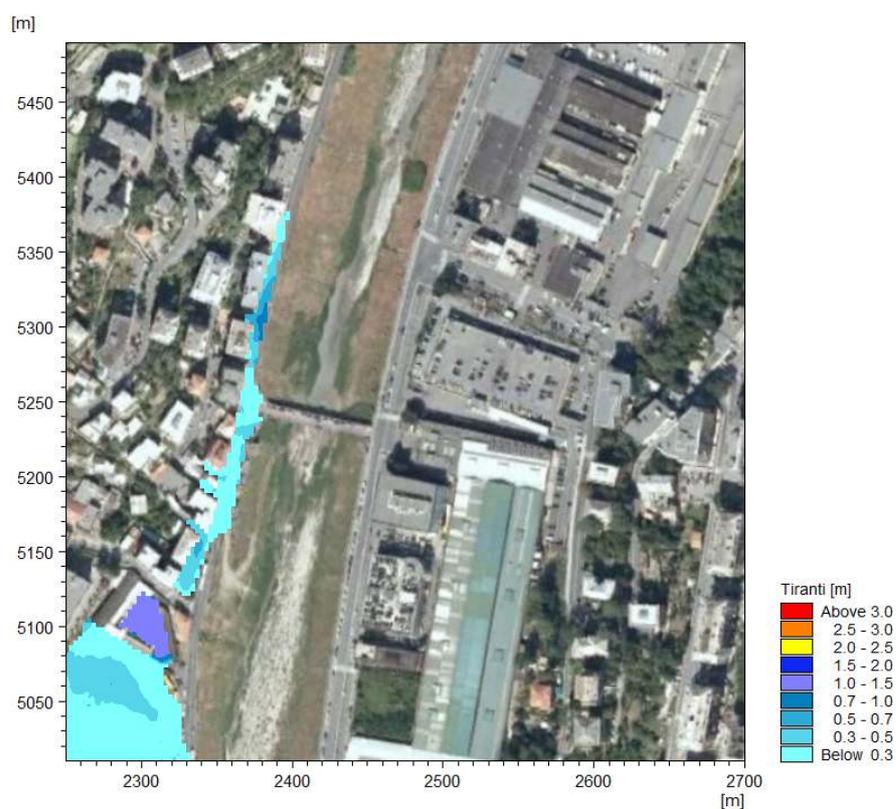


Figura 5.10 Ponte Guglielmetti senza occlusione, TR=200 anni – Tiranti idrici massimi.

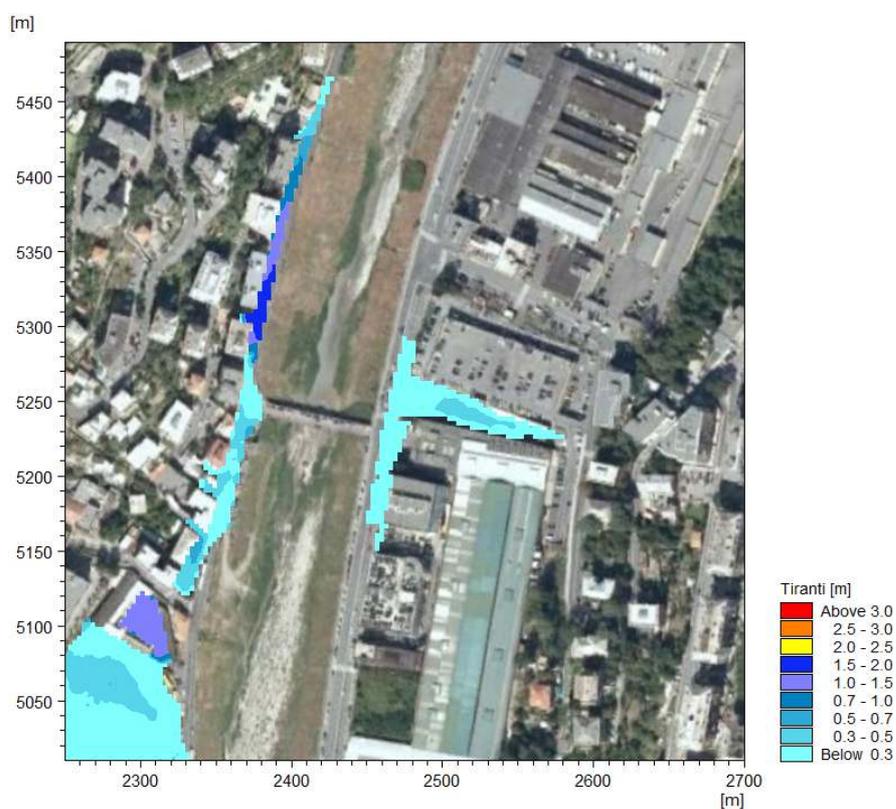


Figura 5.11 Ponte Guglielmetti con occlusione, TR=200 anni – Tiranti idrici massimi.

I valori massimi di velocità (Figura 5.12) risultano in generale non superiori a 0,5 m/s, ad eccezione del tratto in sponda destra immediatamente a monte e a valle dell'attraversamento. Lungo via Piacenza a partire da circa 60 m a monte della struttura, le velocità raggiungono picchi superiori a 3 m/s, per poi diminuire a valle di Ponte Guglielmetti e scendere sotto il valore di 0,5 m/s a partire da circa 50 m a valle della struttura.



Figura 5.12 Ponte Guglielmetti con occlusione, TR=200 anni – Velocità massime.

## 5.3 Ponte Carrega

### 5.3.1 TR=200 anni

La configurazione di occlusione parziale è stata studiata per Ponte Carrega in relazione al solo evento duecentennale. In considerazione della geometria fortemente influente sul deflusso alveato e della conseguente criticità a un'eventuale ostruzione, si è assunto un alto grado di occlusione, pari al 40% circa della luce libera e associato all'ostruzione delle due campate laterali in sinistra e della prima in destra.

Come mostrato in Tabella 5.4 e Figura 5.13, l'occlusione simulata determina un incremento del rigurgito dovuto alla struttura pari a poco più di 1 m. I valori di tiranti derivanti dall'occlusione parziale risultano leggermente superiori a quelli associati all'evento cinquecentennale.

Tabella 5.4 Ponte Carrega - Livelli del pelo libero e franco idraulico relativi allo stato attuale indisturbato (Tr=200 e 500 anni) e alla configurazione di occlusione parziale (Tr=200 anni).

BISAGNO										
Struttura		TR=200 anni						TR=500 anni		
PROGR.	SEZIONE	Stato indisturbato			Occlusione 40%			Stato indisturbato		
		P.L.	Franco sx	Franco dx	P.L.	Franco sx	Franco dx	P.L.	Franco sx	Franco dx
[m]	ID	[m.s.m.]	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m]
1328	68	35.62	-0.6	-0.97	36.73	-1.71	-2.08	36.5	-1.48	-1.85
1351	67.4	35.72	-1.32	-1.25	36.85	-2.45	-2.38	36.68	-2.28	-2.21
1353	Ponte Carrega - monte (67.3)	35.72	-0.7 (intr.) -1.32 (sp.)	-0.7 (intr.) -1.25 (sp.)	36.86	-1.84 (intr.) -2.46 (sp.)	-1.84 (intr.) -2.39 (sp.)	36.7	-1.68 (intr.) -2.30 (sp.)	-1.68 (intr.) -2.23 (sp.)
1357	67.2	32.05	2.25	2.32	31.73	2.57	2.64	32.53	1.77	1.84
1398	66	31.58	2.85	1.81	31.33	3.10	2.06	32.2	2.23	1.19
1460	65	31.29	2.37	1.8	30.97	2.69	2.12	31.88	1.78	1.21

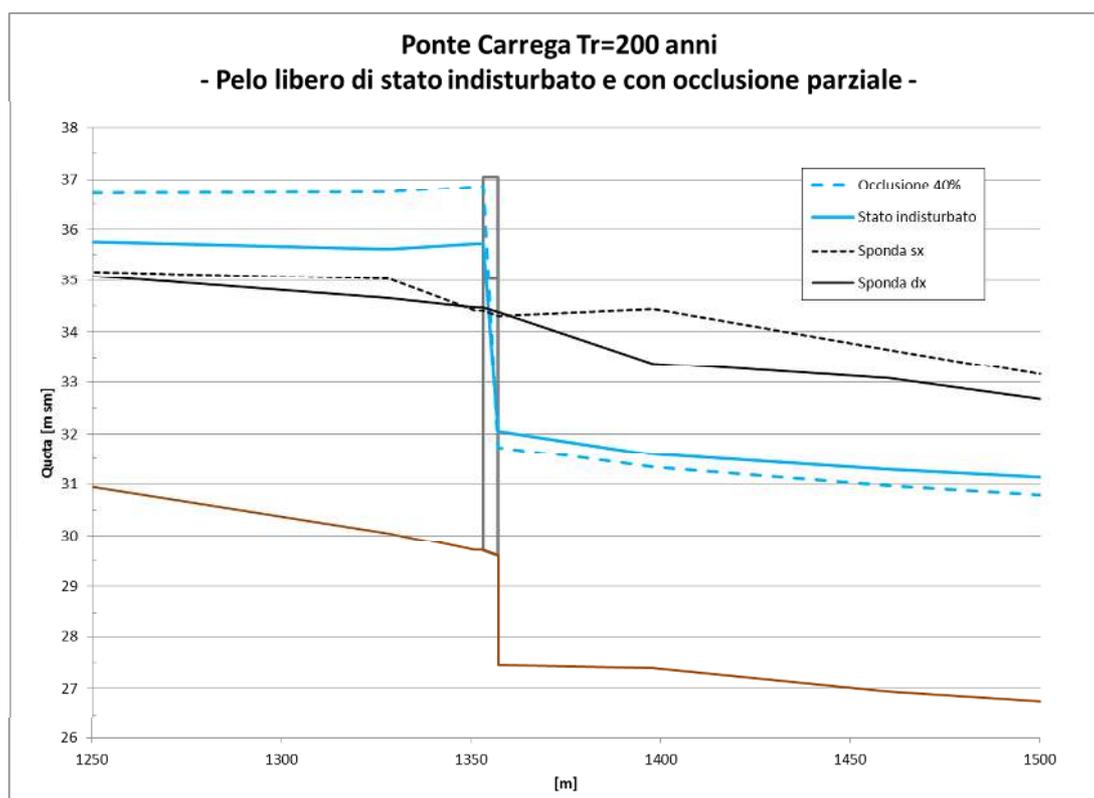


Figura 5.13 Ponte Carrega, TR=200 anni – Profili longitudinali del pelo libero relativi allo stato attuale indisturbato e alla configurazione di occlusione parziale.

La tabella e l'immagine precedenti mostrano come la significativa ostruzione di Ponte Carrega comporti l'ulteriore aggravio di una situazione già fortemente critica. La configurazione in assenza di occlusioni prevede franchi a monte della struttura poco superiori a 1 m, mentre la diminuzione di luce libera determina un incremento di pelo libero circa pari a 1 m, con tiranti sul piano strada intorno a 2 m sia in destra sia in sinistra.

In Figura 5.14 e Figura 5.15 si riportano i valori massimi di tirante idrico per, rispettivamente, lo stato attuale indisturbato e con occlusioni. Si evidenzia come, a parte alcune eccezioni

localizzate, l'estensione delle aree allagate nelle due configurazioni non vari in maniera drastica. Il rigurgito a monte del Ponte Carrega per l'evento duecentennale, sia con ostruzioni sia in loro assenza, comporta l'allagamento in destra di una fascia di estensione trasversale pari a circa 200 m, con sviluppo longitudinale a partire da circa 100 m a monte della struttura sino a circa 300 m a valle, approssimativamente in corrispondenza del viadotto autostradale. A valle del viadotto autostradale, le acque esondate interessano la zona delimitata da via delle Gavette, con estensione longitudinale circa pari a 200 m di e 60-70 m ortogonalmente al corso d'acqua, per poi occupare il solo piano stradale sino a lambire il cimitero monumentale di Staglieno.

Al fine di analizzare con maggior dettaglio le variazioni di estensione e tiranti legate alle due configurazioni, la Figura 5.16 mostra le differenze di battente idrico tra i due scenari, unitamente al contorno dell'area allagata a seguito della diminuzione di luce libera al di sotto di Ponte Carrega. Si nota come, relativamente alla sponda destra, l'allagamento legato all'ostruzione presenti limitati incrementi rispetto alla situazione indisturbata. I tiranti, invece, mostrano significativi accrescimenti soprattutto nella zona di ampia propagazione trasversale compresa tra l'attraversamento e il viadotto autostradale: in tale area il battente idrico a seguito dell'ostruzione risulta mediamente circa 0,6 m superiore rispetto allo scenario indisturbato, per un aumento del tirante medio da 0,20-0,30 m a circa 0,8 m. L'area sottesa a via delle Gavette invece presenta incrementi medi di 0,55 m, per un tirante medio nella configurazione di occlusione pari a 1,3 m.

Relativamente alla sponda sinistra, l'area interessata dalle acque di piena presenta una minore estensione trasversale rispetto alla sponda destra, ma simile propagazione longitudinale. Le sole zone dove si segnala un significativo incremento dell'estensione della superficie esondata sono localizzate in corrispondenza del Ponte Carrega e a monte dello stesso (Figura 5.16): in particolare, risulta interessata dalla configurazione di occlusione la zona commerciale a partire da circa 300 m a monte della struttura, con un tirante medio in quest'area risulta pari a circa 1,3 m, mentre nella situazione indisturbata le acque esondate risalivano per meno di 100 m.

A valle di Ponte Carrega e sino al viadotto autostradale viene allagata una fascia di circa 100 m, senza apprezzabili differenze di estensione tra le due configurazioni. I battenti idrici sono invece caratterizzati da un incremento medio di 0,35-0,40 m, per un tirante nella configurazione di occlusione mediamente pari a 1,50 m e valori localmente superiori a 2 m. A valle del viadotto autostradale, invece, le acque esondate risultano interessare quasi il solo piano stradale, con tiranti generalmente inferiori a 0,3 m.

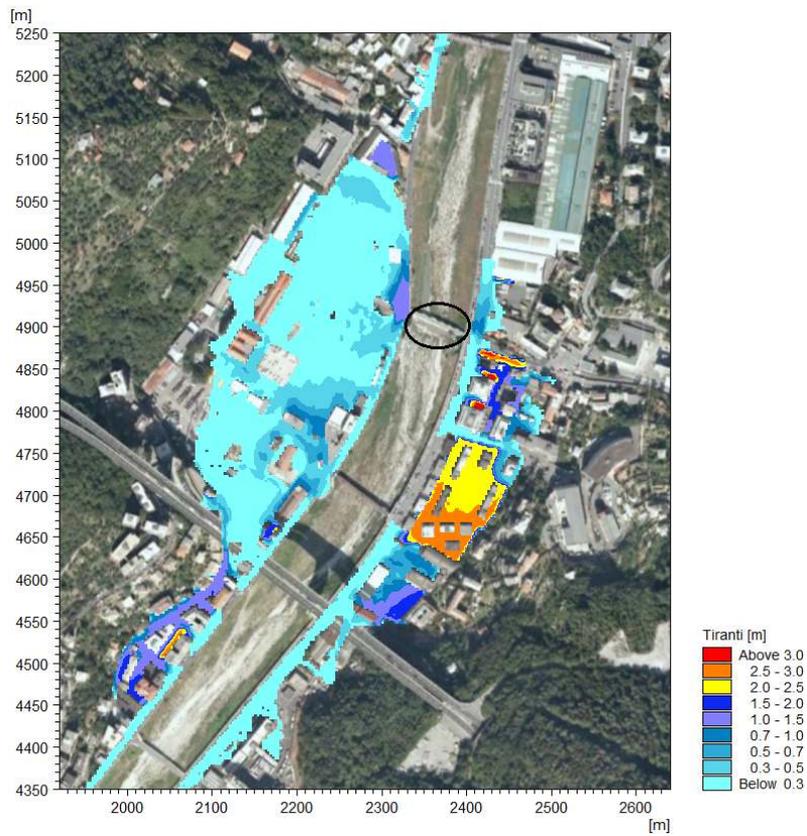


Figura 5.14 Ponte Carrega senza occlusioni, TR=200 anni – Tiranti idrici massimi. In nero è cerchiato Ponte Carrega.

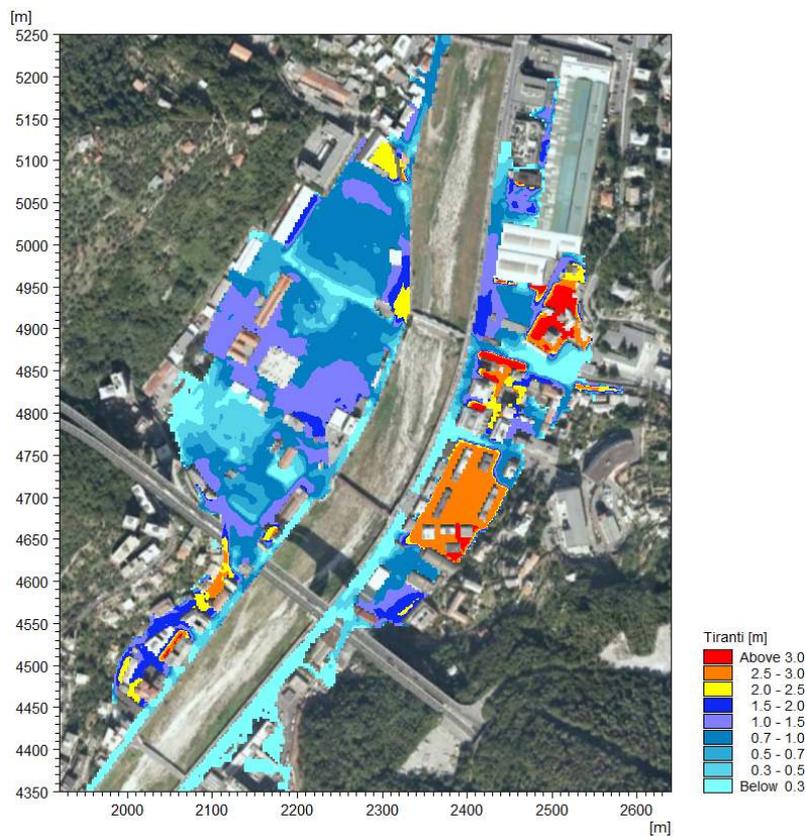


Figura 5.15 Ponte Carrega con occlusioni, TR=200 anni – Tiranti idrici massimi.

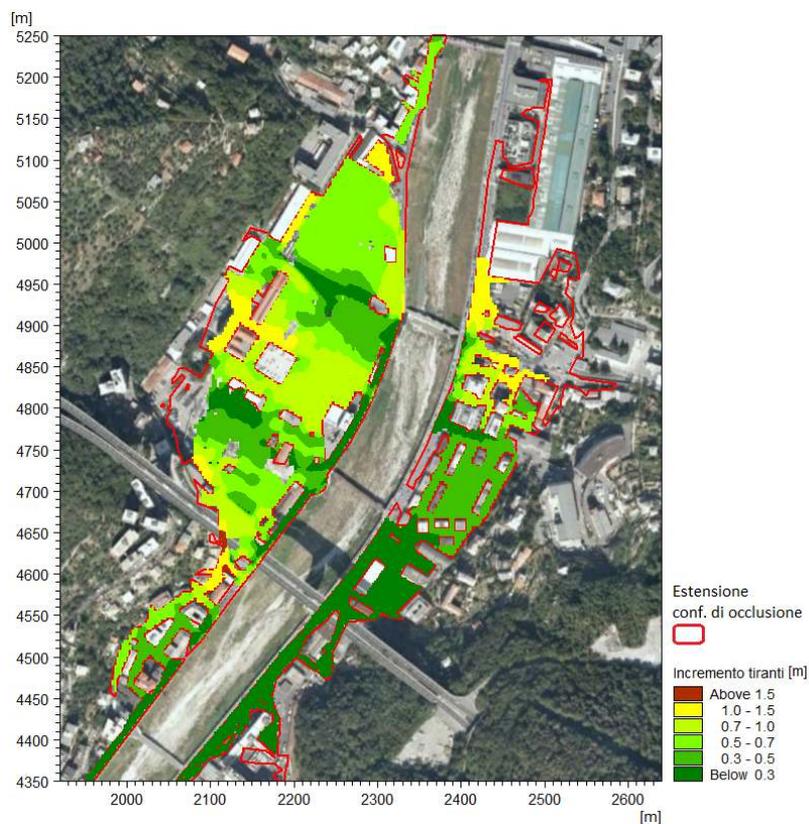


Figura 5.16 Ponte Carrega, TR=200 anni – Incremento di tiranti della configurazione di occlusione rispetto allo stato indisturbato. È riportato (rosso) il contorno dell'area allagata a seguito dell'occlusione.

Come ultima analisi relativa ai tiranti nella configurazione di occlusione, si riporta in Figura 5.17 la differenza tra questi ultimi e la configurazione indisturbata per l'evento cinquecentennale. Si evidenzia come l'estensione delle aree percorse dalle acque di piena risulta pressoché analoga, con un incremento dei tiranti massimi mediamente inferiore a 0,3 m, coerentemente con i profili di pelo libero di Figura 5.13.

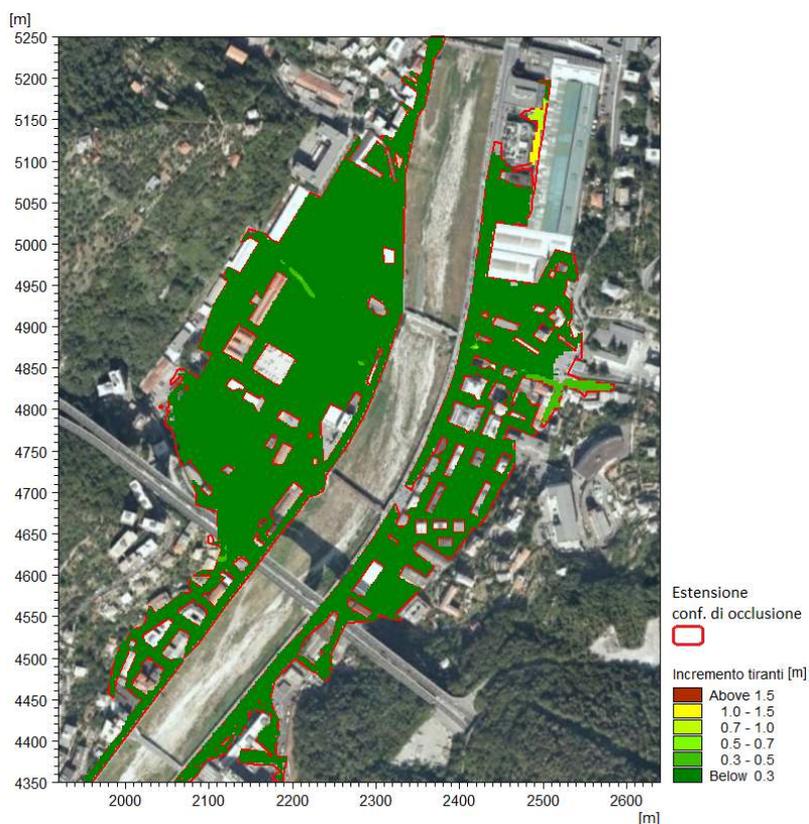


Figura 5.17 Ponte Carrega – Incremento di tiranti della configurazione di occlusione (TR=200 anni) rispetto allo stato indisturbato (Tr=500 anni). È riportato (rosso) il contorno dell'area allagata a seguito dell'occlusione (Tr=200 anni).

I valori massimi di velocità per la configurazione in assenza e presenza di ostruzioni per l'evento duecentennale sono visualizzati in Figura 5.18 e Figura 5.19. Le differenze più rilevanti sono associate all'area vasta di espansione in destra, dove il valore medio risulta all'incirca raddoppiare passando da 0,8 m/s a 1,7 m/s. In particolare l'area compresa tra Ponte Carrega e il viadotto autostradale presenta poco meno della metà della zona allagata caratterizzata da valori superiori a 2 m/s.

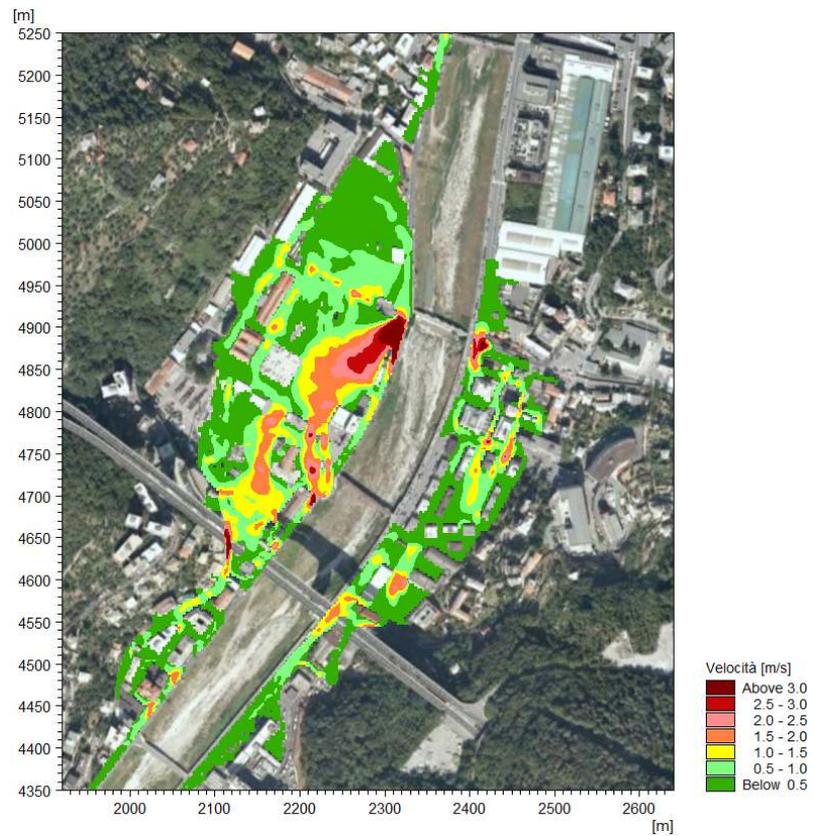


Figura 5.18 Ponte Carrega senza occlusioni, TR=200 anni – Velocità massime.

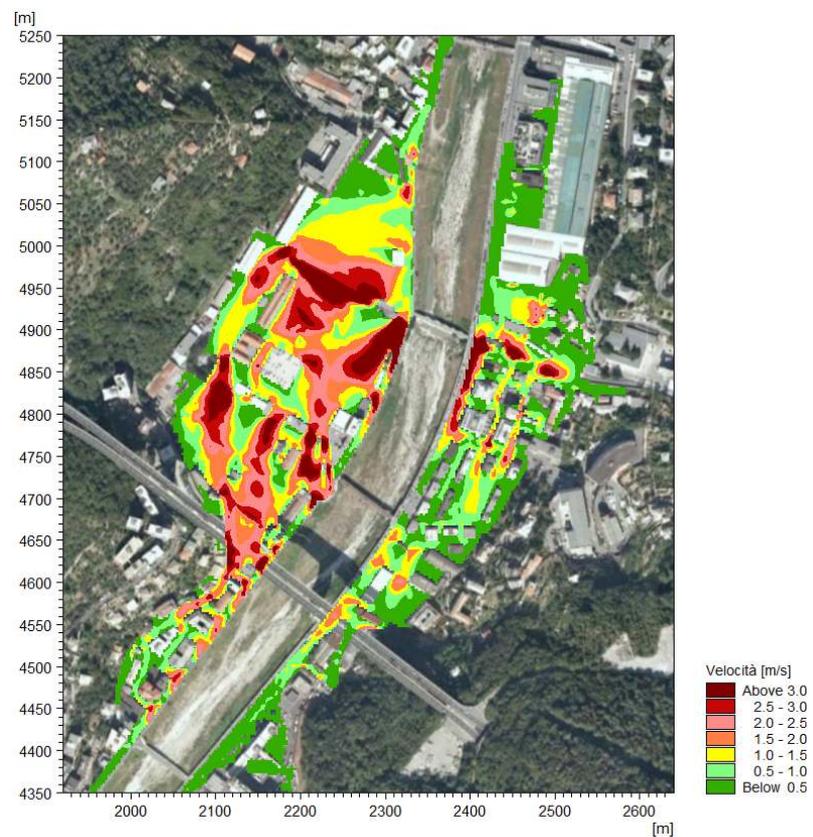


Figura 5.19 Ponte Carrega con occlusioni, TR=200 anni – Velocità massime.

## 5.4 Ponte Bezzecca

Ponte Bezzecca è stato studiato per i tempi di ritorno pari a 50 e 200 anni. La percentuale di occlusione è stata assunta variabile per le due frequenze di evento: per la portata cinquantennale si è considerata un'ostruzione del 20%, corrispondente all'occlusione della prima campata in sinistra, mentre l'evento duecentennale è stato associato all'occlusione delle due campate laterali.

### 5.4.1 TR=50 anni

In Tabella 5.5 e Figura 5.20 si riportano i valori di pelo libero e franco idraulico per la configurazione indisturbata e con occlusioni relativa all'evento cinquantennale. Al fine di consentire il confronto con la situazione associata all'evento a frequenza inferiore, sono riportati anche i valori determinati dall'evento duecentennale senza occlusioni.

Tabella 5.5 Ponte Bezzecca - Livelli del pelo libero e franco idraulico relativi allo stato attuale indisturbato (Tr=50 e 200 anni) e alla configurazione di occlusione parziale (Tr=50 anni).

BISAGNO										
Struttura		TR=50 anni						TR=200 anni		
PROGR.	SEZIONE	Stato indisturbato			Occlusione 20%			Stato indisturbato		
		P.L.	Franco sx	Franco dx	P.L.	Franco sx	Franco dx	P.L.	Franco sx	Franco dx
[m]	ID	[m.s.m.]	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m]
1936	59	27.77	1.96	1.21	28.17	1.56	0.81	29.05	0.68	-0.07
1975	58.4	27.66	1.54	1.36	28.12	1.08	0.90	28.93	0.27	0.09
1976	Ponte Bezzecca - monte (58.3)	27.67	0.69 (intr.) 1.53 (sp.)	0.69 (intr.) 1.35 (sp.)	28.12	0.24 (intr.) 1.08 (sp.)	0.24 (intr.) 0.9 (sp.)	28.94	-0.58 (intr.) 0.26 (sp.)	-0.58 (intr.) 0.08 (sp.)
1983	58.2	27.06	2.14	1.96	27.06	2.14	1.96	28	1.2	1.02
1987	58.1	27.06	2.14	1.96	27.06	2.14	1.96	27.99	1.21	1.03
2025	57	26.94	1.83	1.45	26.94	1.83	1.45	27.86	0.91	0.53

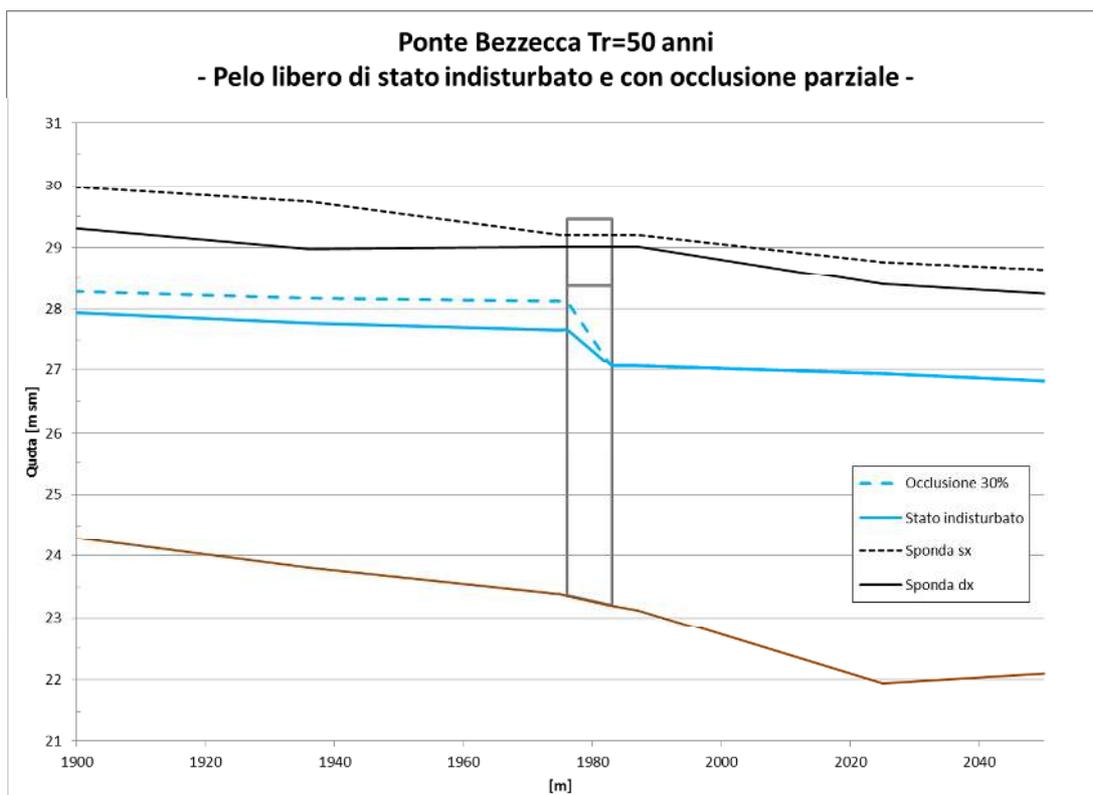


Figura 5.20 Ponte Bezzecca, TR=50 anni – Profili longitudinali del pelo libero relativi allo stato attuale indisturbato e alla configurazione di occlusione parziale.

I valori di pelo libero mostrano come, anche in caso di ostruzione del 20% della luce libera al di sotto dell'impalcato di Ponte Bezzecca, il rigurgito della struttura non determina il sormonto spondale né in destra né in sinistra. Il tirante in alveo aumenta di circa 0,6 m, mantenendo un franco dall'intradosso pari a 0,24 m e circa pari a 1 m rispetto alle quote spondali.

Ponte Bezzecca, dunque, risulta a bassa criticità per l'evento cinquantennale anche in caso di ostruzione di una campata.

#### 5.4.2 TR=200 anni

I valori di pelo libero e franco riportati in Tabella 5.6 e visualizzati in Figura 5.21 mostrano un incremento poco superiore a 1 m dei tiranti in alveo a monte della struttura legato alla presenza di occlusioni: il livello del pelo libero risulta di poco inferiore a quello associato all'evento cinquecentennale.

Tabella 5.6 Ponte Bezzecca - Livelli del pelo libero e franco idraulico relativi allo stato attuale indisturbato (Tr=200 e 500 anni) e alla configurazione di occlusione parziale (Tr=500 anni).

BISAGNO										
Struttura		TR=200 anni						TR=500 anni		
PROGR.	SEZIONE	Stato indisturbato			Occlusione 30%			Stato indisturbato		
		P.L.	Franco sx	Franco dx	P.L.	Franco sx	Franco dx	P.L.	Franco sx	Franco dx
[m]	ID	[m.s.m.]	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m]
1936	59	29.05	0.32	-0.07	30.20	-0.83	-1.22	30.35	-0.98	-1.37
1975	58.4	28.93	0.27	0.09	30.14	-0.94	-1.12	30.22	-1.02	-1.2
1976	Ponte Bezzecca - monte (58.3)	28.94	-0.58 (intr.) 0.26 (sp.)	-0.58 (intr.) 0.08 (sp.)	30.14	-1.78 (intr.) -0.94 (sp.)	-1.78 (intr.) -1.12 (sp.)	30.22	-1.86 (intr.) -1.02 (sp.)	-1.86 (intr.) -1.2 (sp.)
1983	58.2	28	1.2	1.02	28.02	1.19	1.01	28.95	0.25	0.07
1987	58.1	27.99	1.21	1.03	28.01	1.19	1.01	28.94	0.26	0.08
2025	57	27.86	0.91	0.53	27.87	0.91	0.53	28.84	-0.07	-0.45

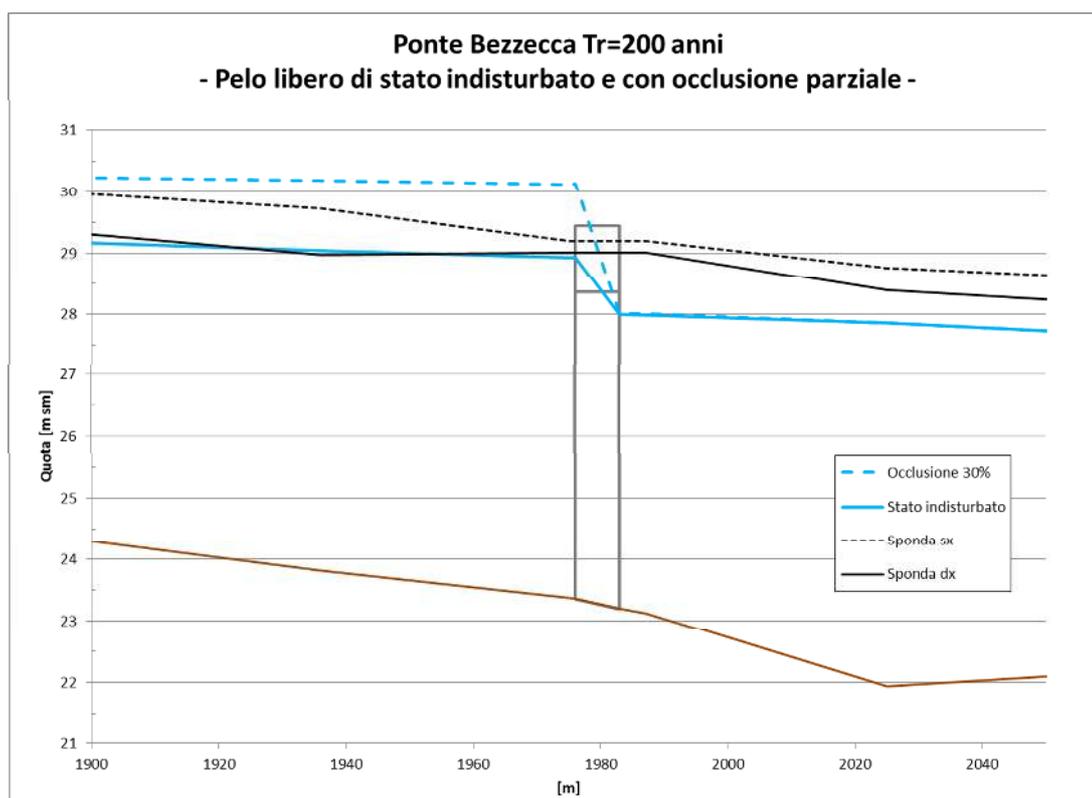


Figura 5.21 Ponte Bezzecca, TR=200 anni – Profili longitudinali del pelo libero relativi allo stato attuale indisturbato e alla configurazione di occlusione parziale.

In Figura 5.22 e Figura 5.23 si riportano rispettivamente i valori massimi di tirante associati all'evento duecentennale nella configurazione indisturbata e con occlusioni. Si può notare come, similmente al caso di Ponte Carrega, l'estensione delle aree allagate risulta molto simile, con le eccezioni più significative rappresentate dal piano stradale del Lungobisagno in destra, interamente interessato dalle acque di piena a valle del viadotto autostradale nella configurazione con occlusioni, e dalla maggiore propagazione in sinistra del volume esondato. Le due arterie contigue al corso d'acqua, infatti, risultano già interessate dalle acque di

sormonto nella configurazione indisturbata, a causa del grande volume liquido esondato in corrispondenza di Ponte Carrega, circa 600 m a monte.

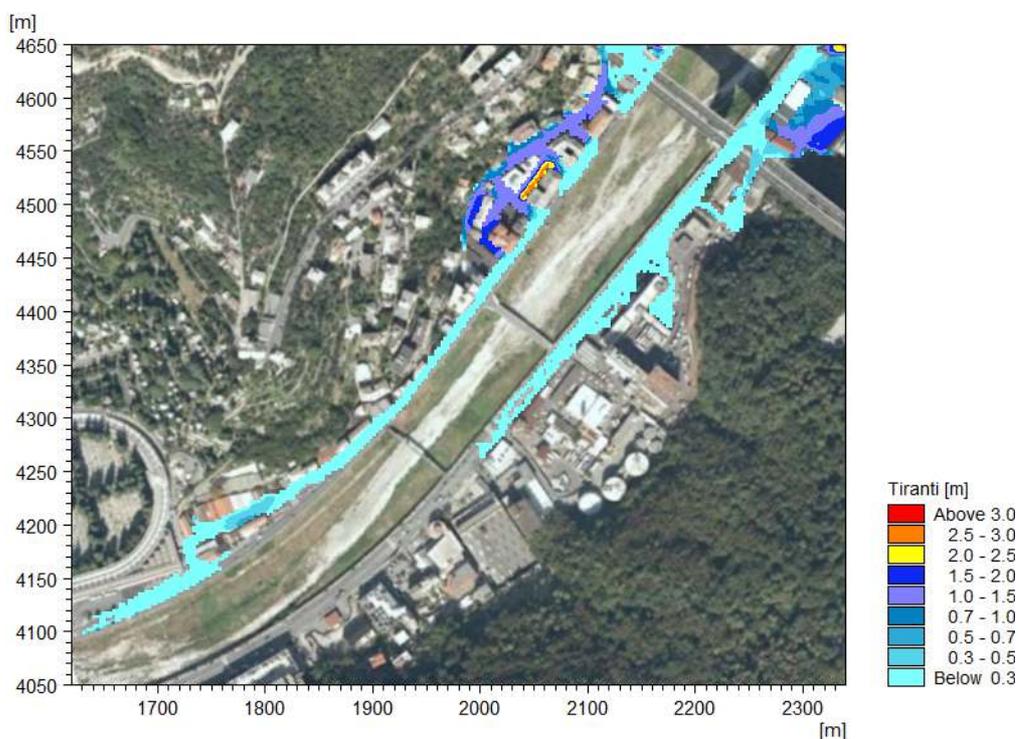


Figura 5.22 Ponte Bezzecca senza occlusioni, TR=200 anni – Tiranti idrici massimi.



Figura 5.23 Ponte Bezzecca con occlusioni, TR=200 anni – Tiranti idrici massimi.

L'esiguità delle differenze di estensione in sponda destra ha indotto ad effettuare un'analisi di maggior dettaglio relativa alla dinamica di esondazione nel tratto. Si è quindi per prima cosa verificata la differenza tra i valori massimi di tiranti nelle due configurazioni (Figura 5.28):

considerando la sola sponda destra, si rileva un netto innalzamento del battente idrico in particolare nella zona delimitata da via delle Gavette, con incrementi generalmente prossimi a 0,5 m con punte superiori a 0,7 m. Tale area, infatti, risulta caratterizzata da una quota inferiore sino a più di 1 m rispetto al piano strada del Lungobisagno (via Piacenza): di conseguenza è disponibile un'ampia zona di potenziale accumulo delle portate esondate a monte di Ponte Bezzecca.

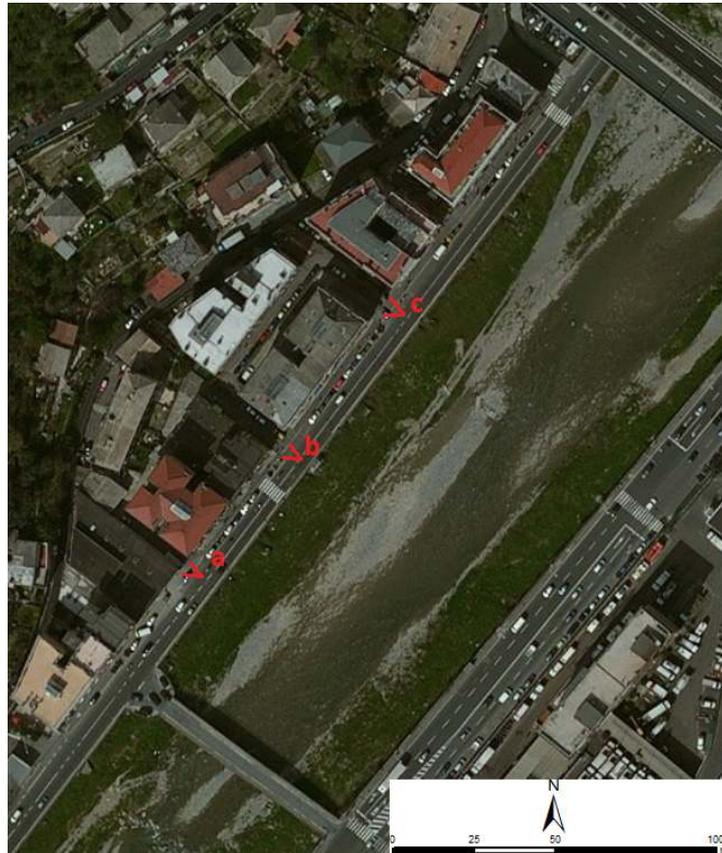


Figura 5.24 Ortofoto della sponda destra a monte di Ponte Bezzecca, con indicazione dei punti di vista delle immagini fotografiche di Figura 5.25.



Figura 5.25 Cortili dell'area circoscritta da via delle Gavette: si nota come le quote siano inferiori al piano strada di via Piacenza.

A valle di Ponte Bezzecca, invece, le differenze sono decisamente inferiori. Si è dunque verificato il flusso sulla sponda destra: in Figura 5.26 si riporta la sezione lungo la quale si è analizzato il flusso, che si estende da circa 200 m a monte sino all'attraversamento, ovvero sino al punto dove le differenze di tiranti scendono quasi ad annullarsi.

Il grafico di Figura 5.27 mostra la differenza di valori di portata netta lungo la sponda destra per le due configurazioni (indisturbata e con occlusioni): per ogni configurazione si è calcolata la portata netta, ovvero la differenza tra quella uscente dall'alveo e quella rientrante, e si è poi calcolata la differenza tra il valore dello scenario occluso e dello stato indisturbato. Si può osservare come, a fronte di una maggiore esondazione all'inizio dell'evento, nel seguito la configurazione con occlusioni presenti rientri in alveo superiori (valori negativi) rispetto allo stato indisturbato.

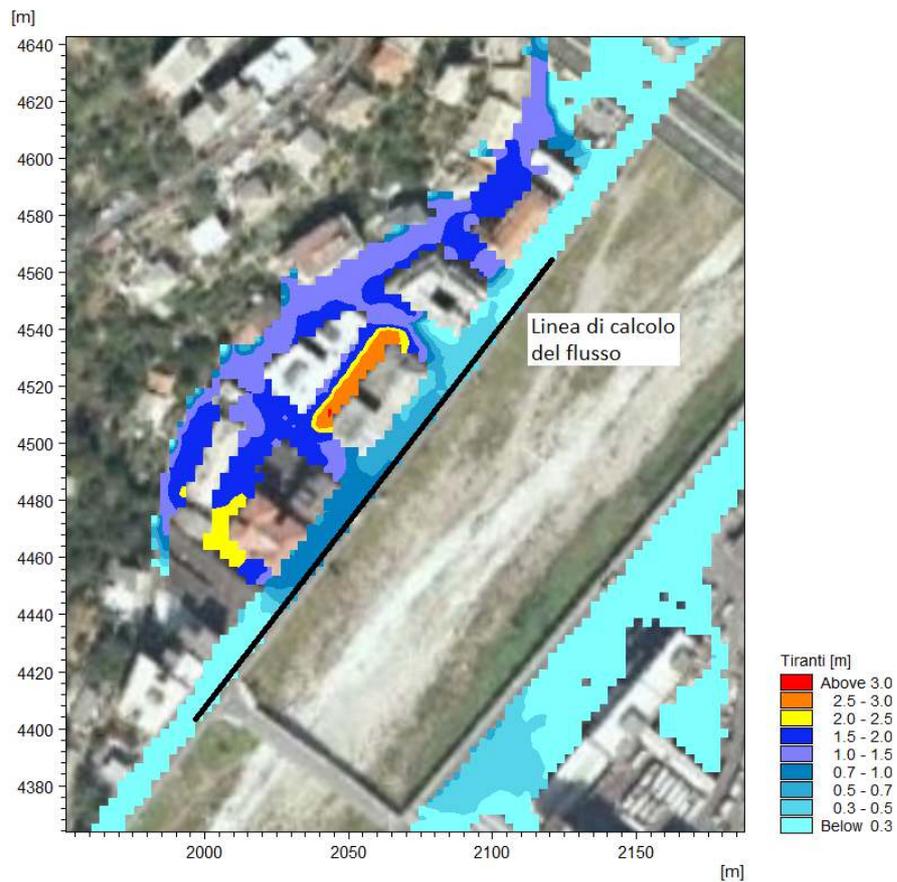


Figura 5.26 Ponte Bezecca con occlusioni, TR=200 anni – Tiranti idrici massimi e indicazione del tratto di sponda destra lungo il quale viene analizzato il flusso liquido.

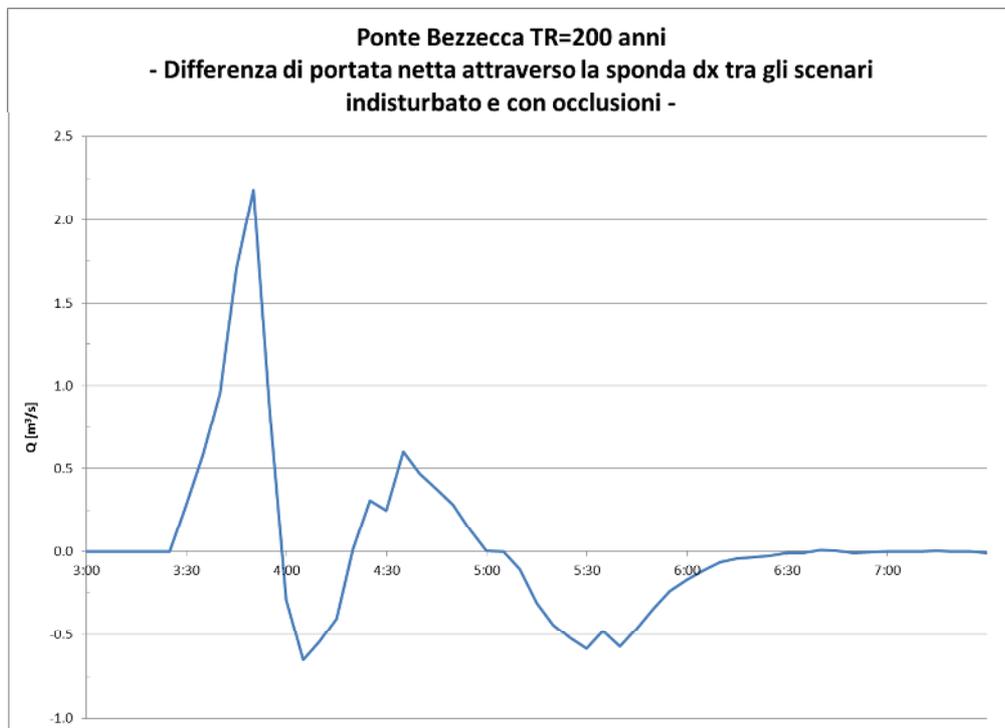


Figura 5.27 Ponte Bezecca, TR=200 anni – Differenza di portata netta sulla sponda destra tra la configurazione indisturbata e con occlusioni.

Si può dunque concludere come l'esiguità dell'effetto dell'occlusione a valle di Ponte Bezzecca sia legato sia all'immagazzinamento della portata esondata a monte della struttura da parte della zona circoscritta da via delle Gavette, che risulta funzionare come una sorta di "cassa di espansione", sia dal rientro in alveo subito a valle dell'attraversamento.



Figura 5.28 Ponte Bezzecca, TR=200 anni – Incremento di tiranti della configurazione di occlusione rispetto allo stato indisturbato.

I valori massimi di velocità per la configurazione indisturbata e con occlusioni sono visualizzati in Figura 5.29 e Figura 5.30. I valori risultano generalmente inferiori a 0,5 m/s per entrambi gli scenari, con le differenze principali associate all'area delimitata da via delle Gavette, in destra, e il tratto di Lungobisagno in corrispondenza e subito a valle del viadotto autostradale in sponda sinistra. Per quanto riguarda la zona di espansione in sponda destra, l'occlusione di Ponte Bezzecca determina, oltre al già analizzato innalzamento dei tiranti idrici, un incremento significativo delle velocità, con punte superiori a 2 m/s e valore medio superiore a 1 m/s.

Relativamente alla sponda sinistra, le velocità nel tratto al di sotto e subito a valle del viadotto autostradale risultano superiori nella configurazione di occlusione, con picchi superiori a 1,5 m/s a fronte di valori non superiori a 0,5 m/s nello scenario indisturbato. Tale decremento è legato principalmente alla presenza di acqua sul piano stradale di Lungobisagno Istria, dovuta ai maggiori tiranti idrici in alveo, che comporta un effetto barriera sulle acque esondate più a monte e il loro conseguente rallentamento.



Figura 5.29 Ponte Bezzecca senza occlusioni, TR=200 anni – Velocità massime.



Figura 5.30 Ponte Bezzecca con occlusioni, TR=200 anni – Velocità massime.

## 5.5 Ponte Campanella

Ponte Campanella è stato studiato per i tempi di ritorno di 50 e 200 anni. Il significativo effetto sul deflusso e la sua geometria hanno portato ad assumere una percentuale di ostruzione pari al 40%, corrispondente all'occlusione delle due campate laterali.

### 5.5.1 TR=50 anni

L'occlusione considerata nel presente studio comporta un innalzamento del pelo libero circa pari a 0,75 m subito a monte dell'attraversamento. Tale livello è leggermente superiore alla quota di sormonto della struttura, per cui una minima parte di volume liquido si trasferisce sul piano stradale contiguo sia in sponda destra sia sinistra.

L'esiguo volume esondato si propaga in destra lungo il margine sinistra di via Bobbio per circa 50 m, con tiranti massimi di pochi centimetri; in sinistra l'estensione è ancora inferiore, interessando solo una ridotta area di Piazzale Parenzo (Figura 5.32).

Come prevedibile, anche i valori di velocità risultano decisamente bassi, sempre inferiori a 0,5 m/s (Figura 5.33).

Tabella 5.7 Ponte Campanella - Livelli del pelo libero e franco idraulico relativi allo stato attuale indisturbato (Tr=50 e 200 anni) e alla configurazione di occlusione parziale (Tr=50 anni).

BISAGNO										
Struttura		TR=50 anni						TR=200 anni		
PROGR.	SEZIONE	Stato indisturbato			Occlusione 40%			Stato indisturbato		
		P.L.	Franco sx	Franco dx	P.L.	Franco sx	Franco dx	P.L.	Franco sx	Franco dx
[m]	ID	[m.s.m.]	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m]
3320	35.35	20.34	1.16	1.01	21.09	0.41	0.26	21.78	-0.28	-0.43
3366	RiiARPAL_86	20.34	0.68	0.68	21.09	-0.07	-0.07	21.81	-0.79	-0.79
3373	35.3	20.3	0.70	0.70	21.06	-0.06	-0.06	21.77	-0.77	-0.77
3374	Ponte Campanella - monte (35.2)	20.3	-0.3 (intr.) 0.70 (sp.)	-0.3 (intr.) 0.70 (sp.)	21.06	-1.06 (intr.) -0.06 (sp.)	-1.06 (intr.) -0.06 (sp.)	21.77	-1.77 (intr.) -0.77 (sp.)	-1.77 (intr.) -0.77 (sp.)
3390	35.1	18.43	2.52	2.52	18.43	2.52	2.52	19.48	1.47	1.47
3394	35	18.4	2.60	2.60	18.40	2.60	2.60	18.4	2.6	2.6
3415	RiiARPAL_88	18.4	2.62	2.62	18.39	2.63	2.63	18.4	2.62	2.619

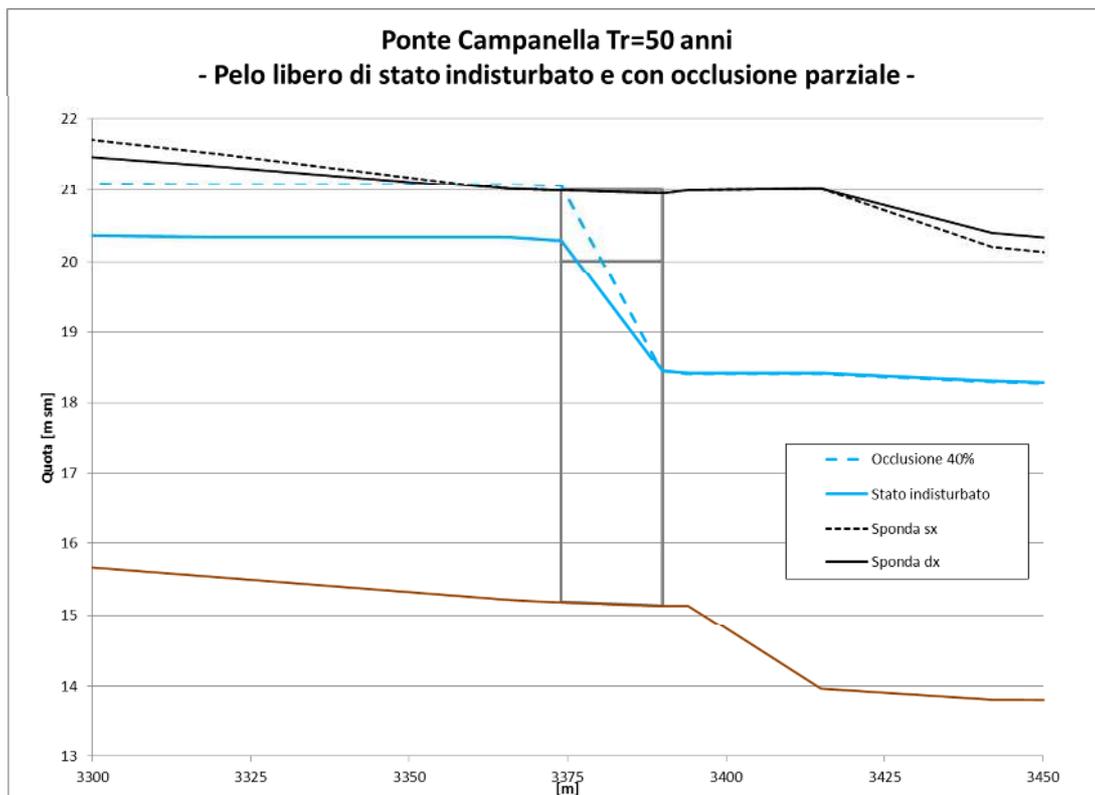


Figura 5.31 Ponte Campanella, TR=50 anni – Profili longitudinali del pelo libero relativi allo stato attuale indisturbato e alla configurazione di occlusione parziale.

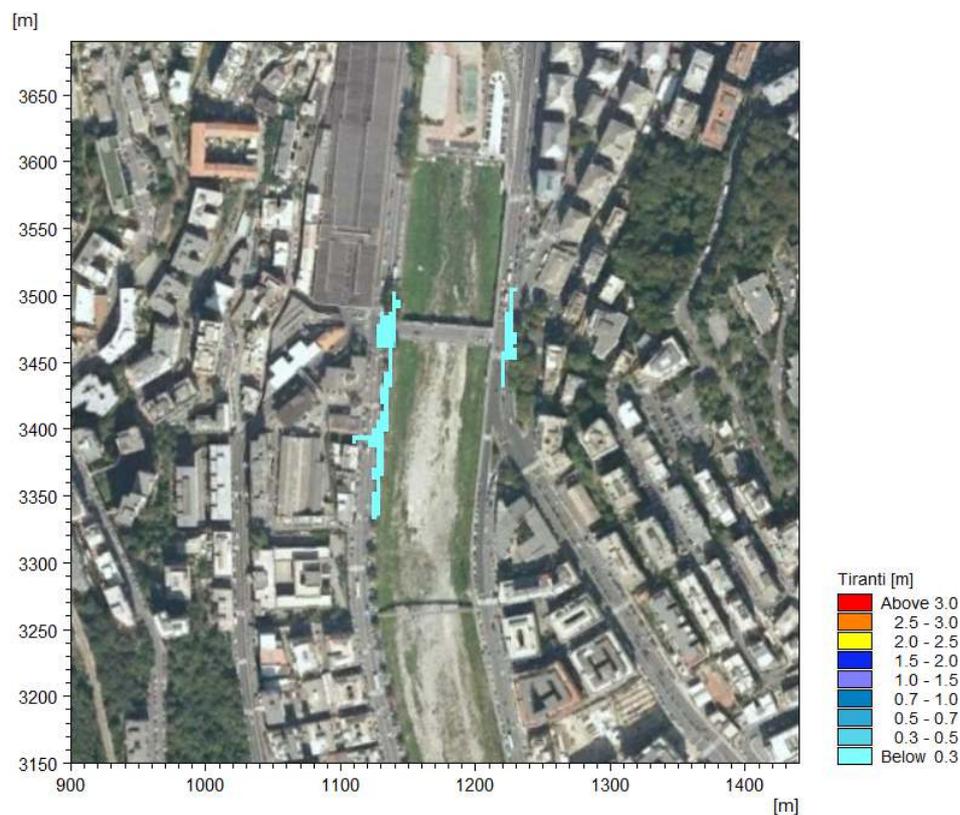


Figura 5.32 Ponte Campanella con occlusioni, TR=50 anni – Tiranti massimi.



Figura 5.33 Ponte Campanella con occlusioni, TR=50 anni – Velocità massime.

### 5.5.2 TR=200 anni

Per l'evento duecentennale, l'occlusione ipotizzata comporta un incremento dei tiranti in alveo a monte di Ponte Campanella circa pari a 0,5 m, come riportato in Tabella 5.8 e Figura 5.34. L'innalzamento comporta sormonti arginali superiori a 1 m, senza però raggiungere i livelli associati a TR=500 anni.

Tabella 5.8 Ponte Campanella - Livelli del pelo libero e franco idraulico relativi allo stato attuale indisturbato (Tr=200 e 500 anni) e alla configurazione di occlusione parziale (Tr=200 anni).

BISAGNO										
Struttura		TR=200 anni						TR=500 anni		
PROGR.	SEZIONE	Stato indisturbato			Occlusione 40%			Stato indisturbato		
		P.L.	Franco sx	Franco dx	P.L.	Franco sx	Franco dx	P.L.	Franco sx	Franco dx
[m]	ID	[m.s.m.]	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m]
3320	35.35	21.78	-0.26	-0.44	22.29	-0.79	-0.94	22.64	-1.14	-1.29
3366	RilARPAL_86	21.81	-0.79	-0.79	22.35	-1.33	-1.33	22.75	-1.73	-1.73
3373	35.3	21.77	-0.77	-0.77	22.33	-1.33	-1.33	22.71	-1.71	-1.71
3374	Ponte Campanella - monte (35.2)	21.77	-1.77 (intr.) -0.77 (sp.)	-1.77 (intr.) -0.77 (sp.)	22.34	-2.34 (intr.) -1.34 (sp.)	-2.34 (intr.) -1.34 (sp.)	22.7	-2.7 (intr.) -1.7 (sp.)	-2.7 (intr.) -1.7 (sp.)
3390	35.1	19.48	1.47	1.47	19.47	1.48	1.48	20.4	0.55	0.55
3394	35	19.44	1.56	1.56	19.43	1.57	1.57	20.36	0.64	0.64
3415	RilARPAL_88	19.52	1.5	1.50	19.53	1.50	1.49	20.47	0.55	0.55

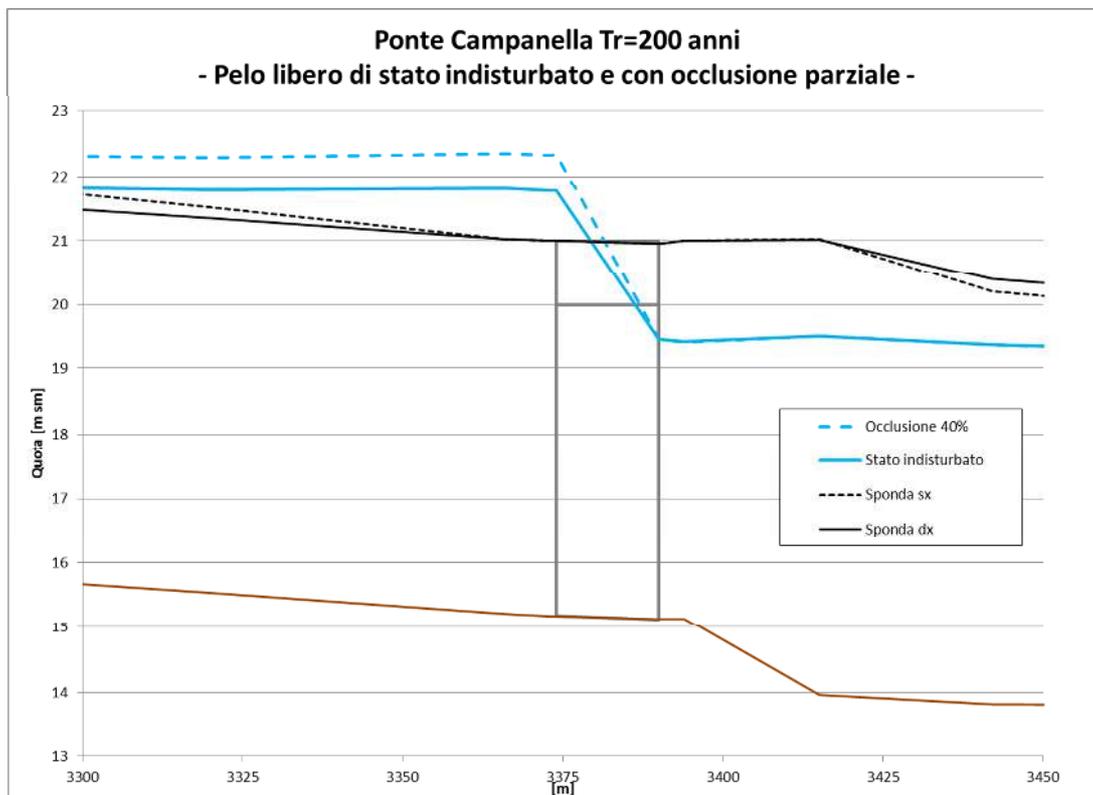


Figura 5.34 Ponte Campanella, TR=200 anni – Profili longitudinali del pelo libero relativi allo stato attuale indisturbato e alla configurazione di occlusione parziale.

Le mappe di tiranti idrici massimi nella configurazione indisturbata (Figura 5.35) e con occlusioni (Figura 5.36) mostrano in maniera evidente i differenti effetti associati ai due scenari. L'aspetto più visibile è rappresentato dal notevole incremento di area interessata dalle acque di esondazione in sponda sinistra.

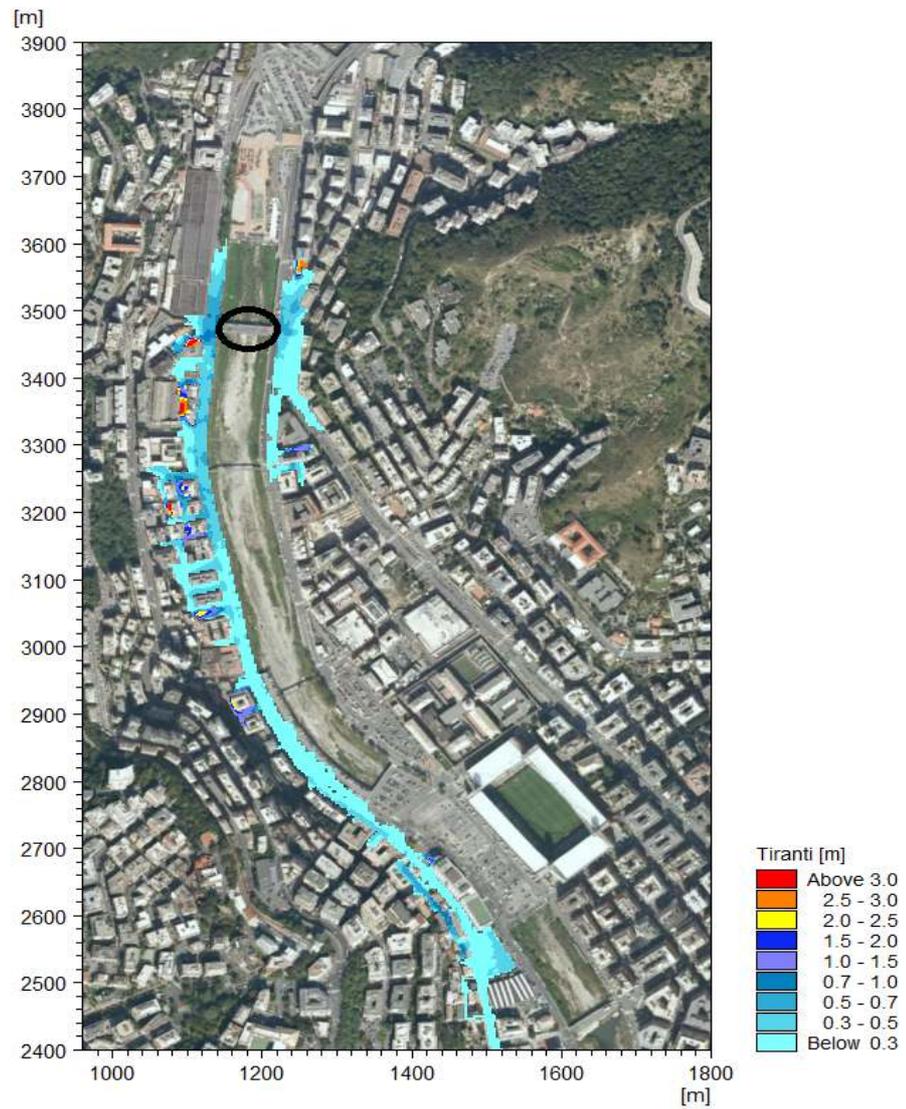


Figura 5.35 Ponte Campanella senza occlusioni, TR=200 anni – Tiranti idrici massimi.

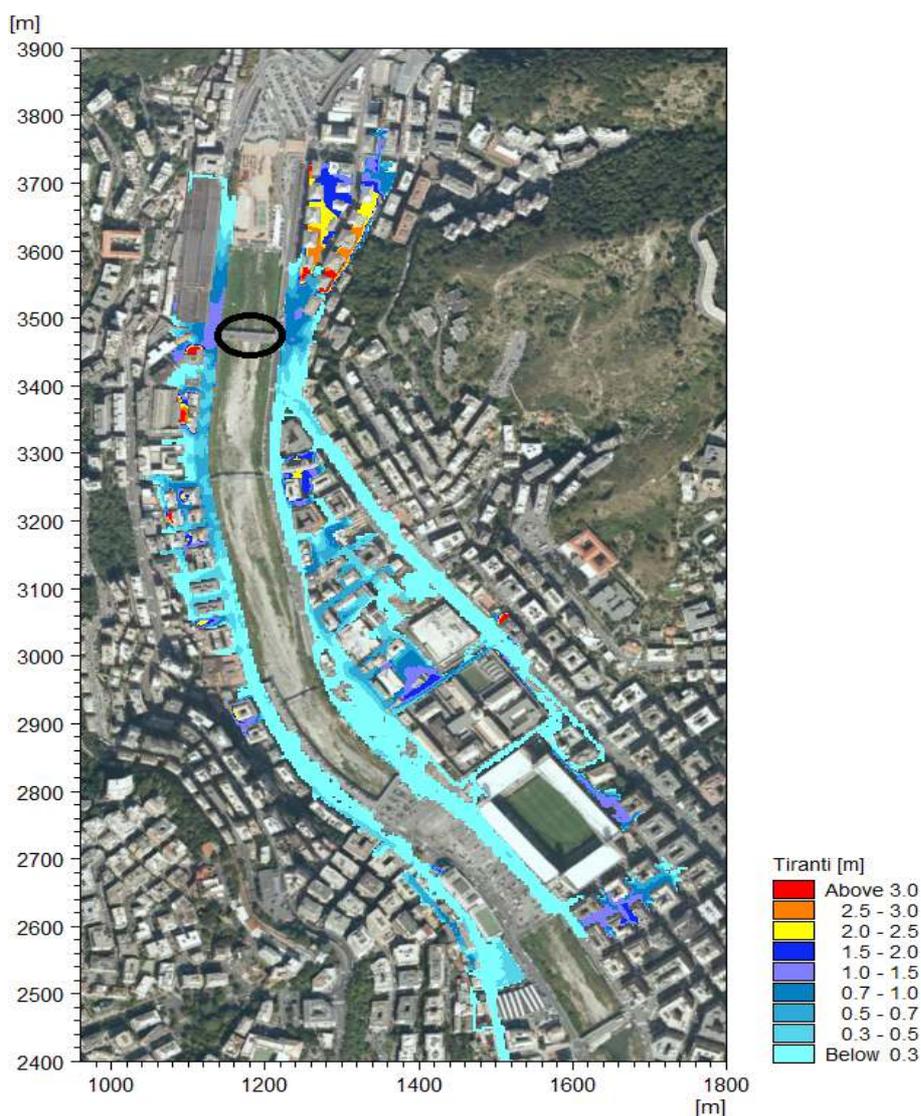


Figura 5.36 Ponte Campanella con occlusioni, TR=200 anni – Tiranti idrici massimi.

Lo scenario senza occlusioni determina, infatti, una propagazione del volume di sormonto principalmente lungo l'asse stradale del Lungobisagno sino alla passerella pedonale circa 200 m a valle, mentre le acque di piena associate all'occlusione interessano l'intera zona sottesa a Corso de Stefanis sino a raggiungere e superare l'impianto sportivo di Marassi. I tiranti risultano generalmente bassi, con valore medio inferiore a 0,5 m.

Sempre in sponda sinistra, si osserva una maggiore propagazione anche verso monte: le acque esondate raggiungono infatti l'area a quota ribassata localizzata in corrispondenza del termine della copertura di Staglieno, al centro della quale passa via Toti. In tale zona, a causa dell'effetto "vasca" il tirante medio è decisamente più alto rispetto alle zone a livello strada e risulta superiore a 1,5 m.

Si osserva, a latere, come le aree allagate in sponda sinistra presentino un certo grado di somiglianza con l'estensione prevista nella Carta delle Aree Inondabili e Inondate del Piano di Bacino vigente (Figura 5.37): come indicato dalle frecce nere, il Ponte Campanella viene indicato come punto di sormonto arginale.

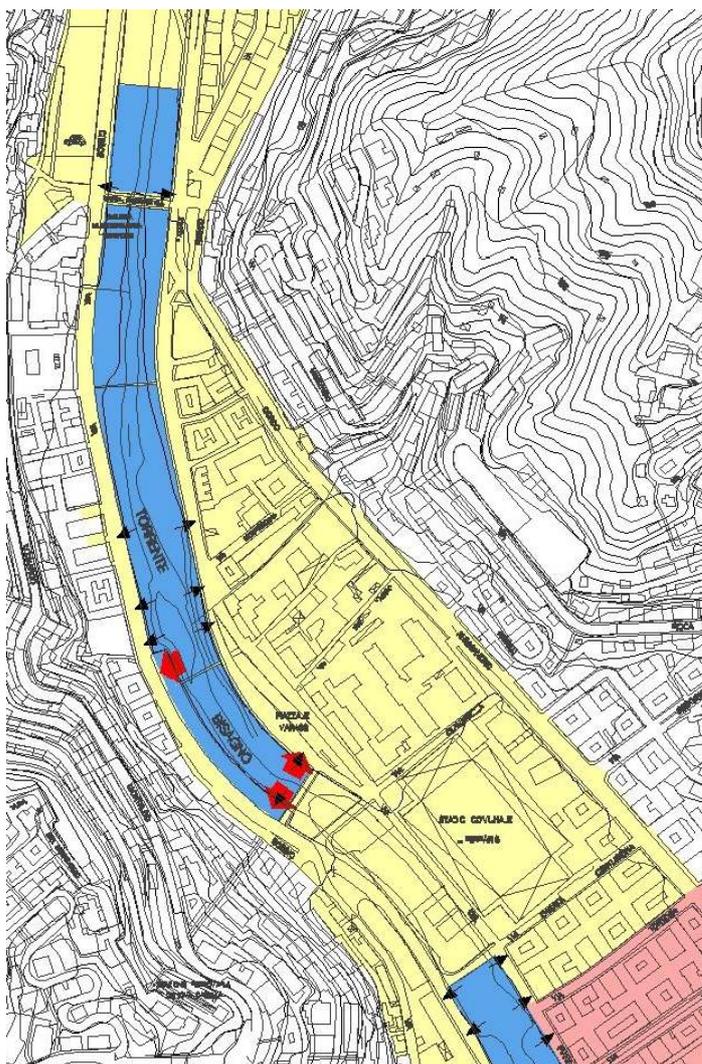


Figura 5.37 Carta delle Aree Inondabili e Inondate, Piano di Bacino vigente – Tratto tra Ponte Campanella e copertura di Marassi. In rosa le aree allagabili per TR=50 anni e in giallo per TR=200 anni. Le frecce nere/rosse indicano i punti di sormonto per TR=200 anni/TR=500 anni.

La sponda destra presenta una differenza tra le due configurazioni molto meno accentuata rispetto alla situazione in sinistra, sia in relazione all'estensione delle aree allagate sia ai tiranti massimi. Per quanto riguarda l'estensione degli allagamenti, la differenza più significativa è la maggiore propagazione verso monte delle acque esondate, che nello scenario di occlusione coprono l'intero tratto del Lungobisagno davanti al deposito AMT mentre nella configurazione indisturbata si fermano circa 100 m più a valle. In tale tratto la differenza tra i battenti massimi dei due scenari è circa pari a 0,5 m, mentre i valore massimi di tirante si realizzano in corrispondenza del Ponte Campanella, ovvero all'inizio del deposito AMT, e risultano superiori a 1 m.

A valle dell'attraversamento, le acque si propagano principalmente lungo via Bobbio, con ridotte propagazioni trasversali (legate prioritariamente alle forti pendenze che caratterizzano l'orografia in sponda destra), sino a raggiungere e superare la copertura di Marassi: le aree interessate dalle acque di piena risultano quasi analoghe nelle due configurazioni di studio. L'analogia tra i due scenari si estende anche ai valori massimi di tirante, la cui differenza è inferiore a 10 cm.

Al fine di comprendere le cause di tale risultato, si è effettuata un'analisi approfondita delle portate in gioco nel tratto di sponda destra interessato dalle acque esondate a monte di Ponte

Campanella. Si sono dunque estratti, per entrambe le configurazioni, i valori di portata ad ogni timestep (frequenza pari a cinque minuti) lungo alcune direzioni di particolare interesse, illustrate in Figura 5.38, in modo da esaminare il bilancio idrico nel tratto a monte della copertura di Marassi.

Si è scelto di analizzare sia la portata netta sulla sponda a monte (“Sponda monte”) e a valle (“Sponda valle”) dell’attraversamento, ovvero il bilancio tra uscente e rientrante in alveo, sia i valori di portata in tre sezioni successive localizzate poco a valle del Ponte Campanella (“Bobbio 1”), subito a monte della prima passerella pedonale (“Bobbio 2”) e subito a monte del parcheggio pensile (“Bobbio 3”).

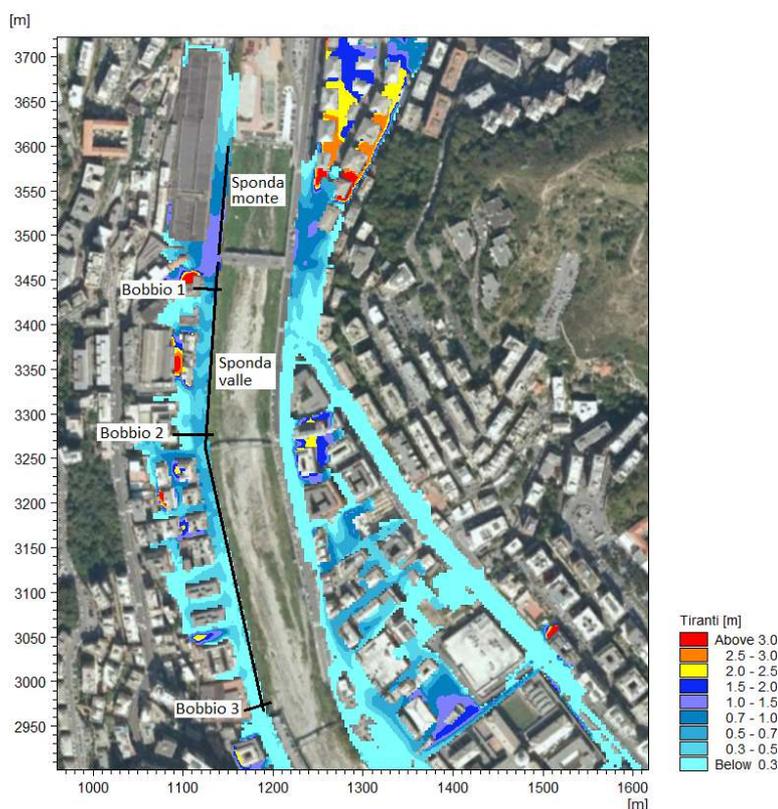


Figura 5.38 Ponte Campanella con occlusioni, TR=200 anni – Tiranti idrici massimi e posizionamento delle sezioni lungo le quali viene analizzato il flusso.

In Figura 5.39 si riporta il grafico relativo al flusso sulla sponda destra a monte di Ponte Campanella e valle dello stesso, sino al parcheggio pensile a monte della copertura di Marassi. In particolare, per i due tratti si grafica la differenza tra la portata netta (uscente-rientrate in alveo) della configurazione con occlusione e indisturbata.

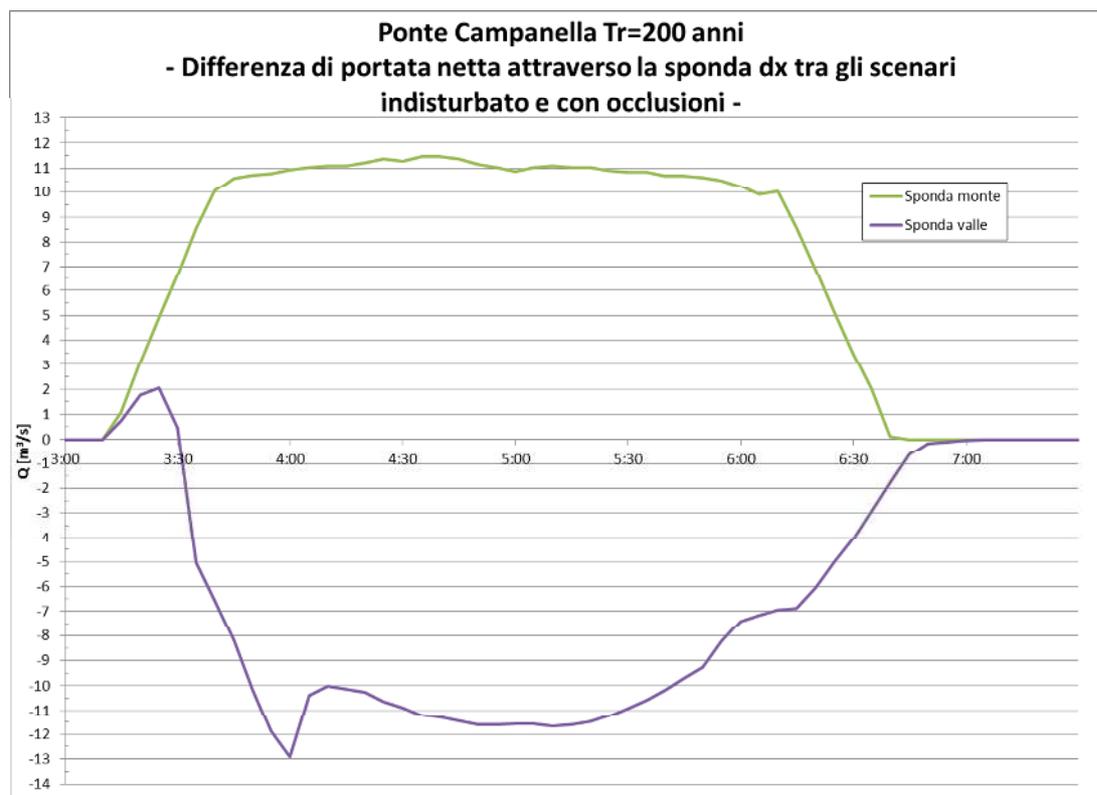


Figura 5.39 Ponte Campanella, TR=200 anni – Differenza di portata netta sulla sponda destra tra la configurazione indisturbata e con occlusioni. Le due curve si riferiscono al tratto tra il termine della copertura di Staglieno e Ponte Campanella (verde) e il tratto tra Ponte Campanella e l’inizio del parcheggio pensile a monte della copertura di Marassi (viola).

Si osserva, come prevedibile, una chiara distinzione tra le due curve. A monte dell’attraversamento lo scenario con occlusioni determina un’esondazione decisamente più significativa rispetto allo stato indisturbato, con differenze relativamente costanti e intorno a 11 m<sup>3</sup>/s. Il tratto di valle, invece, è caratterizzato da un rientro in alveo molto più rilevante associato allo scenario di occlusione, con valori di portata rientrante in alveo che tendono a bilanciare il maggior volume esondato a monte.

La Figura 5.40 mostra, per le due configurazioni di studio, i valori di portata transitanti per le 3 sezioni di via Bobbio la cui localizzazione è riportata in Figura 5.38. Si osserva agevolmente come la differenza tra le portate associate ai due scenari diminuisca velocemente mentre le acque si propagano verso valle: pochi metri a valle di Ponte Campanella la differenza tra i valori di picco è notevole, intorno a 15 m<sup>3</sup>/s, mentre già in corrispondenza della passerella pedonale tale differenza si è circa dimezzata, per poi quasi annullarsi all’inizio del parcheggio pensile. Come si è visto, tale avvicinamento delle due portate è legato principalmente al rientro in alveo a valle di Ponte Campanella.

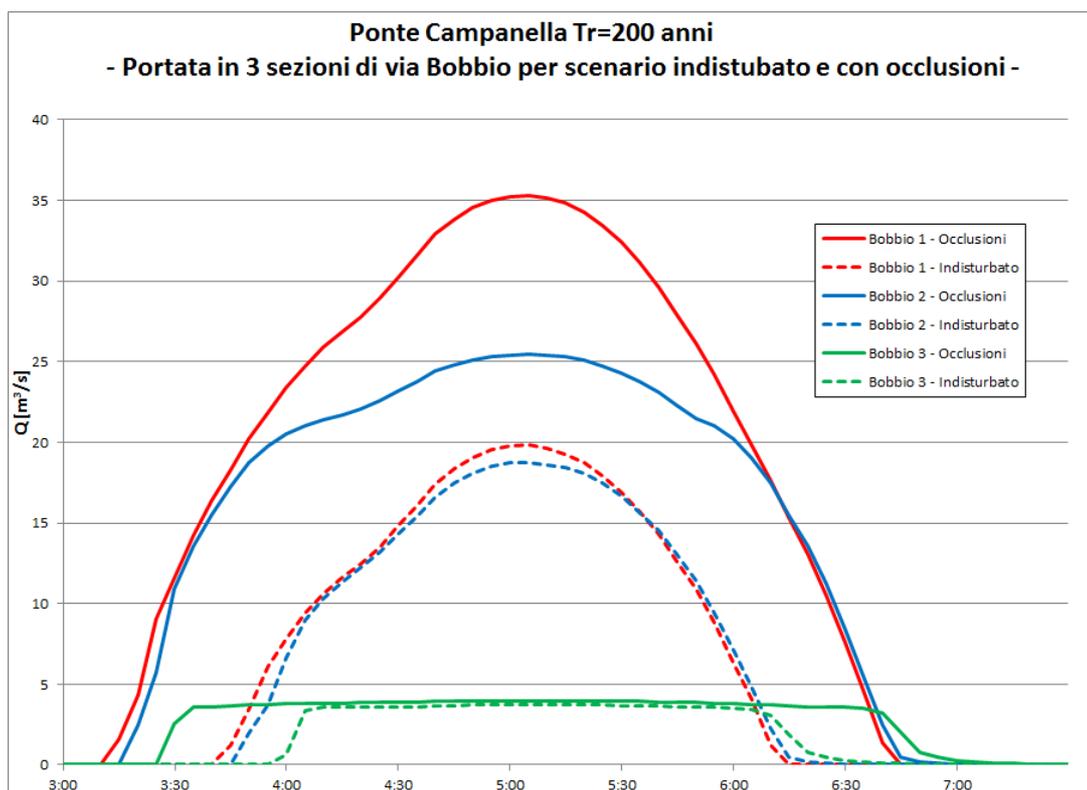


Figura 5.40 Ponte Campanella, TR=200 anni – Portate associate allo scenario indisturbato (linee tratteggiate) e con occlusioni (linee continue) per 3 sezioni lungo via Bobbio a valle di Ponte Campanella.

Le velocità delle acque esondate risulta significativa, sia in sponda destra sia in sinistra, nel tratto subito a valle dell'attraversamento, con valori massimi lungo via Bobbio superiori a 3 m/s per la configurazione con occlusioni (Figura 5.42). Per quanto riguarda la sponda destra, valori elevati di velocità caratterizzano il deflusso extra-alveo sino al parcheggio pensile a monte della copertura di Marassi, in corrispondenza del quale le velocità massime scendono generalmente sotto 1 m/s. Le differenze rispetto ai valori associati allo scenario indisturbato risultano simili a quelle relative ai battenti idrici: subito a valle di Ponte Campanella il divario è massimo, con differenze di picco poco inferiori a 1 m/s, per poi diminuire gradualmente spostandosi verso valle.

In sponda sinistra i valori, con l'eccezione del tratto subito a valle dell'attraversamento, risultano pressoché sempre inferiori a 1 m/s, con un'ampia porzione di area allagata caratterizzata da valori non superiori a 0,5 m.

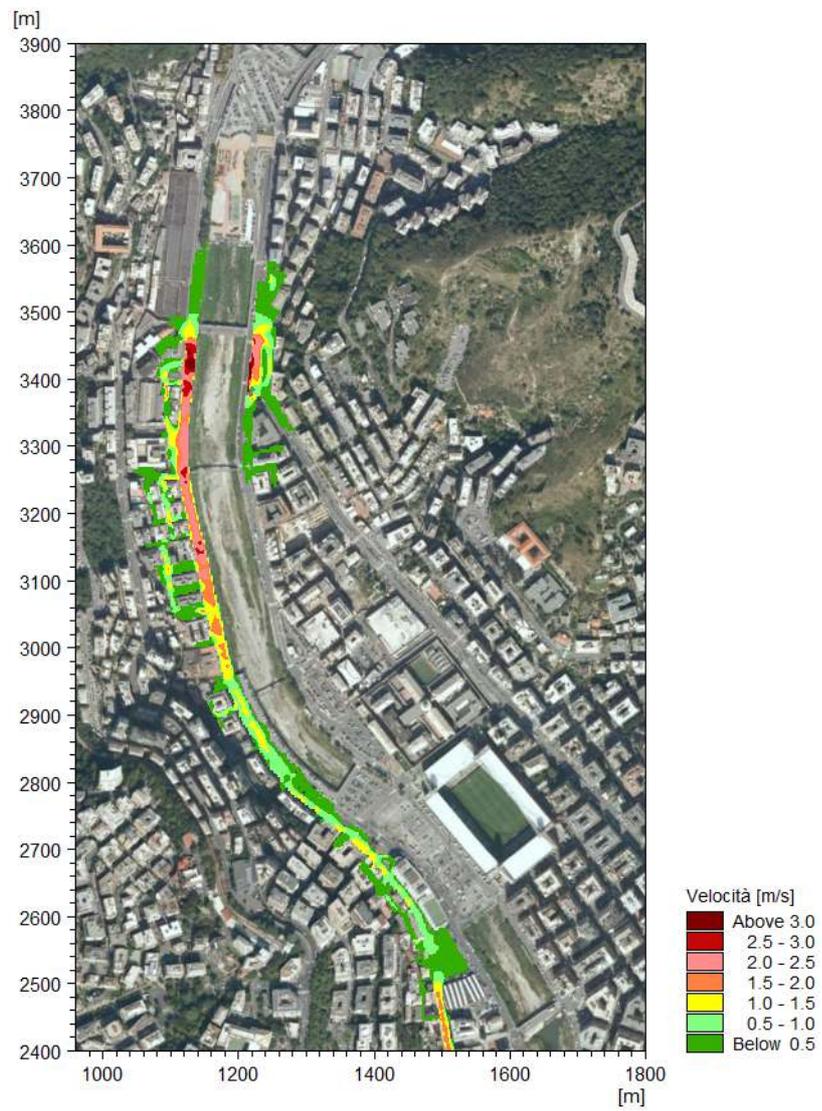


Figura 5.41 Ponte Campanella senza occlusioni, TR=200 anni – Velocità massime.

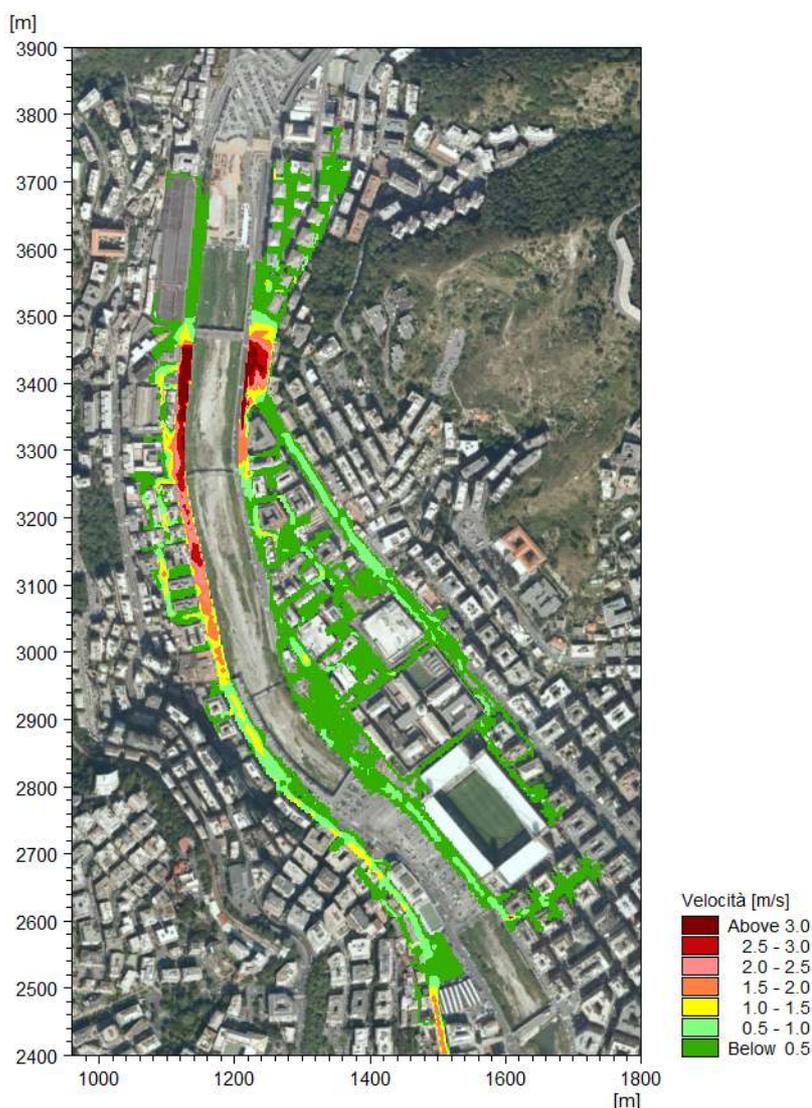


Figura 5.42 Ponte Campanella con occlusioni, TR=200 anni – Velocità massime.

## 5.6 Copertura di Marassi

### 5.6.1 TR=200 anni

La copertura di Marassi è stata studiata per l'evento duecentennale, considerando l'occlusione di metà della campata in sinistra, corrispondente a una percentuale di ostruzione di circa il 15%.

I valori di pelo libero e franco idraulico di Tabella 5.9 e Figura 5.43 mostrano come l'occlusione analizzata comporti un innalzamento del pelo libero all'imbocco della struttura ai livelli di quelli associati all'evento cinquecentennale. Tali valori determinano il funzionamento in pressione della struttura e annullano in pratica il franco idraulico rispetto alla sponda sinistra, ma non comportano un'effettiva esondazione. In sponda destra, invece, il franco è ridotto ma comunque non inferiore a 0,3 m.

Tabella 5.9 Copertura di Marassi - Livelli del pelo libero e franco idraulico relativi allo stato attuale indisturbato ( $Tr=200$  e  $500$  anni) e alla configurazione di occlusione parziale ( $Tr=200$  anni).

BISAGNO										
Struttura		TR=200 anni						TR=500 anni		
PROGR.	SEZIONE	Stato indisturbato			Occlusione 15%			Stato indisturbato		
		P.L.	Franco sx	Franco dx	P.L.	Franco sx	Franco dx	P.L.	Franco sx	Franco dx
[m]	ID	[m.s.m.]	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m]
3932	26.3	15.8	1.5	0.9	16.32	0.98	0.38	16.76	0.54	-0.06
4113	Copertura Marassi - monte (25)	14.89	0.53 (intr.) 1.08 (sp.)	0.53 (intr.) 1.43 (sp.)	15.98	-0.56 (intr.) -0.01 (sp.)	-0.56 (intr.) 0.34 (sp.)	15.95	-0.53 (intr.) 0.02 (sp.)	-0.53 (intr.) 0.37 (sp.)
4384	23	14.44	1.16	0.66	14.36	1.24	0.74	15.36	0.24	-0.26
4438	22	14.21	1.36	0.99	14.21	1.36	0.99	15.2	0.37	0

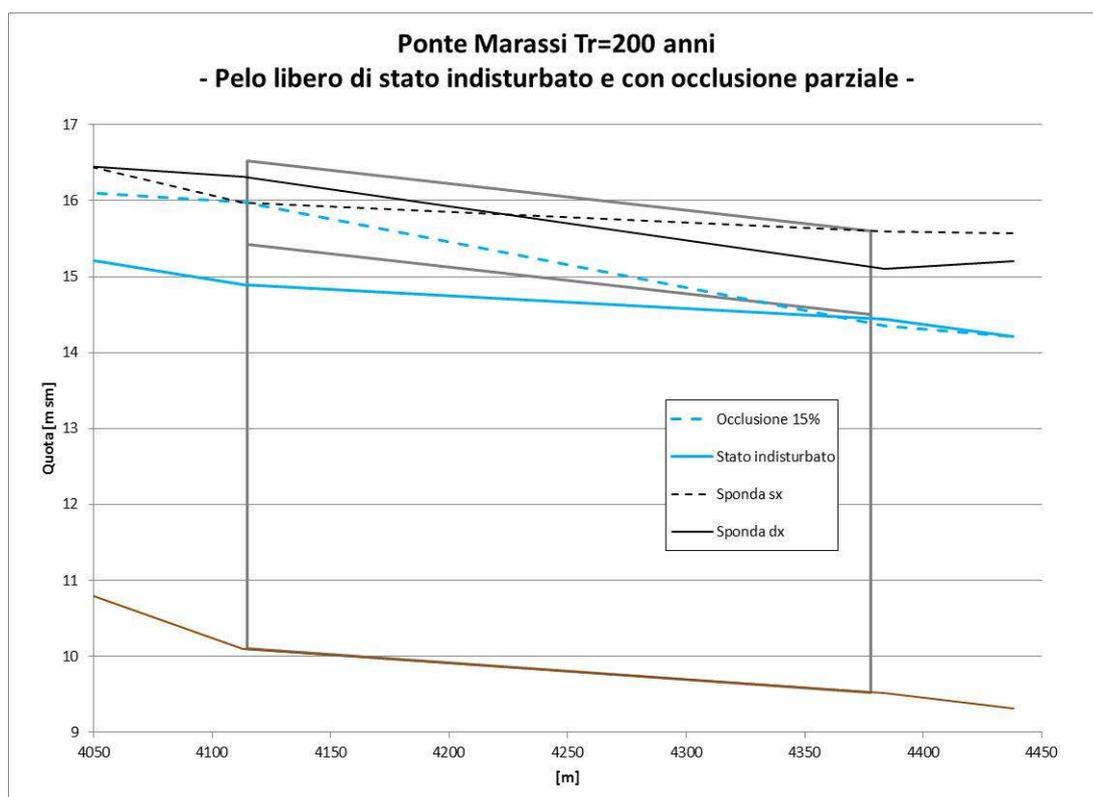


Figura 5.43 Copertura di Marassi,  $TR=200$  anni – Profili longitudinali del pelo libero relativi allo stato attuale indisturbato e alla configurazione di occlusione parziale.

## 5.7 Ponte Castelfidardo

### 5.7.1 TR=50 anni

L'attraversamento di Castelfidardo è stato analizzato in relazione a una potenziale ostruzione per l'evento con tempo di ritorno cinquantennale. L'occlusione ha riguardato la prima campata in sinistra, per una percentuale di ostruzione circa pari a 20%.

L'occlusione considerata comporta un innalzamento non trascurabile dei tiranti in alveo a monte della struttura, comportando l'esondazione in sponda sinistra. Il pelo libero rimane significativamente al di sotto dei livelli relativi all'evento duecentennale.

Tabella 5.10 Ponte Castelfidardo - Livelli del pelo libero e franco idraulico relativi allo stato attuale indisturbato (Tr=50 e 200 anni) e alla configurazione di occlusione parziale (Tr=200 anni).

BISAGNO										
Struttura		TR=50 anni						TR=200 anni		
PROGR.	SEZIONE	Stato indisturbato			Occlusione 20%			Stato indisturbato		
		P.L.	Franco sx	Franco dx	P.L.	Franco sx	Franco dx	P.L.	Franco sx	Franco dx
[m]	ID	[m.s.m.]	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m]
5156	7	10.11	0.50	1.00	10.79	-0.18	0.32	11.97	-1.36	-0.86
5201	6	10.1	0.66	0.74	10.80	-0.04	0.04	12.04	-1.28	-1.2
5207	Ponte Castelfidardo - monte (5.2)	10.17	-1.27 (intr.) 0.48 (sp.)	-1.27 (intr.) 0.65 (sp.)	10.85	-1.95 (intr.) -0.2 (sp.)	-1.95 (intr.) -0.03 (sp.)	12.1	-3.2 (intr.) -1.45 (sp.)	-3.2 (intr.) -1.28 (sp.)
5225	5.1	9.97	0.68	0.83	9.96	0.69	0.84	11.89	-1.24	-1.09
5230	5	9.96	0.69	0.86	9.95	0.70	0.87	11.89	-1.24	-1.07

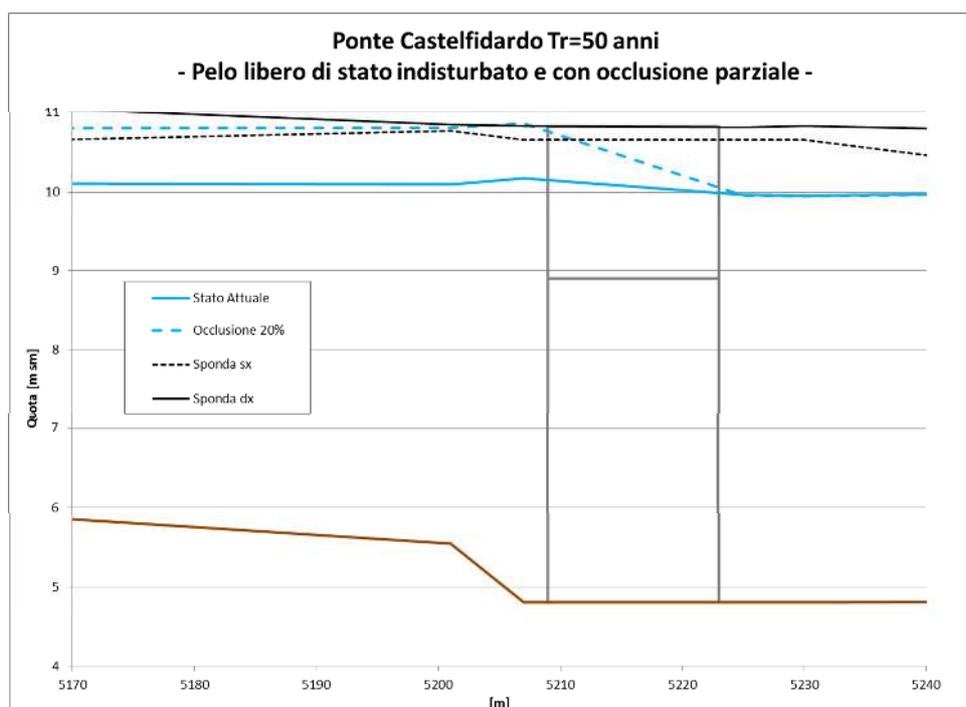


Figura 5.44 Ponte Castelfidardo, TR=50 anni – Profili longitudinali del pelo libero relativi allo stato attuale indisturbato e alla configurazione di occlusione parziale.

Il volume esondato nella configurazione di occlusione (Figura 5.45) comporta allagamenti, a monte dell'attraversamento, nell'area delimitata a nord da Via Miglio, circa 170 m a monte del ponte, e a est da Corso Sardegna. Su Corso Galliera, la direttrice contigua alla sponda sinistra del Torrente Bisagno, i tiranti massimi risultano superiori a 0,5 m, mentre nell'area interna all'isolato si raggiungono valori localmente superiori a 2 m in corrispondenza di una zona depressa. Le acque esondate proseguono la loro espansione trasversale allagando Piazza Giusti e propagandosi lungo via Giacometti, con tiranti generalmente inferiori a 0,3 m.

Relativamente alla velocità di deflusso extra-alveo, i valori massimi sono riportati in Figura 5.47 e risultano generalmente non superiori a 0,5 m/s, con rare eccezioni localizzate.

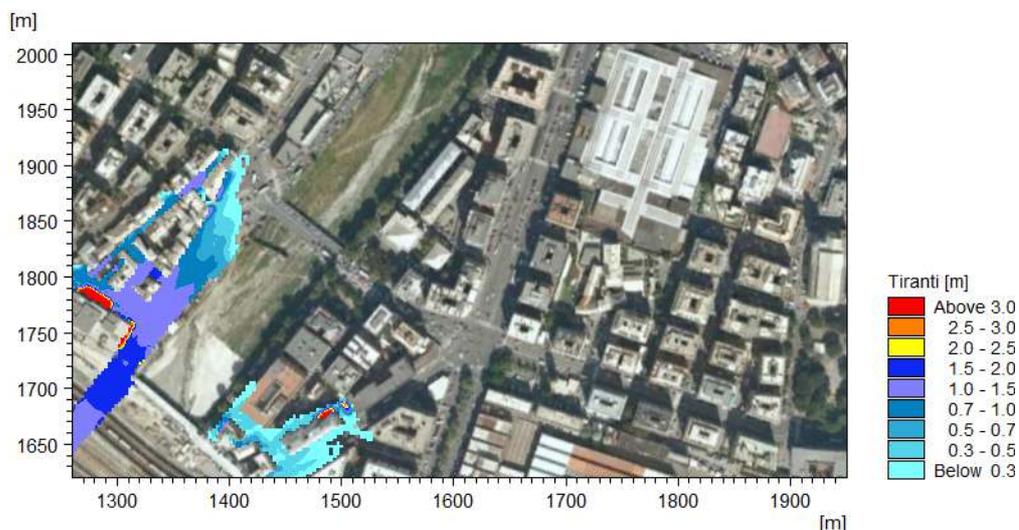


Figura 5.45 Ponte Castelfidardo senza occlusioni, TR=50 anni – Tiranti idrici massimi.

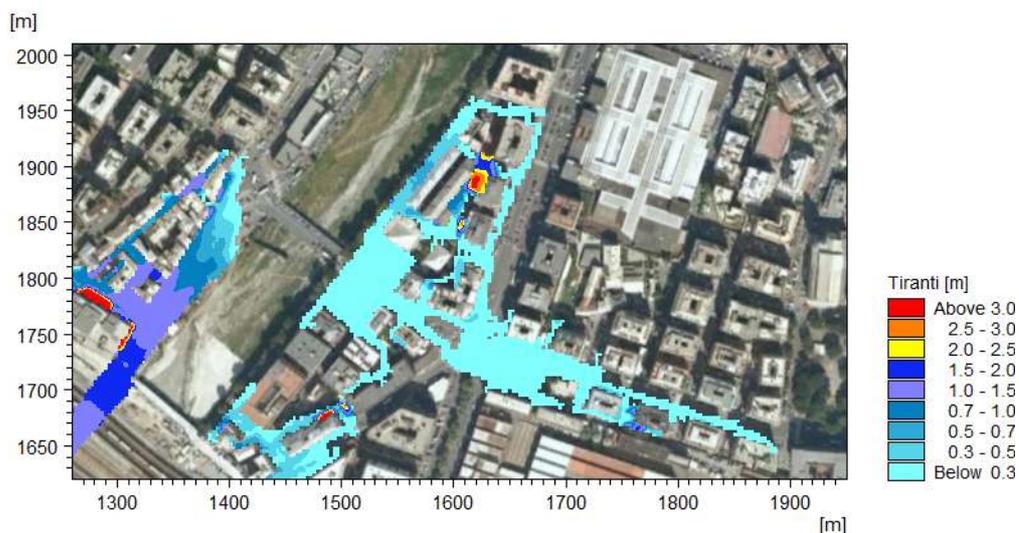


Figura 5.46 Ponte Castelfidardo con occlusioni, TR=50 anni – Tiranti idrici massimi.



Figura 5.47 Ponte Castelfidardo con occlusioni, TR=50 anni – Velocità massime.

## 5.8 Copertura terminale del Rio Fereggiano

### 5.8.1 TR=50 anni

Sulla base della insufficienza della copertura terminale del Fereggiano a far defluire anche la portata cinquantennale, si è analizzata uno scenario di occlusione al 40% per tale tempo di ritorno.

Verificando le geometrie e la pendenza del tratto tombinato, si è appurato come vi sia una sezione le cui caratteristiche la rendono potenzialmente più critica, in caso di occlusione, rispetto a quella di imbocco. Tale sezione è la “6” alla progressiva 2429, che risulta quella con luce libera minore al di sotto della copertura ed è localizzata in corrispondenza di una diminuzione di pendenza circa 300 a monte dello sbocco nel Torrente Bisagno (Figura 5.48).

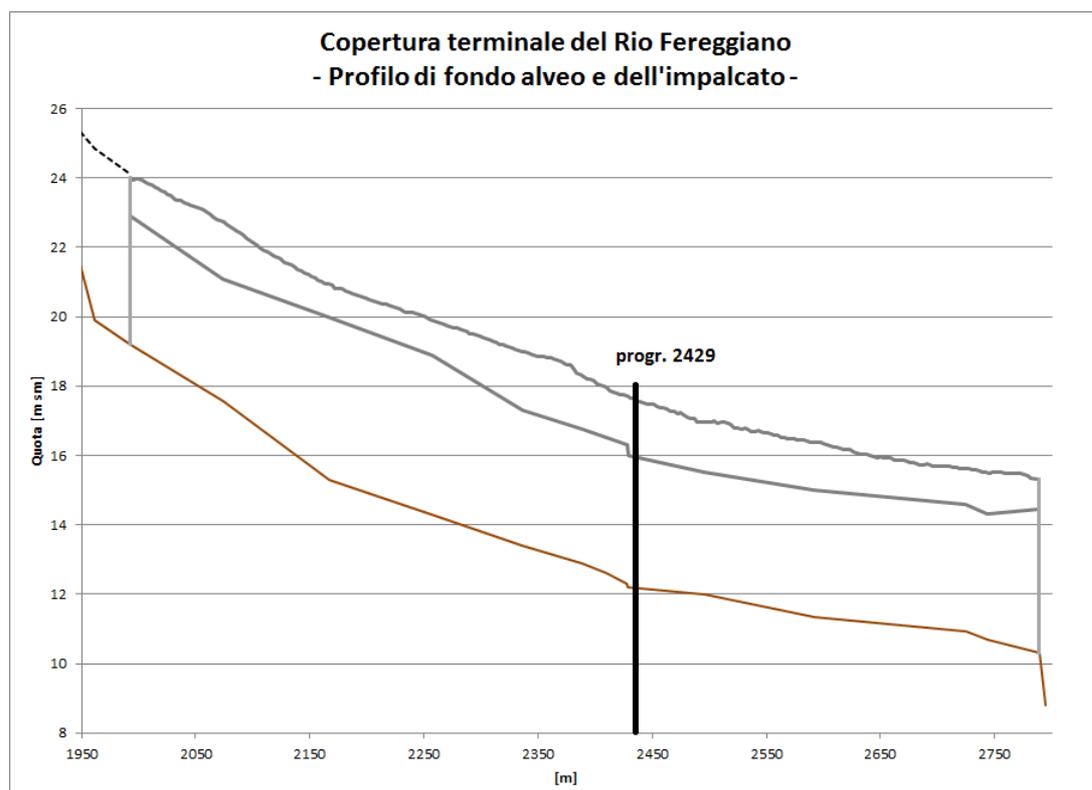


Figura 5.48 Localizzazione della sezione “6” (progr. 2429) al di sotto della copertura terminale del Rio Fereggiano.

Si sono dunque impostati due setup differenti, uno associato all’occlusione della sezione di imbocco e il secondo relativo all’occlusione della sezione più a valle. In Figura 5.49 e Figura 5.50 sono raffigurate le geometrie delle sezioni , rispettivamente, alle progressive 1992 e 2429 sia nella configurazione indisturbata sia con occlusione parziale.

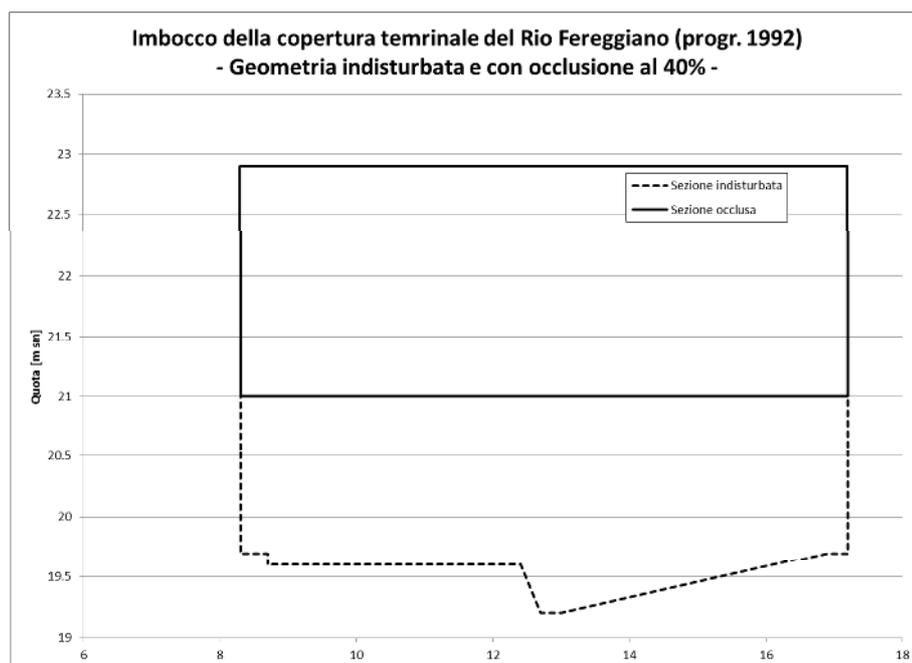


Figura 5.49 Sezione di imbocco della copertura terminale del Rio Fereggiano (progr. 1992) – Geometria con e senza occlusione del 40%.

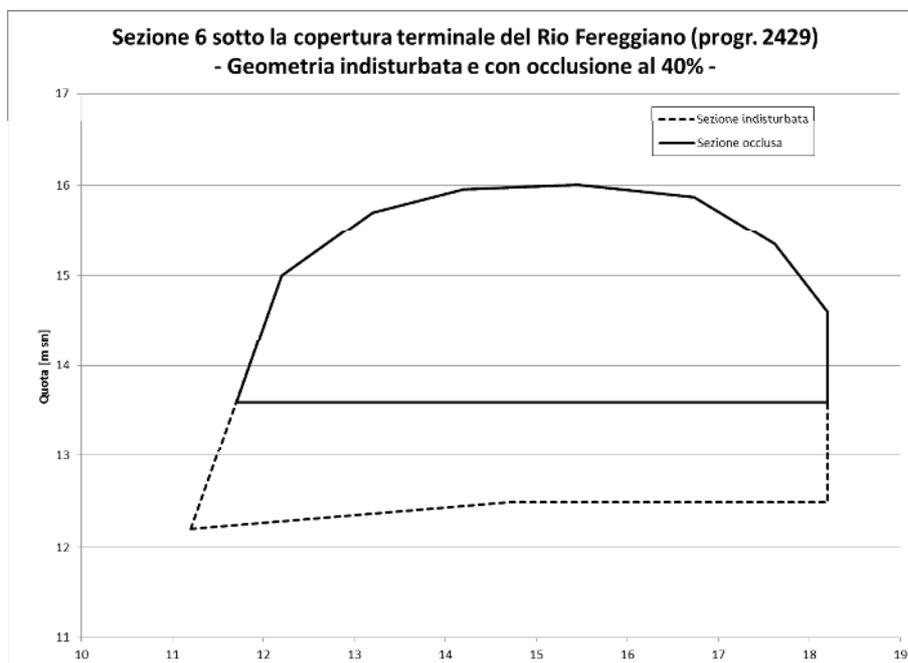


Figura 5.50 Sezione “6” della copertura terminale del Rio Fereggiano (progr. 2429) – Geometria con e senza occlusione del 40%.

L’analisi dei risultati delle due ipotesi di occlusione ha consentito di verificare come l’ostruzione della sezione alla progressiva 2429 comporti tiranti maggiori in alveo a monte della copertura rispetto all’occlusione della sezione di imbocco e, di conseguenza, maggiore estensione delle aree allagate. Di conseguenza, si è scelto di considerare questa configurazione come quella definitiva nell’ambito del presente studio.

I valori di livello del pelo libero e franco idraulico risultanti dalla simulazione sono riportati in Tabella 5.11 e graficati in Figura 5.51. I battenti idrici in alveo subito a monte della copertura risultano incrementati di circa 40 cm a causa dell’occlusione della sezione “6”, determinando un sormonto di circa 60 cm in sinistra. I valori di pelo libero risultano significativamente inferiori rispetto a quelli associati all’evento duecentennale.

Tabella 5.11 Copertura terminale del Rio Fereggiano - Livelli del pelo libero e franco idraulico relativi allo stato attuale indisturbato (Tr=50 e 200 anni) e alla configurazione di occlusione parziale (Tr=200 anni). I valori con asterisco rappresentano le quote dell’intradosso e si riferiscono al funzionamento in pressione della struttura.

FEREGGIANO										
Struttura		TR50						TR200		
PROGR.	SEZIONE	Stato indisturbato			Occlusione 40%			Stato indisturbato		
		P.L.	Franco sx	Franco dx	P.L.	Franco sx	Franco dx	P.L.	Franco sx	Franco dx
[m]	ID	[m.s.m.]	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m]
1961	15	24.22	0.61	2.69	24.64	0.19	2.27	25.68	-0.85	1.23
1992	Copertura terminale - monte (14)	24.3	-1.4 (intr.) -0.19 (sp.)	-1.4 (intr.) 1.27 (sp.)	24.70	-1.8 (intr.) -0.59 (sp.)	-1.8 (intr.) 0.87 (sp.)	25.85	-2.95 (intr.) -1.74 (sp.)	-2.95 (intr.) -0.28 (sp.)
2074	13	21.1*	0		21.1*	0		21.1*	0	
2167	12	20*	0		20*	0		20*	0	
2257	11	18.9*	0		18.9*	0		18.9*	0	

FEREGGIANO										
Struttura		TR50						TR200		
PROGR.	SEZIONE	Stato indisturbato			Occlusione 40%			Stato indisturbato		
		P.L.	Franco sx	Franco dx	P.L.	Franco sx	Franco dx	P.L.	Franco sx	Franco dx
[m]	ID	[m.s.m.]	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m]
2336	10	17.3*	0		17.3*	0		17.3*	0	
2389	9	16.75*	0		16.75*	0		16.75*	0	
2410	8	16.5*	0		16.5*	0		16.5*	0	
2428	7	16.3*	0		16.3*	0		16.3*	0	
2429	6	16*	0		16*	0		16*	0	
2496	5	15.5*	0		15.5*	0		15.5*	0	
2592	4	15*	0		15*	0		15*	0	
2725	3	14.6*	0		14.6*	0		14.6*	0	
2744	2	14.3*	0		14.3*	0		14.3*	0	
2789	1	14.45*	0		14.45*	0		14.45*	0	

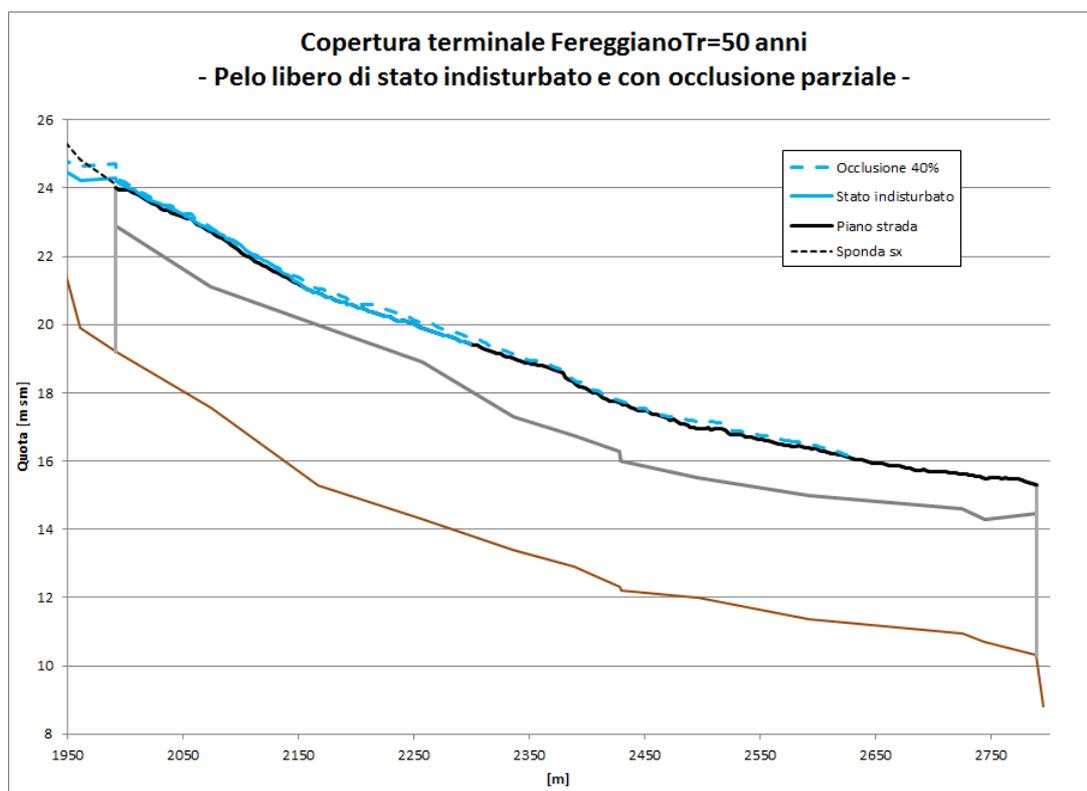


Figura 5.51 Copertura terminale del Rio Fereggiato, TR=50 anni – Profili longitudinali del pelo libero relativi allo stato attuale indisturbato e alla configurazione di occlusione parziale. Si riporta anche il tirante al di sopra della copertura determinato dal volume liquido esondato.

I valori massimi di tirante idrico determinati dal volume esondato all'imbocco della copertura sono visualizzati in Figura 5.52, per quanto riguarda lo scenario indisturbato, e in Figura 5.53 per lo scenario di occlusione.

Si evidenzia un netto aumento dell'area interessata dalle acque di sormonto rispetto allo scenario indisturbato. Quest'ultimo, infatti, è associato a esondazioni limitate al solo piano

stradale di via Fereggiano le cui ultime propaggini arrivano a circa 300 m a valle dell'imbocco della copertura. L'occlusione parziale, invece, comporta una propagazione delle acque di piena decisamente più estesa, andando a interessare via Fereggiano sino a circa 150 m a monte dello sbocco nel torrente Bisagno e distribuendosi anche lateralmente. In particolare, risulta interessato dalle acque di piena il tratto di Corso Sardegna compreso tra Piazza Galileo Ferraris sino all'incrocio con via Cagliari, circa 450 m più a valle.

I tiranti risultano generalmente non superiori a 0,3 m, con eccezioni legate a situazioni specifiche: ad esempio il cortile interno all'isolato posto tra l'inizio di Corso Sardegna e l'inizio di via Tortosa presenta quote depresse rispetto al piano strada principale e di conseguenza i tiranti risultano particolarmente elevati.

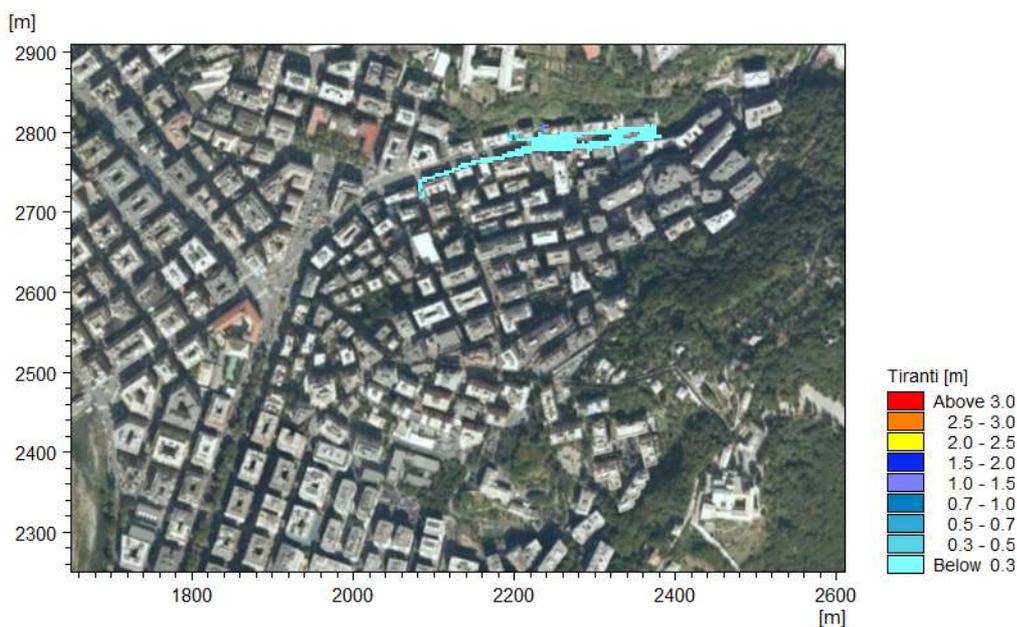


Figura 5.52 Copertura terminale del Rio Fereggiano senza occlusioni, TR=50 anni – Tiranti idrici massimi.

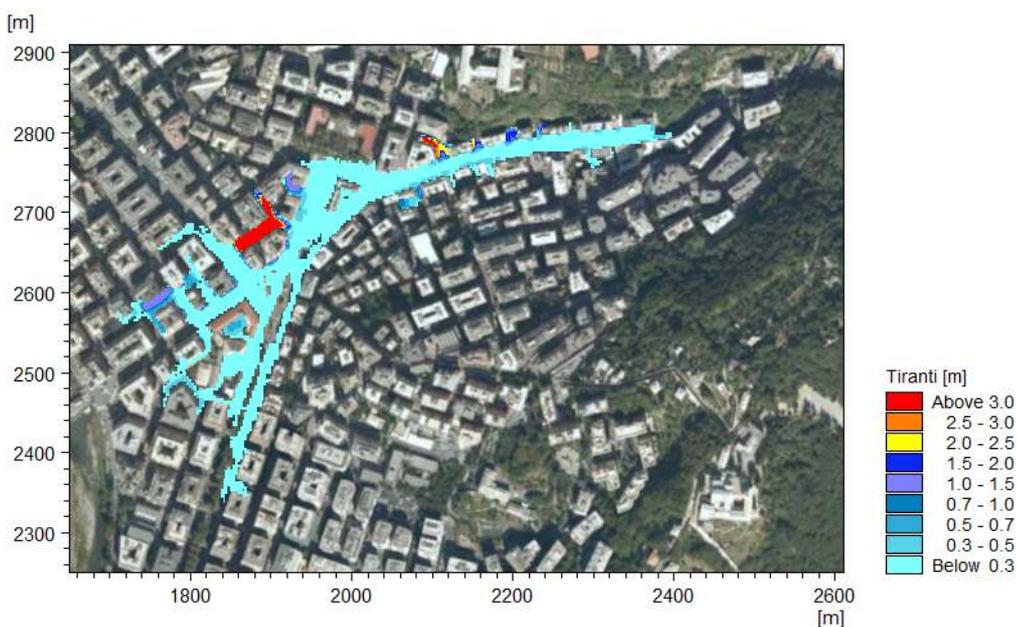


Figura 5.53 Copertura terminale del Rio Fereggiano con occlusioni, TR=50 anni – Tiranti idrici massimi.

In Figura 5.54 si riportano i valori massimi di velocità per lo scenario di occlusione. Il deflusso risulta procedere celermente per i primi 350 m a valle dell'imbocco della copertura, con valori superiori a 1,5 m/s e in buona parte superiori a 2 m/s. A valle dell'incrocio tra via Fereggiano e Corso Sardegna le velocità tendono a diminuire, rimanendo generalmente, a parte localizzate eccezioni, inferiori a 0,5 m/s.



Figura 5.54 Copertura terminale del Rio Fereggiano con occlusioni, TR=50 anni – Velocità massime.

## 6 Sintesi dei risultati

Nella tabella seguente sono riportate le valutazioni conclusive sui risultati delle analisi di possibile ostruzione e riduzione delle luci di ponti e coperture.

La tabella ha lo scopo di fornire un quadro valutativo sintetico di quali strutture possono indurre un effettivo incremento del rischio idraulico rispetto alla situazione indisturbata in caso di ostruzione di parte della luce libera di deflusso.

Tabella 6.1 Effetti delle configurazioni di occlusione .

Struttura	TR [anni]	Ipotesi restringimento	Incremento aree allagate	Incremento tiranti	Incremento velocità
P. Feritore	200	Due campate laterali (30%)	Elevato sponda dx Modesto sponda sx	Elevato	Modesto
P. Guglielmetti	50	Due campate laterali (30%)	Modesto sponda dx Nullo sponda sx	Modesto	Modesto
	200		Modesto	Elevato	Modesto
P. Carrega	200	2 campate in sx e 1 in dx (40%)	Nullo sponda dx Modesto sponda sx	Elevato	Elevato sponda dx Modesto sponda sx
P. Bezzecca	50	Campata sx (20%)	Nullo	Nullo	Nullo
	200	Due campate laterali (30%)	Nullo sponda dx Modesto sponda sx	Elevato sponda dx Modesto sponda sx	Elevato sponda dx Modesto sponda sx
P. Campanella	50	Due campate laterali (40%)	Modesto	Nullo	Nullo
	200		Modesto sponda dx Molto elevato sponda sx	Elevato (modesto sponda dx valle)	Elevato (modesto sponda dx valle)
Copertura Marassi	200	Mezza campata sx (15%)	Nullo	Nullo	Nullo
P. Castelfidardo	50	Campata dx (20%)	Nullo sponda dx Elevato sponda sx	Nullo sponda dx Elevato sponda sx	Nullo sponda dx Elevato sponda sx
Copertura terminale Rio Fereggiano	50	Ostruzione parziale (40%)	Elevato	Elevato	Elevato

Gli indici di incremento relativi a tirante e velocità sono associati ai seguenti range numerici:

Tiranti idrici:

- <5 cm: nullo;
- 5<h<30 cm: modesto;
- > 30 cm: elevato.

Velocità:

- <0,1 m/s cm: nullo;
- 0,1<h<0,5 m/s: modesto;
- > 0,5 m/s: elevato.

**ALLEGATO A**  
**MIKE 11 HD**  
**Descrizione tecnica**



## PREMESSA

MIKE 11 è un software in grado di simulare il flusso monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. Sviluppato a partire dagli anni '70 dal DHI (Danish Hydraulic Institute), rappresenta lo stato dell'arte nella modellistica matematica in ambito fluviale e riferimento nell'ambito della modellistica idrodinamica monodimensionale.

Caratteristiche del codice sono la velocità di calcolo e l'efficienza del robusto motore di simulazione idrodinamica (risolve le equazioni complete del De St.Venant), la struttura logica e sequenziale per l'inserimento e gestione dei dati di input (geometrie, serie storiche ecc.) ed i molteplici strumenti di interpretazione e visualizzazione dei risultati, in grado di garantire un'ottima rappresentazione degli studi condotti (rappresentazione di sezioni, profili, piani quotati, anche in ambiente GIS).

La grande flessibilità del codice di calcolo permette di integrare, attraverso specifici moduli, le applicazioni idrodinamiche con fenomeni idrologici, trasporto solido, advezione-dispersione, qualità delle acque, ecologia, rendendo MIKE 11 uno strumento indispensabile per affrontare e risolvere molteplici problemi d'ingegneria fluviale quali, ad esempio:

- studi di idraulica fluviale e di propagazione dell'onda di piena;
- studi di idrologia e idrogeologia;
- supporto alla progettazione e gestione di opere idrauliche;
- analisi della rottura dighe;
- analisi del trasporto solido e morfologia fluviale;
- modelli di previsione in tempo reale e di supporto decisionale;
- analisi dei fenomeni di intrusione del cuneo salino in fiumi ed estuari;
- studi di valutazione della qualità delle acque sia superficiali che sotterranee;
- analisi dello stato ecologico dei corsi d'acqua.

MIKE 11 è costituito dai seguenti moduli:

- HD (idrodinamico): simulazione del flusso in canali a pelo libero, costituisce la base per ulteriori moduli aggiuntivi;
- RR (afflussi-deflussi): modulo che consente, partendo dai dati meteorologici (pioggia, temperature, evapotraspirazione, ecc...), su bacini naturali o artificiali, di ricostruire attraverso l'utilizzo di modelli idrologici (NAM, UHM, Drift, ecc...) le portate idriche in assegnate sezioni di calcolo;
- AD (advezione-dispersione): simulazione del processo di advezione e dispersione di una sostanza in soluzione o in sospensione di qualsiasi natura nel corpo idrico, eventualmente caratterizzata da una cinetica di decadimento lineare;
- ECOLab (ecologico): simulazione di una serie di processi qualitativi, tra i quali il ciclo BOD-DO con nitrificazione-denitrificazione, il ciclo del fosforo, l'eutrofizzazione, il trasporto di metalli pesanti ecc.;

- ST (trasporto sedimenti): simulazione del trasporto solido di materiale non coesivo, in modalità disaccoppiata (senza variazione della geometria del fondo alveo) o accoppiata (calcolo delle trasformazioni morfologiche);
- FF/DA (previsioni in tempo reale): il modulo consente, assimilando i dati misurati in tempo reale su un bacino e/o corso d'acqua, di correggere la simulazione idrodinamica al fine di garantire una affidabilità massima sulla previsione di un evento di piena.

Particolarmente efficace risulta la possibilità di poter integrare il codice MIKE 11, con altri codici di calcolo della famiglia MIKE quali: MIKE 21 (MIKE FLOOD), per simulare in maniera combinata fenomeni 1D e 2D; MIKE SHE, per la modellazione di corpi idrici superficiali e sotterranei; WEST, per simulare in dettaglio i processi nell'impianto di trattamento ed il relativo impatto sul corso d'acqua recettore; MOUSE (MIKE URBAN FLOOD), simula le interferenze tra il corso d'acqua e la rete di drenaggio.

Di seguito si descrive il codice MIKE 11 HD.

### MODULO IDRODINAMICO (HD)

Il modulo idrodinamico HD rappresenta il "cuore" del codice di calcolo MIKE 11 ed è in grado di simulare il flusso idrico monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. Attraverso l'utilizzo di HD è possibile simulare:

- portate laterali;
- condizioni di corrente veloce o lenta;
- flusso libero o rigurgitato in corrispondenza di sfioratori;
- differenti regole operative di funzionamento di serbatoi o invasi;
- resistenze localizzate e perdite di carico concentrate;
- casse d'espansione;
- condizioni di flusso quasi - bidimensionale sulle pianure alluvionali;
- azione del vento;
- nodi idraulici (biforcazioni e confluenze).

L'adozione del programma di simulazione MIKE 11 consente la soluzione del problema idrodinamico di moto vario con uno schema di soluzione numerica molto efficiente, che limita i tempi di calcolo consentendo una adeguata rappresentazione dell'evolversi temporale dei transitori idraulici legati al passaggio dell'onda di piena.

### DESCRIZIONE DELLE CONDIZIONI DI MOTO SIMULATE

Il modello consente di attivare tre diverse descrizioni del moto, mediante tre differenti formulazioni matematiche:

- Approccio dell'"onda cinematica". Le condizioni di moto sono calcolate imponendo il bilancio tra le forze di gravità e di attrito. Questa semplificazione non permette di simulare gli effetti di rigurgito.
- Approccio dell'"onda diffusiva". Oltre alle forze di gravità ed attrito viene tenuto conto del gradiente idrostatico in modo tale da poter valutare anche gli effetti a monte delle condizioni al contorno di valle e quindi simulare i fenomeni di rigurgito.

- Approccio dell'"onda dinamica". Utilizzando le equazioni complete del moto, comprese le forze di accelerazione, è possibile simulare con questa formulazione transitori veloci, flussi di marea ecc.

In funzione del tipo di problema da risolvere è possibile scegliere la descrizione del moto più appropriata. Ognuna delle tre formulazioni consente di simulare sia sistemi idrici ramificati che reti idrauliche con maglie chiuse.

## EQUAZIONI GENERALI DI DE SAINT VENANT

MIKE 11, risolve le equazioni di conservazione del volume e della quantità di moto (equazioni di De Saint Venant) che sono derivate sulla base delle seguenti assunzioni:

- il fluido (acqua) è incomprimibile ed omogeneo, cioè senza significativa variazione di densità;
- la pendenza del fondo è piccola;
- le lunghezze d'onda sono grandi se paragonate all'altezza d'acqua, in modo da poter considerare in ogni punto parallela al fondo la direzione della corrente: è cioè trascurabile la componente verticale dell'accelerazione e su ogni sezione trasversale alla corrente si può assumere una variazione idrostatica della pressione.

Integrando le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto si ottiene:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

ed introducendo la resistenza idraulica (attrito) e le portate laterali addotte:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2AR} = 0$$

dove:

- A = area della sezione bagnata (m<sup>2</sup>);
- C = coefficiente di attrito di Chezy (m<sup>1/2</sup> s<sup>-1</sup>);
- g = accelerazione di gravità (m s<sup>-2</sup>);
- h = altezza del pelo libero rispetto ad un livello di riferimento orizzontale (m);
- Q = portata (m<sup>3</sup>/s);
- R = raggio idraulico (m);
- α = coefficiente di distribuzione della quantità di moto;
- q = portata laterale addotta (m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>).

## SIMULAZIONE DELLE CORRENTI VELOCI CON L'APPROCCIO DELL'ONDA DINAMICA

Per le correnti veloci viene applicata una equazione "ridotta" del moto, ottenuta trascurando il termine non lineare:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQQ}{C^2AR} = 0$$

La descrizione del moto è tanto più accurata quanto meno rapidamente variabile è la velocità della corrente.

Il vantaggio di questa schematizzazione è rappresentato dal fatto che è possibile ottenere una soluzione stabile con la stessa metodologia usata per le correnti lente. Nella transizione tra corrente lenta e veloce viene applicata una riduzione graduale del termine non lineare.

## APPROSSIMAZIONE DELL'ONDA DIFFUSIVA

L'approssimazione dell'"onda diffusiva" consiste nel trascurare, nelle equazioni generali di De Saint Venant, tutti i termini legati alla quantità di moto:

$$gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQQ}{C^2AR} = 0$$

Questa formulazione assicura ancora la descrizione dell'effetto di rigurgito attraverso il termine  $\frac{\partial h}{\partial x}$ . Per ragioni di stabilità questo termine viene smorzato; ciò significa che vengono risolti soltanto fenomeni di rigurgito relativamente stazionari (confrontati con lo step di tempo utilizzato).

## DESCRIZIONE IN CORRISPONDENZA DI STRUTTURE

Dal punto di vista matematico la descrizione della corrente attraverso stramazzi o soglie e sezioni trasversali strette è abbastanza simile. Sono diversi i tipi di strutture che possono essere simulate:

### *Tipo 1. Stramazzo a larga soglia*

Il programma automaticamente determina le caratteristiche di funzionamento standard dello stramazzo sulla base della geometria e dei coefficienti di perdita di carico specificati dall'utente. Viene assunta una distribuzione idrostatica delle pressioni sulla soglia e vengono utilizzati diversi algoritmi per la simulazione del deflusso libero e di quello rigurgitato.

### *Tipo 2. Relazione Q-h*

Nel caso in cui le condizioni standard di funzionamento (tipo 1) dello stramazzo non risultino adeguate (ad esempio quando è evidente una significativa curvatura delle linee di corrente) è possibile specificare le relazioni Q-h (portate-livelli) valide per la data struttura. La relazione Q-h viene utilizzata per il deflusso libero in condizioni critiche, mentre per il deflusso rigurgitato (o sommerso) vengono utilizzati gli stessi algoritmi della struttura "tipo 1".

### *Tipo 3. Tombino*

Un tombino può essere descritto mediante diversi algoritmi validi per condizioni di deflusso critico, rigurgitato o a "tubo pieno". Il funzionamento a "tubo pieno" è a sua volta suddiviso in deflusso libero a valle, flusso rigurgitato e flusso sommerso: il codice calcola in automatico una relazione Q-h che contempla tutti i casi di deflusso critico allo sbocco del tombino. La portata critica è determinata da una formulazione di stramazzo a larga soglia quando l'imbocco è libero e da una formulazione di luce sotto battente quando l'imbocco è sommerso.

#### Tipo 4. Relazione Q-t

E' possibile inserire una qualsiasi relazione Q-t esterna per descrivere ad esempio il deflusso da una diga o un pompaggio. Questa relazione sostituisce localmente l'equazione di conservazione della quantità di moto.

#### Tipo 5. Relazione $Q = A(Zj1) \cdot Zj2$

Il deflusso nell'ambito di una struttura può essere posto in relazione, in modo dinamico, a due qualsiasi variabili indipendenti del sistema consentendo di simulare regole operative particolari. Il deflusso da un invaso può per esempio essere correlato alla portata in ingresso e al livello nell'invaso (o al livello a valle di esso).

#### Tipo 6. Strutture mobili

E' possibile simulare la presenza di strutture mobili con condizioni di deflusso di tipo sfioro o luce sotto battente. Viene assegnata la geometria fissa della struttura (larghezza, quota del fondo per sistemi a sfioro tipo ventola, quota del livello massimo della paratoia per sistemi con luce sotto battente) ed una regola operativa che determina la quota della parte mobile della struttura in funzione di una delle seguenti condizioni idrodinamiche calcolate dal modello: un livello, una differenza di livelli, una portata, una differenza di portate, il tempo. Il modulo simula dinamicamente la variazione della geometria della struttura ed il flusso che ne consegue.

#### Tipo 7. Ponti

In MIKE 11 possono essere utilizzate diverse formulazioni da letteratura per il calcolo del deflusso attraverso i ponti e del conseguente effetto di rigurgito. In particolare sono implementati i modelli della FHWA (Federal Highway Administration USA, WSPRO method) e della USBPR (US Bureau of Public Roads), modelli per la simulazione della presenza delle pile (Nagler e Yarnell), modelli per il libero deflusso attraverso ponti ad arco (Biery & Delour, HR method). Tutti i precedenti metodi di calcolo possono essere integrati con il calcolo del moto in pressione e con il calcolo del sormonto della struttura (tombini e stramazzi).

## RESISTENZA D'ATTRITO

MIKE 11 consente di utilizzare due diverse formulazioni della resistenza d'attrito: l'espressione di Chezy e quella di Strickler. Secondo la formula di Chezy, nell'equazione del moto il termine di resistenza risulta pari a:

$$\tau_r = \frac{gQQ}{C^2AR}$$

dove C è il coefficiente di attrito di Chezy.

Secondo la formula di Strickler, lo stesso termine diventa:

$$\tau_r = \frac{gQQ}{M^2AR^{4/3}}$$

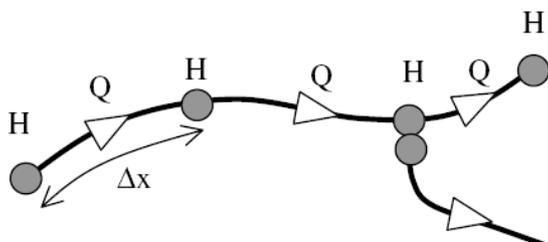
dove M è il coefficiente di Strickler, pari a  $1/n$ , essendo n il coefficiente di Manning.

## CONDIZIONI INIZIALI

Le condizioni iniziali possono essere specificate dall'utente oppure essere calcolate automaticamente. Nel secondo caso viene usata la formula di Chezy per determinare i livelli idrici e le portate da considerare all'inizio della simulazione su tutta la rete o schema idraulico. In alternativa a queste due opzioni è possibile anche assumere come condizioni iniziali i risultati di una precedente simulazione effettuata sullo stesso schema idraulico.

## METODO DI SOLUZIONE

La soluzione del sistema di equazioni è indipendente dall'approccio modellistico seguito (cinematico, diffusivo, dinamico). Le equazioni generali di De Saint Venant sono trasformate in un sistema di equazioni implicite alle differenze finite secondo una griglia di calcolo con punti Q e h alternati tra loro, nei quali la portata Q e il livello idrico h, rispettivamente, sono determinati ad ogni passo temporale (schema di Abbott a 6 punti).



La griglia di calcolo viene generata dal modello in base alle richieste dell'utente:

- i punti Q sono posizionati sempre a metà tra due punti h vicini;
- la distanza tra due punti h può essere variabile;
- ad ogni sezione trasversale d'alveo viene assegnato un punto h;
- ad ogni struttura viene assegnato un punto Q.

## CONDIZIONI AL CONTORNO

In MIKE 11 le condizioni al contorno sono distinte in esterne ed interne. Le condizioni al contorno interne sono: legami tra punti nodali, strutture, portate interne. Le condizioni al contorno esterne sono: valori costanti di h e Q, valori di h e Q variabili nel tempo, relazioni tra h e Q (ad es. scala di deflusso per una sezione d'alveo).

## DEFINIZIONE DEI PASSI DI CALCOLO

La scelta ottimale dei passi di calcolo Dx (spazio) e Dt (tempo) da utilizzare nell'ambito di una simulazione è molto importante perché questi parametri possono condizionare pesantemente la stabilità del calcolo numerico e quindi i risultati stessi della simulazione.

Esistono due differenti criteri per determinare correttamente i passi di calcolo Dx e Dt. Essi sono descritti nel seguito.

### 1) Criterio di Courant

$$Cr = \frac{\sqrt{g \cdot d + V}}{Dx} \cdot Dt$$

dove:

Cr = numero di Courant;

d = altezza d'acqua media;

V = velocità media della corrente;

g = accelerazione di gravità;

Dt, Dx = passi di calcolo.

Il numero di Courant esprime quanti  $\Delta x$  vengono percorsi da un'onda, causata da una piccola perturbazione, che si muove in un intervallo di tempo  $\Delta t$  unitario.

Per correnti lente ( $Fr < 1$ ), il valore massimo del numero di Courant deve essere inferiore a 20.

## 2) Criterio della velocità.

Il criterio della velocità stabilisce che i passi  $\Delta x$  e  $\Delta t$  di calcolo siano definiti in modo tale che la corrente si muova di uno spazio  $\Delta x$  in un tempo maggiore di  $\Delta t$ , e cioè:

$$V \cdot \Delta t < \Delta x$$

dove  $V$  è velocità media della corrente.

In definitiva entrambi i criteri esprimono il concetto che, per un dato passo di tempo  $\Delta t$ ,  $\Delta x$  deve essere maggiore di un valore definito; contemporaneamente sia  $\Delta t$  che  $\Delta x$  devono essere inferiori a valori prestabiliti, in modo da descrivere correttamente il fenomeno in esame.

Il modello DHI/MIKE 11 genera automaticamente una griglia di calcolo sulla quale i nodi che rappresentano le altezze d'acqua sono localizzati in corrispondenza delle sezioni trasversali di rilievo. Nel caso in cui la distanza tra due sezioni sia maggiore di  $\Delta x$ , vengono inseriti ulteriori nodi intermedi di calcolo, distanti fra loro  $\Delta x$  o meno.





**ALLEGATO B**  
**MIKE 21 HD**  
Descrizione tecnica



## PREMESSA

Il MIKE 21 è un programma modulare contenente diversi codici per la simulazione di corpi idrici per i quali sia possibile adottare l'approssimazione idrodinamica bidimensionale, piana, per fluidi verticalmente omogenei. Infatti, il numero "21" che contraddistingue il codice indica proprio la bidimensionalità nel piano ("2") e la monodimensionalità lungo la verticale ("1").

Il sistema modellistico è stato sviluppato per la simulazione delle correnti a pelo libero e dei fenomeni correlati all'idraulica in fiumi, laghi o invasi, così come in ambito costiero e offshore. I principali campi di applicazione sono:

- modellazione idrodinamica del trasporto solido e della qualità delle acque in fiumi;
- laghi ed aree golenali;
- studio del moto ondoso in aree costiere, bacini portuali ed offshore;
- analisi idrodinamica del trasporto solido e morfologica in aree costiere;
- analisi della qualità delle acque al largo e sottocosta;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere costiere ed offshore;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere di difesa fluviale;
- supporto all'ottimizzazione di layout portuali;
- analisi impatto ambientale;
- previsione degli stati di mare a supporto della navigazione;
- analisi di allagamenti in aree costiere e fenomeni di storm surge.

In generale il MIKE 21 offre un ambiente di lavoro completo, efficace e robusto a supporto dell'ingegneria e della pianificazione e gestione territoriale a diverse scale spaziali. La combinazione di un'interfaccia grafica avanzata con un motore di calcolo robusto ed affidabile, frutto di un pluriennale e continuo sviluppo da parte del DHI, rende questo software lo strumento più utilizzato ed efficace per l'ingegneria fluviale e marittima in tutto il mondo.



Il pacchetto MIKE 21 è disponibile in 4 versioni che si differenziano in base alla schematizzazione geometrica adottata:

- CLASSIC GRID (Griglia classica singola): le equazioni di continuità e del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenze finite su una griglia rettangolare, uniforme in tutto il dominio di calcolo;
- MULTIPLE GRID (Griglia multipla): questo schema utilizza lo stesso approccio della griglia singola, con la possibilità di innestare nel dominio griglie a risoluzione crescente nelle aree ove sia richiesto un maggiore dettaglio;
- FLEXIBLE MESH (Griglia flessibile): questo schema utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata. La griglia non strutturata garantisce il massimo della flessibilità nella rappresentazione di geometrie complesse, in particolare per domini di calcolo estesi in cui sia necessario adottare una risoluzione spaziale variabile;
- CURVILINEAR (Griglia curvilinea): è la griglia adottata da MIKE 21C, codice di calcolo studiato appositamente per applicazioni di morfologia fluviale.

In campo fluviale MIKE 21 può essere utilizzato in modo integrato con altri codici di calcolo del DHI, in particolare:

- MIKE 11, grazie al modulo MIKE FLOOD, che consente di condurre simulazioni idrodinamiche accoppiando gli approcci 1d e 2d in modo totalmente integrato;
- MIKE URBAN CS per la simulazione di allagamenti in ambito urbano dalla rete di drenaggio.

In campo marittimo e costiero, dove risulta più efficace l' utilizzo della versione FM, il MIKE 21 consente di studiare in modo integrato il moto ondoso (moduli SW, PMS, NSW, BW, EMS), le correnti e le variazioni di livello superficiale (HD), il trasporto solido e la morfologia di sedimenti non coesivi e coesivi (ST, MT), la dispersione di soluti (AD/TR).

L'utilizzo di formati comuni a tutti i codici del mondo MIKE garantisce la possibilità di utilizzare i file di MIKE 21 anche in input ad altri modelli quali LITPACK e MIKE 3.

Infine, attraverso l'utilizzo di EcoLab, MIKE 21 consente di studiare anche i processi più complessi in termini di qualità delle acque, in presenza di composti e reagenti.

Di seguito si descrive il modulo MIKE 21 HD Classical Grid.

### Modulo Idrodinamico (HD)

Il modulo idrodinamico (HD), cuore del codice MIKE 21, simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate, potendo essere utilizzato da solo o come base per i calcoli effettuati dagli altri moduli disponibili. In particolare, il modulo HD di MIKE 21 permette di tenere in considerazione i seguenti fenomeni:

- flooding and drying;
- perdite di carico;
- attrito al fondo;
- forza di Coriolis;
- effetto del vento;
- gradienti di pressione barometrica;
- coperture di ghiaccio;
- effetto delle maree;
- precipitazioni/Evaporazioni;
- radiation stresses;
- pozzi e sorgenti.

Come menzionato in precedenza, i risultati di una simulazione MIKE 21 HD possono essere usati come input per la simulazione di fenomeni fisici strettamente dipendenti dagli aspetti idrodinamici:

- trasporto di sostanze disciolte/sospese in acqua, modulo AD e modulo "Mud Transport";
- trasporto solido di materiale non coesivo, modulo ST;
- qualità delle acque ed idroecologia, modulo ECO Lab.

Infine, per quanto riguarda le analisi dei fenomeni di esondazione, MIKE 21 può essere accoppiato in modo dinamico attraverso l'interfaccia MIKE FLOOD al codice monodimensionale MIKE 11, per la simulazione degli alvei e dei canali, ed al codice MIKE URBAN, per la simulazione delle reti di drenaggio e collettamento urbano, schematizzando il dominio di calcolo in modo integrato 1D/2D.

Il modulo idrodinamico HD del Mike 21 risolve le equazioni complete del moto di De St.Venant in un caso bidimensionale piano (la terza dimensione - asse z - è implicitamente integrata nelle equazioni considerando un mezzo verticalmente omogeneo), non stazionario. Il sistema delle equazioni di De St.Venant è costituito dalle seguenti equazioni.

Equazione di conservazione della massa:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo x:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) \right] - \Omega q - fVV_x \\ + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} p_a + \frac{1}{\rho_w} \left( \frac{\partial \mathcal{S}_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{S}_{xy}}{\partial y} \right) = 0 \end{aligned}$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega p - fVV_y \\ + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} p_a + \frac{1}{\rho_w} \left( \frac{\partial \mathcal{S}_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \mathcal{S}_{xy}}{\partial x} \right) = 0 \end{aligned}$$

nelle quali:

$h(x,y,t)$  = profondità dell'acqua;

$\zeta(x,y,t)$  = quota del pelo libero;

$p,q(x,y,t)$  = portate unitarie nelle direzioni x e y;

$C(x,y)$  = coefficiente di scabrezza di Chezy;

$G$  = accelerazione di gravità;

$f(V)$  = fattore d'attrito del vento;

$V, V_x, V_y(x,y,t)$  = velocità del vento e componenti lungo le direzioni x e y;

$\Omega(x,y)$  = parametro di Coriolis;

$p_a(x,y,t)$  = pressione atmosferica;

$\rho_w$  = densità dell'acqua;

$x,y$  = coordinate spaziali;

$t$  = tempo;

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$  = componenti dello sforzo di taglio che tengono conto della turbolenza e del profilo verticale delle velocità;

$S_{xx}, S_{xy}, S_{yy}$  = componenti del radiation stress (nel caso la forzante idrodinamica derivi dall'interazione tra il moto ondoso ed il fondo).

Il termine di turbolenza è rappresentato dagli sforzi di taglio  $\tau$  che compaiono nelle equazioni di conservazione della quantità di moto lungo le direzioni  $x$  e  $y$ . La formulazione utilizzata prende in considerazione il parametro  $E$  "eddy viscosity" che è implementato secondo due modalità:

1. dipendente dal flusso locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( E \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( E \frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (\text{nella direzione } x);$$

2. oppure dipendente dalla velocità locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( hE \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( hE \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (\text{nella direzione } x);$$

Le due equazioni rappresentano il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto. Il coefficiente  $E$  può essere specificato come costante su tutta la griglia, variabile da punto a punto, o come funzione del campo di velocità locale secondo la formulazione di Smagorinski:

$$E = c_s^2 \Delta^2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]$$

nella quale  $u$  e  $v$  sono le componenti della velocità locale,  $\Delta$  è la dimensione spaziale della griglia e  $c_s$  è una costante compresa tra 0,25 e 1.

In questo caso il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto (asse  $x$ ) è dato da:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( hE \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{2} hE \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)$$

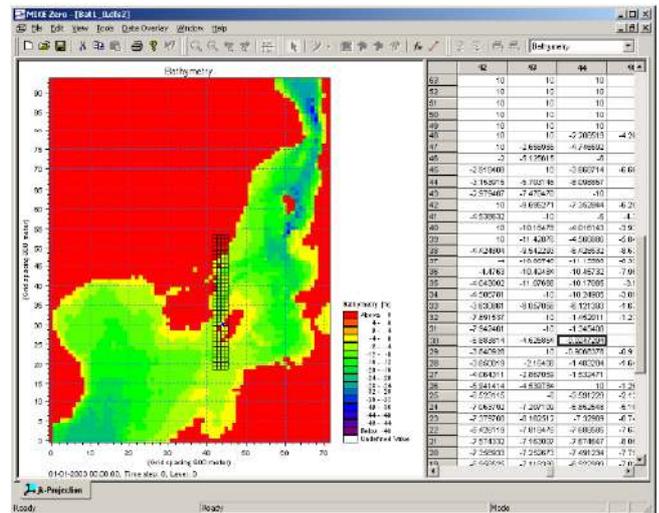
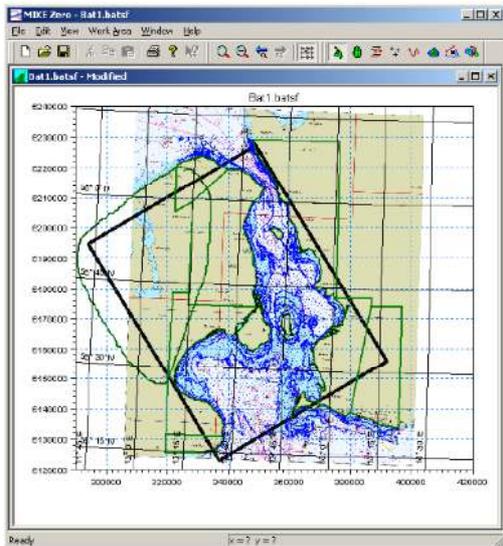
La portata entrante nell'area di calcolo viene assegnata come portata unitaria ( $m^3/s/m$ ) lungo la frontiera libera dalla quale entra il flusso: viene assegnata al modello la portata complessiva ( $m^3/s$ ) che viene poi ripartita automaticamente sui punti di calcolo della griglia.

La condizione iniziale è rappresentata da una situazione di "quiete", nel senso che tutte le componenti delle forzanti sono nulle (portate, velocità, livelli) e variano poi linearmente nel tempo fino a raggiungere il valore assegnato in un tempo prefissato. Questa tecnica, detta del "soft start" consente di eliminare eventuali brusche oscillazioni iniziali della soluzione che potrebbero presentarsi per problemi di stabilità numerica. Al termine del "soft start" la situazione ottenuta è di effettiva stazionarietà.

Le equazioni di continuità del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenze finite su una griglia rettangolare, uniforme su tutto il dominio di calcolo, costituita da celle di dimensioni tali da poter descrivere in maniera sufficientemente corretta le variazioni plano-altimetriche della batimetria.

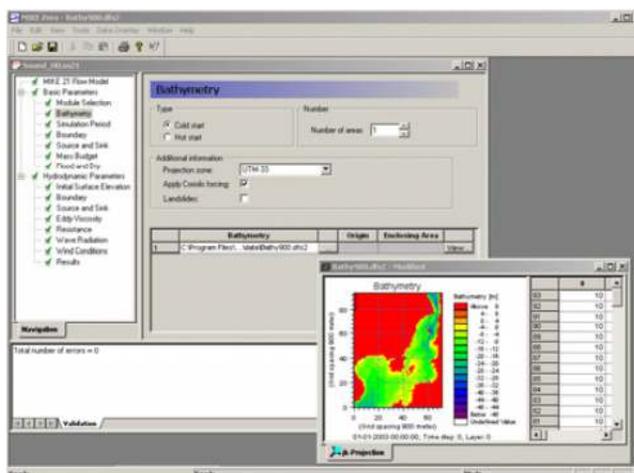
Il medesimo approccio della griglia singola viene utilizzato anche nella versione “griglia multipla-nested grid”, che permette di innestare nel dominio di calcolo griglie a risoluzione crescente nelle aree ove sia richiesto un maggiore dettaglio.

Le equazioni della conservazione della massa e della quantità di moto sono risolte alle differenze finite utilizzando il metodo ADI (Alternating Direction Implicit). Il sistema di equazioni linearizzate che scaturisce dall’algoritmo è risolto con il metodo DS (Double Sweep, Abbott, 1979).



Il modello MIKE 21 HD necessita di una serie di dati di input che si possono raggruppare in differenti categorie, ovvero:

- parametri temporali e del dominio (risoluzione della griglia di calcolo, time step, durata simulazione);
- fattori di calibrazione (bed resistance, viscosità turbolenta);
- condizioni iniziali (livelli e campi di corrente);
- condizioni al contorno (livelli, portate);
- altre forzanti (campi di vento, radiation stresses, sorgenti o pozzi).



I risultati di un'applicazione modellistica bidimensionale possono essere rappresentati con i molteplici strumenti di visualizzazione statica e dinamica a corredo dello strumento modellistico utilizzato. Gli strumenti di post processing consentono di creare animazione 2D da esportare ed utilizzare in ambiente di lavoro esterno alla piattaforma modellistica utilizzata per il calcolo numerico.

L'utilizzo di un approccio di tipo bidimensionale, permette di indagare non solo l'intensità del fenomeno ma anche direzione e verso del vettore velocità in ogni cella della matrice. Ad esempio per ognuno degli elementi della griglia, sono rappresentati le variazioni temporali delle seguenti variabili:

- profondità e livelli idrici;
- flussi di corrente nelle direzioni principali;
- velocità di corrente e direzione.

