



COMUNE DI:

PONTE SAN PIETRO (BG)

PROGETTO:

REALIZZAZIONE DIFESE PASSIVE LUNGO IL TORRENTE QUISA A VALLE
DEL PONTE DI VIA MERENA E RIPRISTINO IDRODINAMICO DEL PONTE
STESSO (LOTTO 1B) - CUP J38H22000370002 CIG 9450227E03

FASE PROGETTUALE:

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA

CODICE	TITOLO ELABORATO	DATA
A.2	RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA	Dicembre 2022
		SCALA

Progettista:



IdroAM - Ing. Adriano Murachelli

via Gran S. Bernardo n. 26, 24068 Seriate (Bg)
Tel. 03519965690 - e-mail: info@idroam.it
Albo Ingegneri di Bergamo n. 4370

In collaborazione con:



**Studio Telo
May Fly**

Ingegneria Idraulica e Ambientale
Largo 24 Agosto 1942, 33A - 43126 Parma
Tel. & Fax 0521/292795
studiotelo@studiotelo.it www.studiotelo.it

Calcoli strutturali:

STUDIO DI INGEGNERIA ED ARCHITETTURA

PIAZZINI ALBANI

Via Martiri di Cefalonia, 4 - Bergamo
info@piazzinialbani.com

IL PROGETTISTA

Ing. Adriano Murachelli

IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

Dott. Arch. Oliviero Rota

AGGIORNAMENTI:

REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	CONTROLL.	APPROV.
00	Dicembre 2022	EMISSIONE	Ing. Cagnoni	Ing. Murachelli	Ing. Murachelli



INDICE

1	PREMESSA	2
2	INQUADRAMENTO TERRITORIALE	4
3	ANALISI IDROLOGICA	6
3.1	Il modello numerico utilizzato	9
4	ANALISI IDRAULICA	17
4.1	Le ipotesi del calcolo idraulico e il modello matematico utilizzato	17
5	RISULTATI DELLE MODELLAZIONI	22
5.1	Risultati nello stato di fatto	23
5.2	Risultati nello stato di progetto	25
6	CONCLUSIONI	27

1 PREMESSA

Il bacino del torrente Quisa è interessato criticità relative a locali fenomeni di esondazione del torrente in concomitanza di eventi meteorici di maggiore intensità. Si ricorda per esempio il recente evento meteorico verificatosi il 25/06/2014, in seguito al quale si sono verificate una serie di criticità idrauliche nel tratto di valle, in cui il torrente attraversa gli abitati di Paladina, Valbrembo, Mozzo, Curno e Ponte San Pietro.

Lo scenario di criticità evidenziato da eventi storici, anche recenti, interessa prioritariamente l'intero tratto di attraversamento degli abitati che, da Paladina verso valle, insistono in adiacenza alle sponde del torrente, ed è tale da rendere necessario ricorrere ad interventi, sia strutturali che non strutturali, volti alla mitigazione del rischio idraulico.

A tal proposito, nel 2016 lo Studio Telò May Fly srl in collaborazione con l'Ing. Adriano Murachelli ha redatto lo *"Studio idrogeologico, idraulico e ambientale a scala di sottobacino idrografico del t. Quisa e del reticolo ad esso connesso finalizzato alla definizione degli interventi di sistemazione idraulica, di riqualificazione ambientale e manutenzione fluviale"* nel quale venivano approfondite le dinamiche idrauliche del torrente Quisa in concomitanza di fenomeni meteorici intensi (evento 25/06/2014) e definiti degli interventi di mitigazione del rischio idraulico volti a risolvere le criticità individuate all'interno del documento stesso.

Il presente progetto di fattibilità tecnica ed economica, in particolare, ha l'obiettivo di perseguire la progettazione preliminare dell'intervento denominato *"Realizzazione difese passive lungo il torrente Quisa a valle del ponte di Via Merena e ripristino idrodinamico del Ponte stesso (Lotto 1B) nei Comuni di Ponte San Pietro e Mozzo"*. Tale intervento originariamente consisteva in una riprofilatura del fondo alveo in prossimità del ponte suddetto al fine di ripristinarne l'efficienza idraulica ed un sopralzo spondale al fine di contenere in sponda destra e sinistra la portata di piena bisecolare; tuttavia, a seguito degli scavi di saggio effettuati in data 24/11/2022 è stato riscontrato che la base dei plinti di fondazione del ponte si trovano ad una quota di -0.50 m dal fondo alveo.

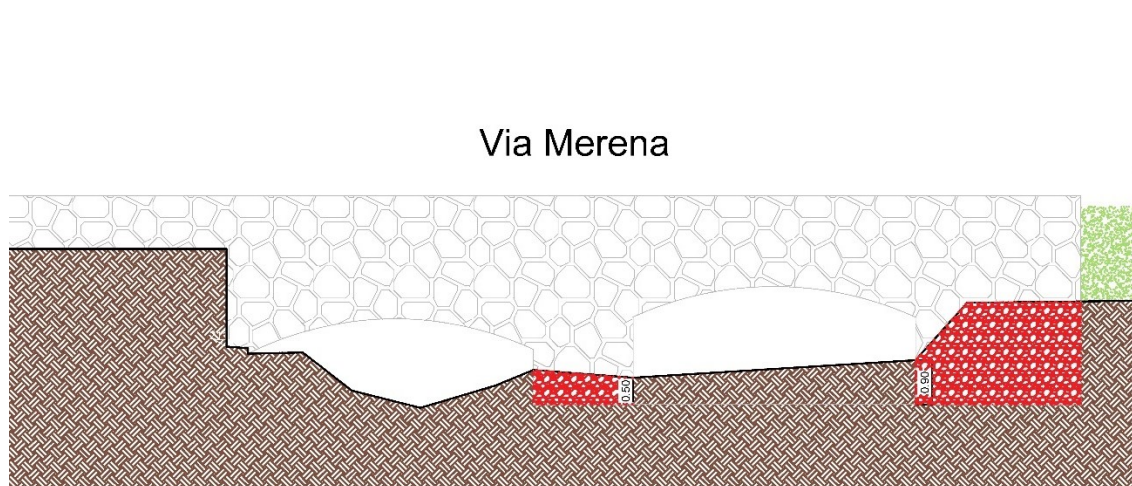


FIGURA 1 - ELABORATO SCHEMATICO RIASSUNTIVO DELL'ESITO DEGLI SCAVI DI SAGGIO



La soluzione quindi, strutturalmente ed economicamente più vantaggiosa, è risultata essere quella di demolire e ricostruire l'attraversamento di Via Merena poiché qualsiasi altra lavorazione prevista non sarebbe stata compatibile in termini di sicurezza e di somme a disposizione con le condizioni allo stato di fatto della struttura (cfr. *A.1 Relazione tecnica e illustrativa*)

Contestualmente alle lavorazioni di demolizione e ricostruzione si prevederanno dei sopralzi spondali in sponda destra e sinistra al fine di poter contenere le portate di piena con TR200.

Gli studi idrologici ed idraulici di seguito illustrati sono focalizzati sulla configurazione attuale del reticolo idrografico esaminato e sulla capacità della sezione di deflusso attuale del Ponte di via Merena di far transitare le piene teoriche per i vari tempi di ritorno considerati, al fine di confermare le diverse criticità idrauliche e l'entità delle stesse già individuate nello studio del 2016; le modellazioni nello stato di fatto sono state implementate sulla base di un quadro conoscitivo integrato da dei rilievi topografici effettuati nel 2021 dal geom. Gazzoli, integrando perciò le informazioni topografiche del 2016 sviluppate dallo Studio Macalli.

Una volta definito e confermato lo scenario nello stato di fatto, già descritto nello studio a scala di sottobacino, si è proceduto a meglio definire lo scenario di progetto tramite modellazioni idrodinamiche atte a verificare la bontà delle scelte progettuali brevemente sopra riportate.



2 INQUADRAMENTO TERRITORIALE

Il bacino idrografico del torrente Quisa occupa una superficie di circa 2100 ha, ricadente entro i comuni di Ponteranica, Sorisole, Bergamo, Almè, Paladina, Valbrembo, Mozzo, Curno e per l'appunto, Ponte San Pietro.

L'asta principale risulta lunga circa 12km, a partire dal punto di origine nel corso d'acqua nella zona collinare del comune di Ponteranica, fino alla sezione di chiusura, nel territorio comunale di Ponte S. Pietro; inoltre, quando giunge a Ponte San Pietro delimita un'ampia zona, denominata "Isolotto", prima di confluire nel fiume Brembo sulla sua sinistra idrografica.

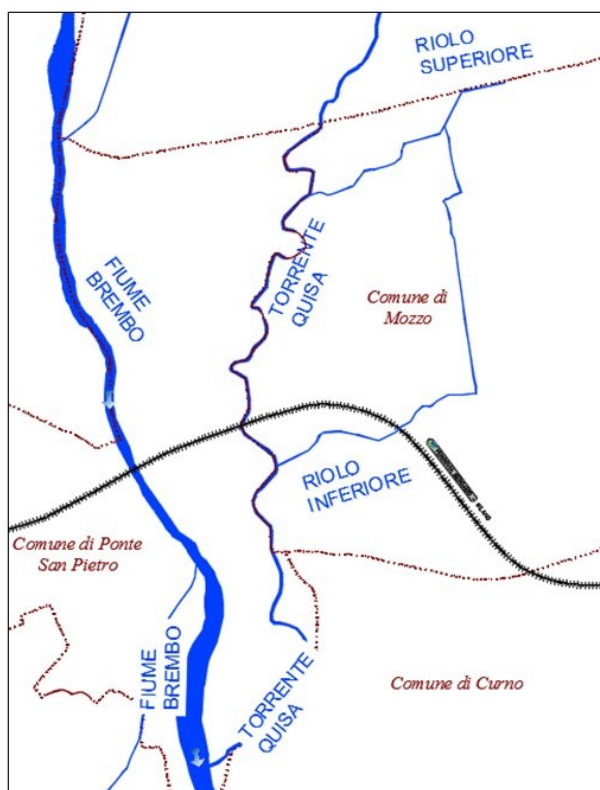


FIGURA 2 - RETICOLO IDRICO SUPERFICIALE AFFERENTE AL TORRENTE QUISA NEL TRATTO DI VALLE. LA LINEA ROSSA TRATTEGGIATA INDICA I CONFINI COMUNALI, LA LINEA NERA INDICA LA LINEA FERROVIARIA MILANO-BERGAMO.

Come anticipato, gli interventi in progetto ricadono nel territorio comunale di Ponte San Pietro in prossimità del Ponte di Via Merena. In tale contesto il torrente Quisa attraversa un territorio urbanizzato consolidato e le principali criticità idrauliche verificatesi storicamente coinvolgono le aree in sinistra idraulica a monte del ponte e le aree sia in destra che sinistra idraulica appena a valle del manufatto.



FIGURA 3 - INQUADRAMENTO TERRITORIALE CON FOCUS SUL PONTE DI VIA MERENA

Come detto in premessa il quadro conoscitivo morfologico è stato integrato mediante una campagna di rilievi lungo tutto il tratto oggetto di intervento. Tali aggiornamenti topografici hanno integrato lo scenario allo stato di fatto evidenziato del 2016, evidenziando minime variazioni nell'andamento del profilo del fondo alveo del torrente Quisa.

3 ANALISI IDROLOGICA

Al fine di poter disporre del necessario quadro conoscitivo meteorologico funzionale alle successive analisi idrologiche, le analisi pluviometriche effettuate nell'ambito del presente studio si sono basate sulle linee segnalatrici di possibilità pluviometriche elaborate a cura dell'ARPA Lombardia.

La dipendenza di tali linee, espresse in mm di pioggia, dalla durata D dell'evento pluviometrico è funzione di tre parametri secondo la formula:

$$h_T(D) = a_1 w_T D^n$$

L'immagine seguente mostra, a titolo di esempio, l'andamento qualitativo del parametro a_1 per la definizione delle linee di possibilità pluviometrica sul territorio Provinciale per eventi con durata compresa tra 1 e 24 ore.

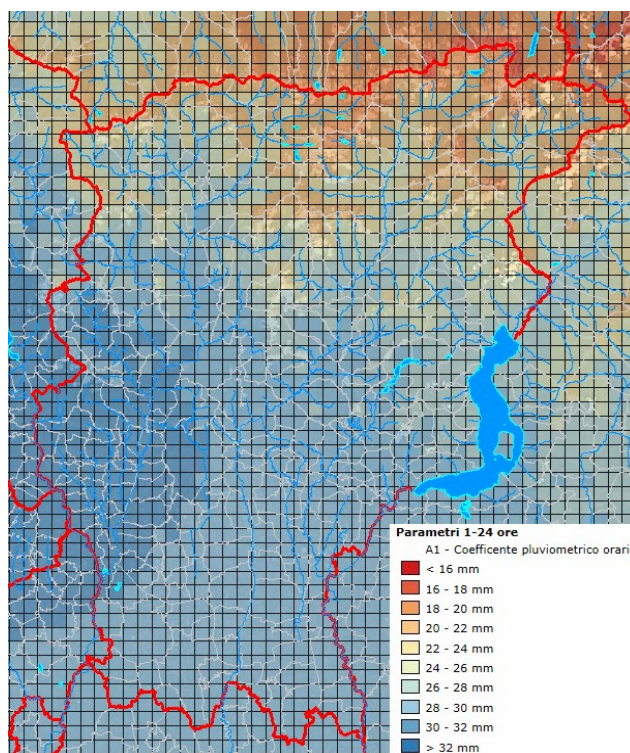


FIGURA 4- ANDAMENTO QUALITATIVO DEL PARAMETRO A_1 PER LA DEFINIZIONE DELLE LINEE DI POSSIBILITÀ PLUVIOMETRICA PER DURATE TRA 1 E 24 ORE SULL'INTERO TERRITORIO PROVINCIALE (ARPA LOMBARDIA)

Le elaborazioni pluviometriche hanno, quindi, fatto riferimento ai dati forniti da ARPA Lombardia relativi alla stazione pluviometrica di Bergamo, dai quali è stato possibile ricavare le curve di possibilità pluviometrica, che riassumono il legame tra altezze di pioggia e durata della precipitazione al variare del TR.

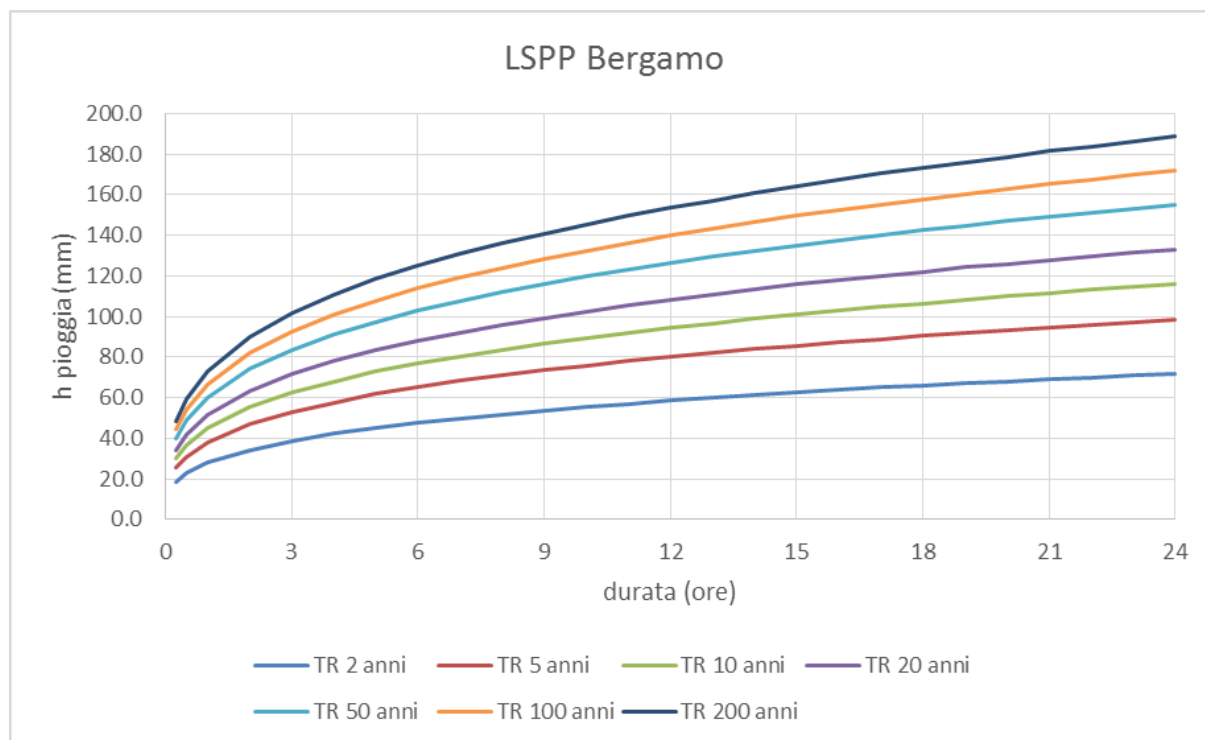


FIGURA 5 - CURVE SEGNALETRICI DI POSSIBILITÀ PLUVIOMETRICA A BERGAMO

Queste relazioni sono state utilizzate per ricavare gli ietogrammi adottati nelle successive analisi idrologiche afflussi-deflussi sul bacino del Torrente Quisa.



TABELLA 1- ALTEZZE CUMULATE DI PIOGGIA PER VARI PERIODI DI RITORNO E DURATE DELL'EVENTO METEORICO OTTENUTE DALL'ELABORAZIONE DEI DATI DELLA STAZIONE PLUVIOMETRICA BERGAMO.

Altezze di cumulate di pioggia (mm)				
Durata (ore)	TR 20 anni	TR 50 anni	TR 100 anni	TR 200 anni
1	51.7	60.3	66.8	73.3
2	63.6	74.2	82.1	90.1
3	71.7	83.7	92.7	101.7
4	78.1	91.1	100.9	110.8
5	83.5	97.4	107.9	118.4
6	88.1	102.8	113.9	125.0
7	92.3	107.6	119.2	130.8
8	96.0	112.0	124.1	136.1
9	99.4	116.0	128.5	141.0
10	102.6	119.7	132.6	145.5
11	105.6	123.1	136.4	149.7
12	108.3	126.4	140.0	153.6
13	110.9	129.4	143.3	157.3
14	113.4	132.3	146.5	160.8
15	115.8	135.0	149.6	164.1
16	118.0	137.6	152.5	167.3
17	120.1	140.1	155.2	170.3
18	122.2	142.5	157.9	173.3
19	124.2	144.9	160.4	176.1
20	126.1	147.1	162.9	178.8
21	127.9	149.2	165.3	181.4
22	129.7	151.3	167.6	183.9
23	131.4	153.3	169.8	186.4
24	133.1	155.3	172.0	188.7

Per quanto riguarda invece la forma degli ietogrammi, che descrive l'andamento delle altezze di precipitazione durante l'evento meteorico, in questa sede sono stati adottati ietogrammi sintetici di forma triangolare, simmetrici rispetto al picco.

Partendo dalle analisi pluviometriche illustrate nel capitolo precedente, nella fase successiva si è passati all'interpretazione delle dinamiche di trasformazione afflussi deflussi con il metodo di calcolo SWMM che, a differenza di procedure e modelli di calcolo prettamente idrologico, descrive in maniera puntuale le dinamiche di trasformazione e propagazione nel reticolo idrografico in esame attraverso un'analisi integrata idrologico-idraulica.

Tale aspetto risulta particolarmente utile per la rete in esame, in cui il reticolo idrico naturale con gli scaricatori di piena delle reti fognarie, permettendo di determinare l'effettiva capacità recettiva del



torrente Quisa e dei suoi affluenti rispetto ai deflussi meteorici collettati dai numerosi scaricatori di piena presenti lungo i tratti urbani.

Nei paragrafi seguenti si descrivono i criteri assunti per le modellazioni, gli strumenti di calcolo impiegati e i risultati per i diversi scenari simulati.

3.1 IL MODELLO NUMERICO UTILIZZATO

L'analisi integrata idrologica e idraulica è stata effettuata tramite il codice di calcolo *Storm and Sanitary Analysis*, a sua volta basato sullo *Storm Water Management Model* (SWMM - versione 5.0) dell'*U.S. Environmental Protection Agency* (EPA).

Il modello SWMM descrive quantitativamente la trasformazione delle piogge in deflussi superficiali sulla estensione di un bacino imbrifero e in correnti idriche che confluiscono e si propagano lungo i suoi collettori drenanti. Fra le varie potenzialità del codice, in questa occasione è stata sfruttata soprattutto quella di valutare la formazione del ruscellamento superficiale e il suo trasferimento al reticolo di correnti monodimensionali lungo i corpi idrici drenanti.

Per quanto riguarda il deflusso di superficie, SWMM considera ogni area elementare utilizzata per la schematizzazione dell'intero bacino come un serbatoio non lineare con un singolo ingresso che rappresenta le precipitazioni, e con più uscite che rappresentano le perdite idrologiche, ossia l'infiltrazione, l'evaporazione e appunto il deflusso superficiale. La capacità del serbatoio non lineare rappresenta la capacità massima d'accumulo sulle superfici del bacino, fornita principalmente dai micro e macro avvallamenti delle superfici e dal velo d'acqua presente sulle superfici bagnate, d'altezza variabile durante l'evento di pioggia.

Nella logica del modello, il deflusso superficiale ha inizio solo quando il volume d'acqua nel serbatoio supera la capacità d'accumulo superficiale, mentre l'infiltrazione (solo nella porzione permeabile della superficie) e l'evaporazione riducono continuamente tale volume accumulato.

L'infiltrazione è stata modellata secondo il metodo *Curve Number*, o metodo CN, del *National Resources Conservation Service*, che consente di calcolare la pioggia netta, che origina i deflussi superficiali, in funzione di un parametro, detto *Curve Number* (CN), dipendente dall'uso del suolo, dalla potenzialità di deflusso del terreno e dal suo grado di saturazione.

Nei casi in cui l'infiltrazione e l'evaporazione risultino potenzialmente superiori alla precipitazione, il deflusso superficiale risulta ovviamente nullo. Non è presente la componente di deflusso ipodermico né quella di base, schematizzate come due serbatoi della regione sotterranea non lineari e interconnessi fra loro; tale elemento, che può simulare anche gli scambi idrici fra falda freatica e corsi d'acqua, riveste qui una importanza trascurabile nella simulazione di singoli eventi di piena, perché i tempi di risposta dei due



serbatoi sotterranei eccedono largamente quelli del ruscellamento superficiale, fornendo un contributo al deflusso totale che diviene significativo solo in regime di magra.

Il processo appena descritto viene ripetuto per ogni area elementare schematizzata e per ogni passo temporale in cui è necessario discretizzare l'intervallo di tempo durante il quale interessa simulare la trasformazione afflussi-deflussi e la propagazione della conseguente onda di piena lungo il sistema idrografico, tenendo conto delle confluenze secondo la struttura topologica della sua rete.

Matematicamente il processo è rappresentato dalla soluzione di un sistema di equazioni differenziali che governano il bilancio della massa liquida (equazione di continuità) e della corrispondente energia meccanica (equazione del moto) tanto per il deflusso che si sviluppa come lama d'acqua fluente sulla superficie di una area elementare per effetto della saturazione del suolo e del superamento della sua capacità di infiltrazione, quanto del deflusso che si sviluppa come corrente essenzialmente monodimensionale in ciascuno dei tronchi elementari costituenti i collettori drenanti. Oltre tali equazioni differenziali, il modello impone contemporaneamente, attraverso ulteriori equazioni, le condizioni al contorno, ed in particolare l'identità del livello in tutti gli estremi di canali che connettono lo stesso nodo, il legame tra livello raggiunto nei nodi, dimensione fisica delle confluenze e livelli idrici nei canali riceventi.

Le condizioni iniziali nel reticolo vengono invece calcolate sulla base delle condizioni al contorno che riguardano i riceventi e della portata iniziale in ogni condotto.

Ai fini della modellazione, il bacino del torrente Quisa è stato diviso in 77 sottobacini, 26 dei quali relativi a bacini naturali, gli altri ad aree urbanizzate, le cui principali caratteristiche sono riassunte in tabella 2. I confini dei bacini naturali sono di facile identificazione, in quanto coincidenti solitamente con linee di displuvio.

L'identificazione dei bacini urbani dipende invece fortemente anche dall'andamento della rete di drenaggio e dai canali di scolo; in generale però ad ogni scarico identificato nel torrente Quisa è stato associato un bacino urbano. Dove nota la geometria e le quote di scorrimento, è stato modellato anche il tratto di condotta a monte dello scarico, accorgimento che consente di valutare in maniera più verosimile l'interazione tra lo scarico e piena in alveo.

Per quanto riguarda l'infiltrazione il metodo di calcolo adottato consente di distinguere tra tre diverse condizioni di umidità del terreno antecedenti l'evento meteorico (*Antecedent Moisture Condition* o *AMC*), che a loro volta influenzano la perdita stessa, in quanto i terreni con bassa umidità naturale consentono una maggiore infiltrazione di acque meteoriche rispetto a quelli con maggior grado di saturazione. Come accennato in precedenza, sono stati creati due modelli idrologici distinti in funzione delle condizioni di saturazione del terreno:



- Terreno mediamente saturo (AMC II): si tratta della condizione “standard”, adottata per le valutazioni sugli interventi di mitigazione del rischio proposti;
- Condizioni antecedenti l’evento molto umide (AMCIII): si tratta della condizione più onerosa in termini di portate generate dai sottobacini ed è stata assunta come ipotesi alla base della definizione delle fasce di rischio e delle valutazioni sulla compatibilità idraulica dei ponti.

Per ognuno dei sottobacini definiti nel modello idrologico, la percentuale di superficie impermeabile e l’uso del suolo, in base al quale è stato assegnato il corrispondente valore di CN (in relazione a ben note tabelle di letteratura), sono stati desunti da fotogrammi aerei ed immagini satellitari della zona.

Il reticolo idrologico formato dal Torrente Quisa, dai suoi principali affluenti e dai tratti terminali di collettori fognari compresi tra gli sfioratori di piena e gli scarichi è stato invece rappresentato mediante nodi idrologici, a cui è associata una quota di fondo alveo, e tratti di collegamento tra di essi.

Per questi ultimi, trattati dal modello come elementi monodimensionali su cui sono imposte le equazioni del moto, è necessario specificare la geometria della sezione (Il modello consente di definire tanto sezioni aperte quanto chiuse) e la scabrezza di essa, potendo eventualmente distinguere tra alveo di magra e golenia. La pendenza del tronco è invece calcolata dal modello sulla base della quota di fondo alveo dei due nodi idrologici alle estremità.

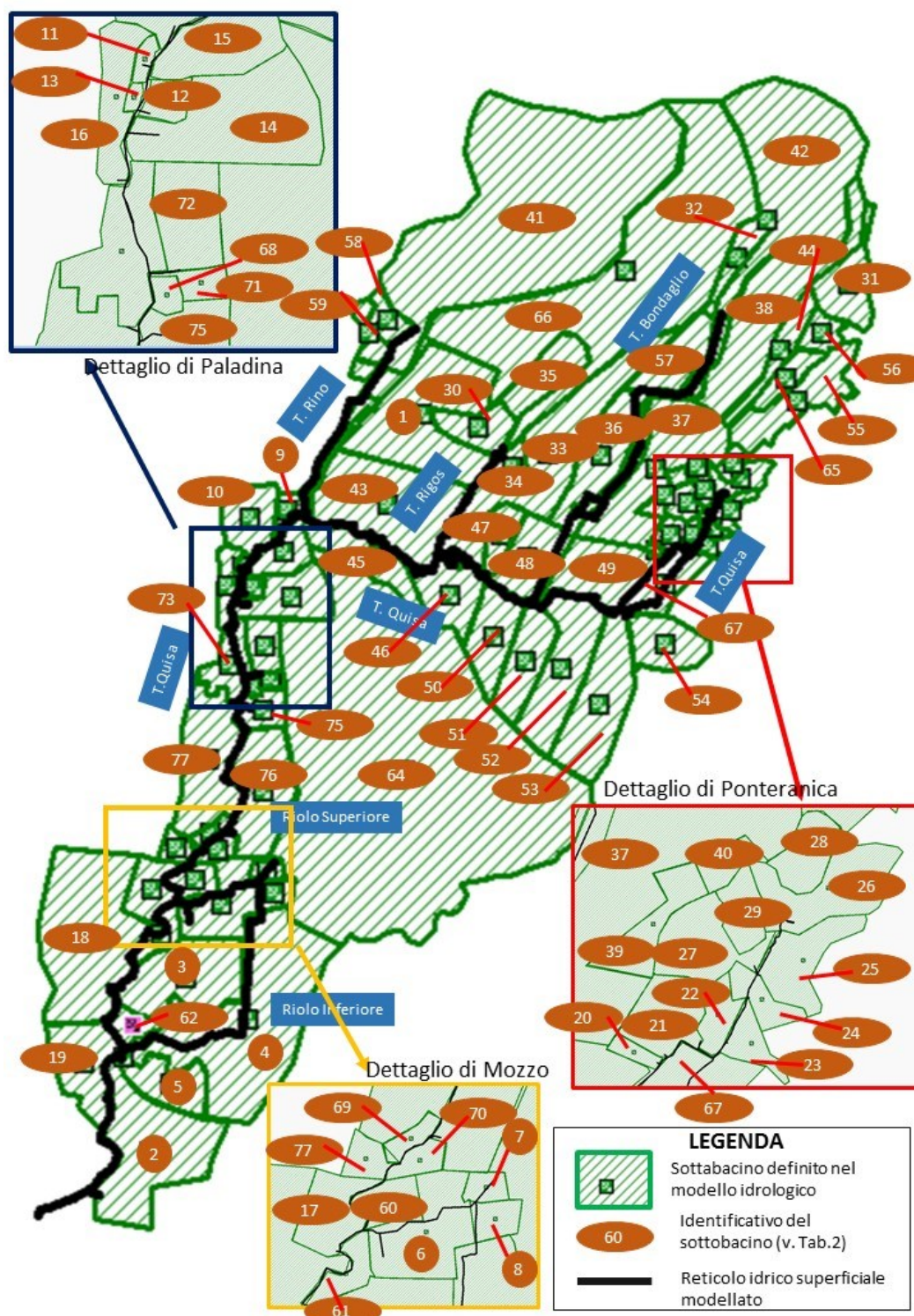


FIGURA 6 - DIVISIONE DEL BACINO DEL T. QUISA IN SOTTOBACINI ADOTTATA AI FINI DELLA MODELLAZIONE (I NUMERI SONO RELATIVI ALLA TAB.2). Nel dettaglio, le quote dei nodi idrologici sono state fatte coincidere con quelle delle sezioni ottenute dal rilievo topografico, mentre la geometria della sezione è stata assegnata al tratto immediatamente a valle del corrispondente nodo.



Nodi idrologici sono stati inoltre definiti in corrispondenza dei paramenti di monte e valle di tutti gli attraversamenti, in corrispondenza di scarichi e sfioratori delle reti fognarie.

Si precisa inoltre che il modello consente di attribuire ad ogni nodo un'altezza massima, che coincide con il massimo rigurgito ammissibile nel nodo in caso in cui instaurarsi di moto in pressione nel tronco a valle. Tale parametro è stato assunto diverso da zero solo per i nodi relativi a condotti fognari, dove è stato fatto coincidere con la profondità del corrispondente pozzetto fognario rispetto al piano campagna, per simulare la capacità di invaso dello stesso.

Dopo aver definito preliminarmente il reticolo drenante superficiale in termini di nodi e tratti fluviali il modello SWMM viene applicato congiuntamente alle 77 sottounità identificate, specificandone il relativo nodo di afferenza.

Come illustrato nella Figura 10 e come meglio descritto nel paragrafo 7.5, al fine del dimensionamento e verifica dei vari possibili interventi di mitigazione, l'analisi modellistica è stata estesa, oltre che all'asta principale del t. Quisa e di parte del t. Rigos, anche a tutto il reticolo idrico affluente costituito, oltre che dal T. Rigos, anche dai T. Bondaglio, T. Rino, Riolo Superiore e Riolo inferiore, in parte interagenti tra loro e affluenti del t. Quisa in porzioni distinte di quest'ultimo.

Il modello è stato applicato per varie durate di pioggia e vari tempi di ritorno. Verificato che la durata critica per il bacino del Torrente Quisa corrisponde alle tre ore, i risultati successivi, faranno per tanto tutti riferimento ad eventi meteorici di tale durata

TABELLA 2 - CARATTERISTICHE PRINCIPALI DEI SOTTOBACINI MODELLATI

Numero	Area (ha)	Tipo	Comune	Ricettore
1	63.28	Urbano	Almè	Rino
2	53.36	Urbano	Curno	Quisa
3	36.06	Urbano	Mozzo	Riolo inferiore
4	94.83	Urbano	Mozzo	Quisa
5	15.24	Urbano	Mozzo	Riolo Superiore
6	20.97	Urbano	Mozzo	Quisa
7	3.265	Urbano	Mozzo	Quisa
8	4.814	Urbano	Paladina	Riolo inferiore
9	3.73	Urbano	Paladina	Quisa
10	15.49	Urbano	Paladina	Quisa
11	0.93	Urbano	Paladina	Quisa
12	2.19	Urbano	Paladina	Quisa



Numero	Area (ha)	Tipo	Comune	Ricettore
13	0.50	Urbano	Paladina	Quisa
14	18.67	Urbano	Paladina	Quisa
15	10.72	Urbano	Paladina	Quisa
16	6.25	Urbano	Paladina	Quisa
17	11.81	Urbano	Ponte S.P.	Quisa
18	69.46	Urbano	Ponte S.P.	Quisa
19	23.37	Urbano	Ponte S.P.	Quisa
20	0.78	Urbano	Ponteranica	Quisa
21	4.48	Urbano	Ponteranica	Quisa
22	1.99	Urbano	Ponteranica	Quisa
23	1.95	Urbano	Ponteranica	Quisa
24	2.06	Urbano	Ponteranica	Quisa
25	4.59	Urbano	Ponteranica	Quisa
26	6.94	Urbano	Ponteranica	Quisa
27	5.46	Urbano	Ponteranica	Quisa
28	3.21	Urbano	Ponteranica	Quisa
29	2.56	Urbano	Ponteranica	Quisa
30	12.87	Urbano	Sorisolet	Rigos
31	17.09	Urbano	Sorisolet	Quisa
32	8.33	Urbano	Sorisolet	Bondaglio
33	55.35	Urbano	Sorisolet	Quisa
34	5.43	Urbano	Sorisolet	Rigos
35	15.77	Urbano	Sorisolet	Rigos
36	24.29	Urbano	Sorisolet	Quisa
37	47.68	Urbano	Sorisolet	Bondaglio
38	48.61	Urbano	Sorisolet	Bondaglio
39	3.90	Urbano	Sorisolet	Bondaglio
40	1.77	Urbano	Sorisolet	Quisa
41	198.83	Non Urbano	Almè e Villa d'Almè	Rino
42	104.55	Non Urbano	Almè e Sorisolet	Bondaglio



Numero	Area (ha)	Tipo	Comune	Ricettore
43	52.79	Non Urbano	Almè e Sorisole	Quisa
44	11.33	Non Urbano	Paladina	Quisa
45	16.839	Non Urbano	Sorisole	Quisa
46	17.76	Non Urbano	Bergamo e Paladina	Quisa
47	8.60	Non Urbano	Sorisole	Quisa
48	16.83	Non Urbano	Sorisole	Quisa
49	24.44	Non Urbano	Sorisole e Ponteranica	Quisa
50	18.44	Non Urbano	Bergamo	Quisa
51	18.71	Non Urbano	Bergamo	Quisa
52	33.39	Non Urbano	Bergamo	Quisa
53	36.00	Non Urbano	Bergamo	Quisa
54	17.35	Non Urbano	Bergamo	Quisa (ramo mulino)
55	23.64	Non Urbano	Sorisole	Quisa
56	6.59	Non Urbano	Sorisole	Quisa
57	16.60	Non Urbano	Sorisole	Bondaglio
58	6.31	Non Urbano	Almè	Rino
59	5.67	Non Urbano	Almè	Rino
60	6.60	Non Urbano	Mozzo	Quisa
61	5.63	Non Urbano	Mozzo	Quisa
62	6.13	Non Urbano	Mozzo	Quisa
63	0.43	Non Urbano	Mozzo	Riolo Superiore
64	363.28	Non Urbano	Paladina, Bergamo, Valbrembo e Mozzo	Quisa
65	8.16	Non Urbano	Sorisole	Quisa
66	164.03	Non Urbano	Almè, Sorisole e Villa d'Almè	Rigos
67	13.65	Non Urbano	Ponteranica	Quisa (ramo mulino)
68	1.30	Urbano	Valbrembo	Quisa
69	3.11	Urbano	Valbrembo	Quisa
70	3.78	Urbano	Valbrembo	Quisa
71	2.07	Urbano	Valbrembo	Quisa
72	34.91	Urbano	Valbrembo	Quisa



Numero	Area (ha)	Tipo	Comune	Ricettore
73	8.50	Urbano	Valbrembo	Quisa
74	11.59	Urbano	Valbrembo	Quisa
75	7.68	Urbano	Valbrembo	Quisa
76	30.62	Urbano	Valbrembo	Quisa
77	4.36	Urbano	Valbrembo	Quisa



4 ANALISI IDRAULICA

Basandosi sugli elementi morfologici ed idrologici sopra illustrati, si è proceduto all'implementazione di un'apposita modellazione numerica di carattere monodimensionale

In particolare, le analisi modellistiche di tipo idrodinamico sono state eseguite in maniera iterativa rispetto alle indagini idrologiche-idrauliche complessive illustrate nel capitolo precedente, utilizzando i valori delle portate massime sostenibili desunte dalle prime come dati di calibrazione per le seconde e, viceversa, imponendo i valori delle portate in transito alle diverse porzioni del corso d'acqua ricavate dalle indagini idrologico-idrauliche come dati di input per le analisi idrodinamiche, ripetendo il procedimento sino alla congruenza dei risultati.

I risultati ottenuti dall'analisi idrodinamica sono stati utilizzati come base conoscitiva sia per la perimetrazione delle fasce di pericolosità idraulica, sia nella valutazione della funzionalità idraulica dei ponti e dei manufatti di attraversamento.

Per quanto riguarda le prime, il modello idrodinamico ha fornito informazioni integrative circa i livelli raggiunti dalla piena in alveo per i vari tempi ritorno e sul lato in cui si verificano principalmente i fenomeni esondativi e, soprattutto, ha consentito di determinare con maggior precisione la massima capacità dell'alveo, dato che ha permesso di correggere e affinare la determinazione dei volumi di esondazione desunti dal modello idrologico ed alla base del tracciamento delle fasce di pericolosità idraulica. La determinazione della massima portata sostenibile dall'alveo è inoltre un dato essenziale per il dimensionamento dei principali interventi di mitigazione della pericolosità idraulica, presentati al capitolo successivo.

Nello specifico, dai risultati della modellazione sono stati ricavati i livelli a monte e a valle del manufatto di Via Merena, le massime velocità ottenute nelle sezioni di attraversamento per valori del tempo di ritorno pari a 20, 100 e 200 anni. Da questi parametri è stato calcolato il franco idraulico secondo le indicazioni fornite nella *“direttiva contenete i criteri per la Valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture di interesse pubblico all'interno delle Fasce A e B”*, redatte dall'Autorità di Bacino del fiume Po.

4.1 LE IPOTESI DEL CALCOLO IDRAULICO E IL MODELLO MATEMATICO UTILIZZATO

Il calcolo dei massimi livelli di piena procede sulla base delle equazioni classiche dell'idraulica dei moti a pelo libero; in particolare sono integrate numericamente le equazioni differenziali per correnti monodimensionali su alveo prismatico in condizione di moto permanente gradualmente vario. L'ipotesi di monodimensionalità è ampiamente giustificata dalle finalità del presente studio e dalle configurazioni



geometriche dei corsi d'acqua analizzati; essa risulta, infatti, poco corretta solo in corrispondenza di brusche variazioni nella geometria della sezione liquida trasversale, ma in tali circostanze il raffittimento del rilievo geometrico limita le possibili fonti di imprecisione.

Il modello utilizzato, è *HEC-RAS River Analysis System*, elaborato dall'*Hydrologic Engineering Center dell'US Army Corps of Engineers degli U.S.A.* (versione 6.3).

Il modello è stato progettato per contenere vari moduli di analisi idraulica monodimensionale: analisi di moto permanente, analisi del moto vario, analisi del trasporto solido in letto mobile e analisi di qualità delle acque. Tra le diverse componenti quella utilizzata nel presente studio consiste nell'algoritmo di calcolo idraulico per la determinazione delle variazioni della portata, della velocità, della larghezza del pelo libero della corrente e di altre caratteristiche idrauliche del moto durante la propagazione verso valle della corrente idrica di portata nota, per effetto della resistenza d'attrito dell'alveo e della presenza di opere interagenti con la corrente (ponti e traverse). Nell'ambito di questo lavoro inoltre sono state svolte solo simulazioni a moto permanente (*steady flow*).

Il modello calcola i profili di moto permanente per corsi d'acqua monodimensionali in regime di corrente lenta, veloce o mista ed è in grado di calcolare e gestire i profili per una rete di canali naturali o artificiali in un sistema ad albero od a singolo ramo. Le relazioni fondamentali della formulazione matematica sono le equazioni dei moti permanenti nell'espressione classica dell'equazione monodimensionale dell'energia secondo Manning. Le perdite valutate sono quelle d'attrito (secondo Manning), valutate per le diverse parti della sezione trasversale (canale centrale, sponde laterali, golene e parti di golene), e quelle causate dalla contrazione o espansione delle sezioni (tramite un coefficiente che moltiplica la variazione dell'altezza cinetica). L'equazione della quantità di moto è utilizzata nei punti dove il profilo del pelo libero subisce brusche variazioni ovvero in regime misto nel passaggio da corrente veloce a corrente lenta oppure, in corrispondenza di ponti, traverse e sottopassi o alla confluenza di più rami di una rete.

Il modello richiede, oltre alla geometria generale del corso d'acqua, profili e sezioni trasversali, i dati di portata in ingresso nella prima sezione di monte e, eventualmente in tutte le sezioni dove sono disponibili dati di portata, ed infine le condizioni al contorno dipendenti dal regime di moto della corrente.

L'equazione generale dell'energia è la seguente:

$$Y_2 + Z_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + h_e$$

dove:

Y_1, Y_2 altezza idrometrica nella sezione 1 e 2,

Z_1, Z_2 quota del fondo alveo nelle sezioni 1 e 2,

V_1, V_2 velocità medie (portata totale/area bagnata) nelle sezioni 1 e 2,



α_1, α_2 coefficienti di velocità,

h_e perdita di carico nel tratto 1-2.

La perdita di carico tra due sezioni trasversali è calcolata come somma delle perdite distribuite per attrito e di quelle concentrate per effetto di contrazioni o allargamenti bruschi di sezione secondo l'equazione:

$$h_e = LS_f + C \left(\alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} - \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} \right)$$

dove:

L distanza pesata, in funzione della portata, tra le due sezioni trasversali 1 e 2,

S_f pendenza motrice tra le sezioni 1 e 2,

C coefficiente di perdita di carico per contrazione o allargamento di sezione.

La pendenza d'attrito S_f è valutata secondo l'espressione di Manning:

$$S_f = n^2 Q |Q| / (A^2 R^{4/3})$$

dove n è il coefficiente di resistenza di Manning (che vale anche $n=1/c$ con c di Gauckler-Strickler) ed R è il raggio idraulico.

L'equazione differenziale del moto viene integrata per via numerica, attraverso un insieme di fasi iterative che vengono ripetute più volte per affinarne la risoluzione; per la determinazione dei profili è quindi necessario fornire le condizioni iniziali di portata in ingresso e le condizioni al contorno in funzione del regime di moto.

Ai fini dell'applicazione del modello per l'analisi idrodinamica del torrente Quisa, è stato innanzitutto necessario definire la geometria del corso d'acqua, ossia il tracciato, le sezioni rilevate dalla campagna di rilievi condotta ed i manufatti di attraversamento. È stato modellato, oltre all'intero tracciato del torrente Quisa fino allo sbocco nel Brembo, il tratto terminale del torrente Rigos.

Le portate inserite nel modello sono state ricavate dalla precedente modellazione idrologica per tempi di ritorno T_r di 20, 100 e 200 anni, in ipotesi di alta saturazione del terreno antecedente l'evento meteorico. Nello specifico sono state assegnate le portate al colmo degli idrogrammi restituiti dal modello SWMM in tutte quelle sezioni in cui si verificano variazioni del flusso (p.es in corrispondenza della confluenza con affluenti, a livello degli scarichi e nei punti di esondazione; nei primi due casi si verificano delle immissioni di portata, nel terzo una sottrazione).

La scabrezza d'alveo è stata espressa attraverso il coefficiente di Gauckler-Strickler, definendo scabrezze differenti per alveo e golene. I valori utilizzati sono stati mutuati dalla letteratura e dall'esperienza e confermati dalle indagini e dai rilievi sul campo.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno, esse dipendono dalla tipologia di moto atteso in alveo; in



presenza di corrente lenta (condizioni subcritiche) è sufficiente assegnare le condizioni al contorno a valle; al contrario in caso di corrente veloce occorre invece specificare le condizioni al contorno a monte. Nel caso in esame, le pendenze dei torrenti Quisa e Rigos e le portate di progetto sono tali da mantenere la corrente in condizioni subcritiche; è stata tuttavia rilevata, in corrispondenza di alcuni manufatti di attraversamento, la possibilità del passaggio locale della corrente in condizioni supercritiche, con successiva formazione di risalto idraulico. Per tali ragioni, si è assunto nella modellazione un regime di corrente di tipo misto, che necessita la definizione di condizioni al contorno sia a monte che a valle. Per questo lavoro nei contorni interni al dominio (p.es nei nodi idraulici definiti da confluenza con affluenti) sono state assegnate condizioni di continuità di portata tra i rami della confluenza.

La condizione al contorno nella sezione di monte è stata assunta pari ai tiranti ed alle velocità di moto uniforme che si instaurerebbero in tale sezione; si tratta ovviamente di un'approssimazione, che influenza però solo localmente i risultati nelle sezioni in prossimità della condizione stessa.

Come condizione al contorno di valle sono stati invece attribuiti, alla sezione del fiume Brembo immediatamente a valle della confluenza del t. Quisa, i tiranti di moto uniforme che si instaurerebbero per un evento di piena del fiume Brembo con TR pari a 5 anni, concomitante ai diversi eventi di piena considerati per il t. Quisa. Tale ipotesi è ritenuta sufficientemente cautelativa per tener conto dello sfasamento temporale tra colmi di piena tra i due corsi d'acqua.

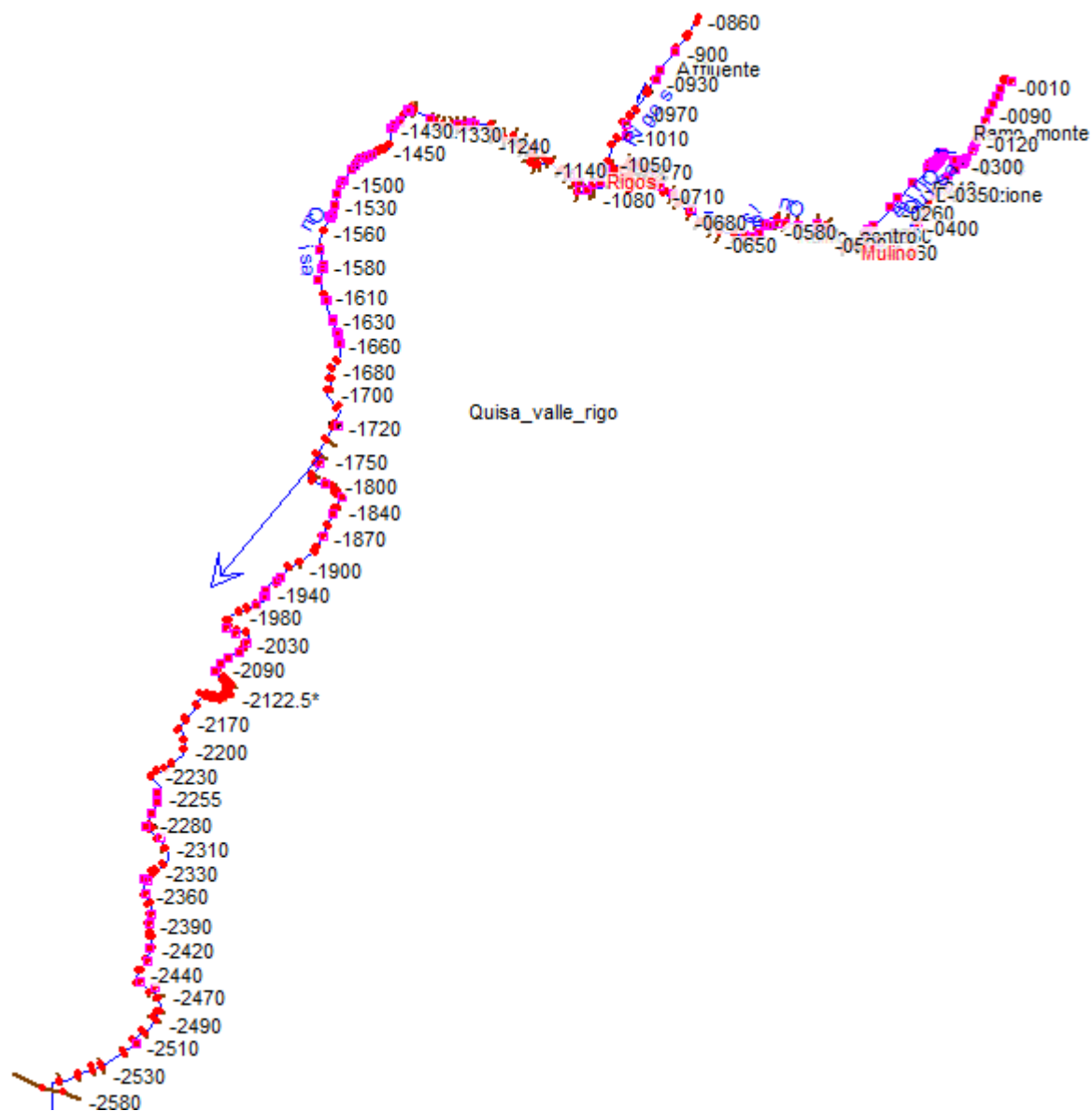


FIGURA 7- SCHEMATIZZAZIONE MODELLISTICA IN HEC-RAS DEL T. QUISA E DEL T. RIGOS

5 RISULTATI DELLE MODELLAZIONI

L'analisi idraulica ha indagato nello specifico il tratto terminale del torrente Quisa per un tratto di lunghezza pari a circa 1.5 km, partendo a monte del Ponte di via Merena e procedendo verso valle sino alla confluenza nel fiume Brembo. Sono stati modellati due scenari:

- 1) stato di fatto, a partire dalle informazioni geometriche ricavate dai rilievi topografici;
- 2) stato di progetto dopo l'esecuzione dei lavori di demolizione e ricostruzione del ponte di Via Merena, dei lavori di demolizione e ricostruzione per l'adeguamento del muretto in sponda idraulica sinistra con franco di 1m, delle movimentazioni di terra lungo via W.A. Mozart atte a garantire 1m di franco in sponda idraulica destra e del sopralzo dello stradello in area golenale nell'area denominata "isolotto" con franco idraulico di 0.5m.

Si riporta di seguito un estratto della planimetria di progetto (cfr. elaborato *B.3 - Planimetria generale di progetto*).

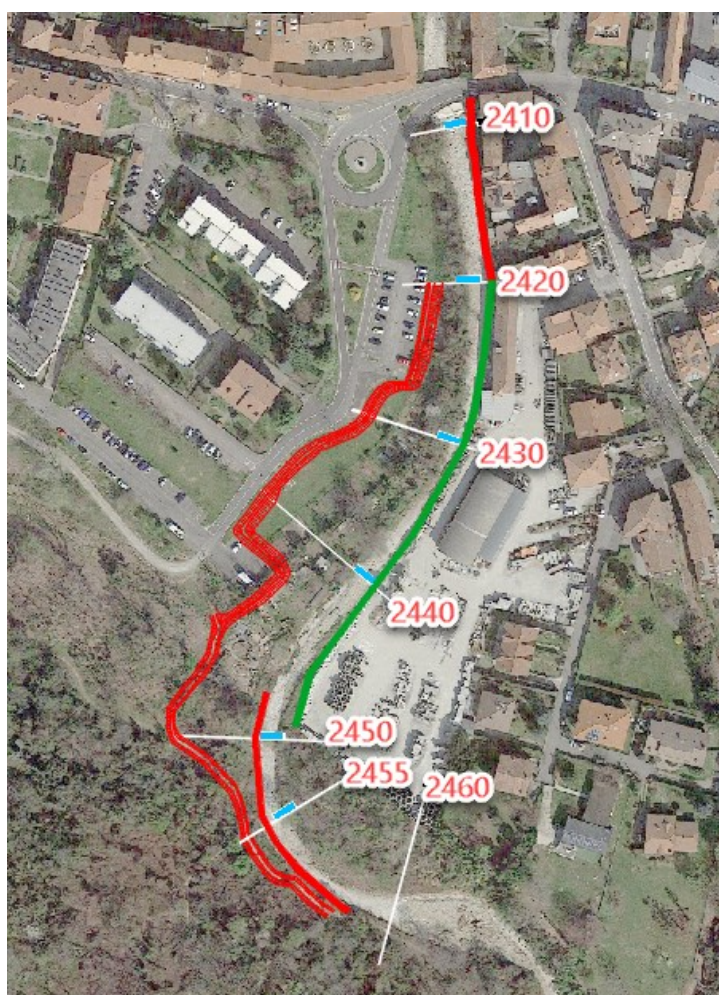


FIGURA 8 - ESTRATTO PLANIMETRICO DELLA PLANIMETRIA DI PROGETTO

I risultati ottenuti dalle modellazioni mostrano come ci sia un sostanziale miglioramento del profilo di rigurgito in corrispondenza del ponte di nuova realizzazione a campata unica, nonostante non sia possibile garantire 1.5m di franco come da normativa, evitando fenomeni di tipo esondativo.

In questo scenario, inoltre, si denota un aumento dei livelli idrometrici a valle del ponte, causato dal corretto funzionamento del manufatto di attraversamento e dall'assenza di fenomeni esondativi in corrispondenza dello stesso; tale condizione è permessa dalla demolizione e ricostruzione del nuovo ponte.

Il quadro topografico aggiornato ha inoltre evidenziato che l'estradosso della campata di destra risulta essere 0.60 m più alto rispetto a quella di sinistra e perciò i livelli che si instaurano in corrispondenza del ponte sono maggiori rispetto a quelli evidenziati nello studio del 2016.

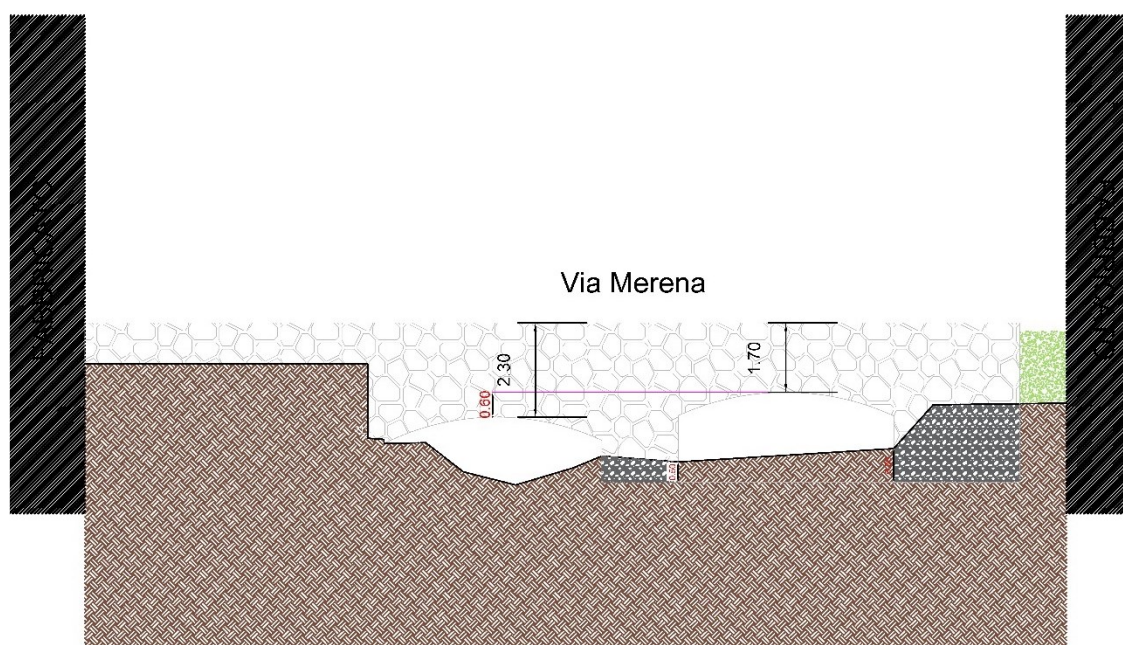


FIGURA 9 - SCHEMA GRAFICO DEL PONTE DI VIA MERENA ALLO STATO DI FATTO

Si riportano nei sottoparagrafi seguenti i profili di rigurgito e sezioni in corrispondenza dell'attraversamento, nell'ordine, nello stato di fatto, nello stato di progetto ed il confronto tra i due scenari per i tempi di ritorno considerati.

5.1 RISULTATI NELLO STATO DI FATTO

Di seguito si riporta il profilo di rigurgito della piena per i diversi tempi di ritorno considerati; si può notare come per TR 20,100 e 200 il ponte di Via Merena venga sormontato. Il quadro topografico aggiornato ha



infatti evidenziato che l'estradosso della campata di destra risulta essere 0.60 m più alto rispetto a quella di sinistra e perciò i livelli che si instaurano in corrispondenza del ponte sono maggiori rispetto a quelli evidenziati nello studio del 2016.

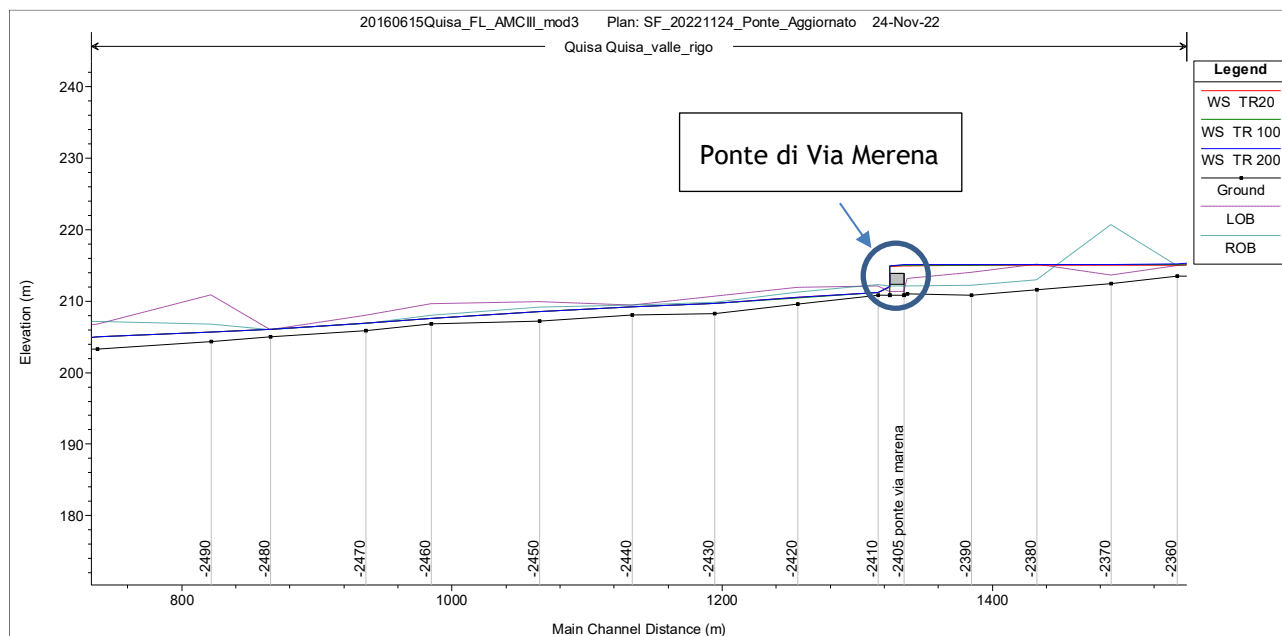


FIGURA 10 - PROFILO DI RIGURGITO DEL TORRENTE QUISA PER I DIVERSI TEMPI DI RITORNO CONSIDERATI

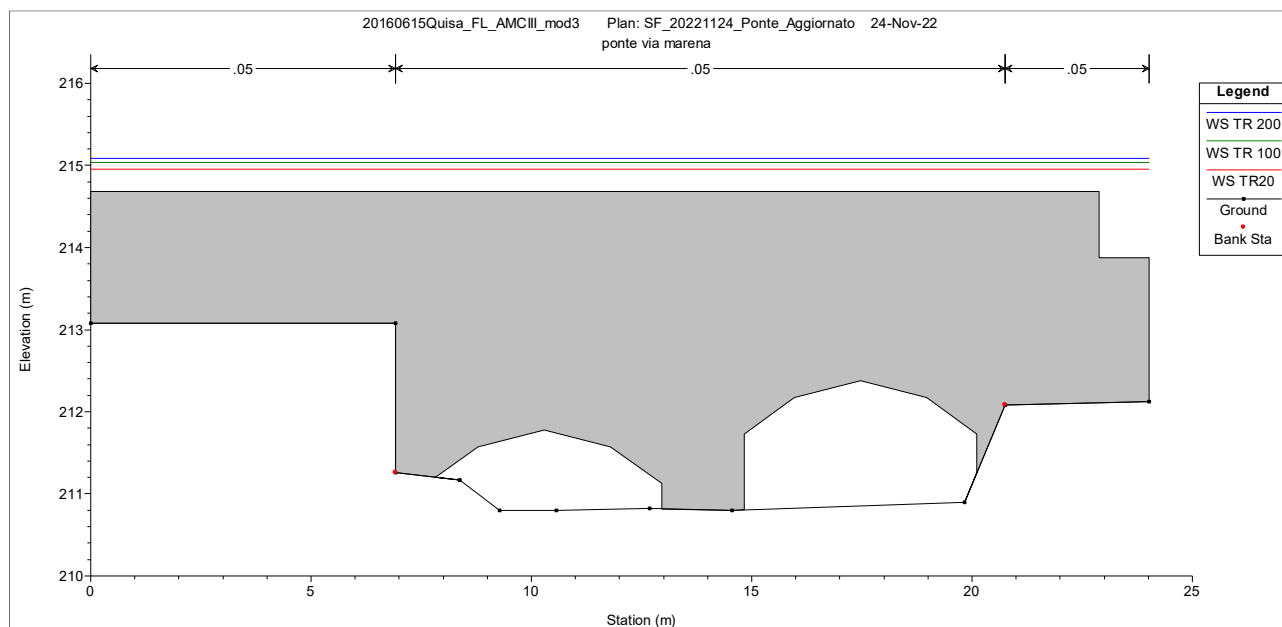


FIGURA 11 - LIVELLI IDROMETRICI IN CORRISPONDENZA DEL PONTE DI VIA MERENA NELLO STATO DI FATTO



5.2 RISULTATI NELLO STATO DI PROGETTO

Si riportano di seguito i risultati derivanti dalla modellazione della configurazione di progetto, la quale, nello specifico consiste nei seguenti interventi:

1. Demolizione e ricostruzione del ponte di Via Merena mediante la realizzazione di un manufatto a campata unica con quota di intradosso minima pari a 213.10 m s.l.m.;
2. In sponda destra, movimentazione di terra al fine di garantire 1m di franco idraulico in corrispondenza della strada rispetto ai livelli instauratisi per la piena bisecolare in via W.A. Mozart fino a raccordarsi con lo stradello presente nell'area denominata "Isolotto" (cfr. B.4 Planimetria generale di progetto);
3. In sponda sinistra, demolizione e ricostruzione del muretto in massi fino alla sezione 2420 con 1m di franco e indicazione di sopralzo spondale dalla sezione 2420 alla 2460 eventualmente a carico del privato proprietario dell'area adiacente al t. Quisa;
4. Infine, sopralzo dello stradello nell'area "Isolotto" affinché la sommità risulti avere un franco pari a 50 cm rispetto ai livelli idrometrici corrispondenti alle piene per TR200.

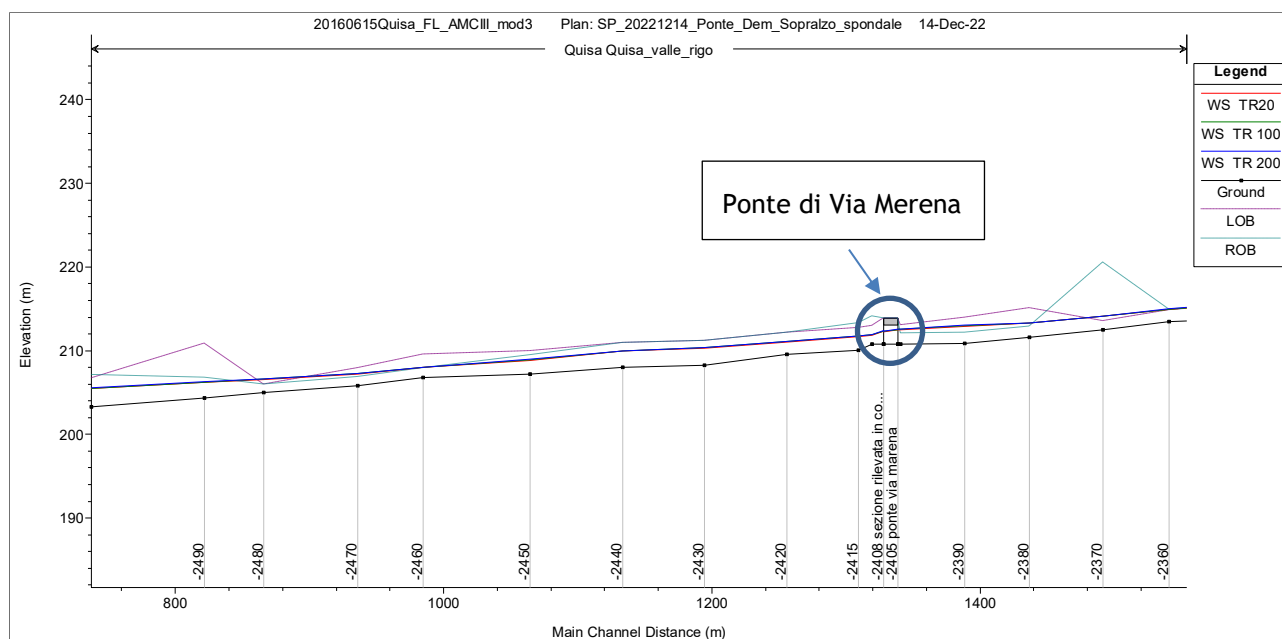


FIGURA 12 - PROFILO DI RIGURGITO DEL TORRENTE QUISA PER I DIVERSI TEMPI DI RITORNO CONSIDERATI NELLO STATO DI PROGETTO

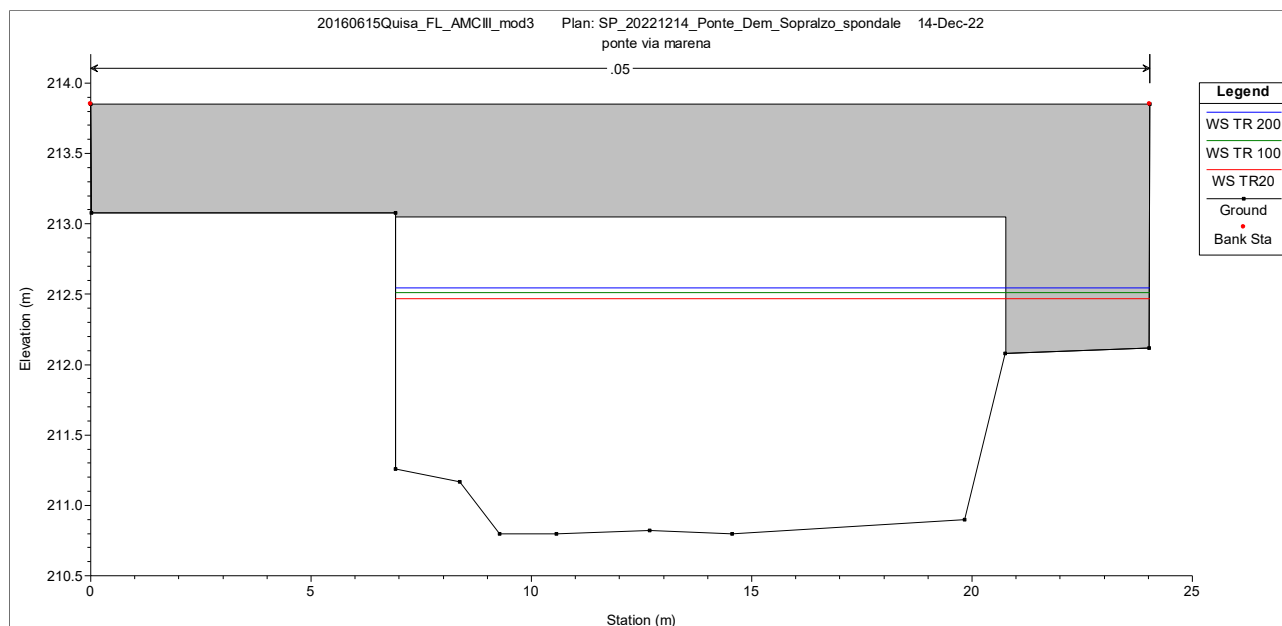


FIGURA 13 - LIVELLI IDROMETRICI IN CORRISPONDENZA DEL PONTE DI VIA MERENA NELLO STATO DI PROGETTO

Come si denota dall'immagine sopra riportata, in corrispondenza del ponte di Via Merena le portate per i diversi tempi di ritorno considerati transitano permettendo il corretto funzionamento del manufatto, in particolare per TR200 si ha un franco residuo di circa 50 cm.



6 CONCLUSIONI

Come si evince dai risultati delle modellazioni numeriche riportate nei precedenti capitoli, nella configurazione di progetto si denota un marcato miglioramento del deflusso della piena.

In particolare, si nota come pur non riprofilando il fondo alveo del torrente Quisa, la nuova sezione di progetto del Ponte di Via Merena permette il transito della piena per TR200 con un franco residuo di 50 cm; inoltre, le opere di difesa spondale previste a valle del manufatto di attraversamento permettono il normale deflusso della piena a valle del ponte mantenendo il franco di 1m in destra e sinistra idraulica per il tratto di intervento previsto.

Si riporta di seguito a titolo dimostrativo una tabella comparativa delle portate e dei livelli instauratisi nelle diverse sezioni modellate negli scenari allo stato di fatto e di progetto.

TABELLA 3 - TBELLA RIEPILOGATIVA DELLE PORTATE E DEI LIVELLI NELLO STATO DI FATTO E DI PROGETTO

Sezione	Portate (m ³ /s)		Livelli idrometrici (m s.l.m.)	
	<i>Stato di fatto</i>	<i>Stato di progetto</i>	<i>Stato di fatto</i>	<i>Stato di progetto</i>
2380	51.3	51.3	215.13	213.33
2390	51.3	51.3	215.11	213.04
2400	53.2	53.2	215.08	212.58
2410	23.4	53.2	211.17	211.93
2420	23.3	53.2	210.49	211.10
2430	25.05	53.2	209.70	210.35

Come si può notare dalla tabella sopra riportata, si hanno delle sostanziali differenze tra lo stato di fatto e di progetto: in particolare, a differenza dello stato di fatto, la configurazione di progetto presenta una sezione di deflusso che permette il transito della Q200 senza esondazioni in corrispondenza del manufatto di attraversamento, riscontrando perciò gli stessi valori di portata a monte e valle del ponte; questo aspetto implica perciò un aumento dei livelli idrometrici a valle del ponte rispetto alla configurazione nello stato di fatto.