

NUOVA VIABILITA' DI ACCESSO ALLO STABILIMENTO SANPELLEGRINO S.P.A. IN COMUNE DI ZOGNO

**PROVVEDIMENTO AUTORIZZATIVO SPORTELLO UNICO PER LE
ATTIVITA' PRODUTTIVE (S.U.A.P.)**
ai sensi dell'art. 8 del D.P.R. 07/09/2010 N. 160

Committente:

SANPELLEGRINO S.P.A
Località Ruspino
24016 - San Pellegrino Terme (BG)

Progettista:



Engineering and Technical Services

S.p.A.

Via A. Mazzi, 32 - 24018 Villa d'Almè - (BG)
T. +39 035/ 63 13 111 F. +39 035/ 54 50 66
info@etseng.it - www.etseng.it
Sistema Qualità Certificato UNI EN ISO 9001:2008
Certificato numero: SQ00461 CSICERT

Titolo elaborato:

**IDRAULICA
RELAZIONE IDRAULICA**

Numero elaborato

010M

Scala: -

Data: 24/05/2018

Commessa: 0142-2017

Redatto	Verificato	Approvato D.T.	Descrizione	Data	Rev.
Fustinoni	Locatelli	Parietti	EMISSIONE	24/05/2018	00

SOMMARIO

1	PREMESSA.....	2
2	DETERMINAZIONE PORTATE DI PIENA	4
3	MODELLO IDRAULICO.....	7
3.1	Generalità	7
3.2	Modello del Fiume Brembo	7
3.3	Condizioni al contorno.....	8
3.4	Risultati	9
3.5	Conclusioni e interventi di sistemazione idraulica	13
	ALLEGATO A – MODELLAZIONE IDRAULICA	16
A.1.	Parametri idraulici e geometrici.	17
A.2.	Profili di pelo libero della corrente	19
A.3.	Visione tridimensionale del modello	20
	ALLEGATO B – MODELLO DI CALCOLO.	21

1 PREMESSA

La strada di collegamento tra la ex strada statale 470 della Valle Brembana (SS 470), ora strada provinciale ex SS 470 della Valle Brembana (SP ex SS 470), ed il nuovo ponte sul fiume Brembo, devono essere oggetto di “verifica di compatibilità idraulica” in quanto le opere in progetto interferiscono con le fasce A e B del PAI.

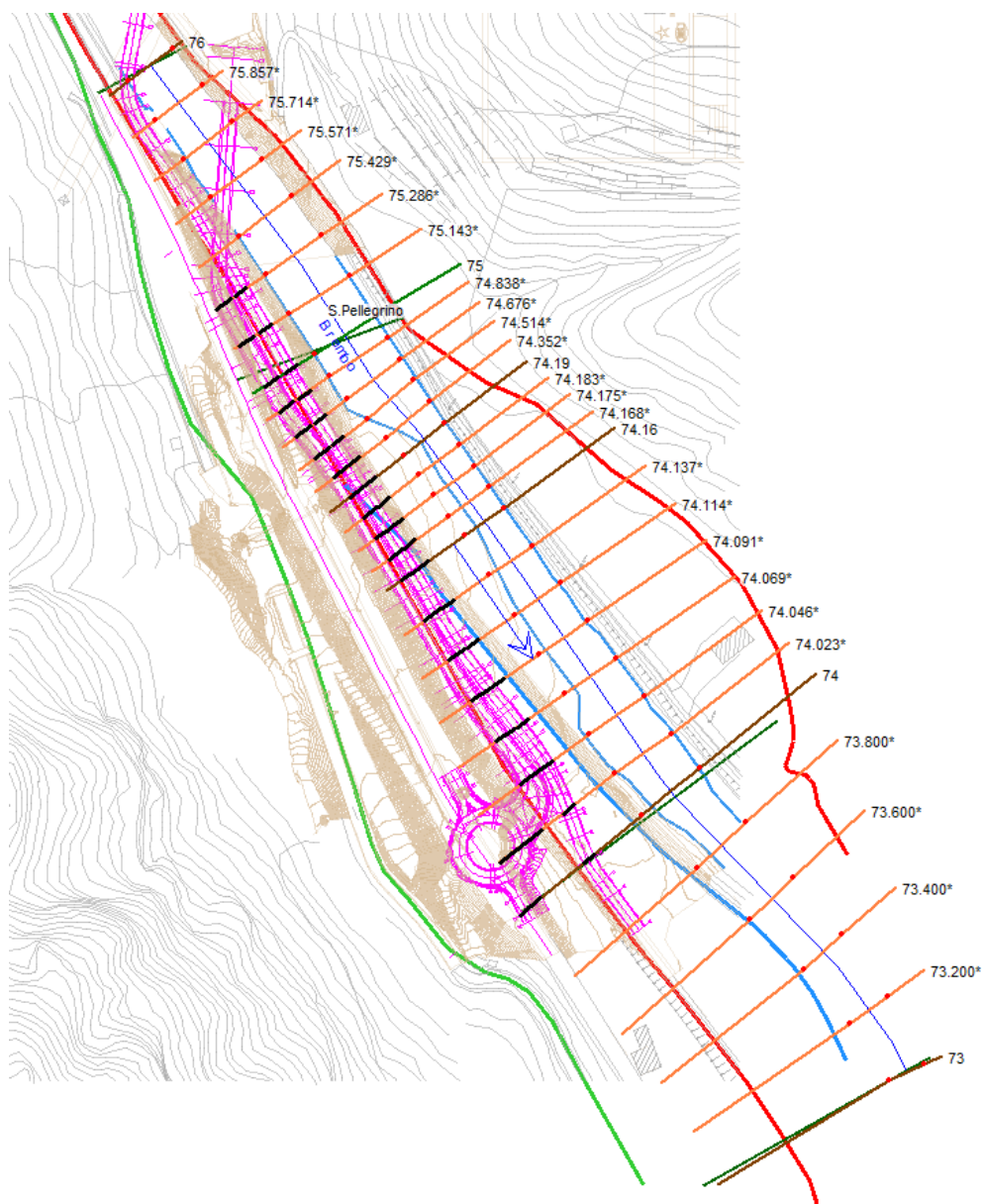
In modo particolare, dalla nuova rotatoria (rotatoria esclusa) alla progressiva 225, il nuovo sedime stradale è compreso all'interno della fascia B del PAI, e per un breve tratto, dalla progressiva 225 alla progressiva 290 le nuove opere interferiscono direttamente con la fascia A del PAI ove, per definizione, la fascia A è:

la fascia di deflusso della piena corrispondente alla porzione di alveo sede della piena calcolata con tempo di ritorno di 200 anni, ove fluisce almeno l'80% di tale portata, ovvero costituita “dall'insieme delle forme fluviali riattivabili durante la piena”, la fascia B è la fascia di esondazione (piena con tempo di ritorno di 200 anni) estesa al territorio con quota topografica corrispondente al livello idrico della piena di riferimento, “ovvero sino alle opere idrauliche esistenti o programmate, dimensionate per la stessa portata” mentre la fascia C comprende la “porzione di territorio esterna alla precedente (Fascia B), che può essere interessata da inondazione al verificarsi di eventi di piena più gravosi di quelli di riferimento” ovvero da piene storiche registrate (se superiore ai 200 anni), o, in assenza di dati, dalla piena con un tempo di ritorno di 500 anni.

La normativa di riferimento è la Direttiva n°4 dalla Autorità di Bacino del Fiume Po approvata con deliberazione del Comitato Istituzionale n. 2 dell'11 maggio 1999 e aggiornata con deliberazione n. 10 del Comitato Istituzionale del 5 aprile 2006 “Direttiva contenente i criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico all'interno delle fasce A e B” come previsto dall'art.38 “Interventi per la realizzazione di opere pubbliche o di interesse pubblico” delle Norme di attuazione del Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI).

Premesso quanto sopra, lo Studio di compatibilità idraulica della bretella di collegamento tra la SP470 ed il nuovo ponte sul fiume Brembo è stato articolato nei seguenti punti:

- determinazione delle portate al colmo di piena nella sezione di interesse con tempo di ritorno di 200 e 500 anni;
- modellazione idraulica monodimensionale della tratta fluviale di fiume Brembo per la verifica di eventuali interferenze delle nuove opere
- previsione di eventuali interventi per la mitigazione del rischio idraulico



2 DETERMINAZIONE PORTATE DI PIENA

Ai fini di quanto sopra sono state considerate con attenzione le risultanze degli esistenti studi idraulici ed idrologici su bacino del fiume Brembo. In particolare con lo “Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del fiume Adda nel tratto da Olginate alla confluenza in Po, del fiume Brembo nel tratto da Lenna alla confluenza in Adda e del fiume Serio nel tratto da Parre alla confluenza in Adda” del 2004-2005, l’Autorità di Bacino del fiume Po ha tra l’altro aggiornato ed approfondito le stime delle portate di piena del fiume Brembo da Lenna fino alla confluenza in Adda. In tale studio l’ampia raccolta dati effettuata ha consentito di desumere le stime delle portate al colmo di assegnato tempo di ritorno sulla base di un campione di osservazioni di dimensioni molto maggiori rispetto a quello ordinario.

Le risultanze dello Studio sopra citato e l’attuazione della Direttiva 2007/60/CE è riassunta nel documento “Profili di piena dei corsi d’acqua del reticolo principale - MARZO 2016” redatto dall’Autorità di bacino del Fiume Po all’interno del “Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni” ai sensi dell’Art. 7 della Direttiva 2007/60/CE e del D.lgs. n. 49 del 23.02.2010, che contiene le tabelle dei valori di portata al colmo nelle sezioni più significative dei corsi d’acqua del reticolo principale del bacino del fiume Po e, ove disponibili, le tabelle dei profili longitudinali dei valori delle massime quote idriche e delle massime velocità medie nelle sezioni fluviali, relative agli scenari di evento assunti per la delimitazione delle mappe di pericolosità di alluvione e al quadro conoscitivo disponibile alla data della redazione delle stesse (22 dicembre 2013).

Questo studio, fornisce per il caso in esame, i valori di portata di piena associati a vari tempi di ritorno ed i livelli idrici corrispondenti a dette portate. Inoltre, lo studio citato è stato corredato da una dettagliata campagna di rilievi topografici in quote assolute appoggiate a caposaldi fisici dell’AIPO che saranno prese a riferimento nello studio di nostra competenza. Infatti le opere in progetto sono ubicate tra la sezione topografica n°75 e la n°74 della rete AIPO (Geoportale AIPO).

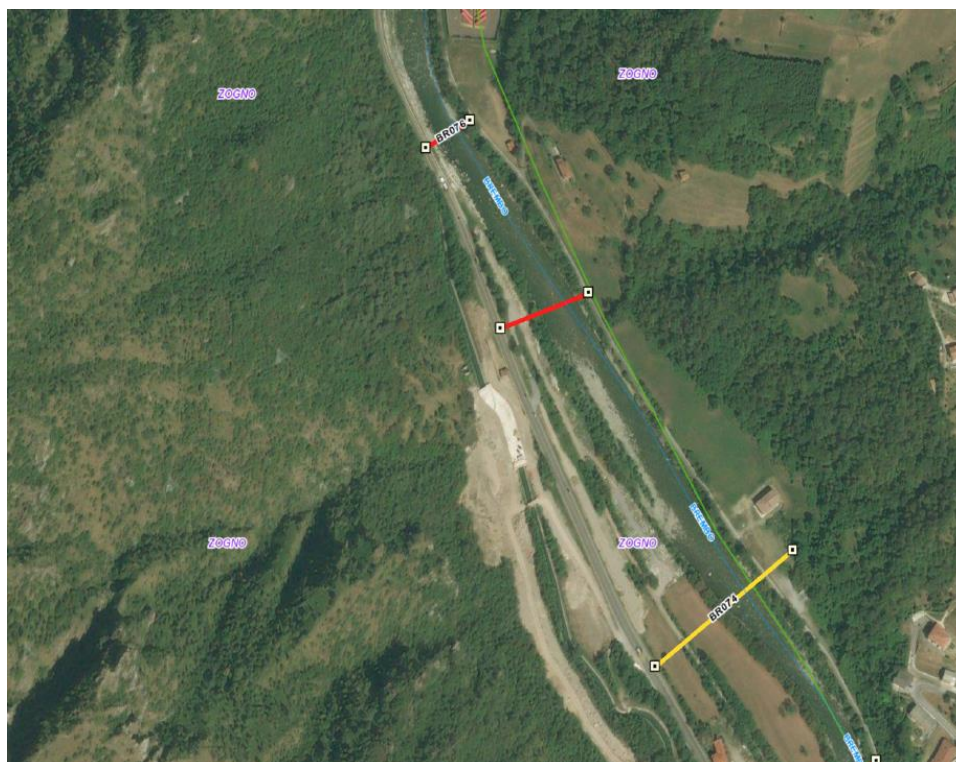


Figura 1 - Sezioni topografiche n°75 e n°74 della rete AIPO nella zona di interesse a sud dell'abitato di San Pellegrino

In particolare nella tabella seguente (corrispondente alla tab. 5 del documento originale) vengono riassunte le portate dei più importanti corsi d'acqua del bacino del fiume Adda.

Tab. 4.5: portate di piena per i corsi d'acqua principali del bacino dell'Adda (Adda, Mera, Brembo, Serio)

Tab. 45: portata di piena per l'Adda d'acqua principale del bacino dell'Adda (Adda, Mera, Brembo, Corno)

Bacino	Corso d'acqua		Sezione		Superficie	Q20	Q200	Q500	Idrometro
		Progr. (km)	Cod.	Denomin.	km ²	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	Denominazione
Adda	Adda sopralac.	20.610	403	Le Prese	577	460	720	820	Adda a Le Prese
Adda	Adda sopralac.	43.257	337	Tirano (monte Poschiavino)	906	530	830	950	
Adda	Adda sopralac.	46.451	330	Tirano (valle Poschiavino)	1056	600	920	1050	
Adda	Adda sopralac.	57.289	309	Teglio	-	630	960	1090	Adda a Teglio
Adda	Adda sopralac.	73.778	269	Sondrio (valle Mallero)	1932	980	1430	1600	
Adda	Adda sopralac.	91.681	238	Masino	2344	1050	1530	1710	
Adda	Adda sopralac.	113.674	201	Fuentes	2598	1070	1560	1750	Adda a Fuentes
Adda	Mera	34.170	40	Chiavenna	267	630	870	960	
Adda	Mera	35.975	35	Valle confluenza Liro	461	1000	1500	1700	
Adda	Mera	47.891	2	Confluenza in l. di Mezzola	541	1070	1540	1730	
Adda	Brembo	18.970	135	Lenna	155	330	560	670	
Adda	Brembo	20.488	121	Scalvino	315	490	820	980	
Adda	Brembo	25.423	107	Camerata Cornello	-	610	1010	1210	Brembo a Camerata Cornello
Adda	Brembo	32.646	085_1	San Pellegrino	-	730	1220	1470	
Adda	Brembo	83.722	64	Zogno	-	810	1350	1620	
Adda	Brembo	53.531	31	Ponte Briolo	765	950	1580	1900	Brembo a Ponte Briolo
Adda	Brembo	65.474	5	Confluenza in Adda	964	950	1580	1900	

Figura 2

Tali portate sono state utilizzate per l'effettuazione di calcoli mirati alla definizione delle fasce Fluviali nell'ambito del Piano di Assetto Idrogeologico (PAI); per questo sono in genere citate semplicemente come "Portate PAI".

La sezione più significativa per il caso in esame è quella di San Pellegrino, ubicata poco più a nord a quelle di interesse. A tale sezione corrispondono le seguenti "Portate PAI", che sono state prese come riferimento per il presente studio.

	Q20 [m3/s]	Q200 [m3/s]	Q500 [m3/s]
Brembo a San Pellegrino	730	1220	1470

Tabella 1 – Portate di piena fornite dall'Autorità di Bacino del F. Po sul fiume Brembo nella sezione di San Pellegrino.

Per quanto riguarda l'area interessata dalla nuova strada il PGRA individua aree più ridotte rispetto al PAI e quindi il grado dei vincoli non varia rispetto a quanto sviluppato nella specifica verifica della compatibilità idraulica.

3 MODELLO IDRAULICO

3.1 Generalità

Sulla scorta di tutti gli elementi di cui sopra, la modellazione dell'onda di piena lungo l'alveo fluviale è stata eseguita mediante il codice di calcolo monodimensionale Hec-Ras (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System); si è proceduto così alla elaborazione dei livelli di piena associati alle stesse ed alla verifica della compatibilità idraulica delle opere ovvero alla dimostrazione della sicurezza e della funzionalità delle infrastrutture e comunque alla garanzia che non sia pregiudicata la sicurezza delle persone.

HEC-RAS è un software appositamente sviluppato per le applicazioni su alvei naturali, che permette di effettuare calcoli in condizioni sia di moto permanente, sia di moto vario, schematizzando la corrente come monodimensionale. È chiaro che il moto di una corrente di piena in un alveo fluviale è sicuramente bidimensionale, tuttavia ampie applicazioni di letteratura hanno mostrato che l'ipotesi di moto monodimensionale conduce spesso ad accettabili risultati senza eccessivi appesantimenti di calcolo. HEC-RAS permette di ricostruire l'andamento del pelo libero, tenendo conto di tutte le strutture presenti nell'alveo, quali: ponti, briglie, sfioratori laterali, argini, ostacoli vari, chiuse, etc.

3.2 Modello del Fiume Brembo

La geometria del corso d'acqua viene rappresentata mediante la schematizzazione dell'andamento planimetrico del fiume e l'inserimento di sezioni idrauliche rilevate lungo l'asta: a tal proposito, come citato nel capitolo precedente, sono state inserite le sezioni fluviali n°74 e n°75 della rete AIPO comprendenti l'area di studio e le sezioni n°73 e n°76 più a valle e a monte della zona interessata per meglio definire le condizioni al contorno.

Le suddette sezioni sono state inoltre integrate tramite un rilievo di dettaglio che ha permesso la creazione di un DTM del bacino lungo la sponda destra idraulica del fiume interessata dalla nuova viabilità stradale e ferroviaria, permettendo così di inserire altre 2 sezioni nella zona di maggior pertinenza dello studio.

Sono state inserite un totale di 6 sezioni su una lunghezza complessiva di 720 m, partendo circa 200m più a valle della rotatoria in progetto sino a circa 120 m a monte dell'area su cui insiste l'opera di nuova viabilità in progetto. Successivamente, tramite un processo di interpolazione, si è infittito il numero di sezioni al fine di meglio discretizzare l'asta fluviale, diminuendo ulteriormente le distanze tra ciascuna sezione di calcolo.

Per ciascuna sezione sono stati assegnati coefficienti di scabrezza variabili ed appropriati, espressi con la formulazione di Manning; in particolare, si è assunto:

- lungo il tronco fluviale un valore medio pari a $n=0.035 \text{ s/m}^{1/3}$.
- lungo le sponde esterne all'alveo principale (fascia di esondazione) un valore variabile da $n=0.04$ a $0.05 \text{ s/m}^{1/3}$.
- lungo la sponda di destra idraulica dell'alveo, dove è presente un'area di deposito alluvionale per una lunghezza di circa 200 m con vegetazione fissa e presenza di grossi arbusti ed anche alcuni alberi un valore medio pari a $n=0.045 \text{ s/m}^{1/3}$.

3.3 Condizioni al contorno

Il tratto in esame presenta in genere situazioni di corrente lenta e in una prima analisi la condizione al contorno (livello dell'acqua in una opportuna sezione di controllo) è stata ricercata a valle. Tuttavia, nel tratto centrale, in corrisponde del restringimento di modesta entità causato dall'isolotto presente in sponda destra, la corrente passa in veloce e quindi per poter simulare correttamente anche questa situazione si è scelto di considerare anche una condizione al contorno di monte.

Quali condizioni al contorno, si sono adottate le altezze di piena fornite direttamente dai dati AIPO per ciascun tempo di ritorno considerato. Si sono inoltre considerate, come condizione al contorno a confronto, le altezze di moto uniforme calcolate nelle sezioni estreme del fiume. Tali valori sono stati individuati assumendo una pendenza dell'alveo pari allo 0.8 % a monte e all'1 % a valle (pendenza media dell'alveo = 0.6 %) senza tuttavia determinare differenze apprezzabili nell'area centrale dell'asta fluviale. Le condizioni al contorno sono infatti assegnate ad una distanza tale da interferire il meno possibile con la zona di studio.

Per la simulazione dei deflussi in condizioni di moto permanente sono stati utilizzati la portata relativa al tempo di ritorno di 200 anni, oltre a quelle con 20 e 500 anni secondo i valori riportati nella precedente Tabella 1.

3.4 Risultati

Si è svolta la modellazione del tronco fluviale allo stato attuale e successivamente si è inserito anche il rilevato stradale della bretella e della linea tramviaria della TEB in progetto.

Si sono effettuate varie simulazioni relative a valori crescenti di portata: soffermiamo l'attenzione sulle portate corrispondenti al tempo di ritorno di 200 anni, pari a 1220 m³/s.

Dalle simulazioni compiute sullo stato di fatto, la corrente si presenta subcritica (lenta), mentre nel tratto centrale, in corrispondenza del restringimento causato dall'isolotto presente in sponda destra (seppur non particolarmente evidente), l'alveo inciso tende a restringersi ed il flusso idrico viene maggiormente ostruito dalla presenza della fitta vegetazione; ciò comporta il passaggio ad una corrente supercritica, con incremento dei livelli idrici più a monte per poter ottenere l'energia necessaria al deflusso nella tratta ostruita dall'isolotto. I tratti a corrente supercritica presentano velocità maggiori e livelli idrici, per contro, inferiori. In allegato si riportano i profili idrici della corrente per le diverse portate considerate.

Allo stato attuale, per valori di portata di poco inferiori a quelli della piena duecentennale il deflusso idrico rimane pressoché sempre contenuto all'interno dell'alveo fluviale principale; con la piena duecentennale si verificano esondazioni principalmente nell'area di espansione in sponda sinistra (mediamente più bassa di oltre 1 m rispetto alla sponda destra) mentre la sponda destra viene lievemente interessata solamente con eventi di piena superiori ai 200 anni di tempo di ritorno.

La bretella stradale ed il futuro tramvia della TEB sono entrambi ubicati in sponda destra, la prima a ridosso della sponda più esterna su cui scorre la SP exSS470, mentre il secondo a ridosso del ciglio fluviale.

La bretella stradale presenta un andamento altimetrico molto variabile passando a sud dal collegamento mediante rotatoria alla Strada Provinciale exSS470 ad una quota di circa

339 m s.l.m (ben al di sopra dal piano della sponda fluviale) sino ad un tratto centrale con quote appena al di sopra del piano spondale destro per tornare a salire nuovamente verso nord per collegarsi al ponte in progetto di attraversamento del fiume Brembo.

La tramvia della TEB presenta invece un profilo longitudinale crescente regolarmente con le pendenze del fiume da sud verso nord.

Le infrastrutture viabilistiche in progetto sono state considerate inserendo, per ciascuna sezione fluviale interessata, delle "ostruzioni" che modellano la presenza delle opere stesse.

Nelle Figure successive si riportano le sezioni fluviali rispettivamente nella zona nord, centrale e sud delle infrastrutture in progetto.

Si può osservare che il rilevato della bretella stradale rimane sempre al di sopra dei tiranti idrici, mentre la sponda del rilevato ferroviario (lato fiume) potrebbe, se pur in maniera limitata, interagire con eventi di piena eccezionale.

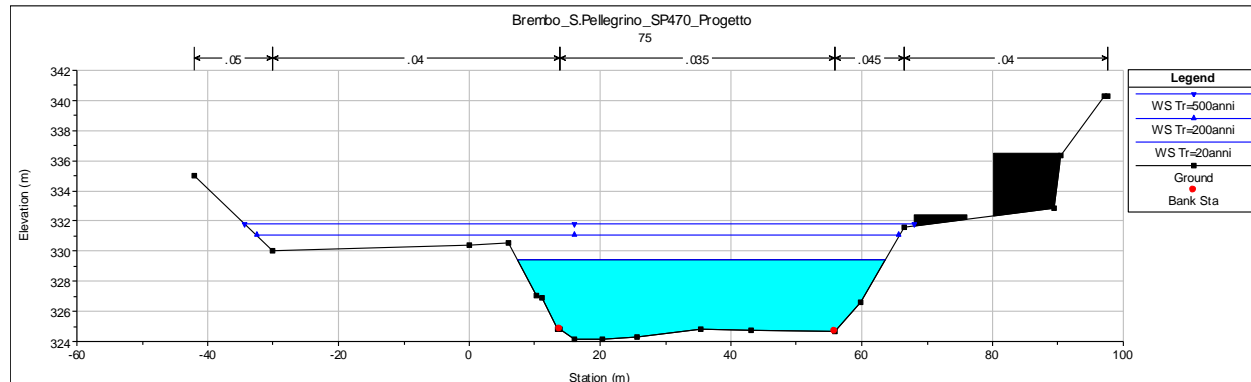


Figura 3

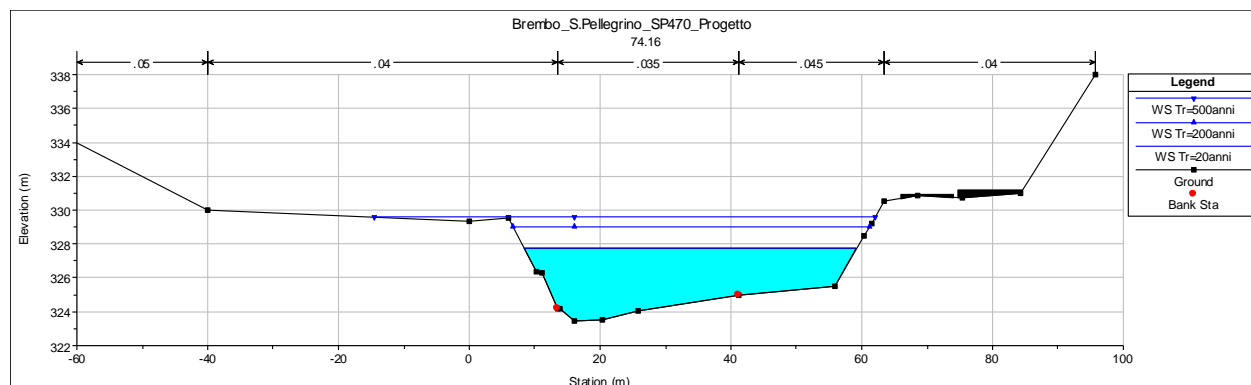


Figura 4

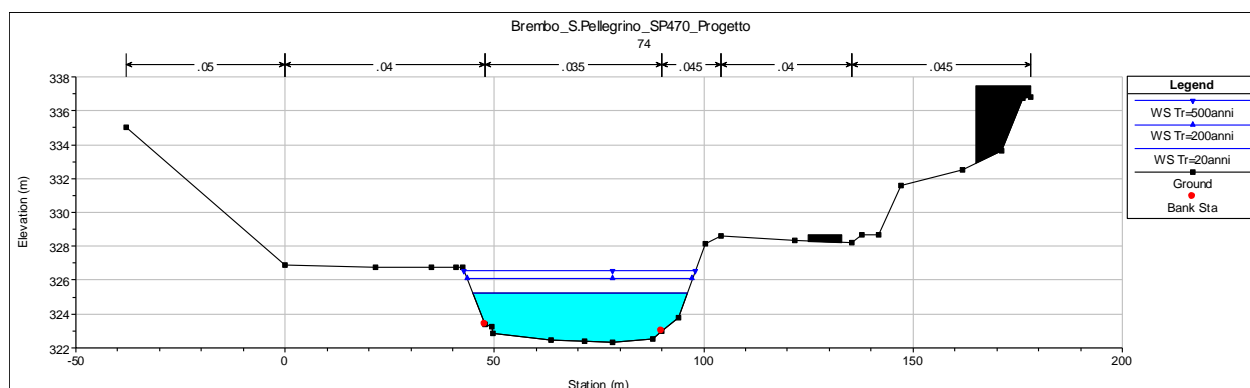


Figura 5 - sezioni fluviali (vista da monte vs valle) rispettivamente nella zona nord, centrale e sud delle infrastrutture in progetto per le portate di piena con $Tr = 20, 200, 500$ anni.

Si noti in figura 5 che la portata di piena di 730 m³/s (ovvero con $Tr=20$ anni) risulta sempre abbondantemente contenuta nell'alveo principale.

In Figura 6 si riporta invece un confronto fra la stessa sezione di monte n°75 allo stato attuale ed in progetto, dove si può notare che, con il rilevato tramviario, il livello della piena cinquecentennale rimane pressoché identico a quello dello stato attuale. Ciò ad indicare che l'interazione fiume / infrastruttura ferroviaria è praticamente nulla anche con $Tr=500$ anni e che la realizzazione di quest'ultima non innalza i tiranti idrici.

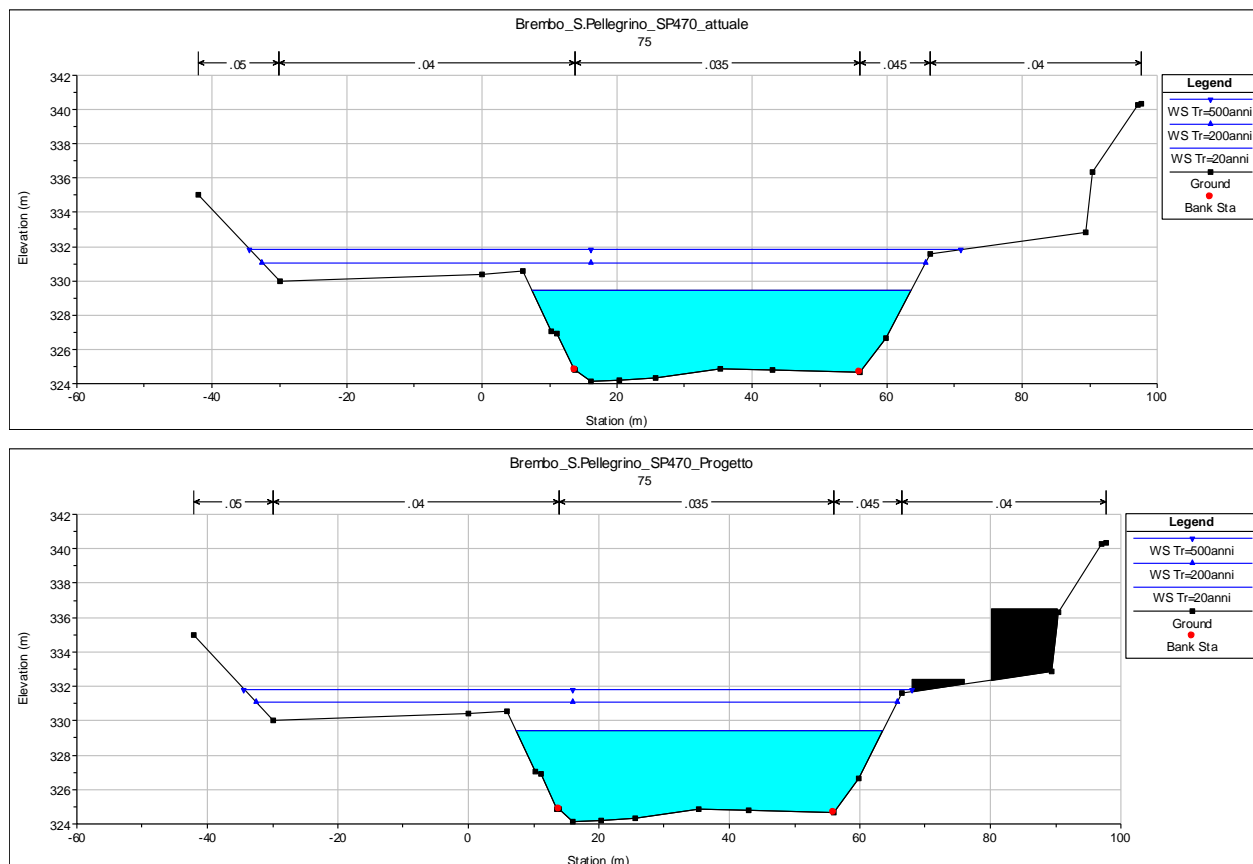


Figura 6 – confronto fra modellazione dell'onda di piena allo stato attuale ed in progetto alla sez. n°75.

3.5 Conclusioni e interventi di sistemazione idraulica

Nel presente studio si sono svolti diversi scenari di simulazione dell'asta fluviale del Brembo con portate al colmo per vari tempi di ritorno da cui si evince che la piena duecentennale non esonda sulla sponda destra il cui piano è interessato dalle opere in progetto, potendo espandersi sulla sponda sinistra posta ad una quota inferiore.

Eventi di piena catastrofica ($Tr=500$ anni) non interagiscono con il rilevato tranviario.

Nelle immagini successive si riporta il profilo longitudinale della corrente idrica allo stato attuale ed in seguito al miglioramento del deflusso in corrispondenza dell'isolotto esistente. In caso di piena cinquecentennale, si noti che il deflusso idrico migliora nella tratta interessata dall'intervento di sistemazione fluviale ed il rigurgito che si verifica a monte si attenua rispetto all'alveo attuale.

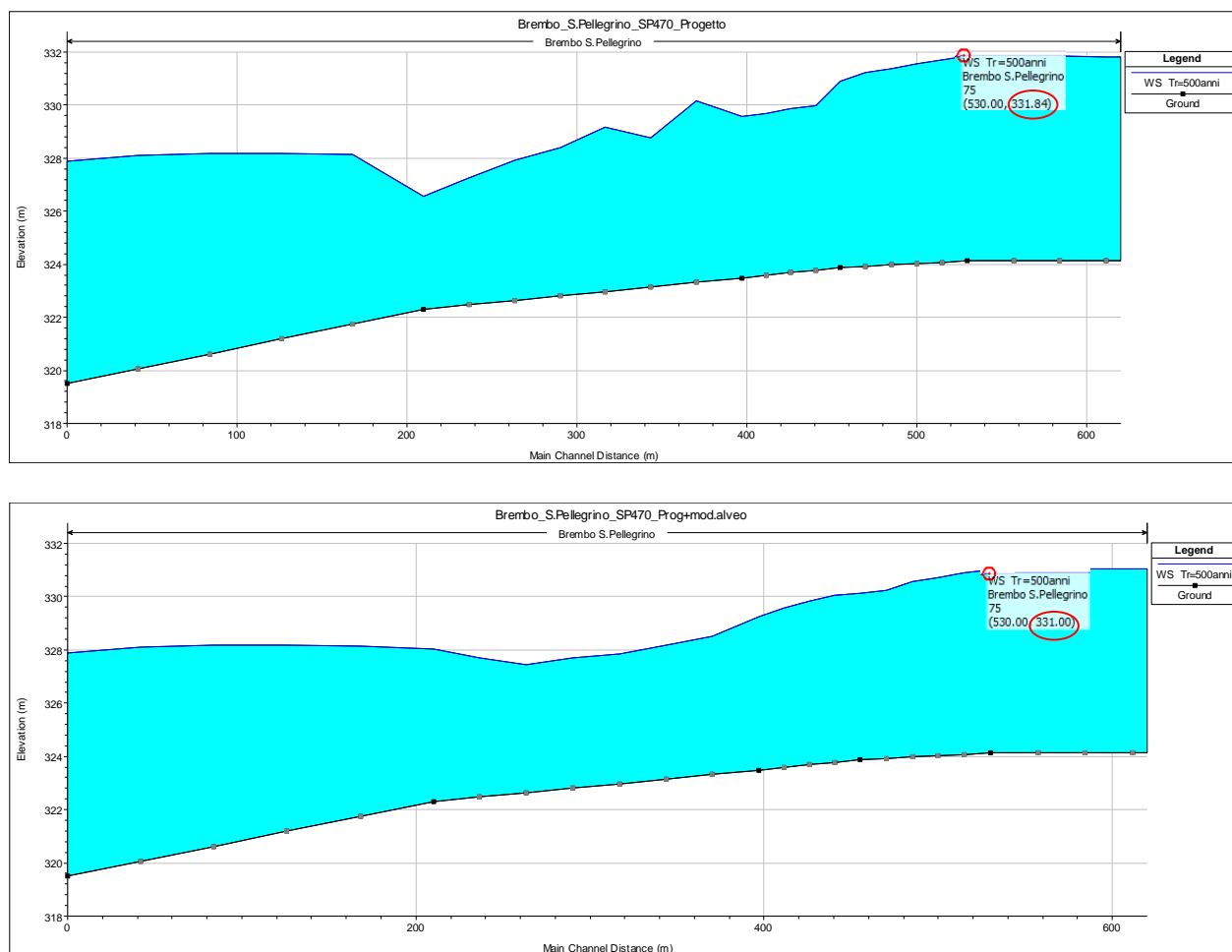


Figura 7 – Confronto fra modellazione dell'onda di piena cinquecentennale con alveo allo stato attuale ed in seguito ad interventi di mitigazione fluviale.

Poiché un tratto della nuova strada di accesso è in parte in fascia “B” e in piccola parte in fascia “A” del PAI, sono previsti i seguenti interventi di sistemazione idraulica in sponda destra del fiume Brembo, che perseguono l’obiettivo di migliorare le condizioni esistenti di funzionalità idraulica e sono stati individuati dopo aver sentito l’UTR di Bergamo della Regione Lombardia.

Gli interventi di sistemazione idraulica si riconducono a:

Intervento di manutenzione straordinaria delle opere di difesa spondale esistenti in sponda destra e ammalorate, in prossimità del tratto interessato dai lavori della nuova viabilità. In particolare il muro in sassi esistente verrà ripulito e ripristinato integralmente.

Intervento di sistemazione dell’alveo fluviale dove si è creato un isolotto lungo il lato destro idraulico dell’alveo inciso, mediante asportazione di materiale fluviale e pulizia della fitta vegetazione esistente, al fine di regolarizzare il più possibile la corrente idrica e di migliorare il naturale deflusso delle acque.

Gli interventi sopra descritti sono rappresentati nell’elaborato grafico 011M.

ALLEGATO A – MODELLAZIONE IDRAULICA

A.1. Parametri idraulici e geometrici.

Stato di progetto

Sezione	Tempo ritorno	Portata (m ³ /s)	Quota fondo alveo (m)	Quota pelo libero (m)	Altezza en.totale (m)	Cadente piezometrica (m/m)	Velocità media (m/s)	Area bagnata (m ²)	Numero Froude
76	Tr=20anni	730	324.11	329.44	330.68	0.004439	5.02	155.48	0.77
76	Tr=200anni	1220	324.11	330.66	332.67	0.005257	6.44	206.53	0.87
76	Tr=500anni	1470	324.11	331.09	333.58	0.005909	7.18	225.37	0.93
75	Tr=20anni	730	324.13	329.44	329.96	0.001625	3.3	240.19	0.48
75	Tr=200anni	1220	324.13	331.06	331.8	0.001622	4	365.55	0.5
75	Tr=500anni	1470	324.13	331.84	332.59	0.001461	4.09	443.34	0.48
74.19	Tr=20anni	730	323.88	328.27	329.65	0.00696	5.57	152.22	0.94
74.19	Tr=200anni	1220	323.88	329.5	331.41	0.006728	6.65	217.3	0.97
74.19	Tr=500anni	1470	323.88	330.9	332.34	0.003756	5.9	316.43	0.76
74.16	Tr=20anni	730	323.48	327.75	329.22	0.007659	5.82	147.97	0.98
74.16	Tr=200anni	1220	323.48	329	330.98	0.007125	6.86	213.76	1
74.16	Tr=500anni	1470	323.48	329.58	331.88	0.007115	7.4	248.54	1.02
74	Tr=20anni	730	322.3	325.26	327.07	0.012014	6.07	126.62	1.18
74	Tr=200anni	1220	322.3	326.08	328.95	0.013581	7.68	169.48	1.31
74	Tr=500anni	1470	322.3	326.57	329.7	0.012502	8.05	196.6	1.28
73	Tr=20anni	730	319.5	324.76	325.95	0.004258	5.28	171.49	0.76
73	Tr=200anni	1220	319.5	326.86	327.83	0.002485	5.11	334.01	0.62
73	Tr=500anni	1470	319.5	327.88	328.7	0.001864	4.85	433.87	0.55

Tabella A.1.1

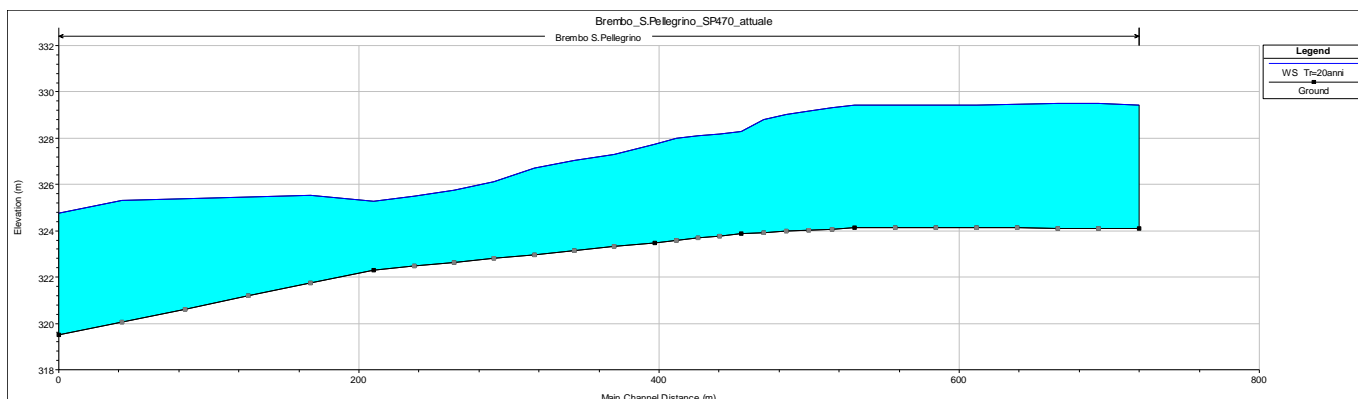
Stato di progetto con mitigazione

Sezione	Tempo ritorno	Portata (m ³ /s)	Quota fondo alveo (m)	Quota pelo libero (m)	Altezza en.totale (m)	Cadente piezometrica (m/m)	Velocità media (m/s)	Area bagnata (m ²)	Numero Froude
76	Tr=20anni	730	324.11	329.02	330.57	0.006321	5.6	138.44	0.9
76	Tr=200anni	1220	324.11	330.28	332.63	0.006729	6.95	190.33	0.97
76	Tr=500anni	1470	324.11	330.84	333.56	0.00686	7.51	214.14	1
75	Tr=20anni	730	324.13	328.87	329.56	0.002501	3.77	208.66	0.58
75	Tr=200anni	1220	324.13	330.32	331.32	0.002542	4.61	294.42	0.61
75	Tr=500anni	1470	324.13	331	332.11	0.002452	4.88	359.43	0.61
74.19	Tr=20anni	730	323.88	328.28	329.27	0.004741	4.52	172.06	0.74
74.19	Tr=200anni	1220	323.88	329.58	331.03	0.00473	5.49	241.77	0.78
74.19	Tr=500anni	1470	323.88	330.12	331.78	0.004824	5.92	274.46	0.8
74.16	Tr=20anni	730	323.48	327.45	328.91	0.008872	5.46	141.06	0.98
74.16	Tr=200anni	1220	323.48	328.67	330.66	0.008009	6.42	204.35	0.98
74.16	Tr=500anni	1470	323.48	329.24	331.44	0.007628	6.78	235.07	0.97
74	Tr=20anni	730	322.3	325.77	327.02	0.006632	5.06	153.28	0.9
74	Tr=200anni	1220	322.3	326.98	328.76	0.006272	6.08	226.65	0.92
74	Tr=500anni	1470	322.3	328.02	329.34	0.003771	5.42	333.44	0.74
73	Tr=20anni	730	319.5	324.76	325.95	0.004258	5.28	171.49	0.76
73	Tr=200anni	1220	319.5	326.86	327.83	0.002485	5.11	334.01	0.62
73	Tr=500anni	1470	319.5	327.88	328.7	0.001864	4.85	433.87	0.55

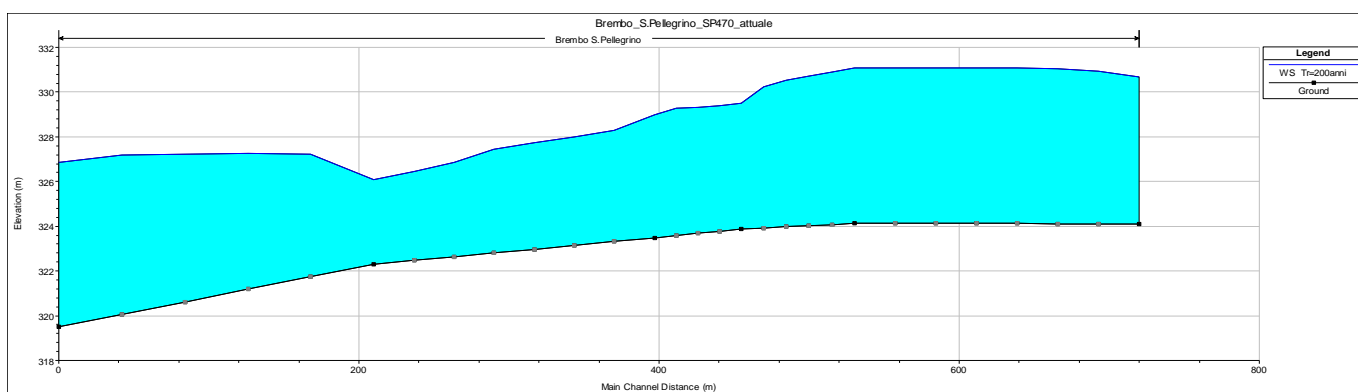
Tabella A.1.2

Tabella A.1.1 e A.1.2 – Parametri geometrici ed idraulici caratteristici del Fiume Brembo nelle principali sezioni di calcolo, per portate con tempo di ritorno di 20, 200, 500 anni allo stato di progetto (A.1.1) e allo stato di progetto a seguito della mitigazione

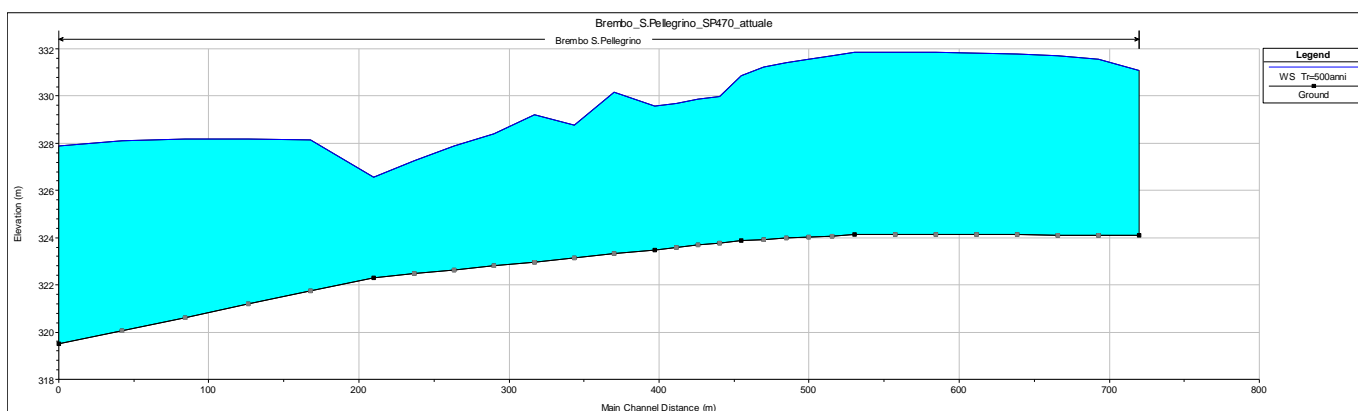
A.2. Profili di pelo libero della corrente



Profilo di pelo libero del fiume Brembo per la portata con tempo di ritorno di 20 anni

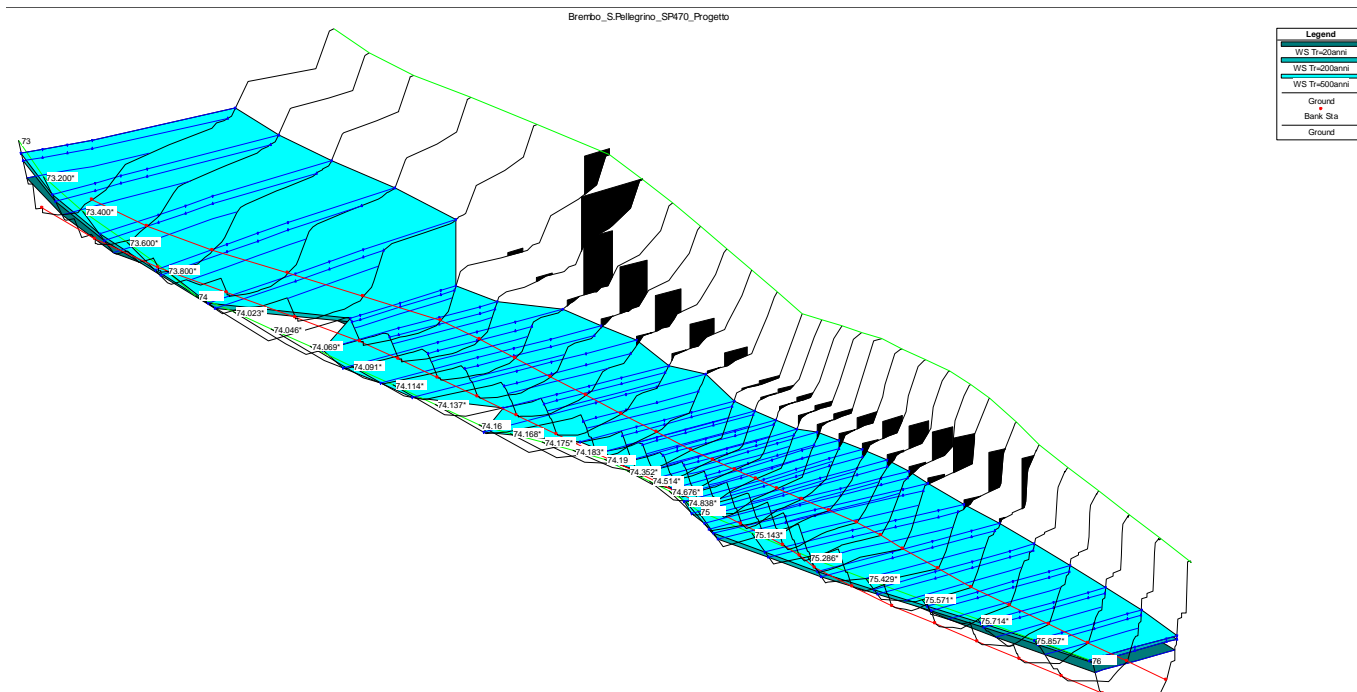


Profilo di pelo libero del fiume Brembo per la portata con tempo di ritorno di 200 anni



Profilo di pelo libero del fiume Brembo per la portata con tempo di ritorno di 500 anni

A.3. Visione tridimensionale del modello



Visione tridimensionale del fiume Brembo nella zona interessata dalle infrastrutture viarie tra i comuni di Zogno e San Pellegrino. In sponda destra sono inseriti gli ingombri della bretella stradale e della tramvia TEB.

ALLEGATO B – MODELLO DI CALCOLO.

Per la simulazione del profilo idrico di piena della corrente nei corsi d'acqua viene adottato un codice di calcolo che opera in condizioni di moto stazionario monodimensionale (portata costante e geometria variabile). Il software di calcolo utilizzato è HEC – RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System), è stato sviluppato all'Hydrologic Engineering Center dall'U.S. Army Corps of Engineers.

La procedura utilizzata nei calcoli si basa sulla soluzione dell'equazione monodimensionale dell'energia; le perdite di carico valutate sono quelle distribuite (equazione di Manning) e quelle localizzate causate dalla contrazione o espansione della vena liquida (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; ciò si verifica: in condizione di regime misto, nei punti di passaggio da corrente veloce a lenta, in corrispondenza dei ponti e dei tombini oppure nei pressi delle confluenze fra corsi d'acqua.

Nei calcoli possono essere considerati gli effetti di punti singolari quali ponti, tombini di varia forma e con aperture singole o multiple, soglie sfioranti e paratoie; inoltre si possono confrontare e valutare direttamente gli effetti indotti da una sistemazione idraulica (riprofilatura o arginatura) riportando sulle stesse sezioni trasversali del corso d'acqua la traccia del pelo libero nelle condizioni post – operam e ante – operam.

Utilizzando il procedimento iterativo il software determina il profilo di moto permanente

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

risolvendo l'equazione:

dove:

Y_1, Y_2 : altezza d'acqua nella sezione trasversale;

Z_1, Z_2 : quota del fondo nella sezione trasversale;

V_1, V_2 : velocità media nella sezione trasversale;

α_1, α_2 : coefficiente di Coriolis

g : accelerazione gravitazionale 9.8 m/s²

h_e : perdita di carico totale tra le sezioni 1 e 2

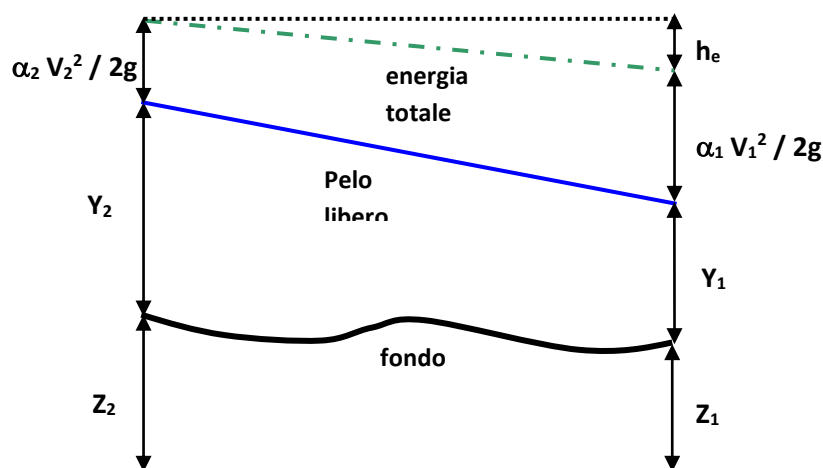


Fig. B.1: Bilancio dell'energia.

Le perdite di carico tra due sezioni comprendono sia la dissipazione localizzata che quella distribuita; l'equazione è la seguente:

$$h_e = L S_f + C \left| \frac{\alpha V_2^2}{2g} - \frac{\alpha V_1^2}{2g} \right|$$

ove è:

L : distanza tra le due sezioni contigue 1 e 2;

S_f : pendenza della linea dell'energia

C : coefficiente per le perdite di carico localizzate

Per la determinazione del valore della pendenza motrice S_f il programma calcola la conduttanza totale della sezione trasversale sommando la conduttanza di tutte le parti della sezione trasversale comprese fra due punti contigui. La conduttanza può essere così definita:

$$Q = K \cdot \sqrt{S_f}$$

dove:

$$K = \frac{1.486 \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}}}{n} = \text{conduttanza della porzione di golena considerata;}$$

n = coefficiente di scabrezza di Manning;

A = area della sezione idrica;

R = raggio idraulico.

Per la determinazione delle perdite di carico localizzate il programma valuta la variazione del termine cinetico tra due sezioni contigue e lo moltiplica per il coefficiente di contrazione/espansione della vena liquida.

Considerando la figura 1 e indicando con $WS = Z + Y$ il livello della corrente, la procedura seguita dal programma per la definizione del profilo idrico risulta così schematizzabile:

- Si assume un valore di primo tentativo $WS_{ass.2}^{1^{\wedge}}$ nella sezione incognita (sezione 2) e lo si pone pari alla quota nota della sezione 1 (WS_1);

- dal rilievo topografico delle sezioni si determinano per le golene e l'alveo inciso area

e perimetro bagnati e raggio idraulico: A_j , P_j , R_j e la somma $A = \sum_{j=1}^3 A_j$;

- si calcolano le conduttività idrauliche (conduttanza) delle 3 parti K_j e la loro somma $KTOT$;

- si calcolano i valori $\frac{k_j^3}{A_j^2}$ e $\sum_{j=1}^3 \frac{K_j^3}{A_j^2}$;

- si determinano il coefficiente α e la velocità media della corrente (U) come:

$$\alpha = \frac{\left(\sum_{j=1}^3 A_j \right)^2}{\left(\sum_{j=1}^3 K_j \right)^3} \sum_{j=1}^3 \frac{K_j^3}{A_j^2} \quad U = \frac{Q}{\sum_{j=1}^3 A_j} \quad \text{ed} \quad \alpha \frac{U^2}{2g} ;$$

e quindi si ricava il termine cinetico

- si calcolano le perdite distribuite determinando la pendenza motrice

$$S_f = \left(\frac{Q}{K_{TOT}} \right)^2 ;$$

- si calcolano le perdite concentrate di allargamento e restringimento;
- dall'equazione dell'energia si determina la WS calcolata, secondo:

$$WS_{calc2}^{1^{\wedge}} = WS_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + \Delta h_e - \left(\alpha \frac{V^2}{2g} \right)_2 ;$$

- si determina l'errore della prima iterazione come: $err^{1^{\wedge}} = WS_{ass2}^{1^{\wedge}} - WS_{calc2}$;
- si assume come valore di secondo tentativo una quota del pelo libero pari a quella dell'iterazione precedente diminuita del 70% dell'errore: $WS_{ass2}^{2^{\wedge}} = WS_{ass2}^{1^{\wedge}} - 0.7 * err^{1^{\wedge}}$;
- si ripetono i passi precedenti calcolando una $WS_{calc2}^{2^{\wedge}}$ (di secondo tentativo) e si determina l'errore di secondo tentativo come: $err^{2^{\wedge}} = WS_{ass2}^{2^{\wedge}} - WS_{calc2}^{2^{\wedge}}$.

Se l'errore è minore della tolleranza (0.003 m di default) ci si ferma al secondo valore di pelo libero calcolato, altrimenti si arriva a convergenza col metodo della secante.

ⁱ La seguente procedura è formulata per il caso di corrente lenta: è quindi nota la quota di valle, WS_a . Per una corrente veloce si segue la stessa procedura procedendo da monte.