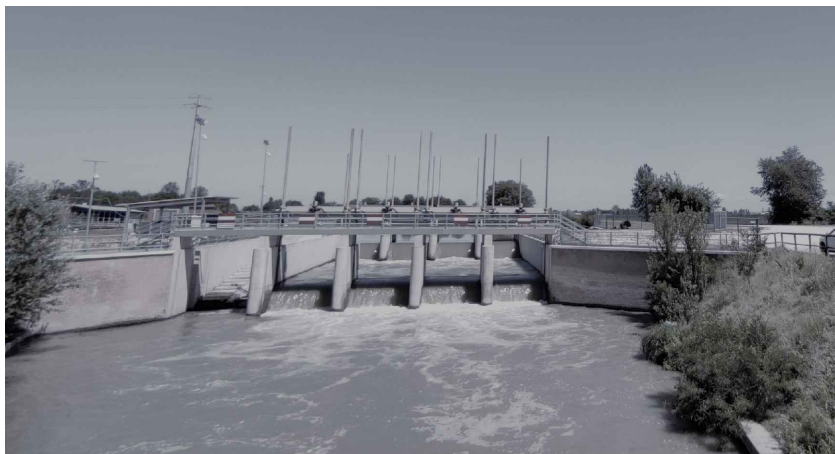




LIFEEL

LIFE19 NAT/IT/000851

Misure urgenti nel Mediterraneo Orientale per la conservazione a lungo termine dell'anguilla europea (*Anguilla anguilla*)



ACTION A3 Progettazione di passaggi per anguille per riaprire oltre 1.000 km di habitat per la migrazione delle ceche verso monte

PROGETTO ESECUTIVO

Data revisione:	Indice revisione:	Natura della modifica:
Settembre 2022	00	Prima emissione
Dicembre 2023	01	Aggiorn.DLgs 36/2023
Aprile 2024	02	Aggiornamento

Titolo elaborato:

Relazione idrologica e idraulica

Ns. Rif.	Data	Scala	Dim. foglio
20S30	Settembre 2022	--	A4

DIRETTORE TECNICO:

Dott. Ing. Massimo Sartorelli

PROGETTAZIONE:

Dott. Ing. Beniamino Barenghi



Address: Via Repubblica 1 - 21020 - Varano Borghi (VA)

Tel: +39 0332.961097

Mail to: info@graia.eu - graia@pec.it

Redazione

*Dr. Cesare M. Puzzi, Dr.ssa Stefania Trasforini,
Dr.ssa Alessandra Ballerio*

Verifica

Dott. Ing. Massimo Sartorelli

Approvazione

Dott. Ing. Massimo Sartorelli



Timbro e firma:





SOMMARIO

PREMESSA	2
1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE DELLE AREE DI INTERESSE E BREVE DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI DI PROGETTO	3
1.1 IL TRATTO DI PIANURA DEL FIUME PANARO	4
1.1.1 <i>Inquadramento generale</i>	4
1.1.2 <i>La traversa di Bondeno: stato di fatto e progetto</i>	5
1.1.3 <i>La traversa di Santa Bianca: stato di fatto e progetto</i>	7
1.1.4 <i>La traversa di Nonantola</i>	9
1.2 IL PO DI VOLANO E IL CANALE NAVIGABILE	11
1.2.1 <i>Inquadramento generale</i>	11
1.2.2 <i>Il sostegno di Valpagliaro: stato di fatto e progetto</i>	12
1.2.3 <i>Il sostegno di Tieni: stato di fatto e progetto</i>	14
1.2.4 <i>Il sostegno di Valle Lepri</i>	16
2 COMPATIBILITÀ CON GLI STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE DELL'ASSETTO IDROLOGICO.....	18
3 VERIFICA DELLA COMPATIBILITÀ IDRAULICA	23
3.1 LE OPERE OGGETTO DI VERIFICA DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA	23
3.2 ANALISI IDROLOGICA – INDIVIDUAZIONE DELLA PORTATA DI PIENA DI PROGETTO	24
3.3 ANALISI IDRAULICA – COSTRUZIONE DEL MODELLO	27
3.3.1 <i>Oggetto della modellazione idraulica e strumento di calcolo utilizzato</i>	27
3.3.2 <i>Aspetti teorici</i>	27
3.3.3 <i>Geometria</i>	30
3.4 APPLICAZIONE DEL MODELLO IDRAULICO E RISULTATI	34
3.4.1 <i>Regime idraulico</i>	34
3.4.2 <i>Applicazione del modello idraulico – Configurazione attuale</i>	34
3.5 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	41



PREMESSA

La presente relazione costituisce la relazione idrologica e idraulica del progetto esecutivo relativo alla realizzazione di **sei dispositivi per la risalita delle anguille** nel bacino del Fiume Po.

Il progetto costituisce parte dell'Azione A.3 del **Progetto Life Natura "LIFEEL" LIFE19NAT/IT/000851**, "*Urgent measures in eastern Mediterranean for the long term conservation on endangered European Eel*", progetto cofinanziato dall'Unione europea, il cui capofila è rappresentato dalla Regione Lombardia con il partenariato di Regione Emilia-Romagna, Parco Delta del Po Veneto, Parco Delta del Po Emiliano, Parco Lombardo della Valle del Ticino, Università di Bologna e di Ferrara e la società Graia S.r.l.

Una descrizione degli obiettivi del progetto LIFEEL e delle azioni che lo compongono è riportata nella relazione tecnica generale di progetto. I sei passaggi per fauna ittica previsti sono così dislocati:

- 3 rampe in pietrame in corrispondenza di altrettante discontinuità dislocate sul tratto di pianura del Fiume Panaro;
- 2 passaggi per pesci a bacini successivi abbinati a passaggi specifici per anguille in corrispondenza di due sostegni presenti su un ramo terminale del Fiume Po;
- 1 passaggio specifico per anguille in corrispondenza di un terzo sostegno posizionato a monte degli altri due sostegni interessati dal progetto.

La presente relazione, già presentata all'interno del progetto definitivo degli interventi, ha lo scopo di:

1. verificare la compatibilità delle opere in progetto con le norme relative all'assetto idrogeologico del territorio, con particolare riferimento al PAI;
2. verificare la compatibilità idraulica delle opere in progetto, attraverso una verifica idraulica finalizzata a valutare l'effetto delle opere in progetto sul regime idraulico dei corsi d'acqua interessati.

La relazione è quindi strutturata in tre capitoli distinti, un primo capitolo introduttivo, in cui è ripresa dalla relazione tecnica generale la descrizione dei siti di intervento e delle opere in progetto, e due capitoli specifici, ognuno dei quali tratta i due i due aspetti appena introdotti.

Nel capitolo 2 viene semplicemente presentata e commentata la sovrapposizione tra le aree interessate dal progetto e la suddivisione del territorio circostante i corsi d'acqua in fasce fluviali, mentre nel Capitolo 3 viene proposta una breve analisi idrologica, analisi basata sui valori riportati dalla Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica del PAI, seguita da un'analisi idraulica sito specifica volta a verificare l'effetto delle opere in progetto sul deflusso della piena di riferimento.



1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE DELLE AREE DI INTERESSE E BREVE DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI DI PROGETTO

I sei passaggi per fauna ittica previsti sono così dislocati:

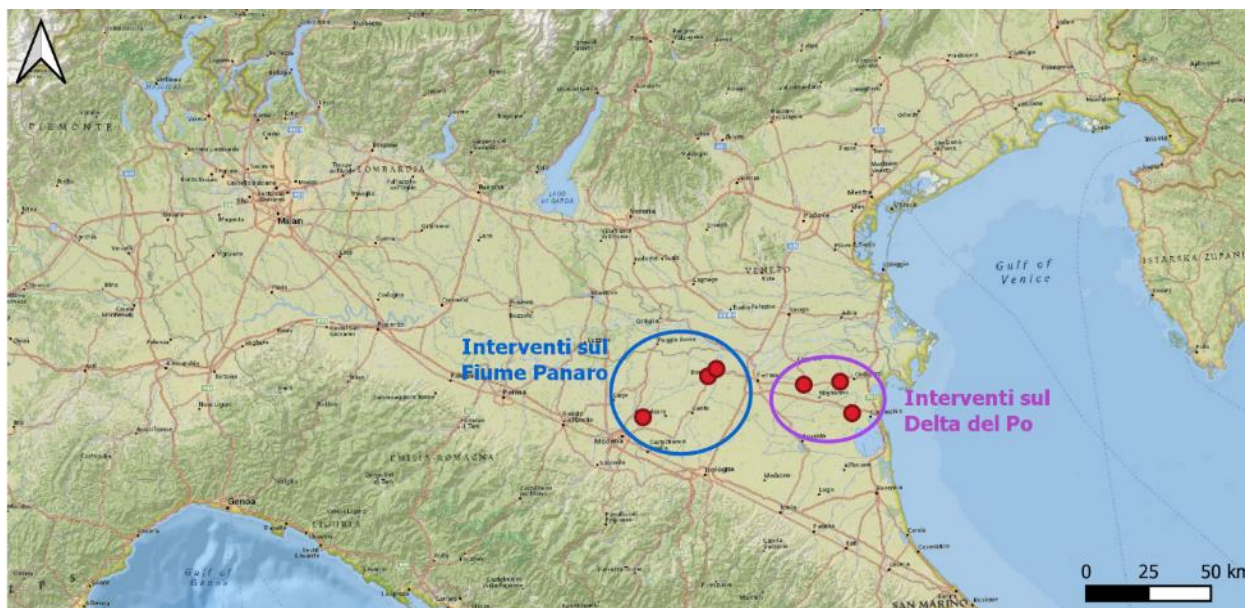
- 3 rampe in pietrame in corrispondenza di altrettante discontinuità dislocate sul tratto di pianura del Fiume Panaro;
- 2 passaggi per pesci a bacini successivi abbinati a passaggi specifici per anguille in corrispondenza di due sostegni presenti su un ramo terminale del Fiume Po;
- 1 passaggio specifico per anguille in corrispondenza di un terzo sostegno posizionato a monte degli altri due sostegni interessati dal progetto.

Dal punto di vista in primis geografico, le aree di intervento possono essere divise in due categorie:

- aree di intervento sul fiume Panaro;
- aree di intervento sul delta del Po.

Di seguito si descrivono brevemente tali aree.

FIGURA 1 - LOCALIZZAZIONE DEGLI INTERVENTI IN PROGETTO





1.1 IL TRATTO DI PIANURA DEL FIUME PANARO

1.1.1 Inquadramento generale

Il Fiume Panaro nasce sull'appennino tosco-emiliano, dalla fusione di corsi d'acqua montani minori (Torrente Lerna, Torrente Scoltenna, Torrente Leo), le cui sorgenti sono collocate ai piedi dello spartiacque appenninico che segna il confine tra Emilia Romagna e Toscana. Tra i punti più alti del bacino imbrifero del Panaro figura il Monte Cimone, che raggiunge la quota di 2.165 m s.l.m.

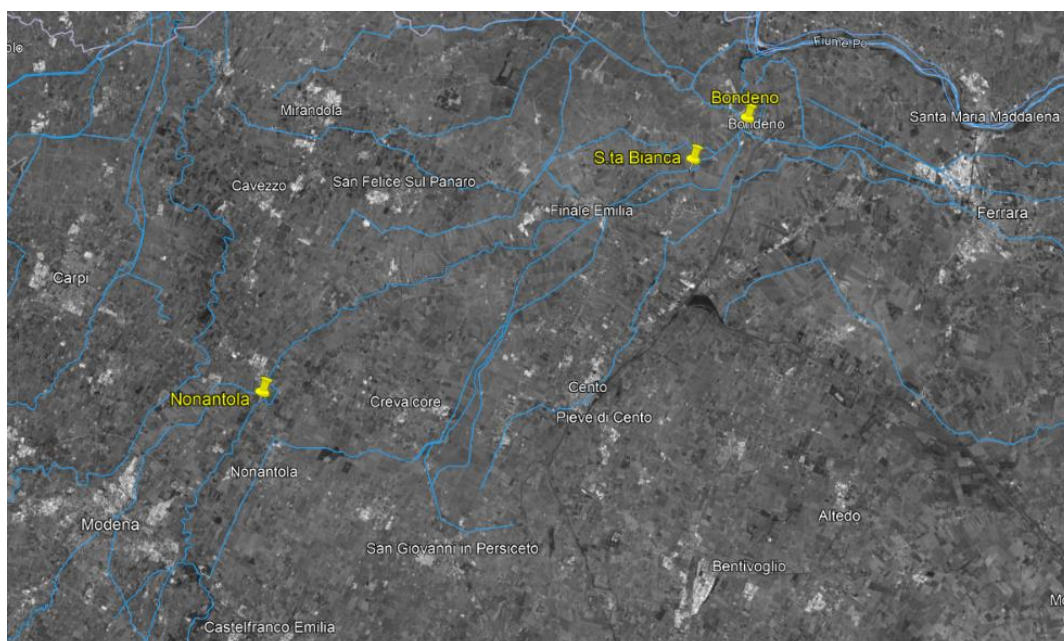
Il Panaro ha una lunghezza complessiva di oltre 150 km e lungo il suo corso attraversa, tra gli altri, i seguenti centri abitati: Vignola (100 m s.l.m.), Modena (30 m s.l.m.) e Bondeno (10 m s.l.m.).

L'inizio del tratto di pianura di questo corso d'acqua può essere indicativamente collocato a Modena. Qui il fiume comincia ad essere costantemente arginato - e lo rimane fino alla confluenza in Po- e il suo alveo diventa progressivamente pensile, ossia posizionato ad una quota superiore a quella della pianura circostante. Questo tratto è lungo complessivamente circa 60 km ed è caratterizzato da una pendenza media dell'ordine dello 0,2 ‰.

Il progetto prevede di realizzare tre rampe in pietrame su altrettante discontinuità presenti sul tratto di pianura del Fiume Panaro. Si tratta degli unici elementi di discontinuità presenti in tutto il tratto di valle, fino alla confluenza nel Fiume Po.

Le tre discontinuità, la cui posizione è rappresentata nella seguente figura, sono descritte sinteticamente nelle pagine che seguono.

FIGURA 2 – LOCALIZZAZIONE DELLE TRE TRAVERSE INTERESSATE DAL PRESENTE PROGETTO (FONTE ORTOFOTO: GOOGLE EARTH, 2021)



1.1.2 La traversa di Bondeno: stato di fatto e progetto

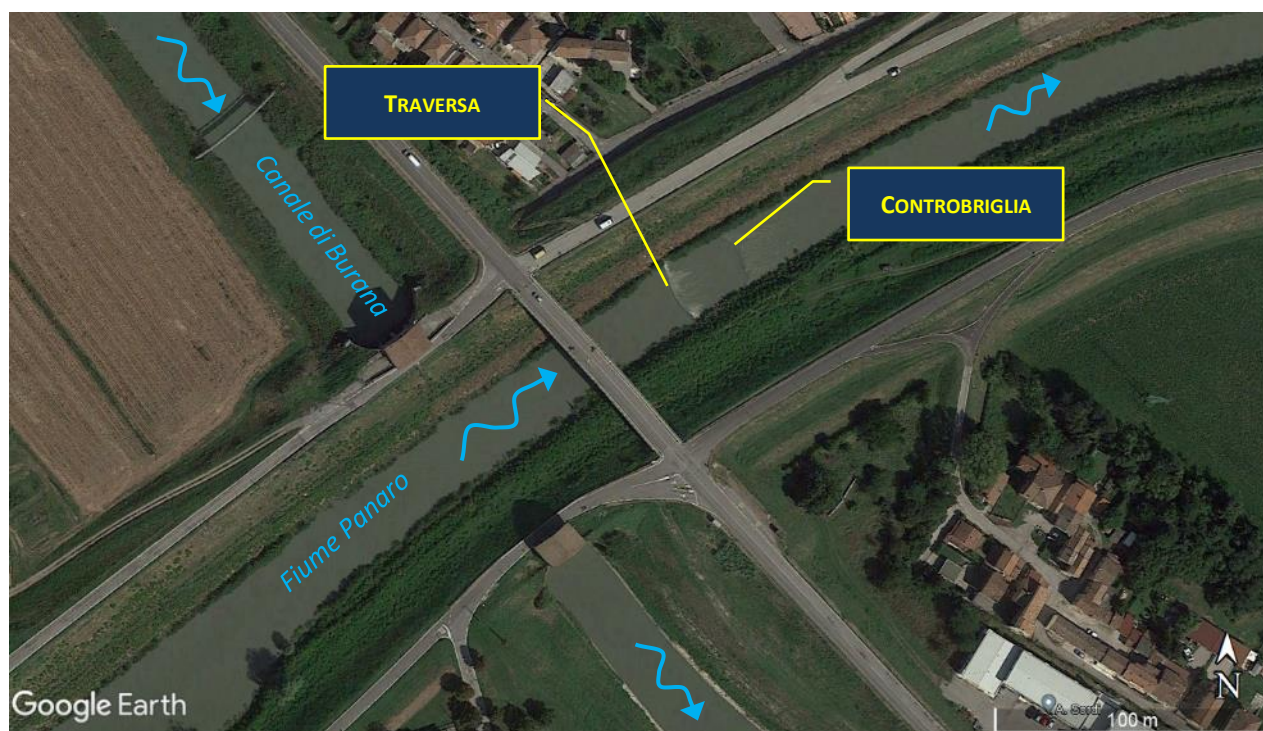
La traversa di Bondeno si trova in comune di Bondeno (FE), circa 8,3 km a monte della confluenza del Panaro nel Fiume Po.

Si tratta di una soglia fissa in calcestruzzo il cui scopo originario è probabilmente quello di stabilizzare il profilo di fondo dell'alveo e prevenire possibili fenomeni erosivi in corrispondenza delle pile del ponte della SP69, posizionato circa 30 m a monte della soglia.

La traversa ha uno sviluppo trasversale di 25 m ed uno spessore di 80 cm. Da quanto si è potuto riscontrare durante il rilievo topografico e geometrico del manufatto, l'altezza della parte in elevazione (esclusa la fondazione) è di 2 m.

A valle della traversa è presente una buca che raggiunge una profondità massima di quasi 3 metri dalla quota del pelo libero. La profondità della buca si riduce progressivamente procedendo verso valle e a circa 20 metri di distanza dalla traversa si esaurisce. Tra i 25 e i 35 metri di distanza dalla traversa è presente una sorta di controbriglia in pietrame di piccola pezzatura che può essere, o meno, sommersa in funzione del livello idrometrico di valle, il quale è influenzato dai livelli del Fiume Po.

FIGURA 3 – LA TRAVERSA DI BONDENO, ORTOFOTO (FONTE ORTOFOTO: GOOGLE EARTH, 2021)



Nel seguente prospetto sono riportate le principali caratteristiche della rampa in pietrame prevista presso la traversa di Bondeno. In Figura 4 è rappresentato l'ingombro previsto della rampa.



TABELLA 1 – PRINCIPALI GRANDEZZE PROGETTUALI DELLA RAMPA IN PIETRAMME DI BONDENO

PARAMETRO PROGETTUALE	VALORE DI PROGETTO
Dislivello e quote di progetto (condizioni di progetto, regime di magra)	50 cm (6.20 m s.l.m. – 5.70 m s.l.m.)
Dislivello (regime di morbida)	< 50 cm, a causa del rigurgito del Fiume Po
Pendenza	5%
Lunghezza	12 m (escluso il raccordo con il fondo a valle)
Larghezza	25 m
Volume di pietrame impiegato	333 mc (escluso il raccordo con il fondo a valle)
Lavorazioni particolari previste	1. Ribassamento della soglia della traversa in corrispondenza dei due canali di magra realizzati nella rampa e ricostruzione del rivestimento superficiale in materiale lapideo. 2. Sistemazione del pietrame esistente a valle della rampa per una lunghezza ulteriore di 20 ÷ 30 m
Accesso all'area di cantiere	Dalla strada arginale in sponda destra (Via Dazio) e quindi dalla pista di accesso esistente che dalla strada arginale scende verso l'alveo.

FIGURA 4 – INGOMBRO DELLA RAMPA IN PIETRAMME DI BONDENO E TRACCIATO DELLA PISTA DI ACCESSO AL CANTIERE



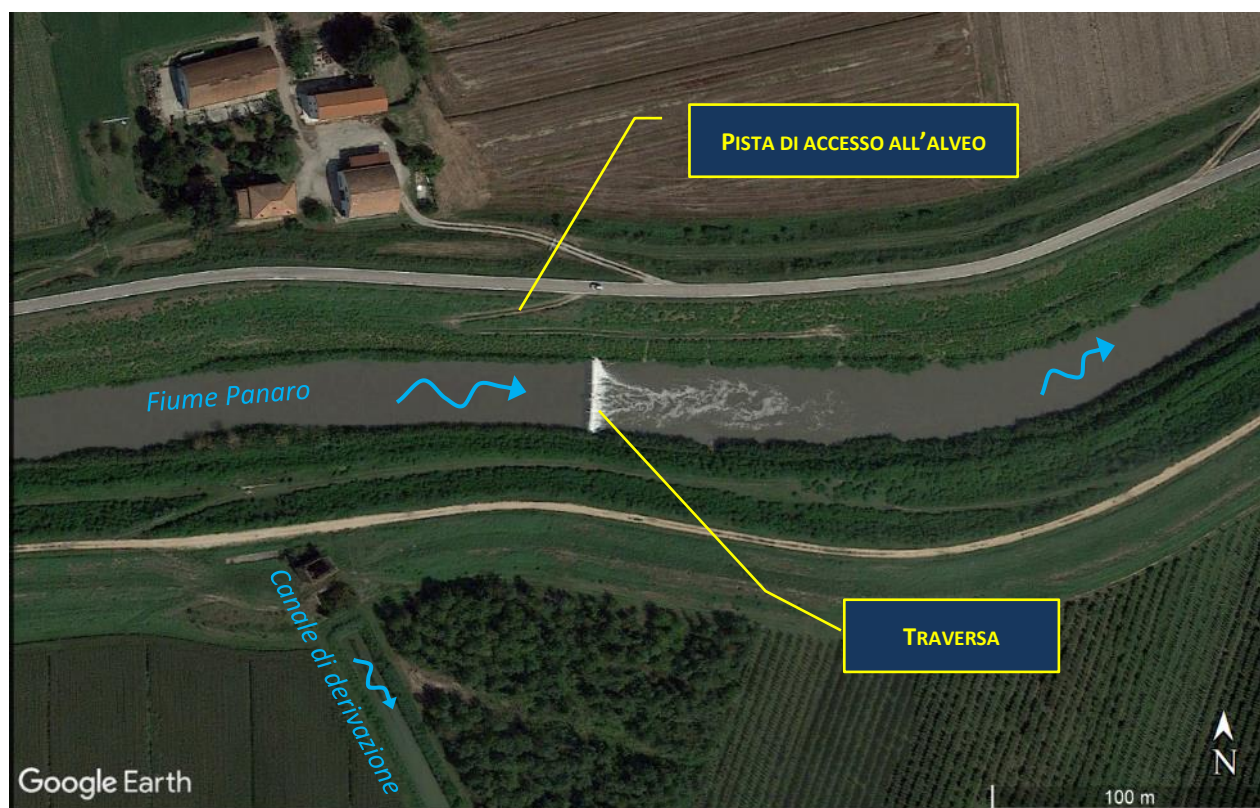
1.1.3 La traversa di Santa Bianca: stato di fatto e progetto

La traversa di Santa Bianca si trova in comune di Bondeno (FE), circa 4,8 km a monte della traversa di Bondeno e 13 km a monte della confluenza del Panaro nel Fiume Po.

Si tratta di una traversa di derivazione, realizzata per poter invasare acqua nell'alveo e derivare parte dell'acqua del Fiume Panaro verso la sponda destra. Attualmente la traversa si configura come un'opera in pietrame e calcestruzzo, lunga 30 metri e spessa 240 cm. Essa è strutturata su due livelli: uno a monte, spesso 80 cm a quota 7,80 m s.l.m., e l'altro più a valle di uguale spessore e posto a quota 7,70 m s.l.m. La traversa è inoltre dotata di tre elementi longitudinali che in passato servivano probabilmente come supporti a cui fissare elementi mobili in legno per aumentare la quota di invaso della traversa.

Al momento del rilievo topografico dell'area, quando il Fiume Panaro era in regime di magra estiva, il salto indotto dalla traversa era di 165 cm. Si ritiene che tale differenza di livello non vari significativamente in condizioni di morbida del fiume.

FIGURA 5 – LA TRAVERSA DI SANTA BIANCA, ORTOFOTO (FONTE ORTOFOTO: GOOGLE EARTH, 2021)



Nel seguente prospetto sono riportate le principali caratteristiche della rampa in pietrame prevista presso la traversa di Santa Bianca a Bondeno. In Figura 6 è rappresentato l'ingombro previsto della rampa.



TABELLA 2 – PRINCIPALI GRANDEZZE PROGETTUALI DELLA RAMPA IN PIETRAMME DI SANTA BIANCA

PARAMETRO PROGETTUALE	VALORE DI PROGETTO
Dislivello e quote di progetto (condizioni di progetto, regime di magra)	165 cm (7.90 m s.l.m. - 6.35 m s.l.m.)
Dislivello (regime di morbida)	≈165 cm, l'innalzamento del livello a monte e a valle della traversa in regime di morbida è simile
Pendenza	5-6 % settori laterali e canali di magra 8-9% settore centrale
Lunghezza	29 m (escluso il raccordo con il fondo a valle) 36 m (incluso il raccordo con il fondo a valle)
Larghezza	29 m a monte, 32 m a valle Larghezza media dei settori laterali: 10 m
Volume di pietrame impiegato	1.150 mc (escluso il raccordo con il fondo a valle)
Lavorazioni particolari previste	1. Ribassamento della soglia della traversa in corrispondenza dei due canali di magra e ricostruzione del rivestimento superficiale in materiale lapideo.
Accesso all'area di cantiere	Dalla strada arginale in sponda sinistra presso la località "La Colletta" e quindi dalla pista di accesso esistente che dalla strada arginale scende verso l'alveo.

FIGURA 6 – INGOMBRO DELLA RAMPA IN PIETRAMME DI SANTA BIANCA E TRACCIATO DELLA PISTA DI ACCESSO AL CANTIERE



1.1.4 La traversa di Nonantola

La traversa di Nonantola si trova sul confine tra i comuni di Nonantola (MO) e Bomporto (MO), 37 km a monte della traversa di Santa Bianca e 50 km a monte della confluenza del Panaro nel Fiume Po. La traversa si trova a circa 15 km a valle della città di Modena.

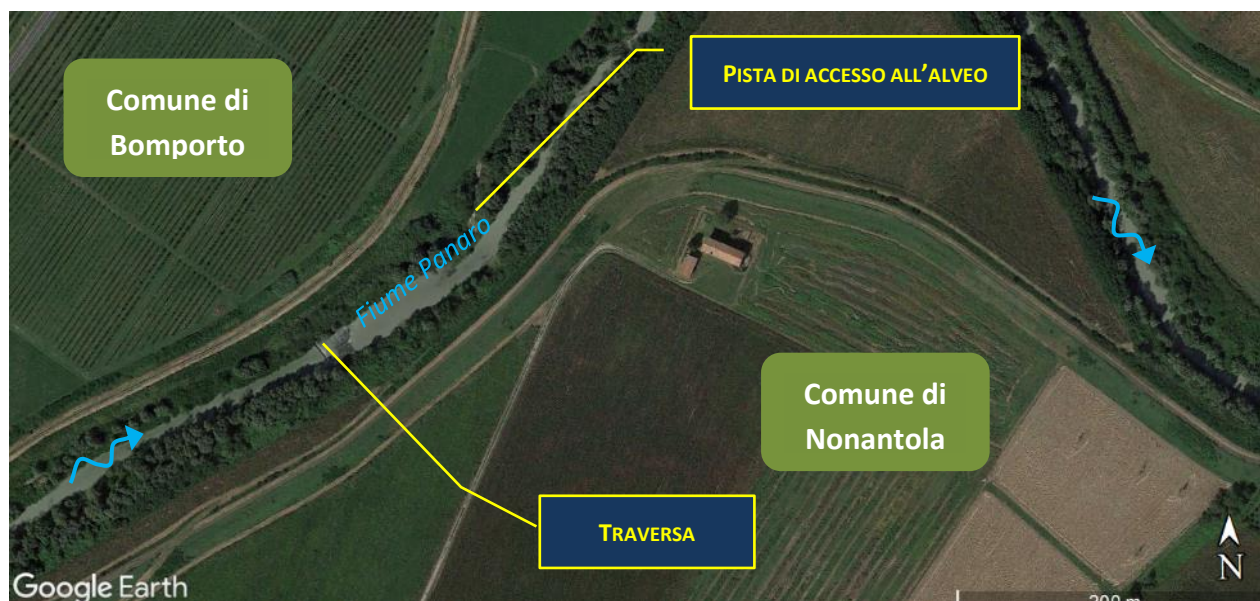
La traversa è costituita da un palancolato con uno sviluppo di 20 metri. Non è chiaro quale sia la funzione di quest'opera: l'ipotesi più probabile è che sia stata realizzata in tempi relativamente recenti per stabilizzare il profilo di fondo dell'alveo, ridurre la velocità della corrente e prevenire fenomeni di erosione degli argini.

Da quanto si è potuto riscontrare durante il rilievo topografico e geometrico del manufatto, l'altezza della parte emersa del palancolato è dell'ordine di $2,5 \div 3,0$ metri.

A valle della traversa è presente una buca che raggiunge una profondità massima di quasi 2 metri dalla quota del pelo libero. La profondità della buca si riduce progressivamente procedendo verso valle; a circa 10 metri di distanza dalla traversa la buca si esaurisce. A valle della traversa si è riscontrato un percorso di deflusso preferenziale della corrente verso la sponda sinistra, dove l'alveo è più profondo e le velocità della corrente è dell'ordine di $1,5 \div 2$ m/s.

Anche in questo caso, tra i 10 e i 25 metri di distanza dalla traversa, è presente una sorta di controbriglia in pietrame di piccola pezzatura, in corrispondenza della quale la pendenza del pelo libero è relativamente elevata. Nonostante la pendenza del pelo libero in corrispondenza della controbriglia sia dell'ordine del $4 \div 5\%$, data la distanza ridotta tra il palancolato e la controbriglia, questi due elementi vengono considerati come un unico "salto" nella progettazione della rampa in pietrame.

FIGURA 7 – LA TRAVERSA DI NONANTOLA, ORTOFOTO (FONTE ORTOFOTO: GOOGLE EARTH, 2021)



Nel seguente prospetto sono riportate le principali caratteristiche della rampa in pietrame prevista presso la traversa di Nonantola. In Figura 8 è rappresentato l'ingombro previsto della rampa.



TABELLA 3 – PRINCIPALI GRANDEZZE PROGETTUALI DELLA RAMPA IN PIETRAMME DI SANTA BIANCA

PARAMETRO PROGETTUALE	VALORE DI PROGETTO
Dislivello e quote di progetto (condizioni di progetto, regime di magra)	165 cm (19.37 m s.l.m. – 17.72 m s.l.m.)
Dislivello (regime di morbida)	≈165 cm, l'innalzamento del livello a monte e a valle della traversa in regime di morbida è simile
Pendenza	5%
Lunghezza	33 m (escluso il raccordo con il fondo a valle)
Larghezza	23 m
Volume di pietrame impiegato	705 mc (escluso il raccordo con il fondo a valle)
Lavorazioni particolari previste	1. Ribassamento della soglia della traversa davanti ai due canali di magra realizzati nella rampa, mediante il taglio della parte sommitale delle palancole. 2. Sistemazione del pietrame esistente in corrispondenza del raccordo della rampa con l'alveo a valle.
Accesso all'area di cantiere	Dalla strada arginale in sponda sinistra presso la località "La Punta" e quindi dalla strada di accesso ai fondi agricoli esistente che scende al piede dell'argine.

FIGURA 8 – INGOMBRO DELLA RAMPA IN PIETRAMME DI BONDENO E TRACCIATO DELLA PISTA DI ACCESSO AL CANTIERE





1.2 IL PO DI VOLANO E IL CANALE NAVIGABILE

1.2.1 Inquadramento generale

Il corso d'acqua noto come Po di Volano è stato il corso principale del Fiume Po fino al XII secolo quando, a seguito di una rottura arginale, il corso del ramo principale si è spostato verso nord.

Attualmente fa parte della complessa rete di corsi d'acqua naturali, seminaturali e artificiali che caratterizzano la pianura ferrarese e viene utilizzato in parte come via navigabile, come collettore principale della rete irrigua e recettore dei sistemi di bonifica. Il Po di Volano viene alimentato in parte dal Canale emissario di Burana, canale artificiale che ha origine nelle pianure mantovane dove nasce come canale collettore delle acque meteoriche e di reflusso, in parte dal Canale Boicelli, canale artificiale che si diparte dal Fiume Po in sponda destra all'altezza di Pontelagoscuro, frazione di Ferrara.

Il corso d'acqua che ha origine dalla confluenza tra Canale emissario di Burana e Canale Boicelli, nei pressi della stazione ferroviaria di Ferrara, prende oggi il nome di Po di Volano.

Poco a valle di Ferrara dal Po di Volano si distacca, in sponda sinistra, il Po di Primaro, che termina a sud di Ferrara in prossimità dell'argine sinistro del Fiume Reno. A Migliarino, in sponda destra, si diparte, sempre dal Po di Volano, il Canale Navigabile Ferrara – Porto Garibaldi, che raggiunge il Mare Adriatico a Porto Garibaldi. Il Po di Volano scorre invece più a nord, attraversa Fiscaglia e Codigoro per poi sfociare nel Mare Adriatico a nord di Valle Bertuzzi, presso l'abitato di Volano.

FIGURA 9 – LOCALIZZAZIONE DELLE TRE TRAVERSE INTERESSATE DAL PRESENTE PROGETTO (FONTE ORTOFOTO: GOOGLE EARTH, 2021)

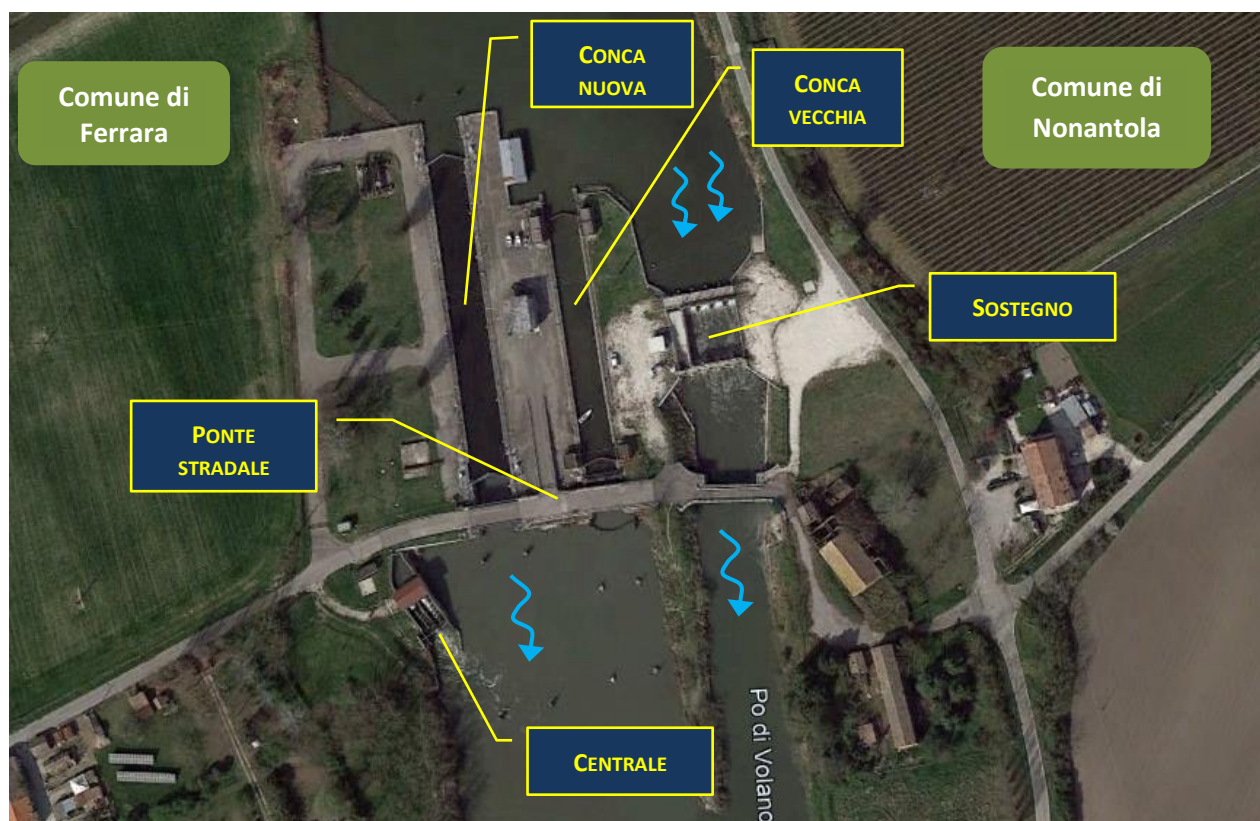


1.2.2 Il sostegno di Valpagliaro: stato di fatto e progetto

Il sostegno di Valpagliaro si trova sul confine tra il comune di Ferrara e il comune di Tresignana, circa 20 km a est del centro storico di Ferrara. La struttura, procedendo dalla sponda destra del Po di Volano (a ovest), verso la sponda sinistra (a est), è costituita da:

- un piazzale di servizio, costituito in parte da strade e in parte da aree a prato;
- una conca di navigazione “nuova”, attualmente attiva, lunga circa 110 m;
- un piazzale interamente asfaltato dove sono anche presenti l’edificio di controllo della conca, due piccoli edifici a servizio della vecchia conca e un magazzino;
- la vecchia conca di navigazione, attualmente non attiva, lunga circa 85 m;
- un piazzale non pavimentato dove si trovano gli altri due edifici a servizio della vecchia conca e una tettoia con funzione di deposito dei panconi;
- l’alveo principale, dove è presente il sostegno vero e proprio, costituito da una doppia schiera di paratoie piane motorizzate;
- un piazzale di servizio in ghiaia.

FIGURA 10 – IL SOSTEGNO DI VALPAGLIARO, ORTOFOTO (FONTE ORTOFOTO: GOOGLE EARTH, 2021)



A valle delle opere idrauliche è presente un ponte stradale, da cui si accede alle varie aree di servizio del sostegno e delle conche, attualmente chiuso al traffico all'estremità orientale, verso Formignana. In sponda destra, a valle del ponte stradale, è presente una centrale idroelettrica a doppia coclea, la cui opera di presa

è collocata a monte del piazzale di servizio che si trova a ovest della conca nuova. L'impianto deriva una portata media di 11 mc/s.

Il salto idraulico generato dal sostegno è di circa 3 m e varia in funzione di come vengono gestite le opere idrauliche di regolazione.

In corrispondenza del sostegno di Valpagliaro, il progetto prevede la realizzazione di un'unica struttura che sarà realizzata in sponda sinistra del Po di Volano, sfruttando il piazzale di proprietà demaniale presente a sinistra del sostegno.

La soluzione proposta prevede, quindi, di realizzare una struttura esterna all'alveo costituita da cinque parti di seguito elencate, procedendo da valle verso monte:

1. raccordo con l'alveo di valle e tratto in pendenza sulla sponda destra del Po di Volano;
2. tratto a pendenza ridotta nel piazzale a lato del sostegno;
3. cabina di arrivo e monitoraggio, impianto idraulico e sistema di cattura e rilascio.

La struttura è interamente coperta, dal collegamento con l'alveo di valle sino all'edificio di monitoraggio. A differenza degli altri interventi in progetto, in questo caso è prevista l'istallazione di una pompa sommersa per alimentare l'intero sistema. Il passaggio artificiale è lungo complessivamente circa 50 metri. Il salto idraulico netto da superare è variabile in funzione dei livelli a monte e a valle del sostegno: esso varia tra un minimo di 290 e un massimo di 320 cm, mentre il dislivello tra la cabina di cattura (punto più alto del sistema) ed il livello di valle è di circa 5,5 metri. La pendenza media dell'intero sistema di risalita è dell'ordine del 5%. La pendenza massima si riscontra nel tratto di valle, sulla sponda del corso d'acqua, ed è pari al 44% (24°), mentre la pendenza del tratto che attraversa il piazzale è dello 0,5%.

FIGURA 11 – TRACCIATO DEL SISTEMA DI RISALITA PER ANGUILLE PRESSO IL SOSTEGNO DI VALPAGLIARO



1.2.3 Il sostegno di Tieni: stato di fatto e progetto

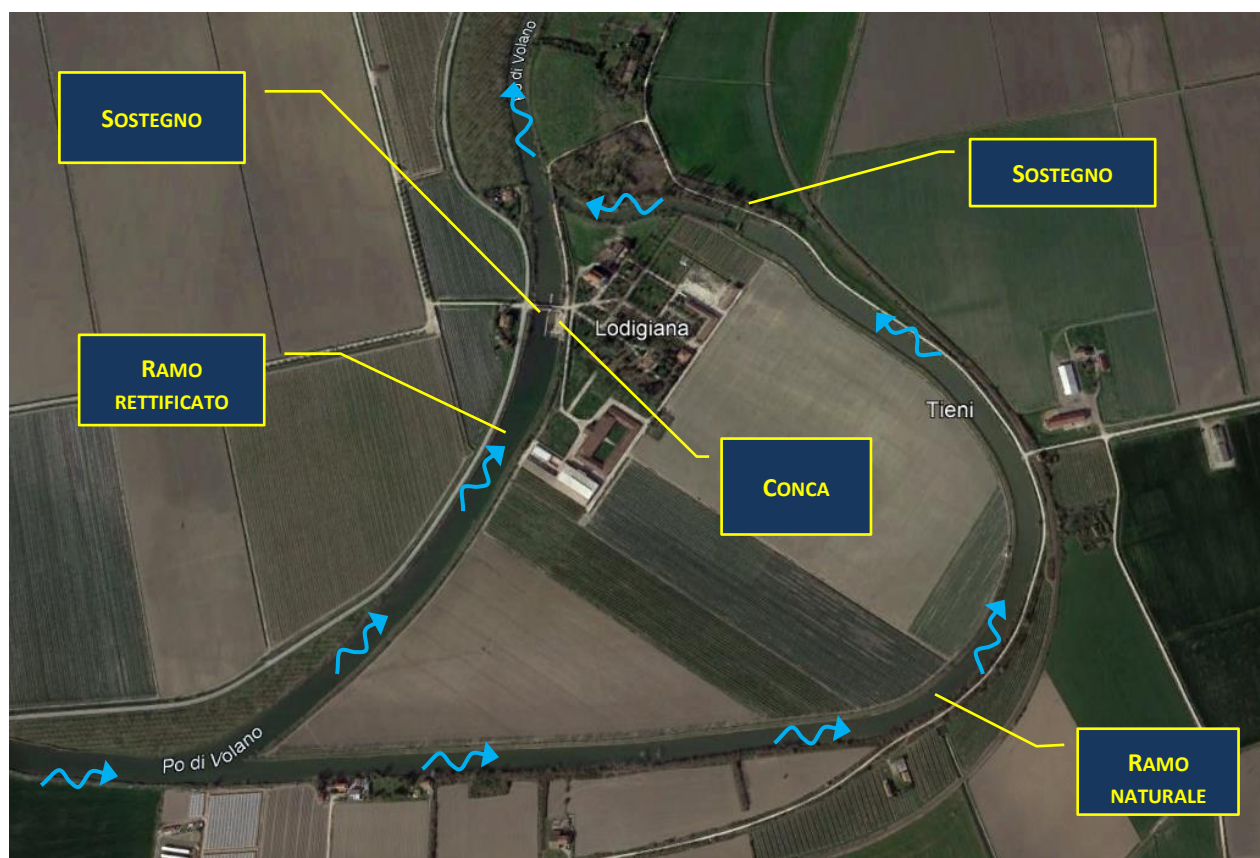
Il sostegno di Tieni si trova circa 24 km a valle del sostegno di Valpagliaro e 12,5 km a valle della derivazione del Canale Navigabile. A Tieni il corso del Po di Volano si divide in due rami: uno segue il vecchio meandro, mentre l'altro, creato artificialmente, lo taglia. Il vecchio ramo segnava anche il confine tra i comuni di Massa Fiscaglia (a est) e Migliarino (a ovest), oggi confluiti nell'unico comune di Fiscaglia.

La distanza tra il punto di divisione dei due rami e la confluenza degli stessi è di 2.300 m, percorrendo il vecchio ramo, e di circa 1.000 m seguendo, invece, il canale rettificato. Entrambi i rami sono dotati di sostegni e il ramo artificiale è, inoltre, dotato di una conca di navigazione collocata a destra del sostegno.

Il passaggio artificiale previsto dal presente progetto sarà realizzato sul ramo naturale, dove il sostegno è costituito da tre paratoie piane in linea che non vengono movimentate da anni. Gli organi di regolazione delle paratoie manuali sono posti all'interno di un edificio storico.

Il salto idraulico generato da entrambi i sostegni è di circa 100 cm e le sue variazioni sono determinate quasi esclusivamente dalle escursioni del livello del Mare Adriatico.

FIGURA 12 – IL SOSTEGNO DI TIENI, ORTOFOTO (FONTE ORTOFOTO: GOOGLE EARTH, 2021)



In corrispondenza del sostegno di Tieni, il progetto prevede la realizzazione di una doppia struttura costituita da un passaggio per pesci a bacini successivi del tipo a "vertical slot" ed un passaggio specifico per la risalita

delle anguille. I due sistemi di risalita seguono lo stesso tracciato: nella parte di monte il passaggio per anguille è realizzato accanto al passaggio a bacini successivi, mentre nella parte di valle il passaggio per anguille è realizzato all'interno del passaggio a bacini successivi. A differenza del sistema di risalita previsto a Valpigliaro, qui il sistema di risalita per anguille funziona a gravità e non è quindi previsto l'utilizzo di apparati elettrici.

FIGURA 13 – TRACCIATO DEL SISTEMA DI RISALITA PER ANGUILLE PRESSO IL SOSTEGNO DI TIENI E PERCORSO DI ACCESSO ALL'AREA DI CANTIERE



Il passaggio a bacini successivi è del tipo a "vertical slot", ossia è formato da una serie di bacini contigui, separati tra loro da setti attraverso i quali viene ricavata una fessura laterale profonda (*vertical slot*) con una particolare geometria che permette di ridurre al minimo la contrazione della vena d'acqua in corrispondenza della luce e mantenere di conseguenza valori di velocità ridotti. La struttura è lunga complessivamente 26 metri ed ha una larghezza interna di 1,60 metri.

L'opera risulta completamente interrata e la profondità della platea varia tra 150 cm, in corrispondenza del raccordo con l'alveo a monte, a 275 cm in corrispondenza del raccordo con l'alveo di valle. La massima profondità di scavo, in corrispondenza del raccordo con l'alveo di valle, è di 330 cm.

La struttura sarà quasi tutta a cielo aperto; solo in corrispondenza della porta di accesso al manufatto in cui sono alloggiati gli organi di regolazione delle paratoie è prevista la realizzazione di un solaio di copertura su una lunghezza di 4 metri. Ad eccezione di questo tratto, la struttura è dotata di un parapetto di protezione, il quale prosegue anche lungo i bordi del suddetto solaio fino agli spigoli dell'edificio.



Dal punto di vista idraulico, il passaggio è formato da 10 setti e 9 bacini, che diventano 11 se si contano anche quelli a monte e a valle dell'opera.

Il passaggio per anguille realizzato presso il sostegno di Tieni è costituito da una tubazione interrata a lato del passaggio a bacini successivi, da alcune camerette di raccordo che saranno posizionate in testa alla tubazione e in corrispondenza delle curve e da alcune parti di ingombro modesto che saranno collocate all'interno del passaggio a bacini successivi.

1.2.4 Il sostegno di Valle Lepri

Il sostegno di Valle Lepri si trova sul Canale Navigabile Ferrara – Porto Garibaldi, circa 28 km a valle del sostegno di Valpagliaro e 16,5 km a valle della derivazione del Canale Navigabile. A circa 8 km oltre il sostegno di Valle Lepri, il Canale Navigabile attraversa l'abitato di Comacchio. Il sostegno e la relativa conca di navigazione si trovano in comune di Ostellato, a est della Bonifica del Mezzano.

Il sostegno è costituito da una schiera di paratoie piane motorizzate spostate verso la sponda sinistra del canale. I dispositivi di regolazione delle paratoie e i relativi organi di movimentazione (quadri elettrici e centrale oleodinamica) sono posizionati all'interno di un edificio in muratura.

A destra si trova invece la conca di navigazione. A valle dell'edificio in cui sono alloggiati gli organi di movimentazione delle paratoie e della conca è presente un ponte carrabile, interno alla proprietà. Tutta l'area di pertinenza del sostegno e della conca è infatti recintata.

Il salto idraulico generato dal sostegno, così come quello di Tieni, è di circa 100 cm e le sue variazioni sono determinate quasi esclusivamente dalle escursioni del livello del Mare Adriatico.

In termini di finalità, di funzionamento idraulico e di scelte progettuali, il sistema di risalita progettato presso il sostegno di Valle Lepri è del tutto analogo a quello previsto presso il sostegno di Tieni. Le uniche differenze riguardano il tracciato delle opere, la lunghezza delle varie parti che costituiscono i due passaggi artificiali e la posizione dei punti di imbocco e di sbocco.

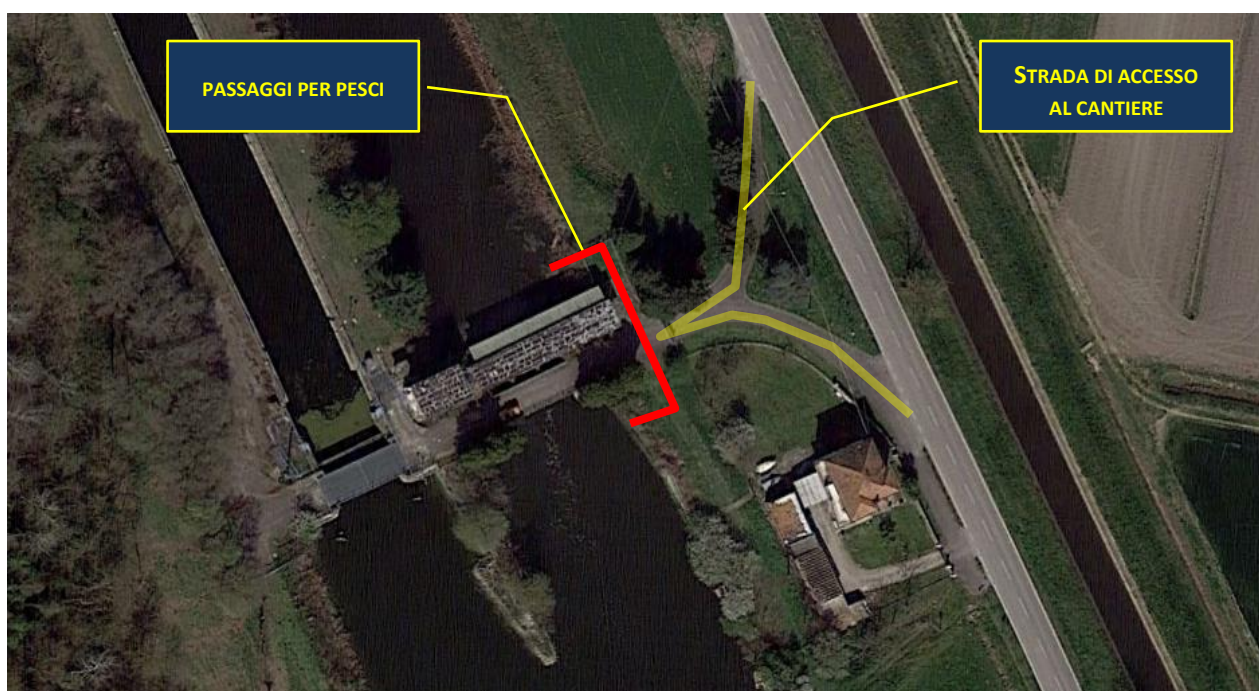
La struttura che costituisce il passaggio a bacini successivi è lunga complessivamente 31 metri ed ha una larghezza interna di 1,60 metri. L'opera risulta completamente interrata e la profondità della platea varia tra 150 cm in corrispondenza del raccordo con l'alveo a monte a 350 cm in corrispondenza del raccordo con l'alveo di valle. La massima profondità di scavo, in corrispondenza della curva a 90° in prossimità del raccordo con l'alveo di valle, è di quasi 400 cm. Il passaggio artificiale ha una forma a "C", la parte principale è parallela al corso d'acqua e ricavata all'interno dell'argine destro; da essa si dipartono due rami, più corti, che consentono di collegare il tronco principale con l'alveo a monte e a valle del sostegno. La struttura sarà in parte a cielo aperto ed in parte ricoperta con un solaio carrabile. Dove non è presente il solaio, essa è dotata di parapetto di protezione.

Anche il passaggio per anguille è stato progettato con lo stesso schema utilizzato per il sostegno di Tieni.

FIGURA 14 – IL SOSTEGNO DI VALLE LEPRI, ORTOFOTO (FONTE ORTOFOTO: GOOGLE EARTH, 2021)



FIGURA 15 – TRACCIATO DEL SISTEMA DI RISALITA PER ANGUILLE PRESSO IL SOSTEGNO DI VALLE LEPRI





2 COMPATIBILITÀ CON GLI STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE DELL'ASSETTO IDROLOGICO

Il Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) definisce le norme per l'individuazione delle fasce fluviali per i corsi d'acqua del bacino del Fiume Po. Le tre fasce fluviali in cui suddividere i corsi d'acqua ed il territorio ad essi limitrofi sono:

FASCIA DI DEFLUSSO DELLA PIENA (FASCIA A)

È costituita dalla porzione di alveo che è sede prevalente, per la piena di riferimento, del deflusso della corrente, ovvero che è costituita dall'insieme delle forme fluviali riattivabili durante gli stati di piena.

Si assume la delimitazione più ampia tra le seguenti:

- fissato in 200 anni il tempo di ritorno (T_R) della piena di riferimento e determinato il livello idrico corrispondente, si assume come delimitazione convenzionale della fascia la porzione ove defluisce almeno l'80% di tale portata. All'esterno di tale fascia la velocità della corrente deve essere minore o uguale a 0.4 m/s (criterio prevalente nei corsi d'acqua mono o pluricursali);
- limite esterno delle forme fluviali potenzialmente attive per la portata con T_R di 200 anni (criterio prevalente nei corsi d'acqua ramificati);

FASCIA DI ESONDAZIONE (FASCIA B)

È esterna alla precedente, costituita dalla porzione di alveo interessata da inondazione al verificarsi dell'evento di piena di riferimento. Con l'accumulo temporaneo in tale fascia di parte del volume di piena si attua la laminazione dell'onda di piena con riduzione delle portate di colmo. Il limite della fascia si estende fino al punto in cui le quote naturali del terreno sono superiori ai livelli idrici corrispondenti alla piena di riferimento ovvero sino alle opere idrauliche esistenti o programmate di controllo delle inondazioni (argini o altre opere di contenimento), dimensionate per la stessa portata.

Si assume come portata di riferimento la piena con T_R di 200 anni. Il limite della fascia si estende fino al punto in cui le quote naturali del terreno sono superiori ai livelli idrici corrispondenti alla piena indicata ovvero sino alle opere idrauliche esistenti o programmate di controllo delle inondazioni (argini o altre opere di contenimento), dimensionate per la stessa portata. La delimitazione sulla base dei livelli idrici va integrata con:

- le aree sede di potenziale riattivazione di forme fluviali relitte non fossili, cioè ancora correlate, dal punto di vista morfologico, paesaggistico e talvolta ecosistemico alla dinamica fluviale che le ha generate;
- le aree di elevato pregio naturalistico e ambientale e quelle di interesse storico, artistico, culturale strettamente collegate all'ambito fluviale.

AREA DI INONDAZIONE PER PIENA CATASTROFICA (FASCIA C)

È costituita dalla 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.

Si assume come portata di riferimento la massima piena storicamente registrata, se corrispondente a un T_R superiore a 200 anni, o in assenza di essa, la piena con T_R di 500 anni. Per i corsi d'acqua non arginati la delimitazione dell'area soggetta ad inondazione viene eseguita con gli stessi criteri adottati per la fascia B, tenendo conto delle aree con presenza di forme fluviali fossili. Per i corsi d'acqua arginati l'area è delimitata unicamente nei tratti in cui lo rendano possibile gli elementi morfologici disponibili; in tali casi la delimitazione è definita in funzione della più gravosa delle seguenti due ipotesi (se entrambe applicabili) in relazione alle altezze idriche corrispondenti alla piena:

- altezze idriche corrispondenti alla quota di tracimazione degli argini,
- altezze idriche ottenute calcolando il profilo idrico senza tenere conto degli argini.

La cartografia del PAI, in continuo aggiornamento, definisce i limiti delle fasce fluviali dei corsi d'acqua del reticolo idrico principale. Per quanto riguarda nel specifico l'area di interesse per il presente progetto, il PAI individua un ambito denominato **PAI-PO** (<https://pai.adbpo.it/index.php/documentazione-pai/>) e un ambito definito come **PAI-DELTA** (<https://pai.adbpo.it/index.php/piano-vigente/>), che copre però i rami in cui il Po si suddivide a valle di Bondeno, che non comprendono il Po di Volano.

FIGURA 16 – AREA DI PERTINENZA DEL PROGETTO PAI-DELTA (FONTE: ADBPO, 2021)

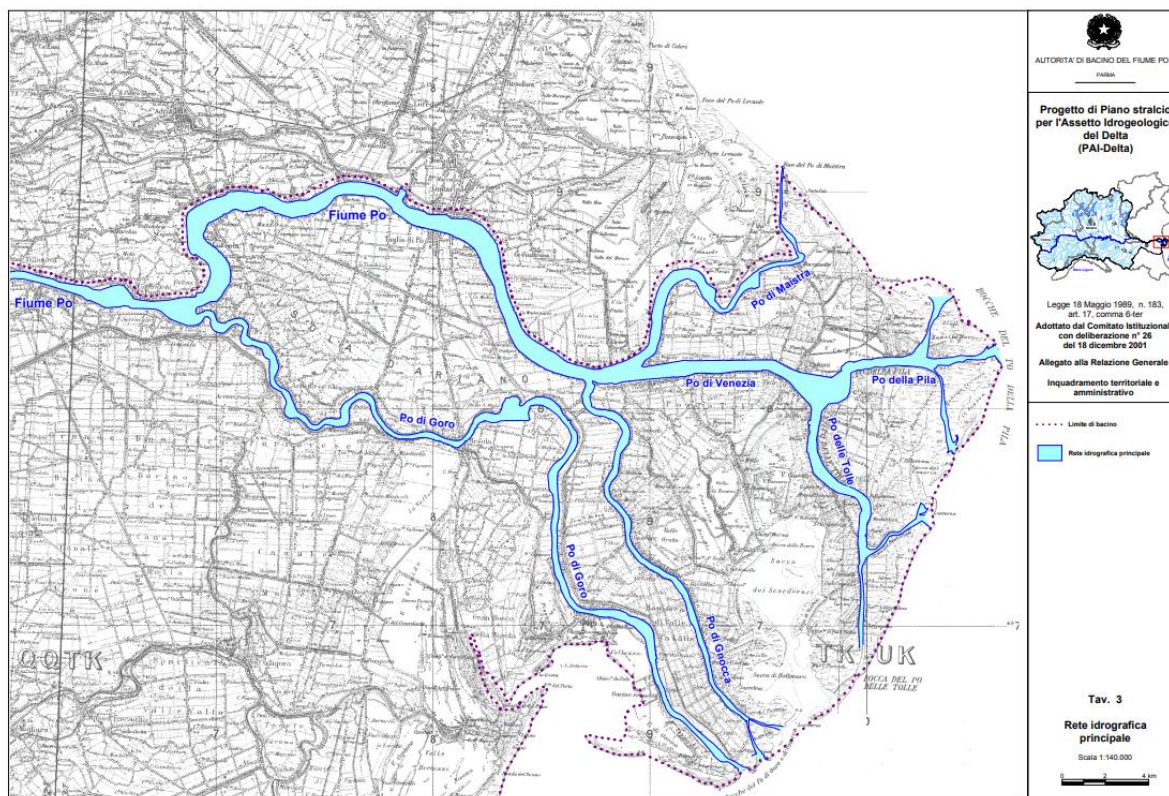


FIGURA 17 – RAMPA IN PIETrame PRESSO LA TRAVERSA DI NONANTOLA – LIMITE FASCE PAI

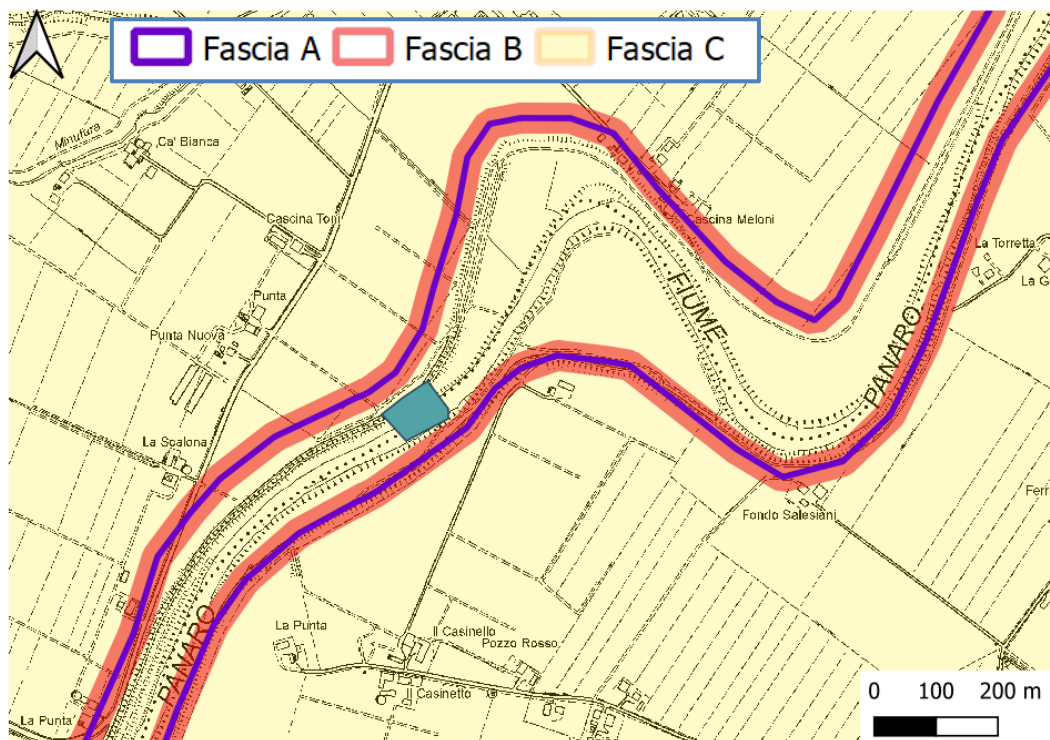


FIGURA 18 – RAMPA IN PIETrame PRESSO LA TRAVERSA DI SANTA BIANCA – LIMITE FASCE PAI

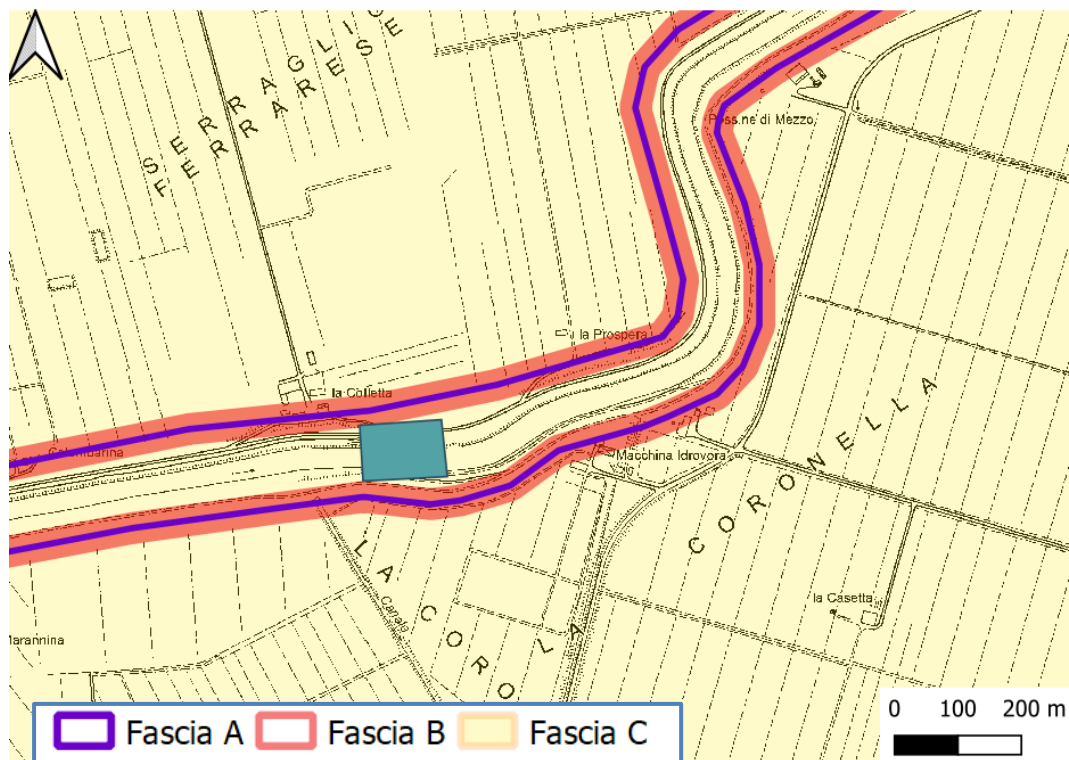


FIGURA 19 – RAMPA IN PIETRAMME PRESSO LA TRAVERSA DI BONDENO – LIMITE FASCE PAI

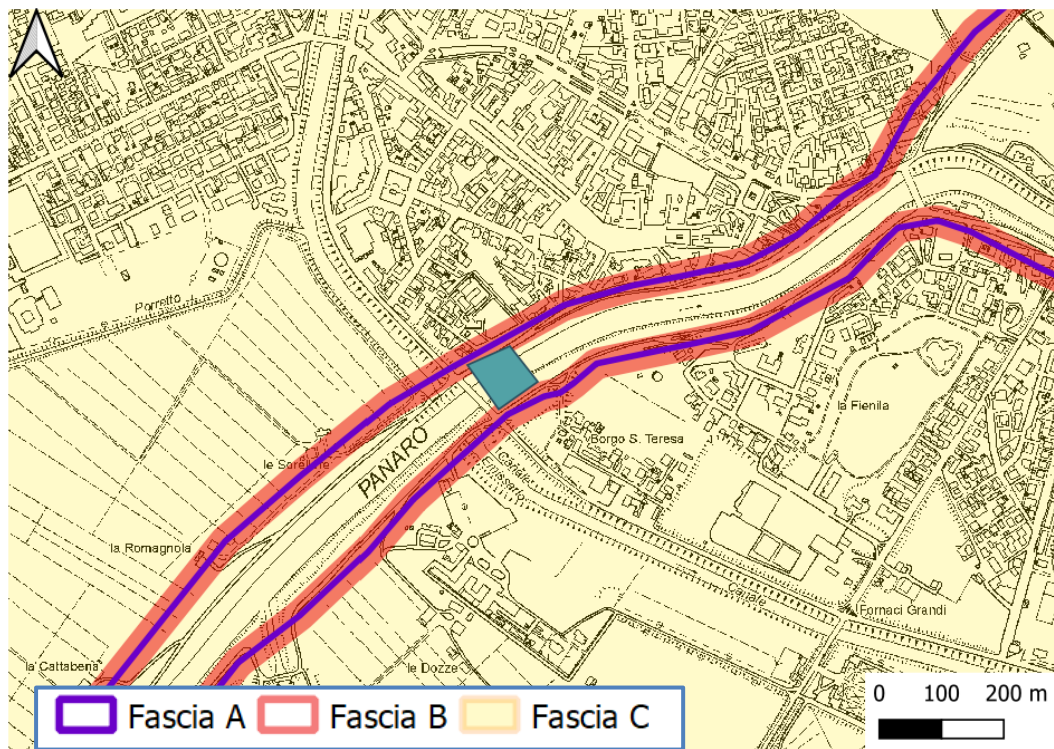
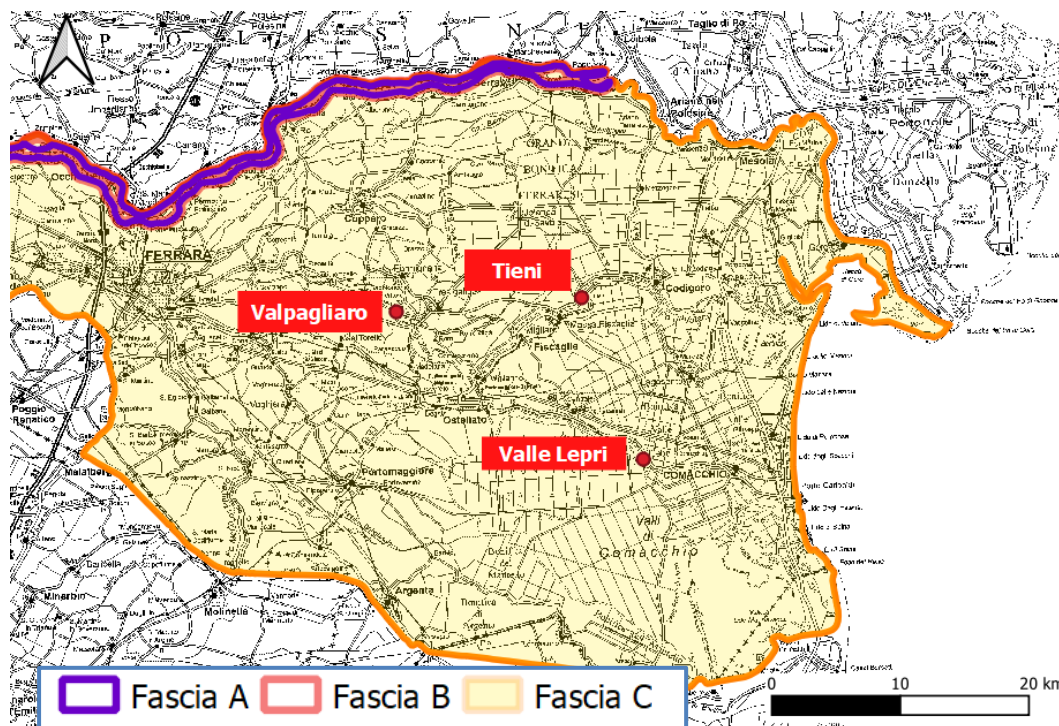


FIGURA 20 – PASSAGGI ARTIFICIALI PER LA RISALITA DELLA FAUNA ITTICA NEL DELTA DEL PO - LIMITE FASCE PAI



Da un'analisi della sovrapposizione tra le fasce PAI e la localizzazione degli interventi in progetto si può osservare e concludere quanto segue:



LIFEEL - LIFE19NAT/IT/000851

**MISURE URGENTI NEL MEDITERRANEO ORIENTALE PER LA CONSERVAZIONE
A LUNGO TERMINE DELL'ANGUILLA EUROPEA (ANGUILLA ANGUILLA)**



*ACTION A3: PROGETTAZIONE DI PASSAGGI PER ANGUILLE PER RIAPRIRE OLTRE
1.000 KM DI HABITAT PER LA MIGRAZIONE DELLE CECHE VERSO MONTE*

- le 3 rampe in pietraie previste sul Fiume Panaro, come del resto è prevedibile vista la natura dell'intervento, si trovano in Fascia A; questi interventi, infatti, proprio per soddisfare l'obiettivo di progetto, interessano l'intero alveo fluviale all'interno degli argini, alveo interessato dal deflusso della piena, ma anche della magra del fiume, che coincide con la Fascia A. Ciò non toglie che si tratta di opere il cui senso deriva proprio dal fatto di trovarsi in Fascia A (come potrebbero esserlo la sistemazione di un argine o la realizzazione di una traversa di derivazione) e per questo sono da ritenersi compatibili con il PAI;
- il Po di Volano e il Canale Navigabile si configurano a tutti gli effetti come corpi idrici regolati, non soggetti ad eventi di piena e non "fasciati" dal PAI. Non è quindi necessario verificare la compatibilità di questi interventi con quanto stabilito dal PAI. Gli interventi si trovano però all'interno della Fascia C del fiume Po, fascia che include tutta la pianura ferrarese a sud del Po.



3 VERIFICA DELLA COMPATIBILITÀ IDRAULICA

3.1 LE OPERE OGGETTO DI VERIFICA DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA

Il presente capitolo ha lo scopo di riportare i risultati della verifica della compatibilità idraulica delle opere in progetto, attraverso una verifica idraulica finalizzata a valutare l'effetto delle opere in progetto sul regime idraulico dei corsi d'acqua interessati.

Premesso che una descrizione di dettaglio dei luoghi e delle opere in progetto è contenuta nella relazione descrittiva generale e negli elaborati grafici di progetto, in questa sede è opportuno precisare sin da subito che tutte le opere previste sul Po di Volano e sul Canale Navigabile Ferrara – Porto Garibaldi non prevedono di realizzare opere tali da modificare significativamente la geometria e le caratteristiche idrauliche dei corsi d'acqua. Tralasciando il fatto che si tratta comunque di corsi d'acqua regolati, dove non ha senso parlare di eventi di piena e “piene di progetto”, si ritiene che per questi corsi d'acqua le opere in progetto non interferiscano in alcun modo sul regime idraulico dei corsi d'acqua e di conseguenza non si è ritenuto necessario effettuare alcun tipo di verifica idraulica.

Ne deriva che il presente capitolo tratta esclusivamente gli effetti delle tre rampe in pietrame previste sul Fiume Panaro e non considera in alcun modo i dispositivi di risalita in progetto sul Po di Volano e sul Canale Navigabile Ferrara – Porto Garibaldi. In questo capitolo si prendono quindi in esame le sole rampe in pietrame previste sul Fiume Panaro, la cui descrizione è riportata nel paragrafo 1.1 della presente relazione.



3.2 ANALISI IDROLOGICA – INDIVIDUAZIONE DELLA PORTATA DI PIENA DI PROGETTO

Il Fiume Panaro nasce sull'appennino tosco-emiliano, dalla fusione di corsi d'acqua montani minori (Torrente Lerna, Torrente Scoltenna, Torrente Leo), le cui sorgenti sono collocate ai piedi dello spartiacque appenninico che segna il confine tra Emilia Romagna e Toscana. Tra i punti più alti del bacino imbrifero del Panaro figura il Monte Cimone, che raggiunge la quota di 2.165 m s.l.m.

Il Panaro ha una lunghezza complessiva di oltre 150 km e lungo il suo corso attraversa, tra gli altri, i seguenti centri abitati: Vignola (100 m s.l.m.), Modena (30 m s.l.m.) e Bondeno (10 m s.l.m.).

L'inizio del tratto di pianura di questo corso d'acqua può essere indicativamente collocato a Modena. Qui il fiume comincia ad essere costantemente arginato - e lo rimane fino alla confluenza in Po- e il suo alveo diventa progressivamente pensile, ossia posizionato ad una quota superiore a quella della pianura circostante. Questo tratto è lungo complessivamente circa 60 km ed è caratterizzato da una pendenza media dell'ordine dello 0,2 ‰.

Per caratterizzare il regime idraulico del Fiume Panaro nel tratto di pianura di interesse progettuale si fa riferimento agli annali idrologici dell'Emilia Romagna, documenti pubblicati annualmente da ARPAE.

Le stazioni idrometriche di interesse per le sezioni idrauliche, soggette agli interventi in progetto, sono quelle di Bomporto e di Bondeno. In particolare la stazione di Bomporto si trova a circa 2,5 km a valle della traversa su cui è prevista la realizzazione della rampa in pietrame di Nonantola, la più a monte delle tre, mentre quella di Bondeno è collocata a 40 m a monte della traversa su cui è prevista la realizzazione dell'intervento, a più a valle delle tre.

Lo zero idrometrico della stazione di Bomporto è posizionato a 17,06 m s.l.m., mentre quello della stazione di Bondeno è invece a 11,39 m s.l.m. Il bacino imbrifero sotteso è pari rispettivamente a 1.041 kmq e 1.192 kmq (Tabella 4).

Per la caratterizzazione del regime idrologico si fa riferimento alla sezione idrometrica di Bomporto, l'unica delle due per la quale sono disponibili informazioni sulle portate medie mensili e annuali.

Dai dati riportati in Tabella 5 si osserva come il Panaro abbia un regime idrologico tipico dei corsi d'acqua appenninici, con portate medie mensili molto basse nei mesi estivi ($< 10 \text{ m}^3/\text{s}$ tra giugno e settembre), che spesso superano i $30 \text{ m}^3/\text{s}$ nei mesi autunnali e primaverili e che raramente scendono sotto i $20 \text{ m}^3/\text{s}$ nei mesi invernali.

Dalla Figura 21 si può invece vedere come l'andamento delle altezze idrometriche a Bondeno sia in parte determinato dall'entità delle portate provenienti dal bacino (ben rappresentate dall'andamento dei livelli idrometrici a Bomporto) e in parte dall'andamento dei livelli del Po, che ha un effetto di rigurgito sulla parte terminale del Fiume Panaro.



TABELLA 4 – ELENCO E CARATTERISTICHE DELLE STAZIONI IDROMETRICHE (FONTE: ARPAE, ANNALI IDROLOGICI, ANNO 2020, PARTE II)

BACINO E STAZIONE	Tipo della stazione	CARATTERISTICHE						
		Quota dello zero idrometrico <i>m.s.m.</i>	Bacino di dominio <i>Kmq</i>	Altezza di max piena <i>m.</i>	DATA della max piena	Altezza idrom. minima <i>m.</i>	DATA della minima altezza idrometrica	Anno inizio osservaz.
Panaro								
Acquicciola a Fiumalbo	Ir	936.62	18.0	2.31	11 nov. 2012	0.35	14 ago. 2014	2003
SCOLTENNA a PIEVEPELAGO	MIr	719.05	130.0	5.51	11 gen. 2016	-0.61	vari 2016	2003
SCOLTENNA a P.TE VAL DI SASSO	MIr	356.49	271.0	4.23	11 nov. 2012	-0.72	18 ago. 2005	2000
LEO a FANANO	MIr	515.16	65.0	1.70	4 giu. 2020	-0.65	21 set.2020	2003
PANARO a P.TE SAMONE	MIr	214.43	584.0	3.26	21 ott. 1955	-1.39	20 ago. 2017	1954
PANARO a SPILAMBERTO	MIr	62.50	742.0	4.02	16 nov. 1968	-1.92	28 ago. 2011	1965
Panaro a P.te S. Ambrogio	Ir	»	921.0	10.33	6 dic. 2020	0.33	17 ago. 2017	2015
<i>Tiepido a Gorzano</i>	Ir	142.23	43.0	1.78	20 mag. 2008	-0.17	31 lug. 2003	2003
<i>Tiepido a San Donnino</i>	Ir	42.93	61.0	2.97	4 apr. 2014	-0.28	9 ago. 2008	2003
Panaro a Navicello	Ir	20.68	1040.0	11.46	6 dic 2020	-0.93	17 ago. 2017	2001
PANARO a BOMPORTO	MIr	17.06	1041.0	11.55	25 dic. 2009	-0.03	24 lug. 2017	1874
Panaro a Camposanto	Ir	14.04	1140.0	11.15	25 dic. 2009	0.64	20 lug. 2006	2001
Panaro a Foscaglia	Ir	9.99	1353.0	17.67	25 dic. 2009	9.98	6 nov. 2016	2011
NAVIGLIO a MODENA	MIr	27.08	72.0	3.70	19 ago. 1979	-0.01	vari 2015 e 2019	1971
Panaro a Bondeno	Ir	11.39	1192.0	13.89	19 nov. 2014	7.20	11 giu. 2014	2003

TABELLA 5 – PORTATE MEDIE MENSILI DEL FIUME PANARO A BOMPORTO (FONTE: ARPAE, ANNALI IDROLOGICI, ANNO 2020, PARTE II)

ELEMENTI CARATTERISTICI PER L'ANNO 2020													
	ANNO	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Q max (m ³ /s)	338.0	19.1	15.4	140.0	53.1	28.8	127.0	35.4	9.4	16.7	43.2	12.2	338.0
Q media (m ³ /s)	16.0	13.4	10.1	27.6	15.0	10.4	18.9	3.7	2.6	3.1	13.5	5.9	66.3
Q minima (m ³ /s)	0.4	10.0	7.1	7.0	7.1	5.9	2.5	0.7	0.4	0.7	1.5	3.5	5.1
Q media (l/s Km ²)	15.7	13.2	9.9	27.1	14.8	10.3	18.6	3.6	2.6	3.0	13.2	5.8	65.2
Deflusso (mm)	496.2	35.3	24.9	72.6	38.2	27.5	48.3	9.7	6.9	7.9	35.4	15.0	174.6
Afflusso meteorico (mm)	1095.5	30.6	20.7	121.6	54.8	73.2	120.6	65.5	82.9	70.6	141.6	28.8	284.6
Coefficiente di deflusso	0.45	1.15	1.20	0.60	0.70	0.38	0.40	0.15	0.08	0.11	0.25	0.52	0.61
ELEMENTI CARATTERISTICI PER IL PERIODO 1923 - 1945 e 1954 - 1959 e 2003 - 2019													
Q max (m ³ /s)	530.0	407.0	310.0	417.0	425.0	525.0	333.0	109.0	310.0	356.0	530.0	478.0	391.0
Q media (m ³ /s)	19.1	18.9	26.0	36.7	31.1	26.0	9.4	2.7	1.8	5.0	12.4	31.3	29.0
Q minima (m ³ /s)	—	0.8	0.5	1.9	0.8	0.2	—	—	—	—	0.1	0.3	0.5
Q media (l/s Km ²)	18.8	18.6	25.6	36.1	30.6	25.6	9.3	2.6	1.8	4.9	12.2	30.8	28.5
Deflusso (mm)	593	50	62	97	79	68	24	7	5	13	33	80	76
Afflusso meteorico (mm)	1080	82	97	96	98	105	79	43	51	28	126	156	120
Coefficiente di deflusso	0.55	0.61	0.64	1.01	0.81	0.65	0.30	0.16	0.10	0.46	0.26	0.51	0.64

FIGURA 21 - CONFRONTO TRA L'ANDAMENTO DELLE ALTEZZE IDROMETRICHE IN DIVERSE STAZIONI DI MISURA (FONTE: ARPAE, ANNALI IDROLOGICI, ANNO 2020, PARTE II)



Per quanto riguarda le portate di piena, in Tabella 6 si riportano i valori delle piene di progetto indicati dall'Autorità di bacino distrettuale del Fiume Po. Dalla tabella si vede come la portata di progetto di Saliceto Panaro (nei pressi di Modena) e della foce siano identiche, questo a causa della natura di alveo pensile che caratterizza tutto il tratto di pianura e della conseguente assenza di immissari.

TABELLA 6 – PIENE DI PROGETTO PER IL FIUME PANARO (FONTE: AUTORITÀ DI BACINO DISTRETTUALE DEL FIUME PO – DIRETTIVA SULLA PIENA DI PROGETTO DA ASSUMERE PER LE PROGETTAZIONI E LE VERIFICHE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA, 2017)

Bacino	Corso d'acqua	Sezione		Superficie km ²	Q20 m ³ /s	Q100 m ³ /s	Q200 m ³ /s	Q500 m ³ /s
		Progr. (km)	Cod.					
Panaro	Panaro	84.029	175	Marano sul P.	696	960	1180	1550
Panaro	Panaro	104.273	136	San Cesario	759	1030	1270	1660
Panaro	Panaro	113.283	117	Saliceto P.	1043	780	880	940
Panaro	Panaro	174.940	3	Confl. in Po	1070	780	880	940
Panaro	Tiepido	12.643	31	Gorzano	44	100	155	210
Panaro	Tiepido	25.965	11	San Damaso	67	120	180	240

Per le verifiche idrauliche riportate nel successivo capitolo, si assume quindi come portata di piena di progetto la portata con tempo di ritorno di 200 anni pari a 940 m³/s. Le verifiche idrauliche sono state effettuate anche per la portata con T_R 100 pari a 880 m³/s.



3.3 ANALISI IDRAULICA – COSTRUZIONE DEL MODELLO

3.3.1 Oggetto della modellazione idraulica e strumento di calcolo utilizzato

Poiché le tre opere in progetto sono del tutto simili tra loro, in questa sede sono presentati e commentati i soli risultati relativi alle simulazioni effettuate per la traversa di Nonantola. Gli effetti delle rampe in pietrame sul profilo di corrente in corrispondenza delle altre due discontinuità interessate dal presente progetto sono del tutto analoghi.

Il modello idraulico è stato elaborato attraverso l'impiego del software Hec-Ras (versione 6.0), sviluppato nel 2002 presso l'*Hydrologic Engineering Center* dell'*US Corps of Engineers*, e successivamente aggiornato costantemente in modo da perfezionarlo e renderlo interfacciabile con altri software di calcolo. Hec-Ras è un modello di calcolo monodimensionale (l'unica variabile spaziale indipendente è la progressiva lungo il corso d'acqua) che effettua il calcolo dei profili idraulici di moto permanente o gradualmente vario in reti di canali naturali o artificiali. Con questo modello possono essere simulate le condizioni di moto subcritico, supercritico e misto e possono essere valutati gli effetti di immissioni o emissioni laterali di portata, opere in alveo, ostacoli al flusso e costruzioni presenti lungo le sponde.

Per le finalità del presente lavoro, è stato sufficiente effettuare delle simulazioni idrauliche in moto permanente con la portata di progetto riferita all'evento con T_R di 200 anni di $940 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.3.2 Aspetti teorici

IPOTESI DI MOTO PERMANENTE

La procedura di calcolo di moto permanente (*steady flow*) utilizza le seguenti assunzioni:

- la corrente è stazionaria, ovvero le sue caratteristiche dal punto di vista geometrico e cinematico si mantengono invariate e costanti nel tempo;
- la corrente è gradualmente variata, ovvero le curvature dei filetti liquidi sono poco accentuate e possono essere considerate uniformi), ad eccezione dei punti in cui sono presenti strutture idrauliche quali ponti, paratoie, briglie, ecc; nei pressi di tali strutture la corrente può essere rapidamente variata, ovvero con curvature dei filetti liquidi accentuate e quindi non considerabili uniformi e vengono applicate, quindi, equazioni globali o sperimentali;
- la corrente è monodimensionale, ovvero viene considerata come unica variabile indipendente la progressiva.

REGIMI DI FLUSSO

La determinazione del profilo liquido può avvenire secondo tre regimi di flusso:

- corrente lenta o subcritica (*subcritical flow*): quando la corrente è ovunque lenta, ovvero presenta, in tutte le sezioni, un'altezza d'acqua maggiore dell'altezza critica;
- corrente veloce o supercritica (*supercritical flow*): quando la corrente è ovunque veloce, ovvero presenta, in tutte le sezioni, un'altezza d'acqua minore dell'altezza critica;
- corrente mista (*mixed flow*): quando nel tratto in esame si possono verificare transizioni da un tipo di corrente all'altro.

EQUAZIONI DI BASE UTILIZZATE PER IL CALCOLO DEL PROFILO

Per il calcolo del profilo idraulico in moto permanente, il software Hec-Ras utilizza una procedura iterativa per la soluzione dell'equazione del bilancio energetico tra una sezione e quella immediatamente a monte (o quella immediatamente a valle in caso di corrente lenta):

$$y_2 + z_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} = y_1 + z_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} - h_e \quad [1]$$

con:

- y_1, y_2 = altezze d'acqua riferite al fondo dell'alveo
- z_1, z_2 = altezze del fondo rispetto ad una quota di riferimento
- v_1, v_2 = velocità medie della corrente nelle due sezioni
- α_1, α_2 = coefficienti di ragguaglio del termine di energia cinetica
- h_e = perdita di carico tra le due sezioni considerate

Il termine h_e dipende sia dalle perdite per attrito sia da quelle per contrazione ed espansione e viene valutato mediante la seguente equazione:

$$h_e = L \times S_f + c \times \left| \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right| \quad [2]$$

con:

- L = lunghezza del tronco considerato
- S_f = perdita di carico distribuita tra le due sezioni
- c = coefficiente di perdita di carico per contrazione o espansione

Il primo termine dell'equazione [2] ($L \times S_f$) rappresenta le perdite di carico totale per attrito: è infatti il prodotto tra la distanza tra le due sezioni e la cadente media. La cadente media viene calcolata utilizzando l'equazione di Manning:

$$S_f = \left(\frac{Q}{K} \right)^2 \quad [3]^1$$

$$K = \left(\frac{1}{n} \right) \times A \times R^{\frac{2}{3}} \quad [4]$$

con:

- n = coefficiente di Manning
- A = area bagnata
- R = raggio idraulico della sezione (rapporto tra area bagnata e contorno bagnato);
- K = *conveyance*, ovvero misura dell'attitudine di una data sezione a far defluire le portate

Il secondo termine dell'equazione [2] per il calcolo delle perdite di carico rappresenta il contributo dovuto alla contrazione ed espansione dell'area bagnata, ovvero dovuto alla non linearità della corrente in seguito ad allargamento o restringimento della sezione. L'altezza del pelo libero, in riferimento ad una assegnata sezione, viene determinato mediante una risoluzione iterativa delle equazioni [1] e [2].

¹ Hec-Ras permette di selezionare espressioni alternative delle equazioni riportate per il calcolo della cadente media che presuppongono una suddivisione dell'alveo in sottosezioni all'interno delle quali la velocità possa ritenersi con buona approssimazione costante e il coefficiente di Manning invariato.

PASSAGGIO ALL'ALTEZZA CRITICA

Il programma permette di calcolare l'altezza critica corrispondente a ciascuna sezione attraverso un procedimento iterativo che definisce l'altezza d'acqua per cui è minima l'energia totale espressa come:

$$H = WS + \frac{av^2}{2g} \quad [5]$$

con:

H = energia totale

WS = quota del pelo libero dell'acqua corrispondente all'energia di posizione

$\frac{av^2}{2g}$ = energia cinematica

Il software impone il passaggio della corrente dall'altezza critica nei seguenti casi:

1. condizione specificata dall'utente come condizione al contorno;
2. passaggio da corrente lenta a corrente veloce;
3. incapacità del programma nel risolvere l'equazione di bilancio energetico entro un numero specificato di iterazioni;
4. se il controllo effettuato con il numero di Froude indica che l'altezza d'acqua calcolata per il profilo, attraverso l'equazione di bilancio energetico, non corrisponde al regime di flusso selezionato.

Nei casi 3 e 4 il programma visualizza un messaggio di errore che permette di correggere condizioni che hanno portato alla non risoluzione dell'equazione di bilancio energetico o di selezionare un regime di flusso più adeguato.

APPLICAZIONE DELL'EQUAZIONE DEL MOMENTO (MOMENTUM EQUATION)

Nel caso in cui si verifica il passaggio allo stato critico, e comunque in tutti i casi in cui la corrente è rapidamente variata, l'equazione di bilancio energetico non può essere applicata. In questi casi Hec-Ras utilizza l'equazione del momento (*Momentum Equation*) che prevede l'applicazione dell'equazione globale di equilibrio a un elemento di volume d'acqua compreso tra le sezioni 1 e 2:

$$\sum F_x = m \times a \quad [6]$$

$$P_2 - P_1 + W_x - F_f = Q\rho\Delta V_x \quad [7]$$

con:

P_{1,2} = spinta idrostatica nella sezione 1 e 2

W_x = forza dovuta al peso dell'acqua nella direzione del moto

F_f = forza di attrito dovuta alla resistenza idraulica

Q = portata uscente

ρ = densità dell'acqua

ΔV_x = variazione di velocità tra le sezioni 1 e 2 nella direzione del flusso



3.3.3 Geometria

La modellazione idraulica presentata in questa relazione è stata effettuata basandosi sulle sezioni rappresentate negli elaborati grafici relativi alla traversa di Nonantola, con particolare riferimento alle tavole 007 e 008.

Lo schema geometrico del tratto fluviale relativo allo **stato di fatto** è stato ricostruito attraverso:

- 7 sezioni trasversali (*XSections*) distribuite su 84 m di alveo oggetto di modellazione;
- 1 manufatto (*inline structure*) rappresentato dalla traversa in palancole.

Una volta tracciate le sezioni rilevate e i manufatti, la geometria del sistema è stata migliorata inserendo delle sezioni fittizie interpolate tra le sezioni rilevate (*XS Interpolation*). La distanza minima impostata per le sezioni interpolate è di 5 m.

In Figura 22 è rappresentato il tratto di torrente oggetto di modellazione con indicate le sezioni trasversali rilevate e i due manufatti. In Figura 23 è invece rappresentato il confronto tra schema idraulico con e senza le sezioni interpolate. Nelle figure successive sono invece riportati degli esempi grafici di come sono stati schematizzati il ponte e le sezioni trasversali.

Lo schema geometrico relativo alla configurazione di progetto è stato ricostruito sulla base dello schema relativo allo stato di fatto operando in questo modo:

- è stato modificato il profilo del palancoleto, nel quale sono stati ricavati i due segmenti a quota ribassata di 20 cm;
- sono stati modificati profilo e quota delle sezioni a valle del palancoleto, rendendole congruenti con le sezioni progettuali, ossia ricostruendo la rampa in pietrame con la pendenza del 5% e con i due canali ribassati in corrispondenza delle fenditure.
- modificando i coefficienti di scabrezza in corrispondenza della rampa in pietrame, tenendo conto dell'effetto dei massi ciclopici.

Nelle pagine che seguono sono rappresentate alcune sezioni trasversali del corso d'acqua e del palancoleto, sovrapponendo allo stato di fatto la configurazione di progetto.



FIGURA 22 - SCHEMATIZZAZIONE DEL MODELLO IDRAULICO UTILIZZATO – TRACCIA DELLE SEZIONI TRASVERSALI

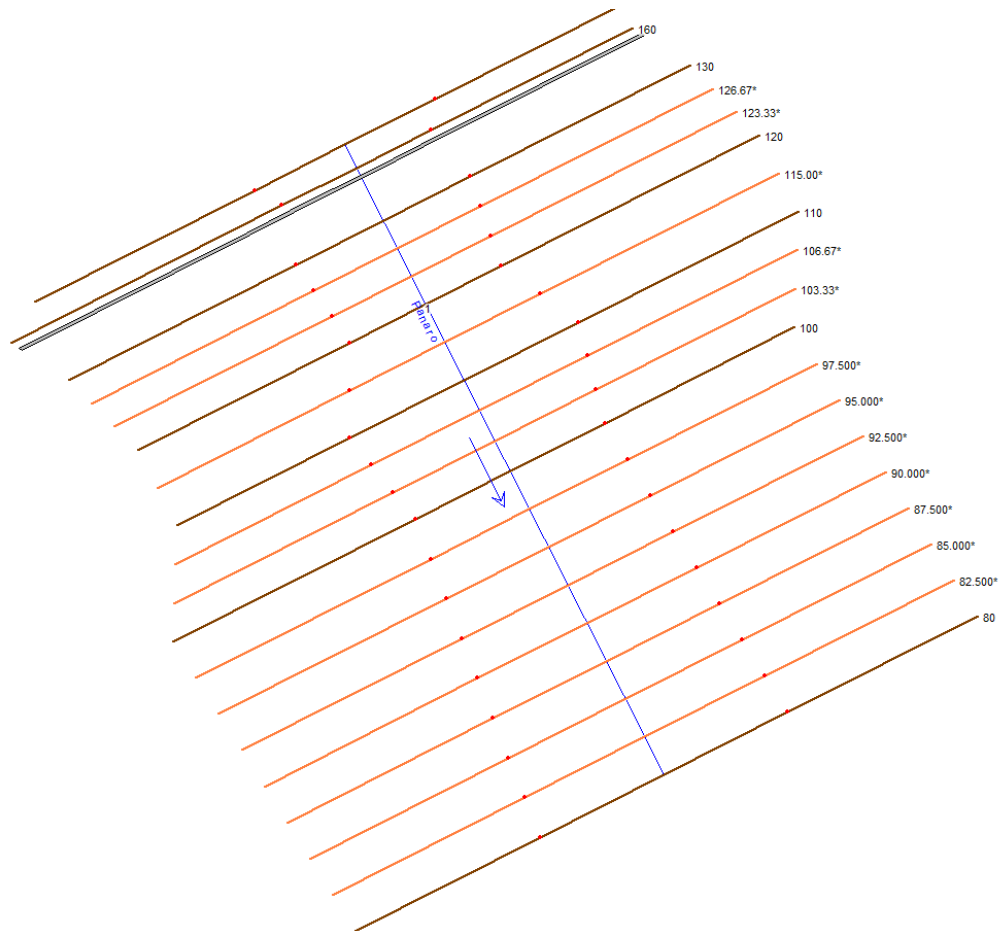


FIGURA 23: SCHEMATIZZAZIONE DEL MODELLO IDRAULICO - SOVRAPPOSIZIONE SEZIONI TRASVERSALI - A MONTE DELLA TRAVERSA

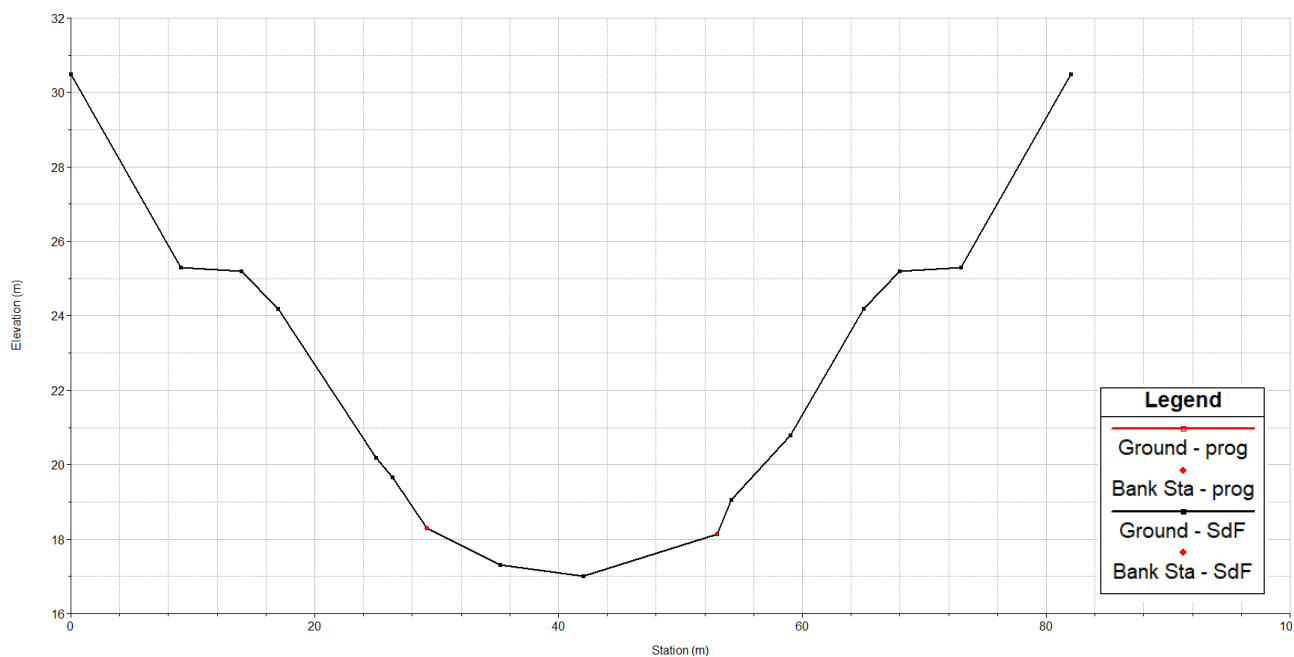




FIGURA 24: SCHEMATIZZAZIONE DEL MODELLO IDRAULICO – PALANCOLATO (INLINE STRUCTURE) – CONFIGURAZIONE ATTUALE

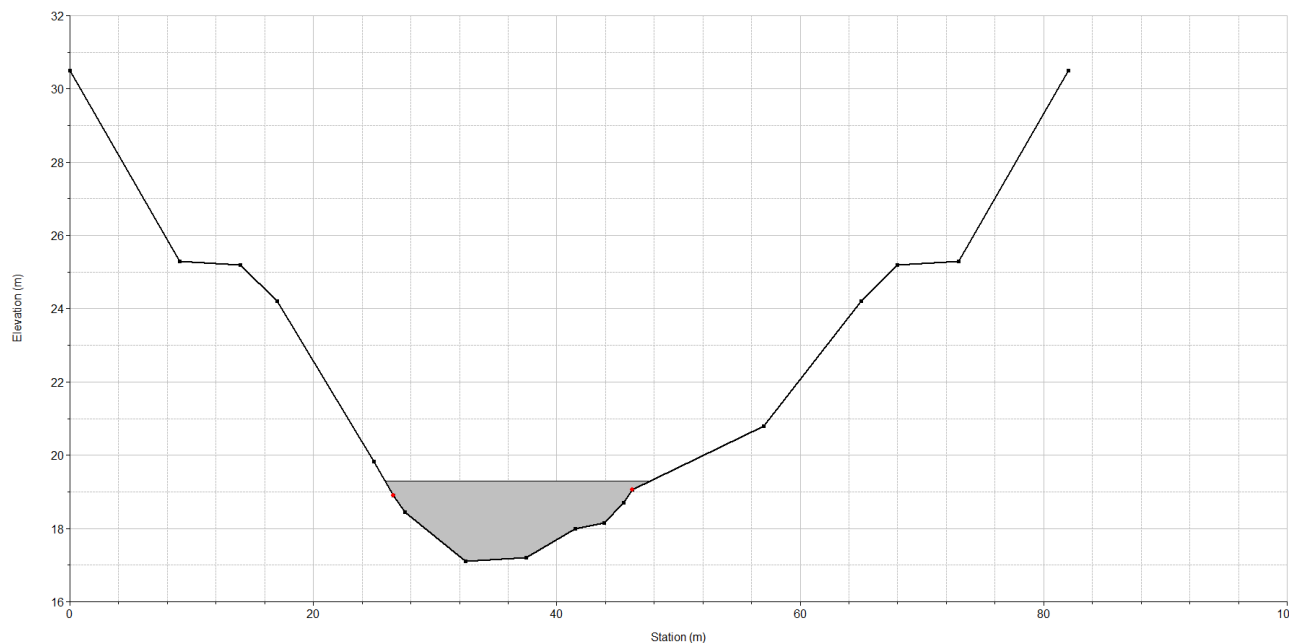


FIGURA 25: SCHEMATIZZAZIONE DEL MODELLO IDRAULICO – PALANCOLATO (INLINE STRUCTURE) – CONFIGURAZIONE DI PROGETTO

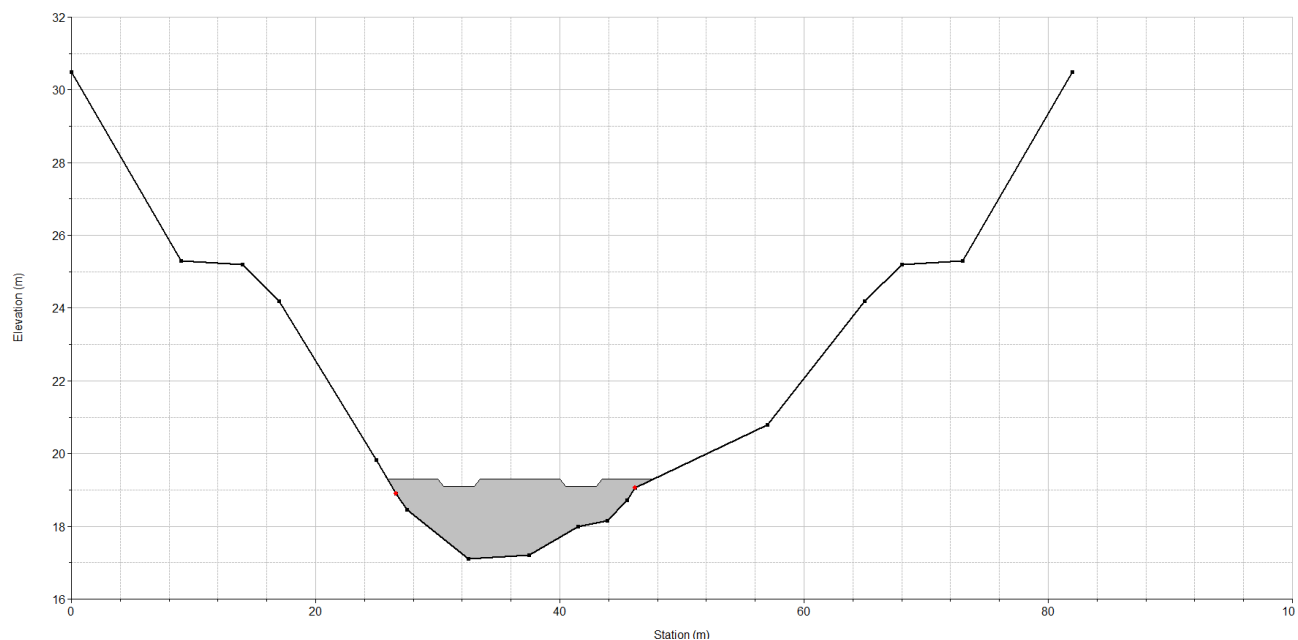




FIGURA 26: SCHEMATIZZAZIONE DEL MODELLO IDRAULICO - SOVRAPPOSIZIONE SEZIONI TRASVERSALI – 6 M A VALLE DELLA TRAVERSA

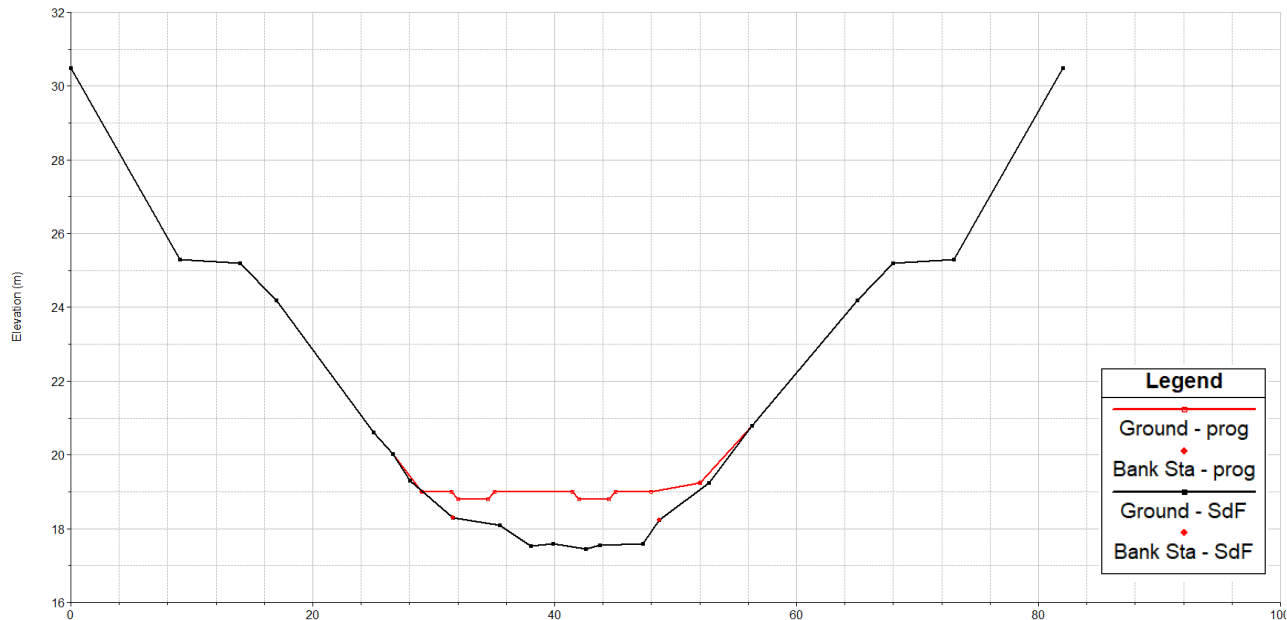


FIGURA 27: SCHEMATIZZAZIONE DEL MODELLO IDRAULICO - SOVRAPPOSIZIONE SEZIONI TRASVERSALI – 18 M A VALLE DELLA TRAVERSA

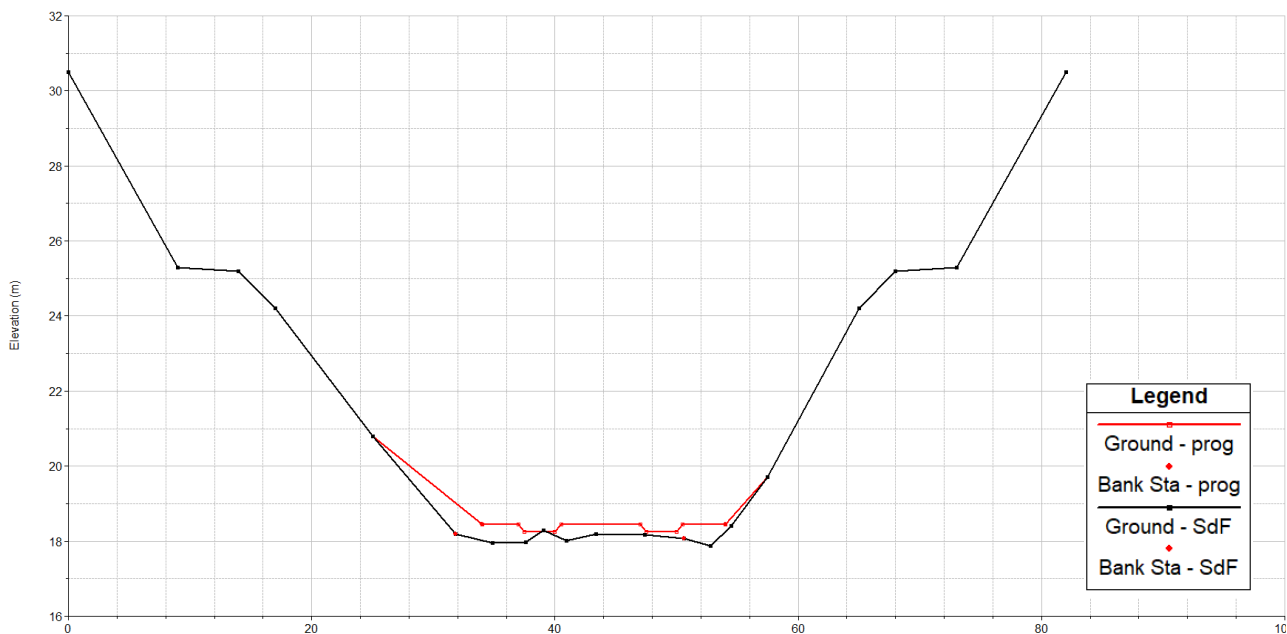


FIGURA 28: SCHEMATIZZAZIONE DEL MODELLO IDRAULICO - SOVRAPPOSIZIONE SEZIONI TRASVERSALI – 18 M A VALLE DELLA TRAVERSA



3.4 APPLICAZIONE DEL MODELLO IDRAULICO E RISULTATI

3.4.1 Regime idraulico

Come già anticipato a inizio paragrafo, ai fini del presente lavoro è sufficiente eseguire delle simulazioni in moto permanente. Le simulazioni sono state effettuate utilizzando come portate di riferimento $940 \text{ m}^3/\text{s}$ e $880 \text{ m}^3/\text{s}$, che corrispondono rispettivamente alle portate di piena con tempo di ritorno di 200 e di 100 anni.

Come condizioni al contorno da attribuire al modello sono state attribuite sia a monte che a valle del tratto di interesse le condizioni di moto uniforme, con una pendenza dello 0,5 %.

3.4.2 Applicazione del modello idraulico – Configurazione attuale

Le verifiche idrauliche condotte hanno permesso di calcolare il profilo del pelo libero del corso d'acqua lungo il tratto oggetto di modellazione. I risultati della modellazione sono rappresentati in forma numerica e grafica nelle pagine che seguono.

FIGURA 29 - RISULTATI DELLA MODELLAZIONE IDRAULICA- SEZIONE 4 M A MONTE E DELLA TRAVERSA

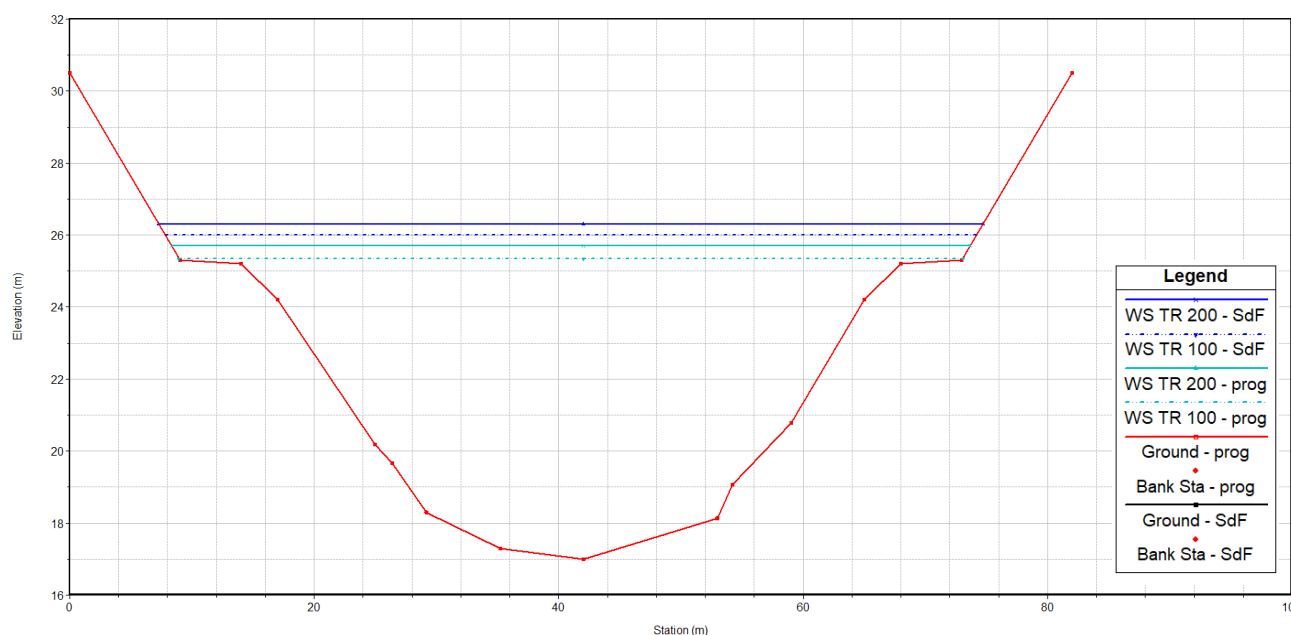




FIGURA 30 - RISULTATI DELLA MODELLAZIONE IDRAULICA- SEZIONE IN CORRISPONDENZA DELLA TRAVERSA

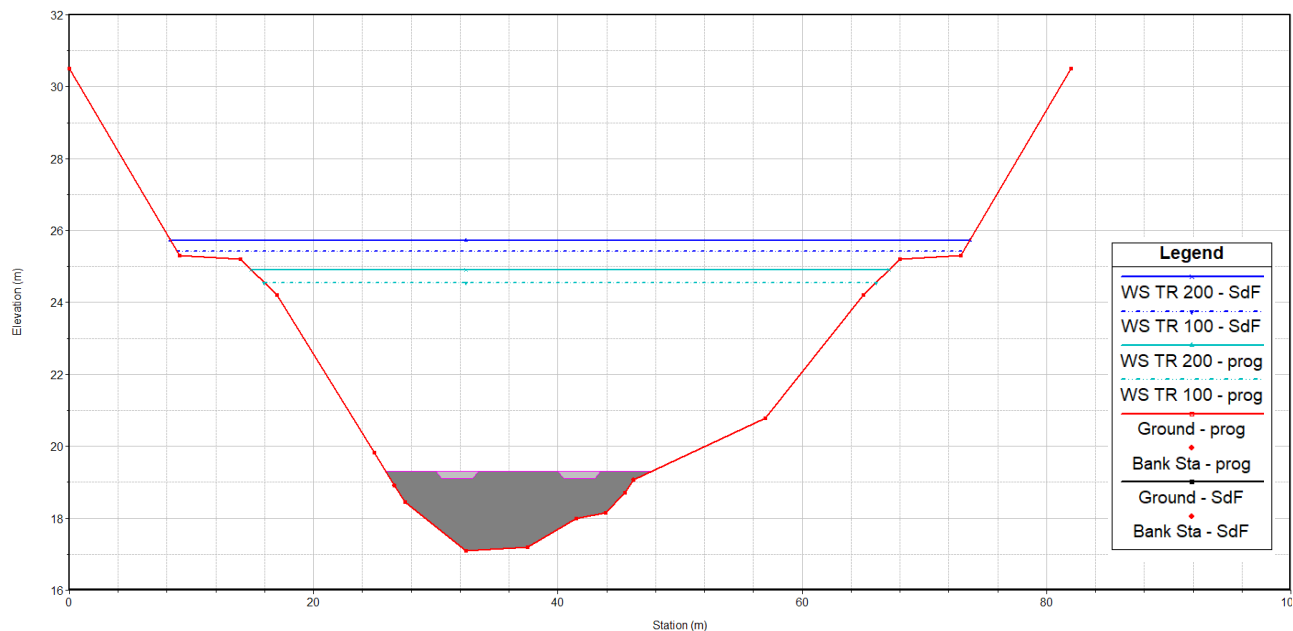


FIGURA 31 - RISULTATI DELLA MODELLAZIONE IDRAULICA- SEZIONE 6 M A VALLE DELLA TRAVERSA

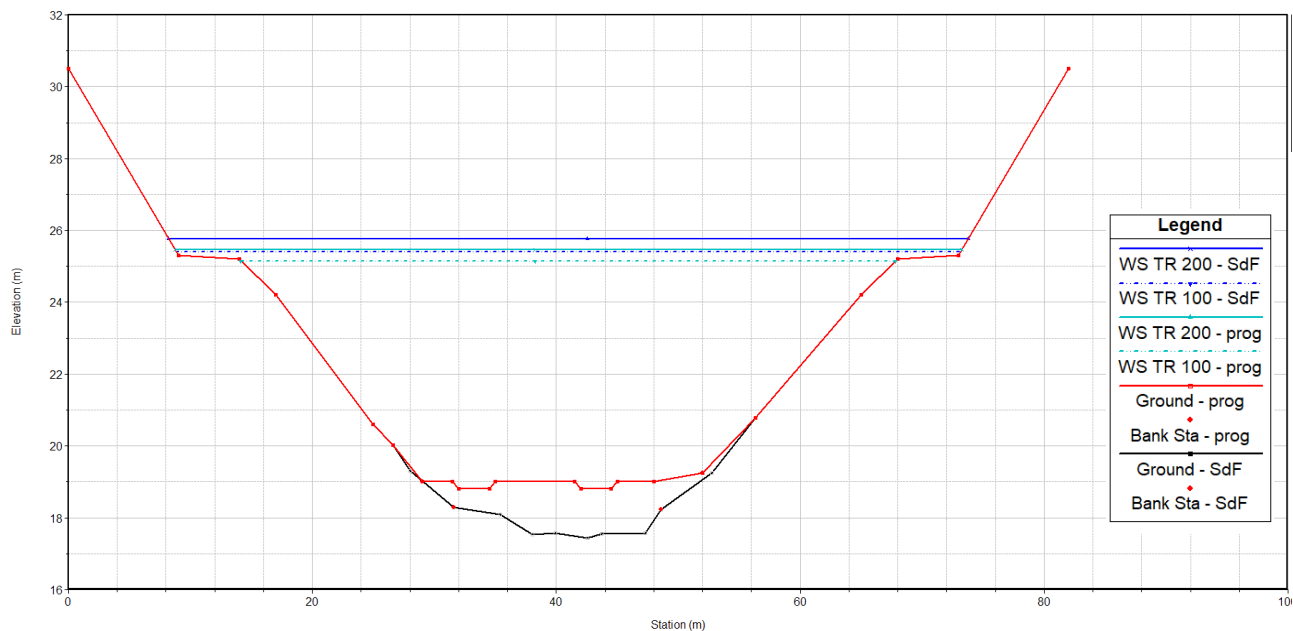




FIGURA 32 - RISULTATI DELLA MODELLAZIONE IDRAULICA- SEZIONE 18 M A VALLE DELLA TRAVERSA

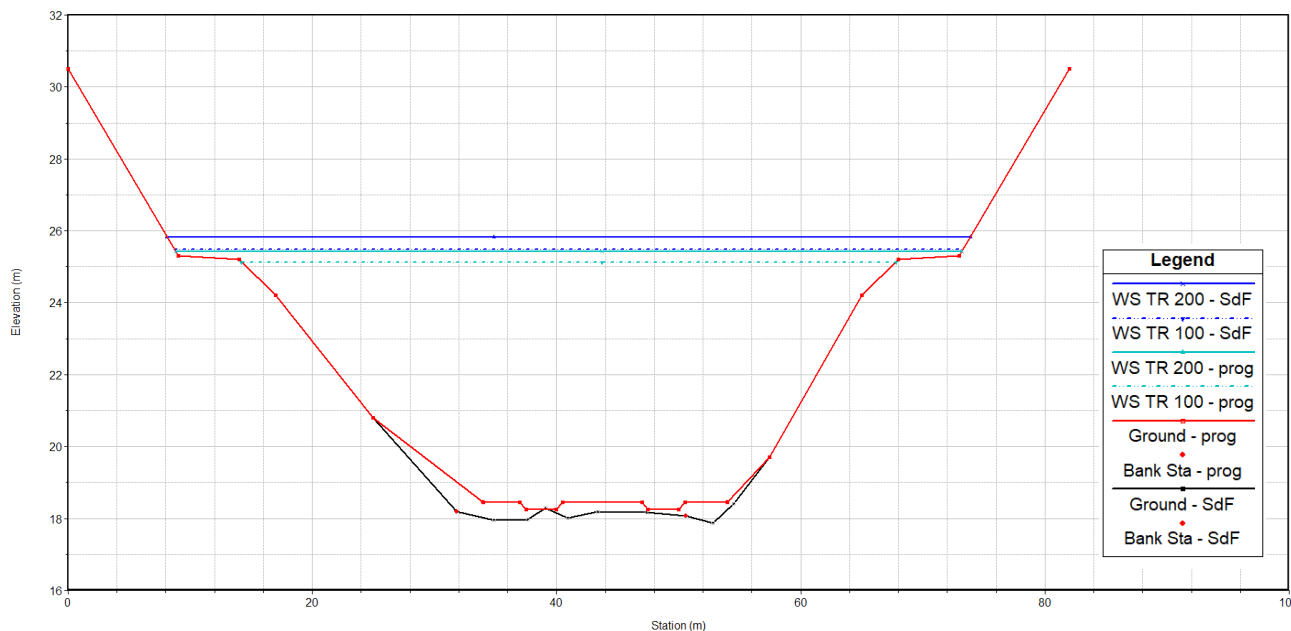


FIGURA 33 - RISULTATI DELLA MODELLAZIONE IDRAULICA- SEZIONE 40 M A VALLE DELLA TRAVERSA

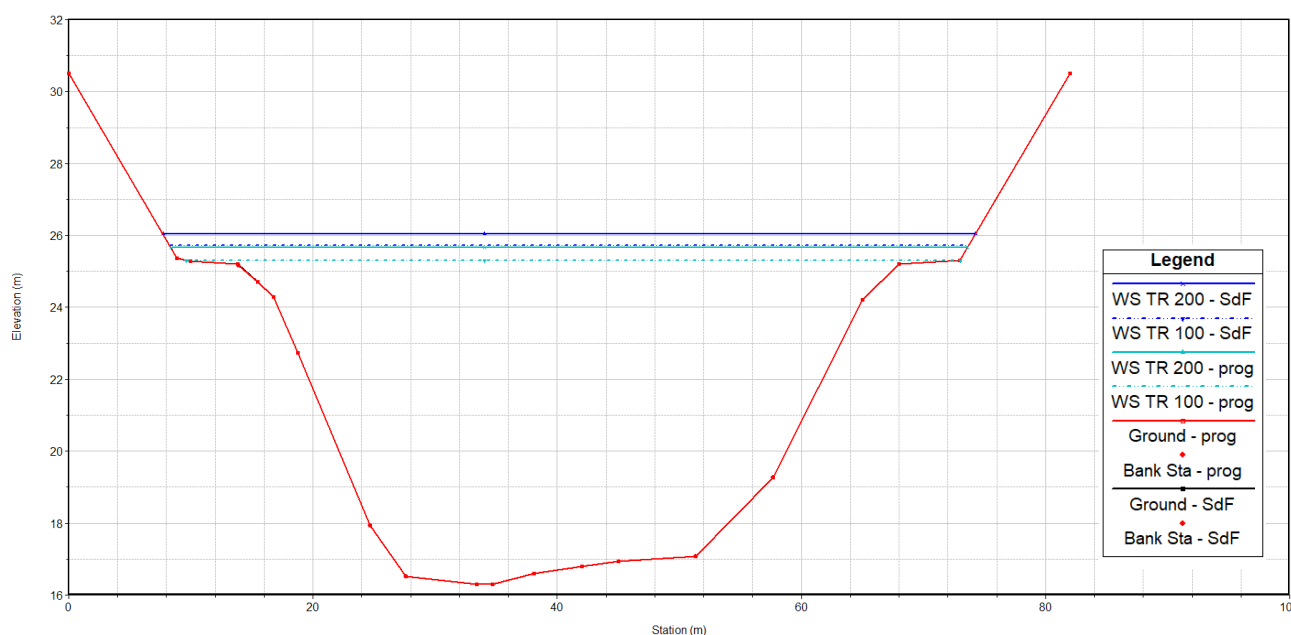




TABELLA 7 – RISULTATI DELLA MODELLAZIONE IDRAULICA - STATO DI FATTO

RIVER STATION		-4 M	-1 M	TRAVERSA	+6 M	+18 M	+28 M	+40 M	+80 M
Min Ch El [m]	TR 100 (880 mc/s)	17.00	17.10		17.44	17.96	16.64	16.20	17.00
	TR 200 (940 mc/s)	17.00	17.10		17.44	17.96	16.64	16.20	17.00
W.S. Elev [m]	TR 100 (880 mc/s)	26.01	25.43		25.41	25.49	25.82	25.84	25.71
	TR 200 (940 mc/s)	26.31	25.72		25.76	25.83	26.15	26.17	26.03
Crit W.S. [m]	TR 100 (880 mc/s)	22.60	23.45		23.62	23.40	22.05	21.50	21.99
	TR 200 (940 mc/s)	22.84	23.70		23.85	23.60	22.26	21.71	22.20
E.G. Elev [m]	TR 100 (880 mc/s)	26.77	26.72		26.68	26.60	26.43	26.40	26.37
	TR 200 (940 mc/s)	27.11	27.05		27.02	26.94	26.77	26.75	26.71
E.G. Slope [%]	TR 100 (880 mc/s)	0.06%	0.12%		0.33%	0.30%	0.12%	0.10%	0.05%
	TR 200 (940 mc/s)	0.06%	0.12%		0.31%	0.28%	0.12%	0.10%	0.05%
Vel Chnl [m/s]	TR 100 (880 mc/s)	4.02	5.28		5.50	5.15	3.64	3.55	3.70
	TR 200 (940 mc/s)	4.12	5.39		5.53	5.18	3.71	3.63	3.79
Flow Area [mq]	TR 100 (880 mc/s)	336.65	276.88		272.52	285.41	345.65	374.13	346.17
	TR 200 (940 mc/s)	356.66	295.80		294.97	307.73	367.41	395.80	366.99
Top Width [m]	TR 100 (880 mc/s)	66.46	64.46		64.39	64.66	65.80	65.87	65.42
	TR 200 (940 mc/s)	67.49	65.47		65.59	65.84	66.94	67.00	66.52
Froude # Chl	TR 100 (880 mc/s)	0.44	0.61		0.64	0.61	0.40	0.37	0.41
	TR 200 (940 mc/s)	0.44	0.61		0.62	0.59	0.40	0.37	0.41



TABELLA 8 – RISULTATI DELLA MODELLAZIONE IDRAULICA - CONFIGURAZIONE DI PROGETTO

RIVER STATION		-4 M	-1 M	TRAVERSA	+6 M	+18 M	+28 M	+40 M	+80 M
Min Ch El [m]	TR 100 (880 mc/s)	17.00	17.10		18.80	18.25	17.75	17.15	17.00
	TR 200 (940 mc/s)	17.00	17.10		18.80	18.25	17.75	17.15	17.00
W.S. Elev [m]	TR 100 (880 mc/s)	25.37	24.60		25.19	25.17	25.29	25.27	25.13
	TR 200 (940 mc/s)	25.73	24.95		25.51	25.48	25.65	25.62	25.45
Crit W.S. [m]	TR 100 (880 mc/s)	22.61	23.45		23.76	23.31	22.31	21.88	21.71
	TR 200 (940 mc/s)	22.84	23.70		23.96	23.50	22.50	22.06	21.90
E.G. Elev [m]	TR 100 (880 mc/s)	26.30	26.23		26.18	26.04	25.90	25.84	25.72
	TR 200 (940 mc/s)	26.68	26.60		26.56	26.43	26.26	26.20	26.07
E.G. Slope [%]	TR 100 (880 mc/s)	0.08%	0.18%		1.02%	0.85%	0.46%	0.42%	0.05%
	TR 200 (940 mc/s)	0.08%	0.17%		1.01%	0.87%	0.44%	0.40%	0.05%
Vel Chnl [m/s]	TR 100 (880 mc/s)	4.41	5.93		4.86	4.69	3.62	3.64	3.44
	TR 200 (940 mc/s)	4.47	6.00		5.00	4.90	3.64	3.70	3.54
Flow Area [mq]	TR 100 (880 mc/s)	295.03	231.29		235.38	255.19	294.40	315.43	310.05
	TR 200 (940 mc/s)	318.19	249.15		255.35	274.00	317.78	338.09	329.28
Top Width [m]	TR 100 (880 mc/s)	64.26	50.43		53.93	53.83	63.04	60.68	53.60
	TR 200 (940 mc/s)	65.49	52.51		64.73	64.61	65.22	65.10	64.52
Froude # Chl	TR 100 (880 mc/s)	0.50	0.72		0.62	0.58	0.43	0.41	0.40
	TR 200 (940 mc/s)	0.50	0.71		0.62	0.59	0.42	0.41	0.40



LIFEEL - LIFE19NAT/IT/000851

MISURE URGENTI NEL MEDITERRANEO ORIENTALE PER LA CONSERVAZIONE A LUNGO TERMINE DELL'ANGUILLA EUROPEA (ANGUILLA ANGUILLA)

ACTION A3: PROGETTAZIONE DI PASSAGGI PER ANGUILLE PER RIAPRIRE OLTRE 1.000 KM DI HABITAT PER LA MIGRAZIONE DELLE CECHE VERSO MONTE



FIGURA 34 - PORTATA CON TEMPO DI RITORNO DI 100 ANNI ($880 \text{ m}^3/\text{s}$)

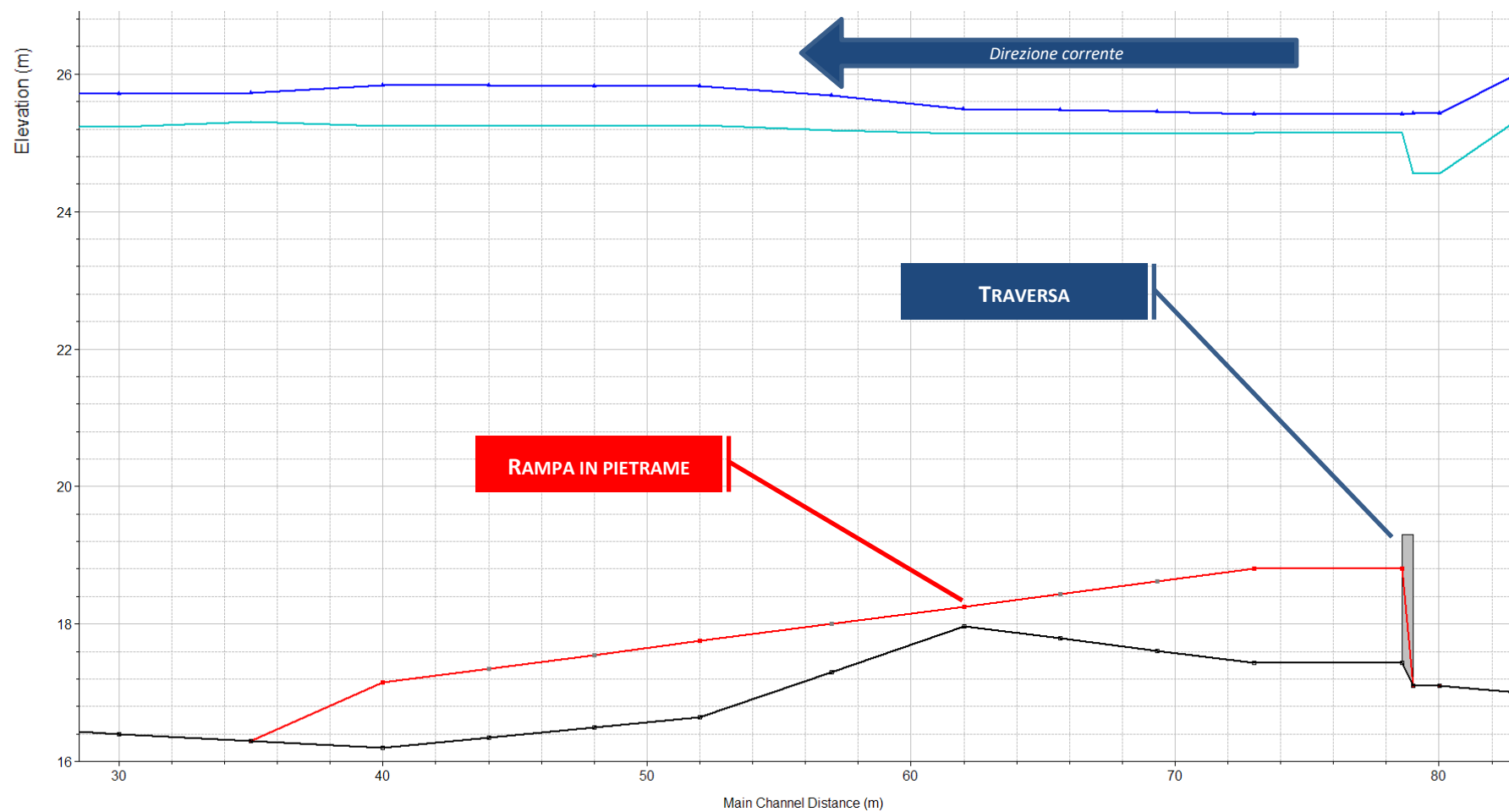
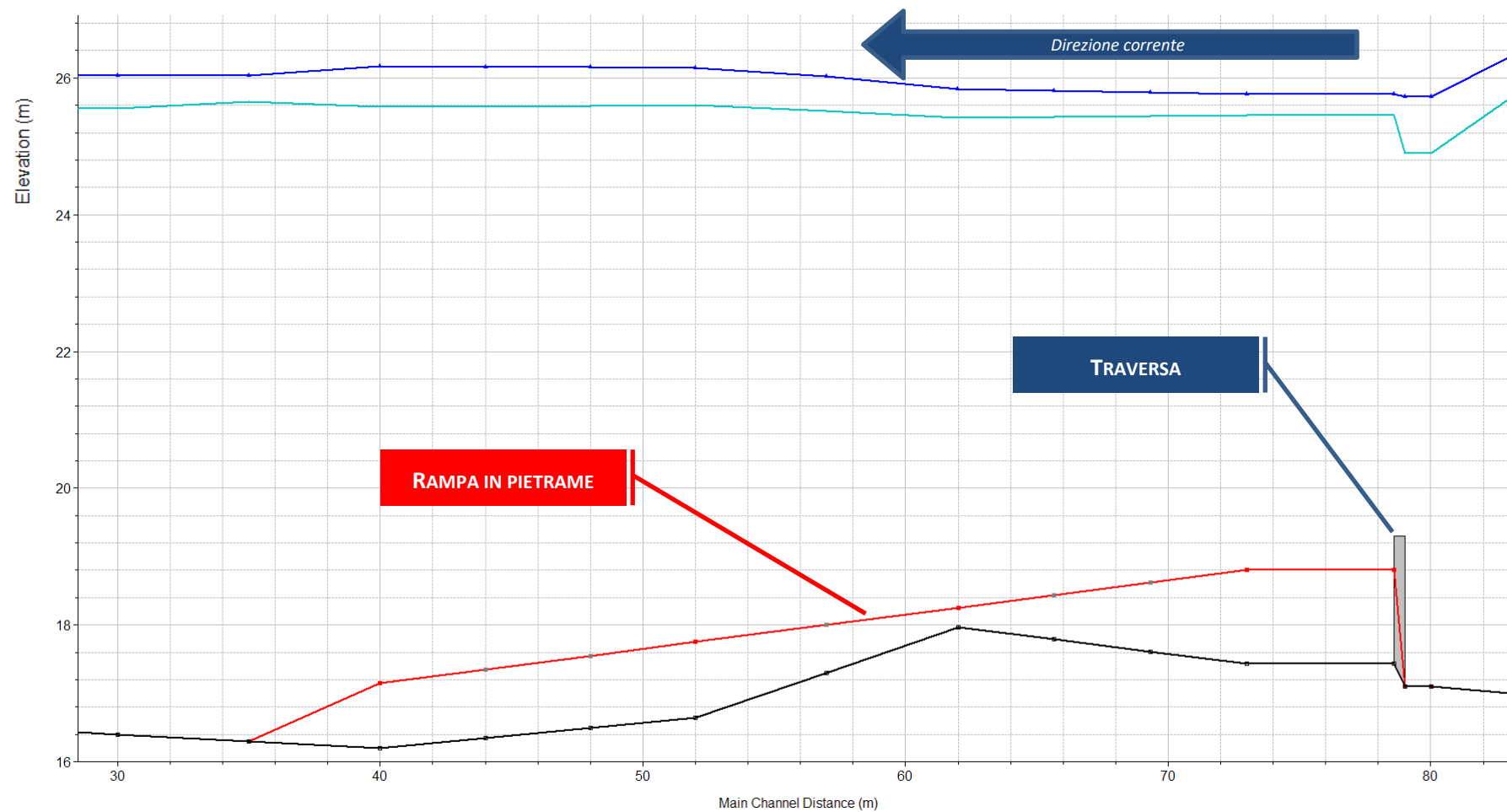




FIGURA 35 - PORTATA CON TEMPO DI RITORNO DI 200 ANNI ($940 \text{ m}^3/\text{s}$)





3.5 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Le simulazioni svolte dimostrano che l'effetto delle rampe in pietrame sul profilo idraulico del Fiume Panaro è pressoché nullo.

In realtà il modello stima addirittura un abbassamento del tirante idrico in condizioni di progetto dovuto in parte al ribassamento di una parte della soglia, in parte al fatto che il profilo di fondo ha un andamento più regolare.

Il tirante idrico simulato dal modello idraulico in questa sede è compatibile con i valori forniti dagli annali idrologici nel tratto di pianura del Panaro.

Infine, come già è stato accennato, dato che le tre rampe in pietrame in progetto sono del tutto simili tra loro, in questa sede non vengono presentati e commentati i risultati relativi alle simulazioni effettuate per le altre due traverse (Santa Bianca e Bondeno), che risultano del tutto simili a quelli qui riportati per la traversa di Nonantola.

Varano Borghi, aprile 2024

Ing. Massimo Sartorelli