

REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
0	11/2013	CONSEGNA	A.Boccato	A.Boccato	M.Coccato
1	06/2014	REVISIONE PER RICHIESTE PLIS	A.Boccato	A.Boccato	M.Coccato
2	12/2020	AGGIORNAMENTO PROGETTO ESECUTIVO	J.E.Lucca	J.E.Lucca	M.Coccato
3	01/2021	VERIFICA AGGIORNAMENTO PROGETTO ESECUTIVO	J.E.Lucca	J.E.Lucca	S.Fattorelli



OPERE DI LAMINAZIONE DELLE PIENE DEL FIUME OLONA DA REALIZZARE NEI COMUNI DI CANEGRATE (MI), LEGNANO (MI), PARABIAGO (MI), E S. VITTORE OLONA (MI)

AGGIORNAMENTO PROGETTO ESECUTIVO

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO:

DOTT. ING. MARCO LA VEGLIA

PROGETTAZIONE:

A.T.I. TECHNITAL S.p.A. – mandataria
BETA STUDIO S.r.l.

AGGIORNAMENTO:

BETA STUDIO S.r.l.

Capo Progetto e Responsabile Integrazione Prestazioni Specialistiche: DOTT. ING. SERGIO FATTORELLI

ELABORAZIONE:

BETA Studio S.r.l.

TITOLO ELABORATO:

STUDI ED INDAGINI
STUDIO IDRAULICO DEL FIUME OLONA E
DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA DI REGOLAZIONE

SCALA:

—

REV.

3

N° ELABORATO:

PE SI IDR 01

NOME FILE:

PE SI IDR 01.doc

DATA:

GENNAIO 2021

**OPERE DI LAMINAZIONE DELLE PIENE DEL FIUME OLONA DA
REALIZZARE NEI COMUNI DI CANEGRATE (MI), LEGNANO (MI),
PARABIAGO (MI) E S. VITTORE OLONA (MI) – PRIMO LOTTO FUNZIONALE**

**AGGIORNAMENTO
PROGETTO ESECUTIVO**

**STUDI E INDAGINI
STUDIO IDRAULICO DEL FIUME OLONA E
DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA DI REGOLAZIONE**

I N D I C E

PREMESSA	4
1. RICOSTRUZIONE DEI PROFILI IDROMETRICI DEL FIUME OLONA	6
1.1. Descrizione del corso d'acqua nel tratto prossimo al mulino Giulini	6
1.2. Criticità idrauliche e interventi di sistemazione	6
1.3. Studio idraulico del fiume Olona	8
1.4. Informazione topografica	8
1.5. Modello matematico HEC-RAS	10
1.6. Profili idrometrici - Stato di fatto	11
1.7. Profili idrometrici stato di progetto	20
2. DIMENSIONAMENTO DEI MANUFATTI DI REGOLAZIONE	31
2.1. Schema di funzionamento generale	31
2.2. Criteri di dimensionamento idraulico, franchi di sicurezza	32
2.3. Prescrizioni di gestione degli organi mobili	34
2.4. Canale di adduzione	35
2.5. Verifica della vasca di dissipazione	36
2.6. Opera di presa	38
2.6.1. Dimensionamento delle paratoie piane	38
2.6.1. Dimensionamento del muretto di sfioro	39
2.7. Opera di restituzione	40
2.7.1. Dimensionamento dello scarico di fondo	41
2.8. Opera di regolazione intermedia tra i bacini SX2 e SX3	43
A. Il modello matematico HEC-RAS	46
A.1 Ipotesi di funzionamento e capacità di calcolo	47
A.2 Definizione dei parametri fondamentali	48
A.2.1 Moto permanente e vario	49
A.2.2 Moto uniforme e vario	49
A.2.3 Moto subcritico e supercritico	50
A.2.4 Altezza critica	51
A.3 Procedure di calcolo per simulazioni in moto permanente	51
A.3.1 Determinazione della distribuzione del moto in una sezione trasversale	52
A.3.2 Distribuzione delle pressioni in una sezione trasversale	53
A.3.3 Calcolo dei profili idraulici	53
A.3.3.A Bilancio dell'energia	53
A.3.3.B Perdite di energia	54
A.3.4 Standard step method	55

PREMESSA

La presente relazione costituisce parte integrante dell'aggiornamento del progetto esecutivo dell'intervento di realizzazione delle *opere di laminazione delle piene del fiume Olona da realizzare nei comuni di Canegrate (MI), Legnano (MI), Parabiago (MI) e San Vittore Olona (MI)*. In particolare il progetto prevede la realizzazione del Primo Lotto Funzionale, ossia di quelle opere realizzabili con i finanziamenti già disponibili.

L'intervento proposto s'inquadra nel sistema complessivo di opere previste per la messa in sicurezza del territorio situato nel tratto di pianura del fiume, fino alla città di Milano, che prevede la realizzazione di una serie di casse di laminazione lungo il corso del fiume Olona (nel comune di Malnate, nel comune di Lozza, nel comune di Gorla Maggiore e nei comuni interessati dal presente intervento), in grado di mantenere le portate in ingresso in Milano, compatibili con la capacità dell'alveo che, in quel tratto, è tombinato. Si tratta di un intervento finanziato dalla Regione Lombardia ai sensi dell'Ordinanza 3258 del Presidente del Consiglio (dicembre 2002) che affidava incarico alle Regioni interessate dalle esondazioni dei corsi d'acqua, di provvedere "...al ripristino, in condizioni di sicurezza, delle infrastrutture pubbliche danneggiate, alla pulizia ed alla manutenzione straordinaria degli alvei dei corsi d'acqua ed alla stabilizzazione dei versanti, nonché alla realizzazione di adeguati interventi ed opere di prevenzione dei rischi ed alla messa in sicurezza relativa ai dissesti idrogeologici ed al controllo delle piene; ..."; stante il carattere di urgenza, l'ordinanza disponeva inoltre la deroga dalle disposizioni che normalmente regolano la progettazione delle opere pubbliche (es. legge Merloni ecc.).

La prima versione del progetto è stata consegnata nel dicembre 2004, in cui è stato definito l'intervento nel suo complesso. Successivamente, sulla base delle indicazioni pervenute e dei risultati di ulteriori indagini conoscitive avviate, è stata predisposta una variante al progetto: tale Perizia di Variante rappresenta lo sviluppo delle opere di laminazione comprese nel Primo Lotto Funzionale ed è stata approvata nel dicembre 2005 dall'Ente appaltante.

Il progetto dell'intero intervento (primo lotto funzionale e lotto di completamento) è stato quindi sottoposto a procedura di VIA e nel dicembre 2010 la Regione Lombardia ha emesso giudizio positivo alla VIA (Decreto N°12641 del 2 dicembre 2010) con delle prescrizioni. Nel giugno del 2011 è stato quindi consegnato e approvato il progetto definitivo a seguito della Conferenza di Servizi del 1 agosto 2011.

Nel novembre del 2013 è stato consegnato il progetto esecutivo che accoglieva le richieste di modifiche emerse in sede di conferenza dei servizi. Nel giugno del 2014, il progetto è stato riemesso a seguito di incontri avvenuti tra AIPo, rappresentanti dei Comuni, del PLIS (Parco Locale di Interesse Sovracomunale) e gli altri membri della conferenza dei servizi (Regione Lombardia, Consorzio del Fiume Olona, ecc.) in cui sono emerse osservazioni e richieste di modifica alle opere presentate in esecutivo, da parte degli enti elencati.

Infine il presente aggiornamento del progetto esecutivo si è reso necessario a seguito della volontà di AIPo di ottemperare all'adeguamento dei lavori al D. Lgs. 50/2016. In particolare AIPo ha affidato a BETA Studio s.r.l. in data 07/09/2020 l'incarico di aggiornamento del progetto esecutivo realizzato dal Raggruppamento Temporaneo di Imprese costituito da TECHNITAL S.p.A. (capogruppo mandataria) e da BETA STUDIO s.r.l.

La presente relazione ha come obiettivo quello di dimensionare le opere di regolazione idraulica che garantiscano il corretto funzionamento della cassa. Nell'intervenire sul regime idrometrico di questo complesso nodo idraulico si è avuta cura di dimensionare le opere al fine di non aggravare le condizioni di criticità.

Lo spostamento dell'opera di derivazione a seguito delle osservazioni ricevute al progetto esecutivo (nov. 2013) ha riguardato le problematiche maggiori in quanto l'opera viene ad essere ubicata non nel ramo principale del fiume Olona bensì lungo la roggia Molinara, in un punto in cui il fiume si separa in ramificazioni e sono presenti situazioni di criticità idraulica. Prima di procedere alla riprogettazione dell'opera di derivazione è stato necessario affrontare uno studio specifico di carattere idraulico, per comprendere il comportamento del fiume e delle modificazioni del regime idrometrico che saranno imposte dalla presenza della nuova opera.

Va infine segnalato che alcune aree adiacenti al corso d'acqua sono state dichiarate esondabili ai sensi del PAI. In questo caso è stato mantenuto il carattere di esondabilità. In particolare, il rilevato arginale sulla sinistra idraulica del fiume Olona a monte della nuova opera di derivazione, è stato oggetto di un intervento di sistemazione che tuttavia non va inteso come un intervento di messa in sicurezza del territorio.

1. RICOSTRUZIONE DEI PROFILI IDROMETRICI DEL FIUME OLONA

1.1. Descrizione del corso d'acqua nel tratto prossimo al mulino Giulini

Il fiume Olona, una volta oltrepassato il ponte lungo la strada provinciale n.189, si divide in due rami formando un'isola che, seppure protetta da arginature di modesta altezza, viene normalmente sommersa dalle acque in condizioni di piena.

Lungo entrambi i rami, che nel seguito chiameremo semplicemente ramo sinistro e ramo destro, sono state realizzate due soglie di regolazione per evitare la tendenza del fiume a spostare e ad incidere progressivamente, uno dei due rami, cosa che avrebbe l'effetto di rendere asciutto il secondo. Entrambi questi rami hanno origini naturali, ma attualmente, in assenza delle due suddette soglie, la corrente ordinaria andrebbe a defluire unicamente lungo il ramo sinistro.

Mentre il ramo destro segue un percorso lungo l'incisione naturale, il ramo sinistro vede la presenza di un canale artificiale (roggia Molinara) realizzato per alimentare il Mulino Giulini. Di fatto, la presenza di questa roggia determina una seconda isola, al cui interno sono presenti, oltre al mulino, anche edifici residenziali. Questa situazione comporta una evidente situazione di rischio idraulico.

Subito a valle di questa seconda diramazione, è stato realizzato un manufatto di regolazione dotato di una paratoia mobile che determina la suddivisione della portata in arrivo. Secondo le regole di gestione imposte dal Consorzio Olona, in condizioni di piena la paratoia viene mantenuta in posizione completamente aperta favorendo il deflusso lungo il ramo naturale dell'Olona che nel modello viene denominato "Ripartitore", data la sua funzione idraulica.

Le condizioni del sistema in quest'area, così come osservate durante il sopralluogo, presentano evidenti criticità. La situazione appare piuttosto compromessa per la presenza di edificazioni a ridosso delle sponde, protezioni arginali che non garantiscono il contenimento dei livelli di piena, scarse condizioni di manutenzioni delle opere.

1.2. Criticità idrauliche e interventi di sistemazione

Come già anticipato, la ramificazione del fiume Olona ha portato alla formazione di due isole. Nella prima è stato previsto un intervento di riqualificazione ambientale, nella seconda, dove sorge il complesso Giulini, sono presenti alcuni fabbricati rurali e la situazione appare complessa. I ponti che collegano quest'area al territorio esterno, così come i rilevati arginali adiacenti, presentano franchi di sicurezza ridottissimi. In caso di piena

entrambi i ponti sono a rischio di sormonto con totale isolamento di questa porzione di territorio.

In particolare il ponte presente sulla roggia Molinara viene circondato dalle acque e risulta non transitabile.

Nell'ottica di una riqualificazione dell'area, è già stato osservato che il costo da sostenere è troppo oneroso rispetto le disponibilità economiche di progetto e va demandato ad altro finanziamento specifico. Tuttavia, il livello di sicurezza idraulica può essere aumentato fin da ora realizzando alcuni interventi di sistemazione comprensivi di difese spondali, rifacimento del suddetto attraversamento e interventi di adeguamento di una soglia fissa.

Gli interventi proposti sono così elencati:

- realizzazione di difese spondali nei punti dove l'azione erosiva della corrente ha prodotto fenomeni di destabilizzazione della scarpata;
- adeguamento della soglia fissa, a valle del ponte di via Filarete con riduzione della quota di sfioro, al fine di deprimere i profili idrometrici di piena e di aumentare l'esiguo franco idraulico attuale.
- rifacimento del ponticello di attraversamento della roggia Molinara, con struttura di 3^a categoria, ma adatta a sopportare il peso di mezzi d'opera fino a 120 KN (12 tonnellate);

Il ponticello, costituito da una singola corsia, viene utilizzato per accedere alla zona interna dell'isola fluviale circondata dalla roggia Molinara e dal fiume Olona. Attualmente, in condizioni di piena, l'impalcato viene raggiunto dalle acque e determina un importante rigurgito a monte. Peraltro anche le rampe di accesso all'impalcato vengono sommerse dalle acque rendendo impossibile l'utilizzo di questa struttura. L'isola è tuttavia accessibile anche da un ponte presente sul lato (destra idrografica) di maggiori dimensioni e quota.

Viste le condizioni di manutenzione in cui si trova la struttura sulla roggia Molinara, si è previsto il suo rifacimento in posizione adiacente, mediante una struttura costituita da un impalcato in acciaio e da spalle in calcestruzzo armato, collegate tra loro da una platea.

Dal punto di vista strutturale, il nuovo attraversamento è stato progettato con riferimento ai ponti di 3^a categoria con la possibilità di sopportare il carico di un mezzo di servizio secondo lo schema di calcolo indicato dalla circolare ministeriale del 2 febbraio 2009, n. 617 (C5.1.4.9 Ponti di 3a categoria) e pertanto in grado di sopportare un carico massimo di 120 KN.

Dal punto di vista della sicurezza idraulica, la struttura verrà inserita in area allagabile e pertanto la sua fruibilità dipenderà dalle condizioni delle strade e delle rampe di accesso all'impalcato. In queste condizioni si è ritenuto inutile sovradimensionare lo sviluppo verticale della struttura nell'intento di rispettare il franco di sicurezza.

La struttura viene pertanto realizzata con una quota dell'impalcato tale da non essere raggiunta dalla massima piena, situazione che andrebbe a disturbare il profilo idrometrico a monte dove è presente l'opera di derivazione.

1.3. Studio idraulico del fiume Olona

I livelli idrometrici che si instaurano nel corso d'acqua nei tratti adiacenti alle opere di presa e di restituzione della cassa di espansione, influiscono in modo significativo sul funzionamento dei manufatti in progetto e risulta pertanto indispensabile procedere alla loro valutazione in modo accurato.

Nonostante le opere di presa e di restituzione della cassa, manufatti che interagiscono direttamente con la corrente in alveo, siano dotate di organi di regolazione mobili che conferiscono alle opere la capacità di adattarsi ad eventuali modificazioni delle condizioni al contorno, i dimensionamenti sono stati pensati nell'intento di garantire un buon controllo delle piene anche in caso di avaria di un dispositivo tale da rendere inutilizzabile una di questi organi mobili, limitando la perdita di efficienza complessiva.

L'alveo principale stesso è oggetto di un intervento di sistemazione, orientato all'aumento degli spazi golenali attualmente disponibile all'espansione delle acque, destinato a modificarne l'assetto idraulico e del quale è necessario tener conto.

Per questi ed altri motivi, si è proceduto a eseguire un nuovo rilievo topografico e batimetrico del corso d'acqua che ha restituito informazioni plano-altimetriche di maggior dettaglio rispetto a quelle già disponibili. Tali informazioni sono state utilizzate nell'implementazione del modello matematico di moto monodimensionale, che ha messo a disposizione un utile strumento di riferimento per la progettazione.

1.4. Informazione topografica

In passato è stato effettuato un rilievo topografico utilizzato per lo "Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua naturali ed artificiali all'interno dell'ambito idrografico di pianura Lambro-Olona", in seguito, al fine di ricostruire in maniera più dettagliata l'andamento plano altimetrico della zona d'interesse, in fase di progettazione preliminare, è stato effettuato un nuovo rilievo topografico di maggiore dettaglio.

Questo è stato eseguito a partire dalla sezione situata 550 m a monte della S.P. n 198 ed ha interessato un tratto lungo 2700 m.

L'elaborazione dei dati ottenuti mediante il rilievo aerofotogrammetrico, eseguito nella zona fuori alveo ed il rilievo batimetrico eseguito in alveo, ha consentito la riproduzione di 62 sezioni trasversali del corso d'acqua.

Oltre alle sezioni d'alveo sono state accuratamente rilevate le opere trasversali incontrate lungo il percorso per le quali si è ritenuta possibile una loro interferenza con il regime idrometrico del corso d'acqua; tali manufatti sono posizionati rispettivamente tra le sezioni 51-52 (briglia 1), 41-42 del ramo Montoli (briglia 2), 34-36 (briglia 3), 19-20 (briglia 4), 1-2 (briglia 5).

A seguito della richiesta di spostare l'opera di presa della cassa in corrispondenza della Roggia Molinara è stata realizzata una campagna di rilievi delle aree localizzate lungo il Fiume Olona, principalmente in Comune di San Vittore Olona (MI) e per una piccola parte in Comune di Parabiago (MI).

I rilievi eseguiti in località Molino Giulini (S. Vittore Olona) hanno avuto lo scopo di fornire una serie di sezioni trasversali d'alveo lungo il Fiume Olona (n°3 identificate dal codice "OLNxx"), la Roggia Bellona (n°6 identificate dal codice "BELxx") e la Roggia Molinara (n°5 identificate dal codice "MOLxx"). In quest'area è stato inoltre realizzato un piano quotato del nodo idraulico costituito dal Fiume Olona e della Roggia Molinara in quanto in questo tratto verrà realizzata l'opera di presa della cassa in progetto.

I rilievi hanno inoltre interessato una serie di soglie (n°4 identificate dal codice "Mxx") localizzate lungo il Fiume Olona e la Roggia Molinara e un sensore idrometrico posto a ridosso del ponte della S.P. 198 (**Figura 1.1**).

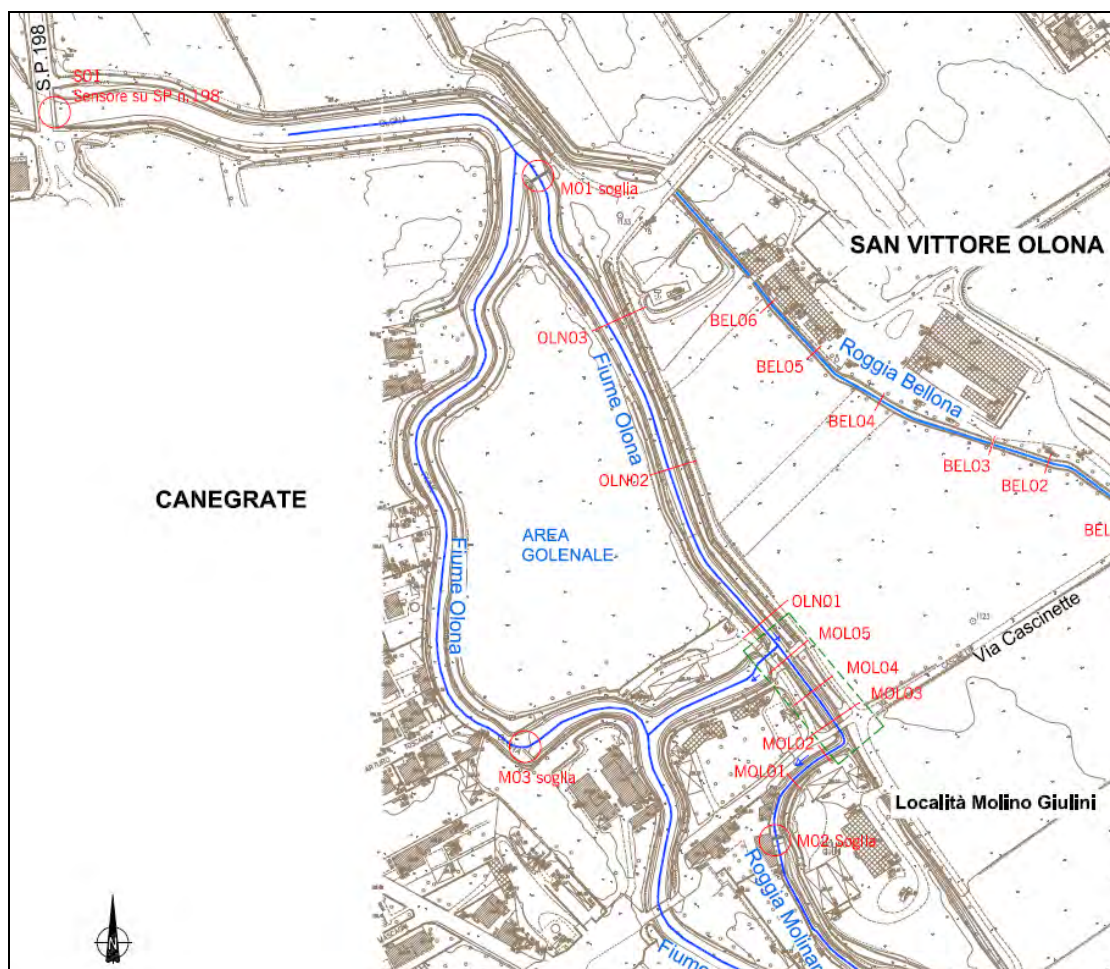


Figura 1.1 – Localizzazione dei rilievi eseguiti in località Molino Giulini (S. Vittore Olona)

1.5. Modello matematico HEC-RAS

L'analisi del comportamento idraulico del fiume Olona, è stata condotta mediante l'implementazione del modello matematico HEC-RAS (i cui algoritmi di calcolo sono stati dettagliatamente descritti in appendice A), che ipotizza un andamento monodimensionale della corrente. Mediante l'uso del modello sono stati ricostruiti i profili idraulici del fiume Olona operando in regime di moto permanente, sia per lo stato di fatto che per lo stato di progetto.

Data la tipologia del corso d'acqua, l'ipotesi di approssimare il campo di moto con una corrente a flusso monodimensionale appare particolarmente adeguata. La scelta di procedere con simulazioni in regime di moto permanente, limita le conclusioni ricavate dal modello a quelle utili per stabilire le quote idrometriche per il dimensionamento delle opere di regolazione, in particolare i livelli idrometrici che si stabiliscono nei pressi delle opere di presa e di restituzione. Peraltro, queste informazioni costituiscono l'obiettivo della presente studio.

1.6. Profili idrometrici - Stato di fatto

Il corso d'acqua è stato schematizzato introducendo la geometria dei seguenti tratti (Figura 1.2):

- tratto di monte del fiume Olona, definito “tratto di monte”, immediatamente a valle del ponte lungo la strada provinciale n.189;
- i due rami “ramo destro” e “ramo sinistro” a valle della diramazione del tratto principale;
- il tratto a valle del ramo destro, definito “ramo destro 2”
- la “Roggia Molinara”;
- il ramo definito “Ripartitore”;
- il tratto di valle del fiume.

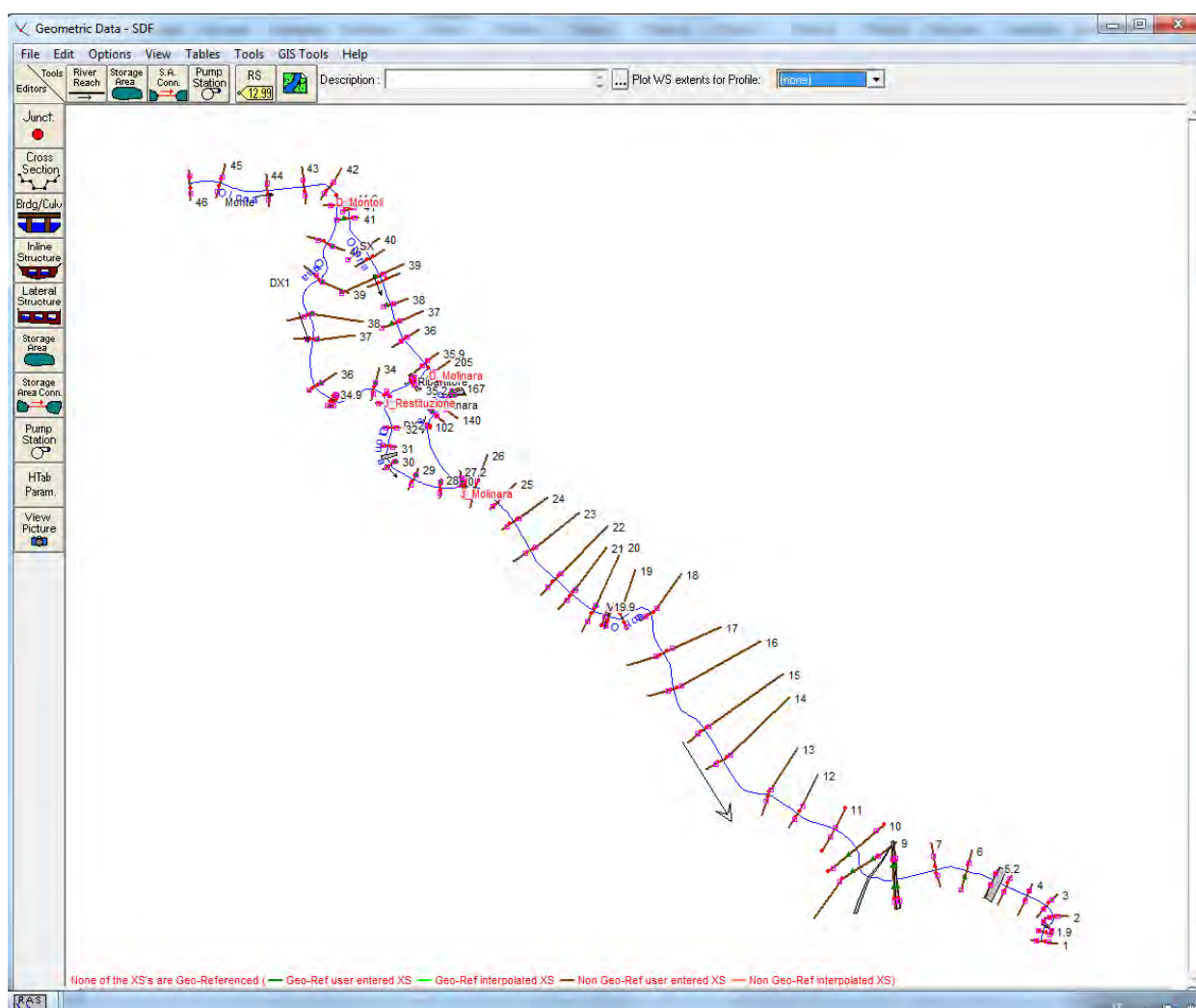


Figura 1.2 – Schematizzazione modello – Stato di fatto

Sono state schematizzate tutte le tratte al fine di simulare l'esatta ripartizione delle portate tra i diversi rami al variare della portata in arrivo da monte.

Data la vicinanza dell'opera di presa della cassa di laminazione (posta tra la sezione MOL05 e MOL04, si veda elaborato PE-TOP-PL02), al nodo "derivazione -ripartitore - Roggia Molinaro", si è resa indispensabile una corretta simulazione del moto in questo nodo idraulico, al fine di ottenere, una corretta ricostruzione del profilo nel tratto di monte e quindi in prossimità dell'opera di presa.

I coefficienti di scabrezza di Manning sono stati imposti pari a 0.035 e 0.045 per l'alveo principale e per le golene rispettivamente avendo indicato come alveo principale la parte della sezione di deflusso normalmente immersa in condizioni ordinarie.

Il modello è stato implementato sia per la portata con Tr 100 anni, pari a 75 m³/s, sia per una portata pari a 80 m³/s identificata come la massima portata che può defluire in alveo

senza dar luogo a tracimazioni arginali e alle conseguenti esondazioni. Tale portata assume pertanto il ruolo di massima portata morfologica (o idraulica).

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti per ogni singola simulazione.

Stato di fatto – portata $Tr\ 100 = 75\ m^3/s$

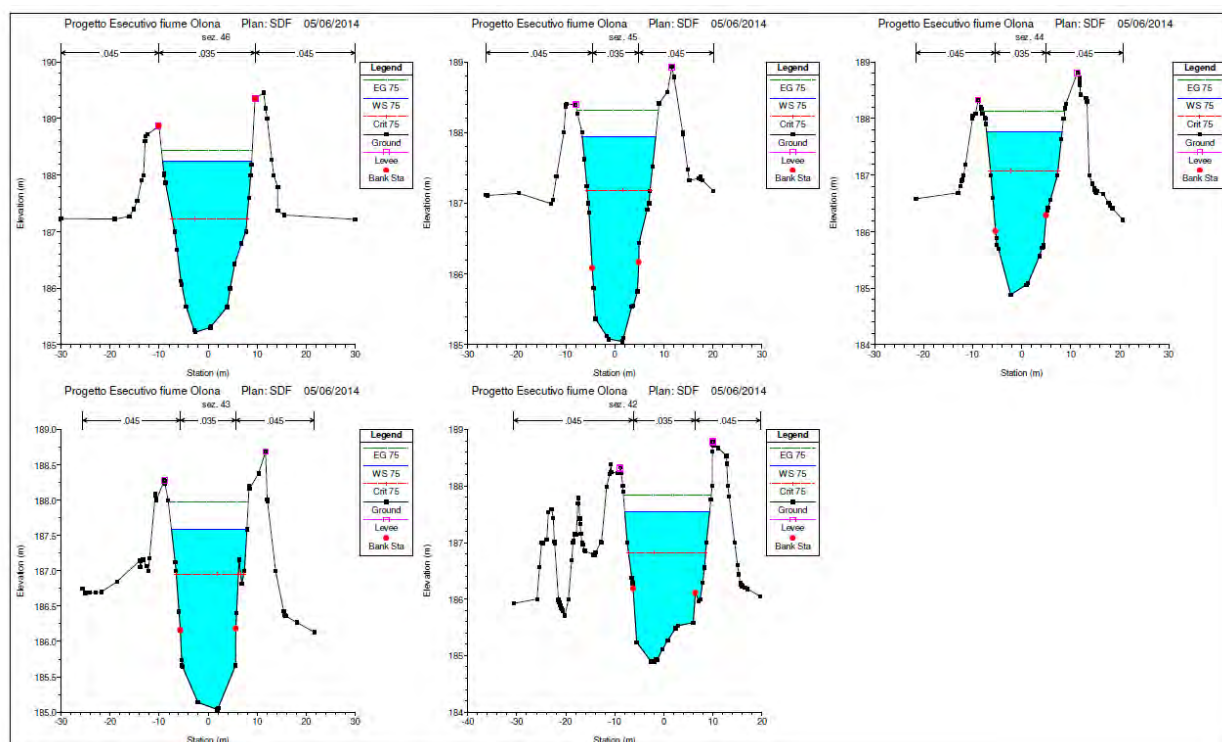


Figura 1.3 – Risultati modello Hec-Ras – tratto di monte $Q=75\ m^3/s$, sdf

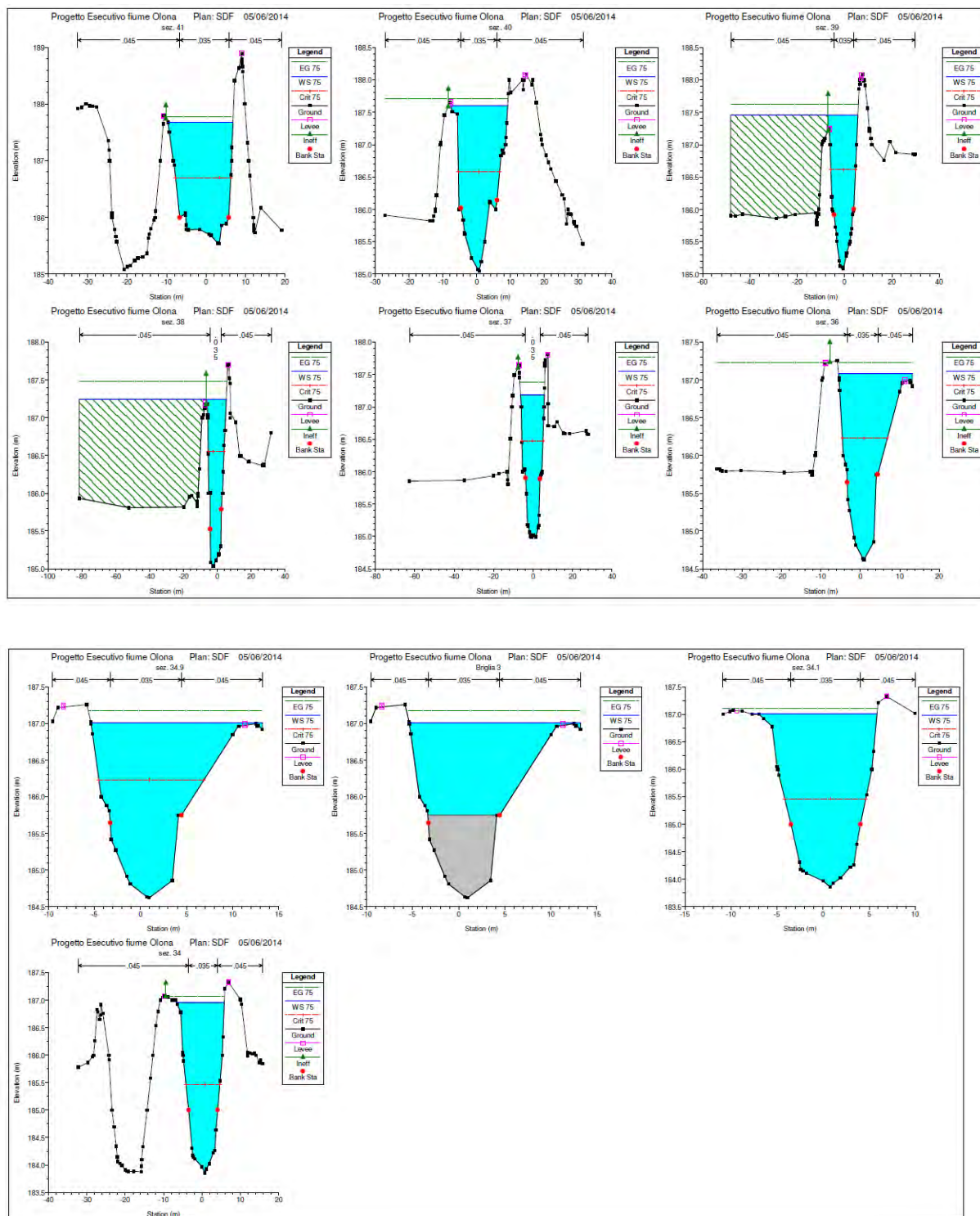


Figura 1.4 – Risultati modello Hec-Ras – Ramo destro $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$, sdf

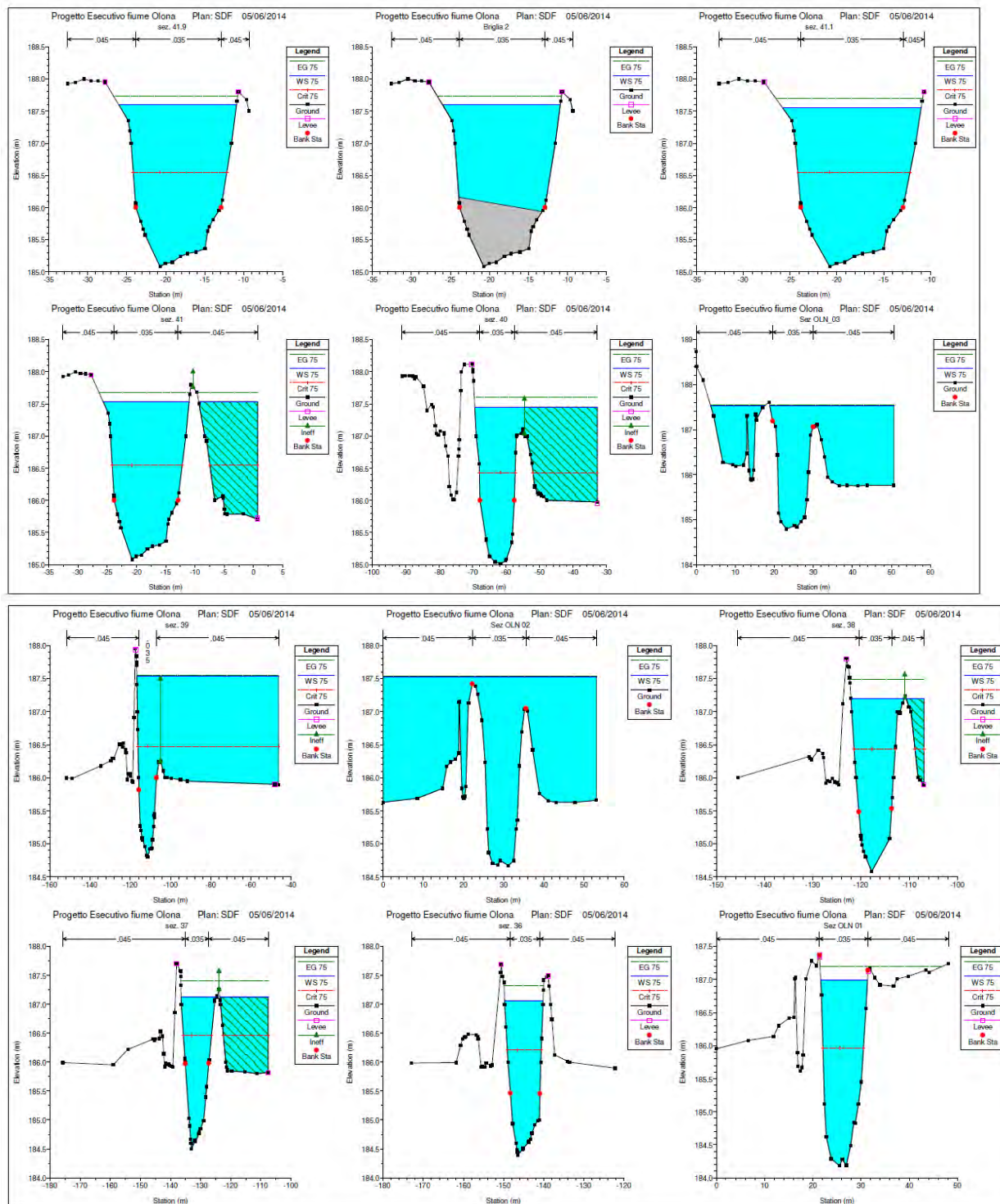


Figura 1.5 – Risultati modello Hec-Ras – Ramo sinistro $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$, sdf

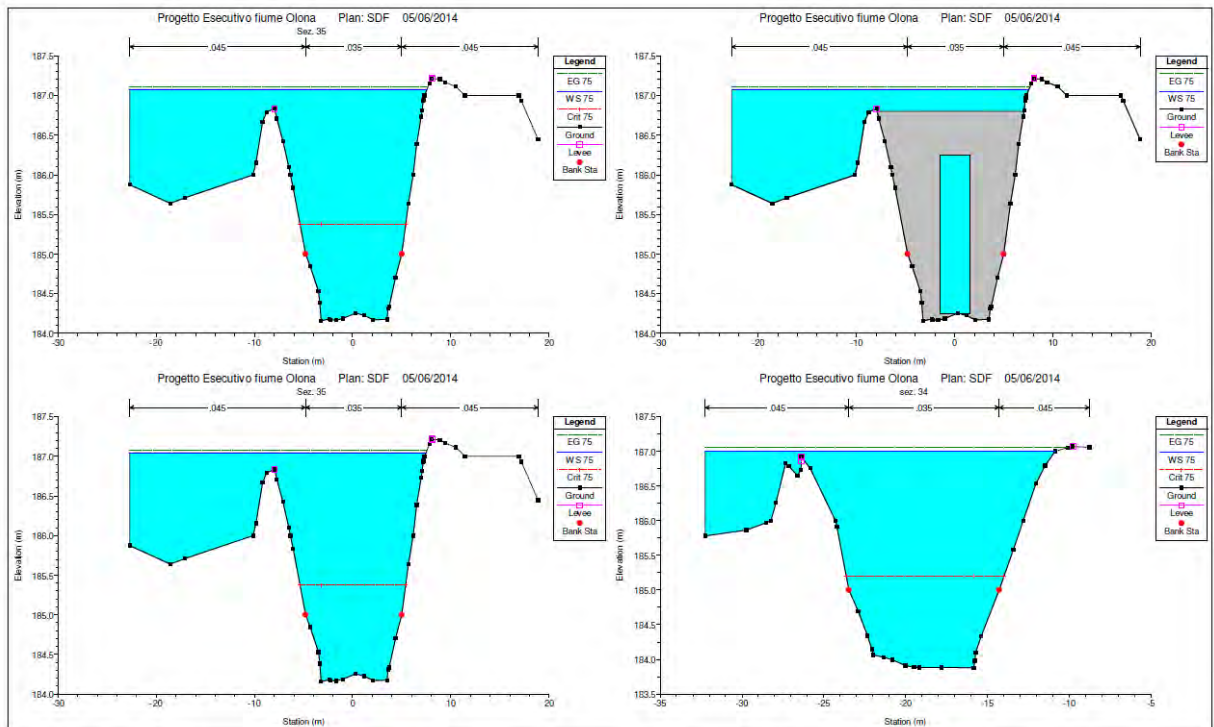
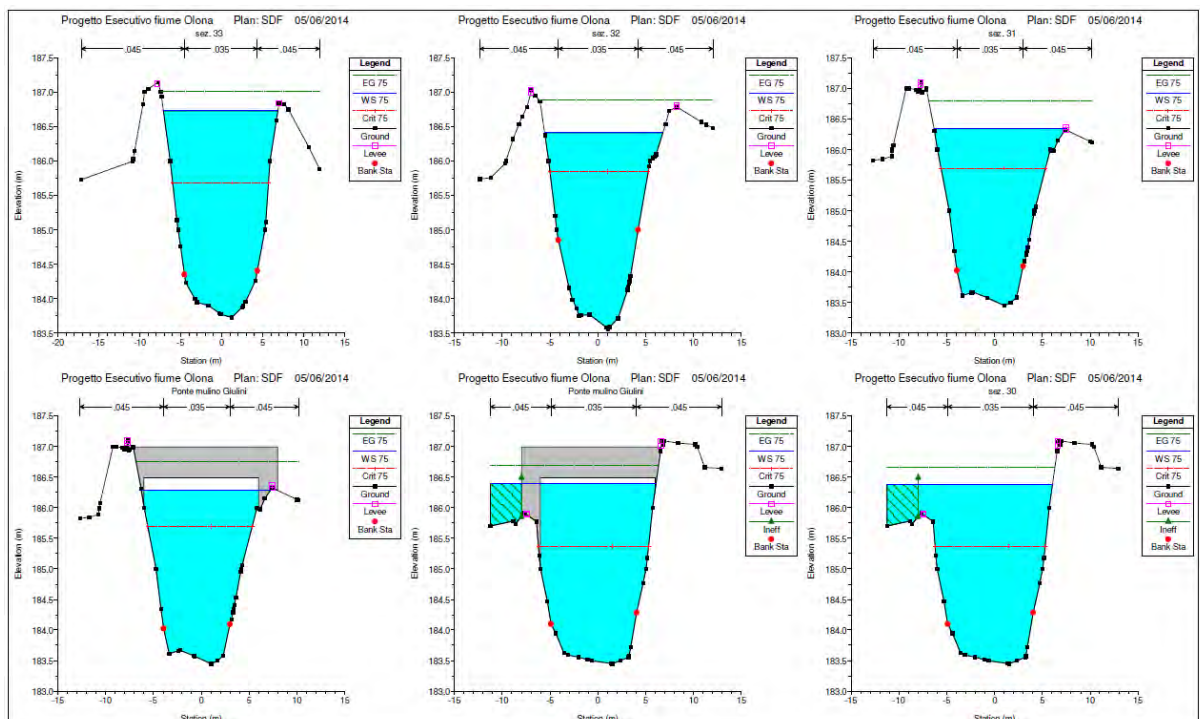


Figura 1.6 – Risultati modello Hec-Ras –Ripartitore $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$, sdf



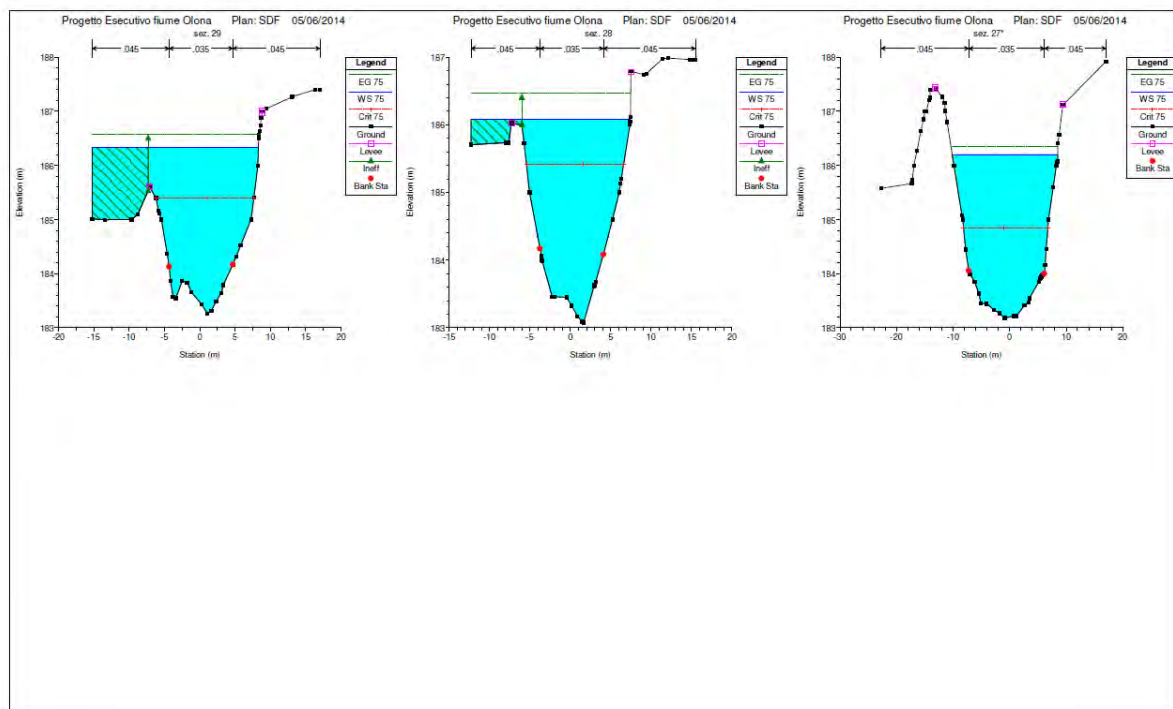
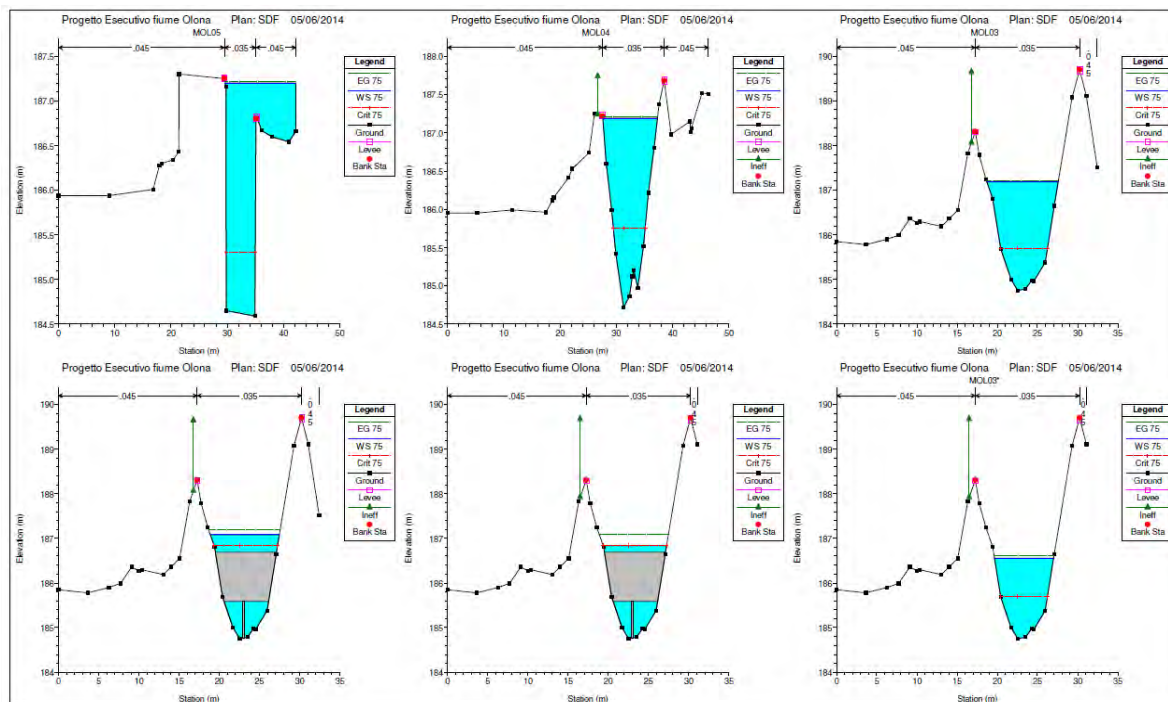


Figura 1.7 – Risultati modello Hec-Ras – Ramo destro 2 $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$, sdf



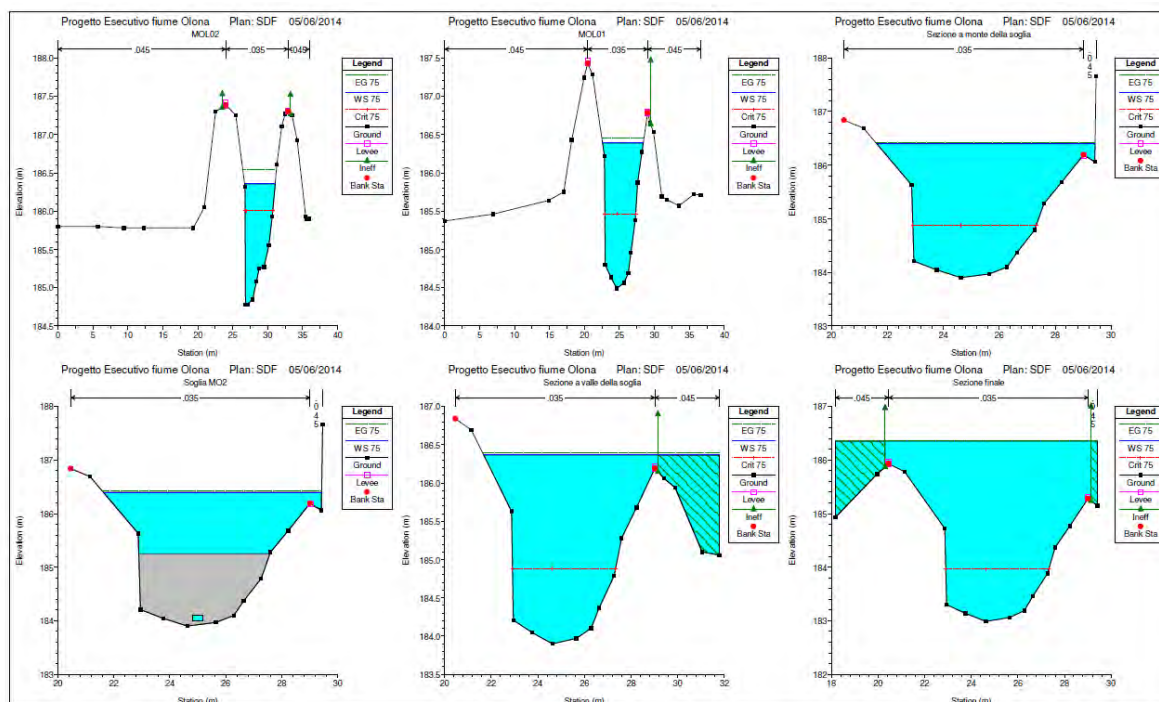


Figura 1.8 – Risultati modello Hec-Ras –Roggia Molinara $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$, sdf

Dai risultati ottenuti, si evince che la portata di $75 \text{ m}^3/\text{s}$, defluisce nel tratto di valle, senza determinare sormonti arginali (Figura 1.3), che si verificano nei tratti immediatamente a valle della biforcazione, bagnando le isole centrali (Figura 1.4, Figura 1.5, Figura 1.6, Figura 1.7, Figura 1.8).

E' da notare però che gli allagamenti risultano confinati entro zone golenali interne ed esterne, formando invasi comunque contenuti entro rilevati.

Come già precedentemente accennato, il ponte Giulini presenta un franco ridottissimo (Figura 1.7) e il ponte sulla Roggia Molinara viene addirittura sormontato dalla piena, determinando un importante rigurgito a monte (Figura 1.8).

In prossimità della sezione MOL05 (dove verrà realizzata l'opera di presa della cassa), il defluire della portata di $75 \text{ m}^3/\text{s}$, consente il raggiungimento di un livello idrometrico pari a 187.19 m s.m.m., mentre in corrispondenza della sezione 6 (zona di restituzione), la stessa portata determina un livello idrometrico pari a 183.13 m s.m.m.

In fase di dimensionamento del progetto esecutivo nella precedente versione, data l'importanza di poter disporre di una stima attendibile dei livelli di piena raggiunti, in particolar modo in prossimità dell'opera di presa, era stata eseguita una analisi di sensibilità dei profili idrometrici ai parametri scabrezza. Questi sono stati fatti variare in un intervallo di 0.030 e 0.040 per l'alveo principale e di 0.040 e 0.050 per la parte normalmen-

te emersa dell'alveo. Con riferimento alla sezione trasversale dove era ubicata l'opera di derivazione (sezione n. 46 del rilievo, subito a valle del ponte sulla SP189) erano state ottenute le stime riportate in Tabella 1.1 e la scala delle portate in Figura 1.9. In corrispondenza del passaggio di portata pari a $50 \div 75 \text{ m}^3/\text{s}$ si osservano variazioni di livello di $\pm 10 \text{ cm}$ quale indicatore dell'ordine di grandezza degli errori di calcolo.

Tabella 1.1 - Quote idrometriche raggiunte dal fiume Olona presso l'opera di presa

Q [m^3/s]	Coefficiente di scabrezza di Manning (alveo ÷ golene)		
	n = 0.030÷0.040	n = 0.035÷0.045	n = 0.040÷0.050
3	186.17	186.18	186.19
30	187.12	187.20	187.28
45	187.45	187.55	187.65
50	187.57	187.68	187.79
75	188.07	188.19	188.31

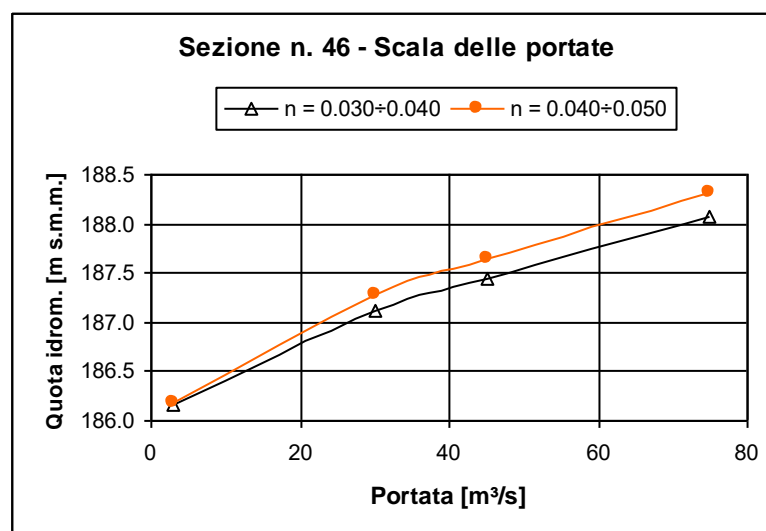


Figura 1.9 - Scala delle portate in prossimità dell'opera di presa

A seguito dell'aumento di dettaglio dell'informazione topografica, consentita dal nuovo rilievo topografico, è stata migliorata la qualità dei risultati modellistici nel tratto immediatamente a valle del ponte SP189. Nonostante questo dettaglio, si è potuto verificare che la scala delle portate presso la sezione n. 46 è rimasta sostanzialmente invariata a dimostrazione dell'attendibilità delle stime.

1.7. Profili idrometrici stato di progetto

La geometria precedentemente descritta, introdotta per la simulazione dello stato di fatto, è stata modificata in funzione degli interventi previsti in progetto.

Oltre alla realizzazione della cassa di derivazione e dei manufatti realizzati per il funzionamento della cassa stessa, nell'ottica di una riqualificazione dell'area e al fine di aumentare il livello di sicurezza idraulica sono previsti in progetto alcuni interventi di sistemazione quali:

- realizzazione di difese spondali per la stabilizzazione delle scarpate erose;
- adeguamento della soglia fissa a valle del ponte di via Filarete, al fine di ridurre i profili idrometrici ed aumentare il franco idraulico;
- rifacimento del ponticello di attraversamento della Roggia Molinara.

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti mediante l'implementazione del modello Hec-Ras, nella configurazione di progetto.

Il modello è stato implementato ipotizzando due condizioni:

- paratoie piane aperte, con conseguente funzionamento della cassa e laminazione delle piene;
- paratoie piante chiuse, opera di derivazione non funzionante.

Stato di progetto con paratoie aperte – portata Tr 100 = 75 m³/s

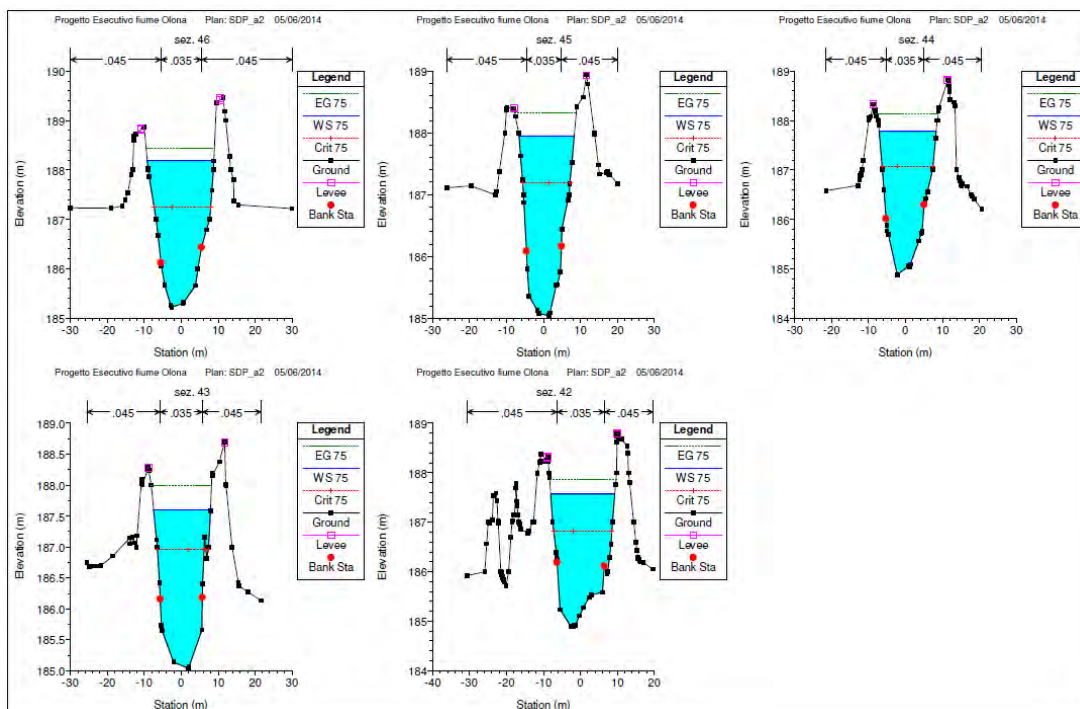
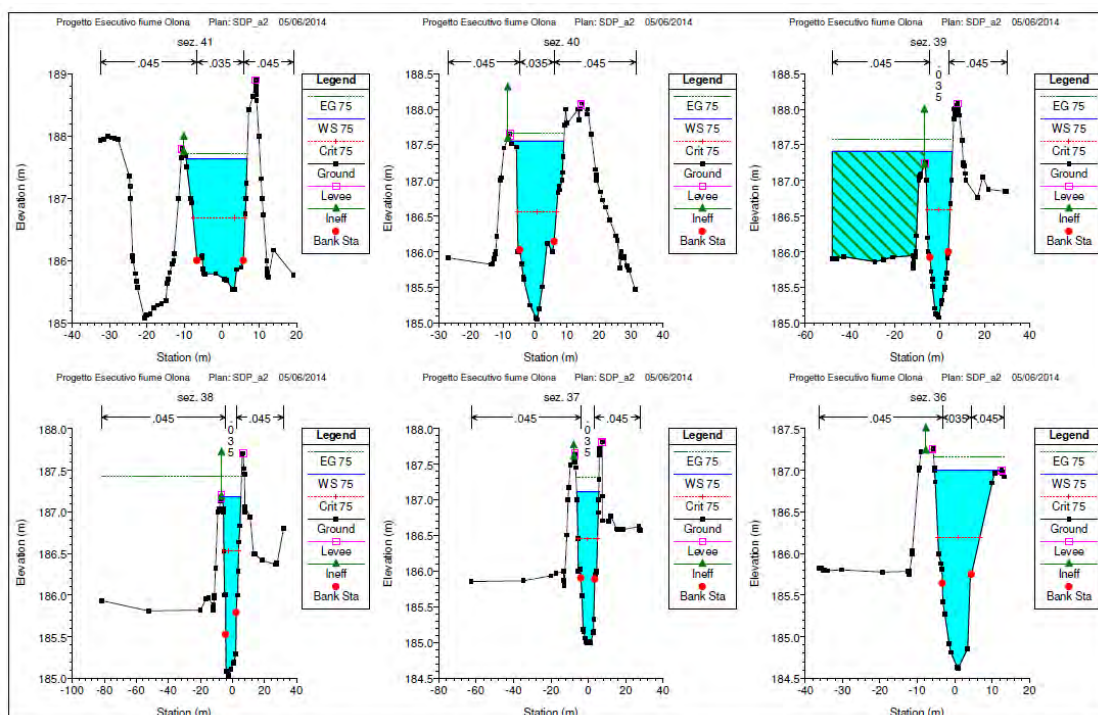


Figura 1.10 – Risultati modello Hec-Ras – tratto di monte $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$, sdp paratoie aperte



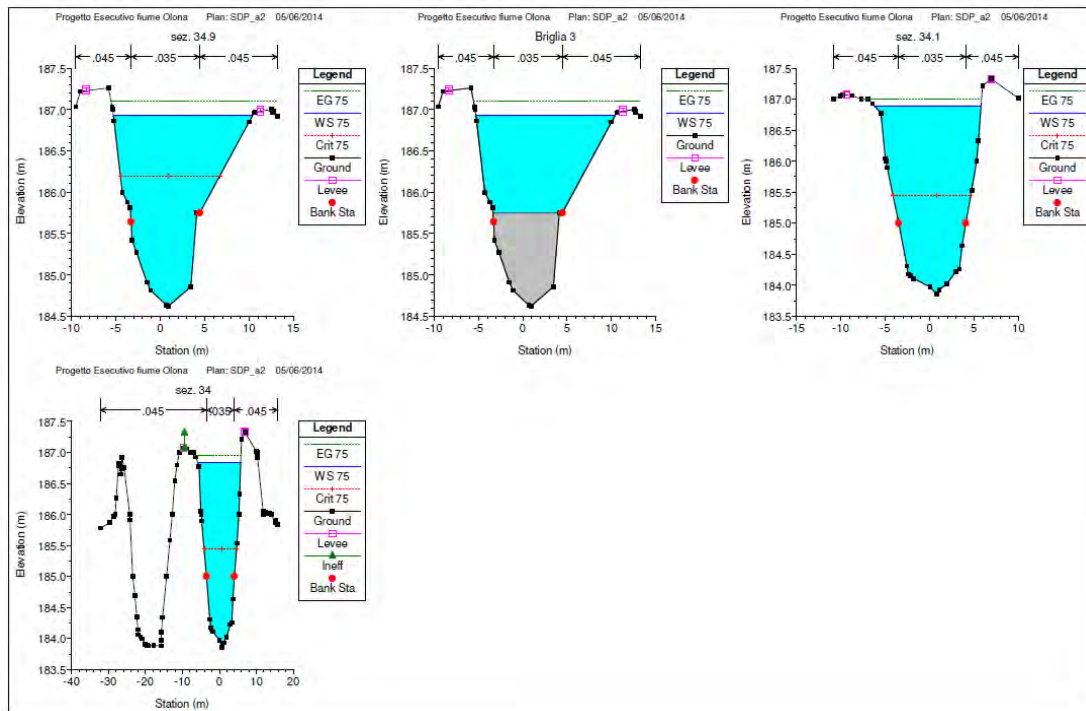
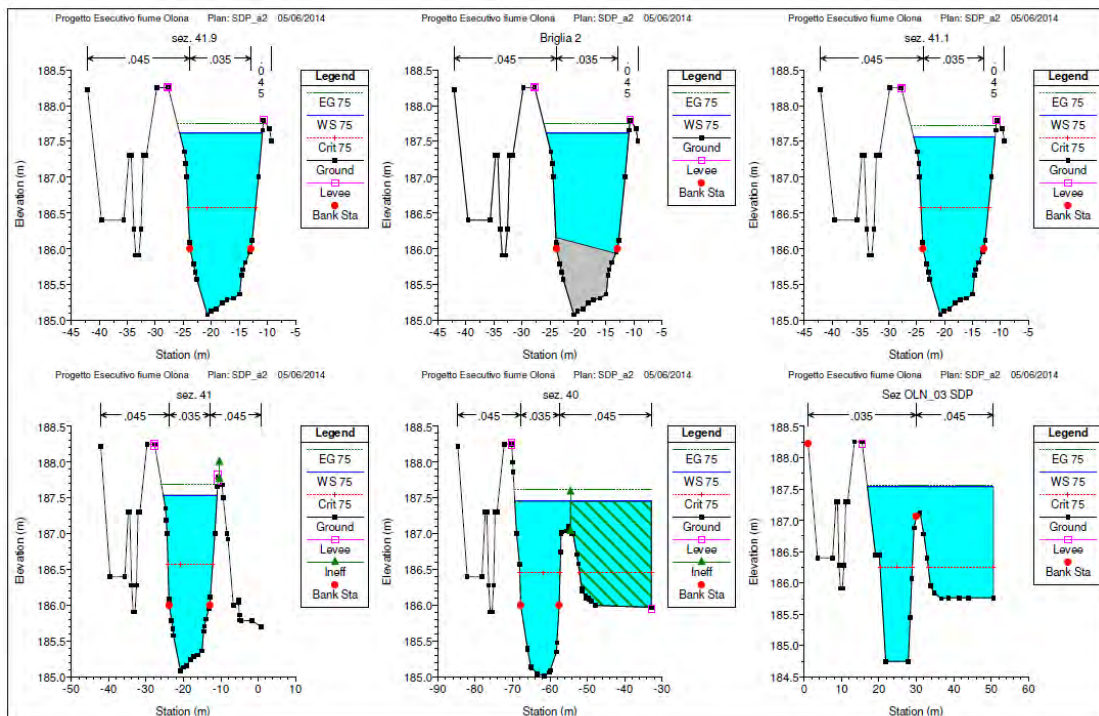


Figura 1.11 – Risultati modello Hec-Ras – Ramo destro $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$, sdp paratoie aperte



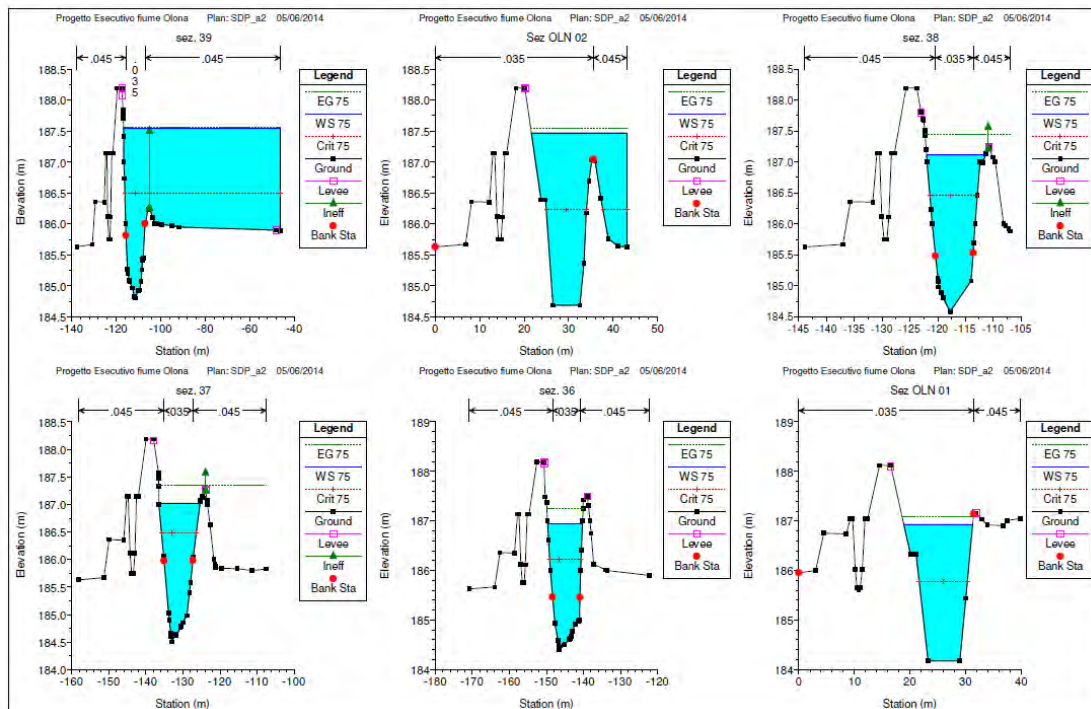


Figura 1.12 – Risultati modello Hec-Ras – Ramo sinistro $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$, sdp paratoie aperte

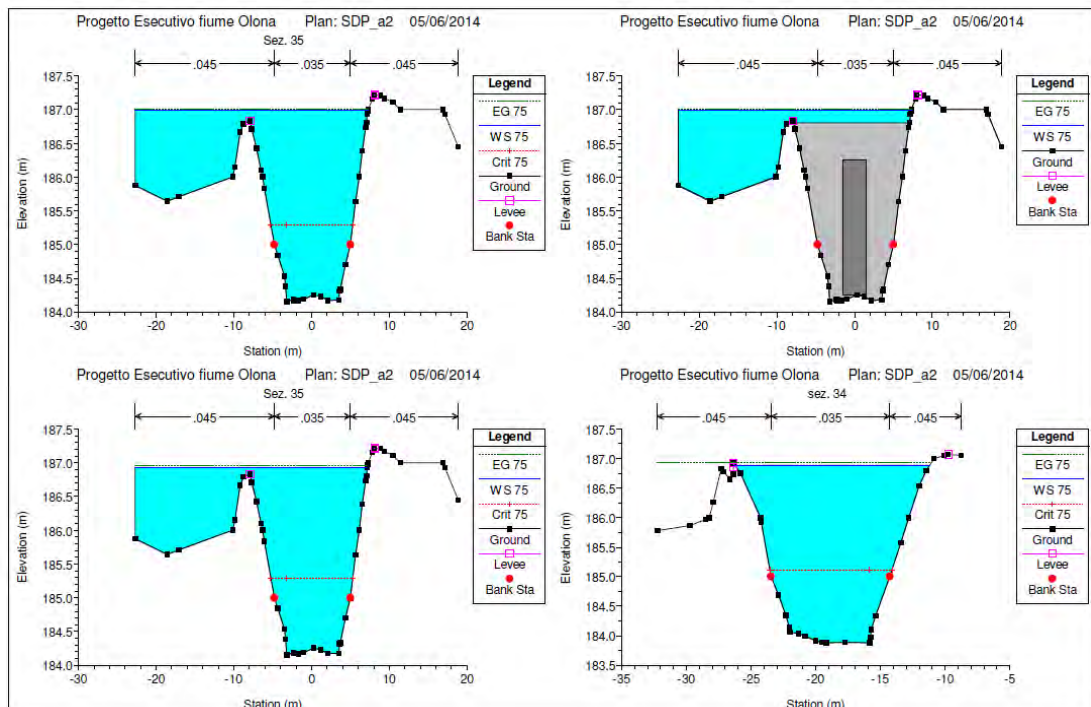


Figura 1.13 – Risultati modello Hec-Ras – Ripartitore $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$, sdp paratoie aperte

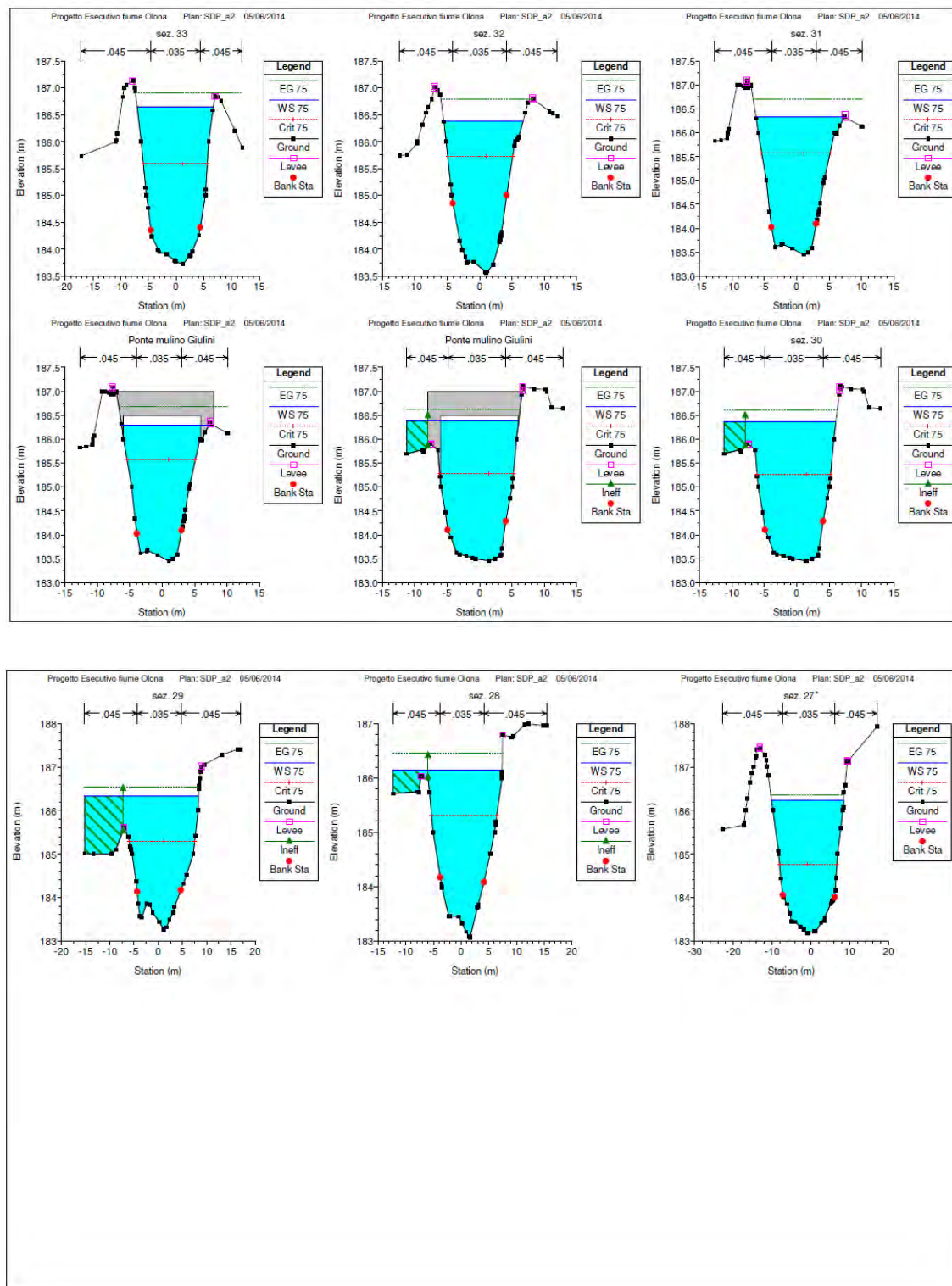


Figura 1.14 – Risultati modello Hec-Ras – Ramo destro 2 Q=75 m³/s, sdp paratoie aperte

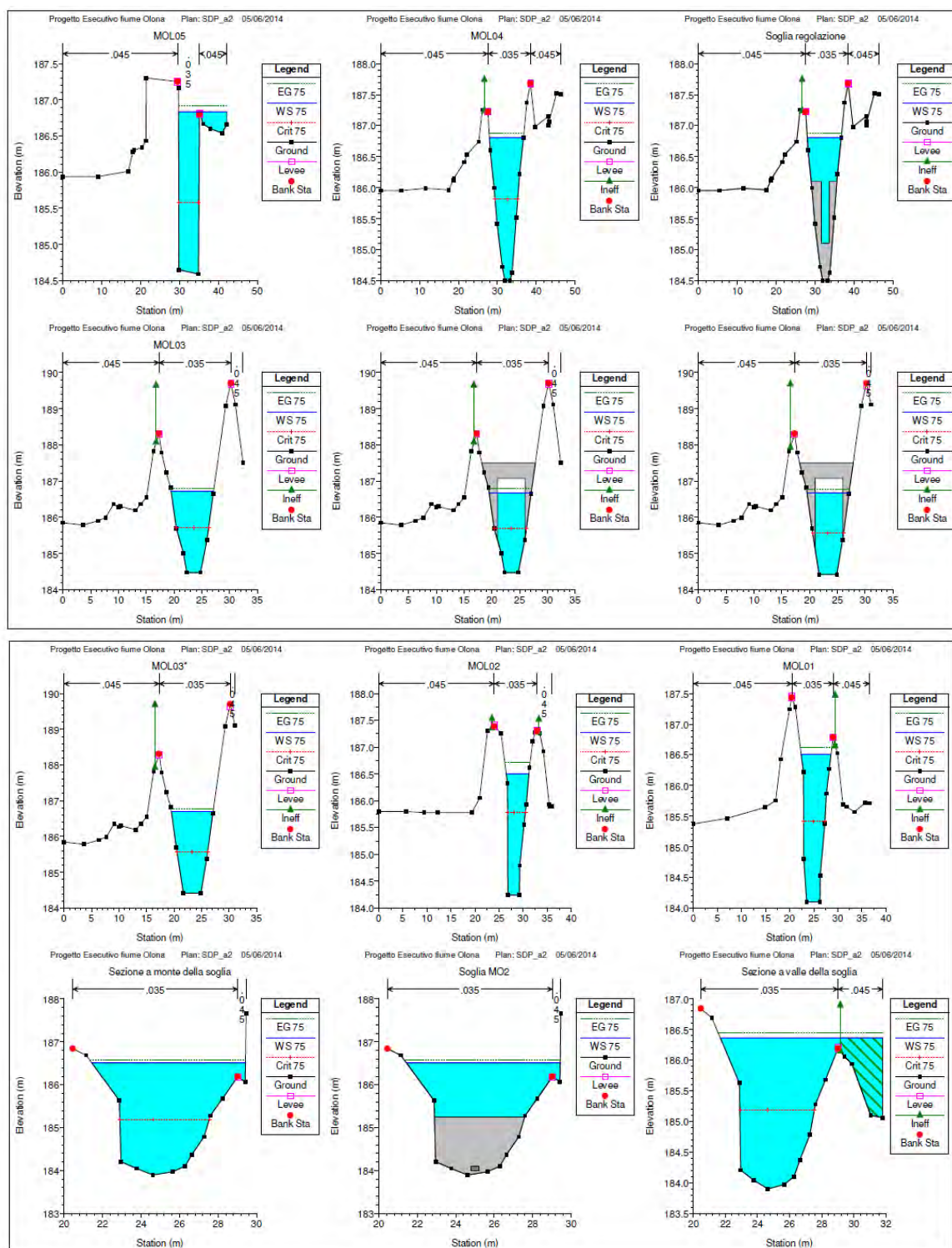


Figura 1.15 – Risultati modello Hec-Ras –Roggia Molinara $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$, sdp paratoie aperte

Stato di progetto con paratoie chiuse – portata $Tr_{100} = 75 \text{ m}^3/\text{s}$

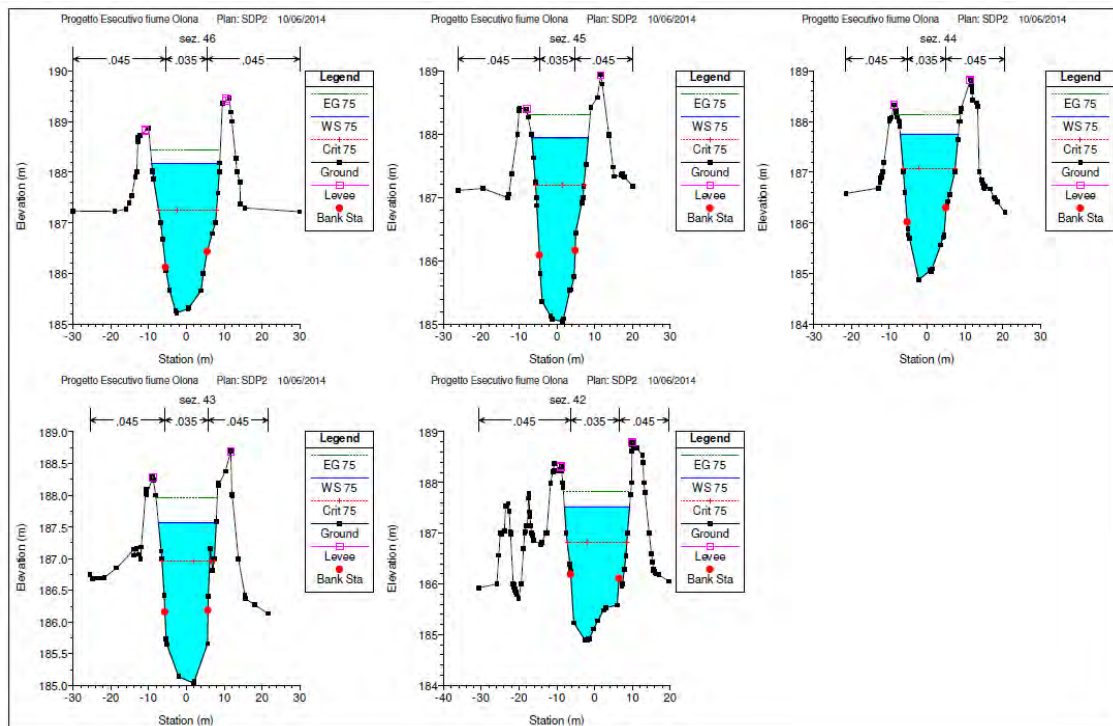


Figura 1.16 – Risultati modello Hec-Ras – tratto di monte $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$, sdp paratoie chiuse

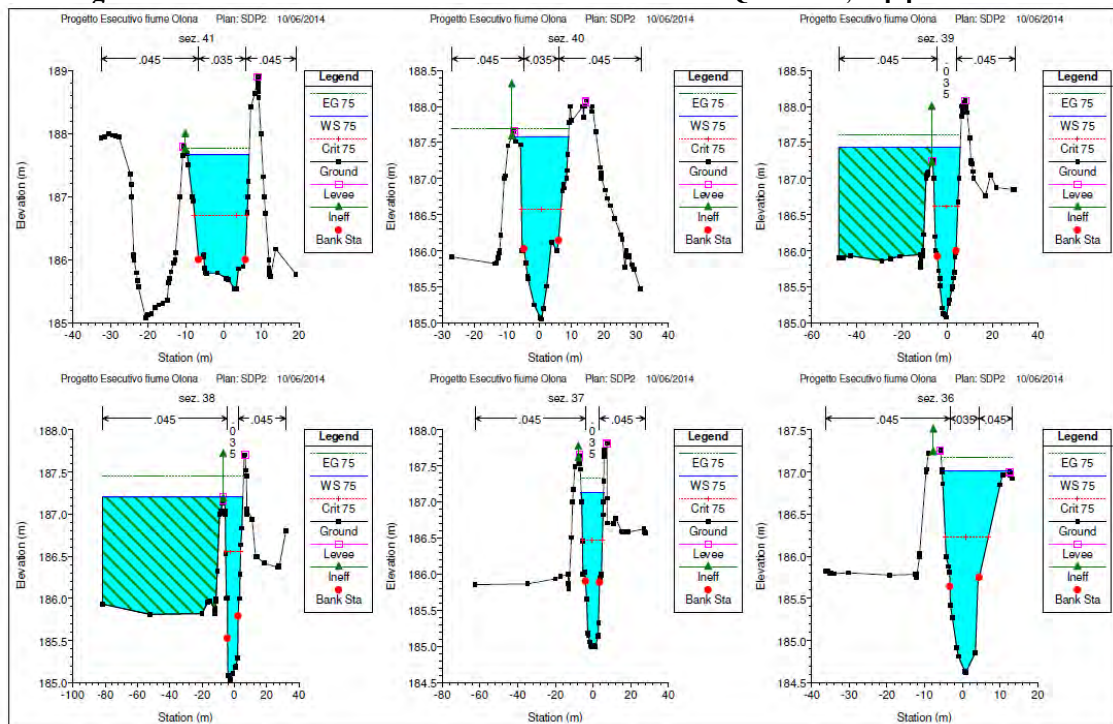


Figura 1.17 – Risultati modello Hec-Ras – Ramo destro $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$, sdp paratoie aperte

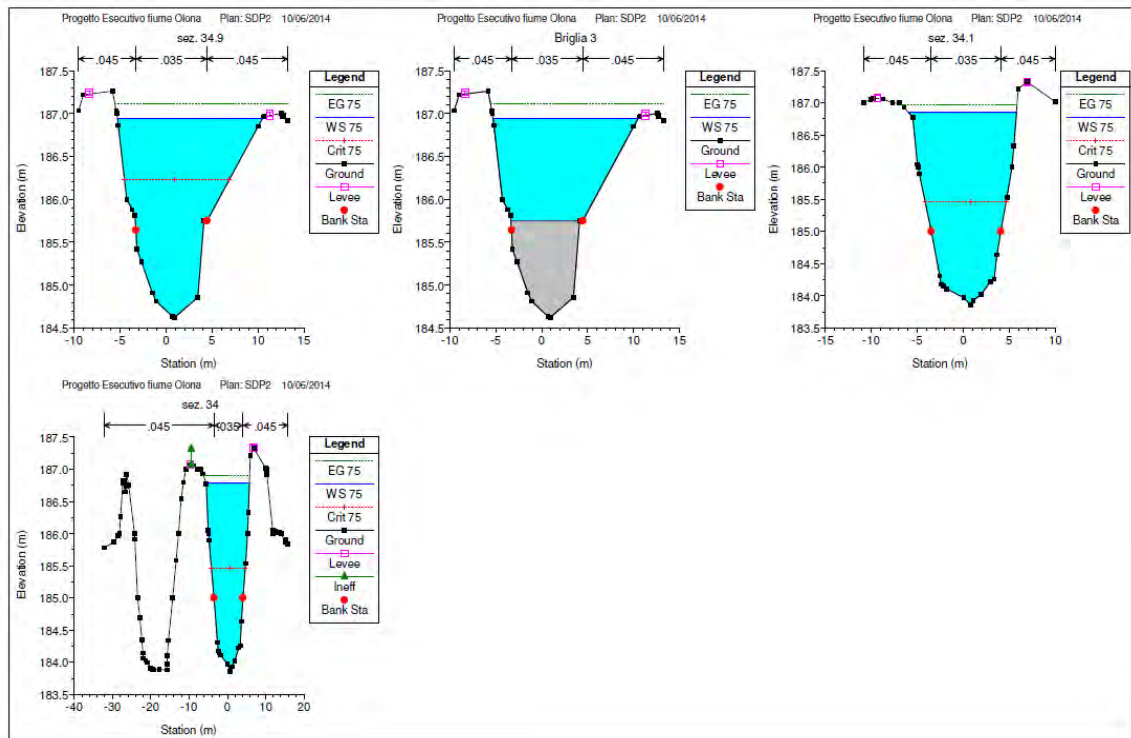
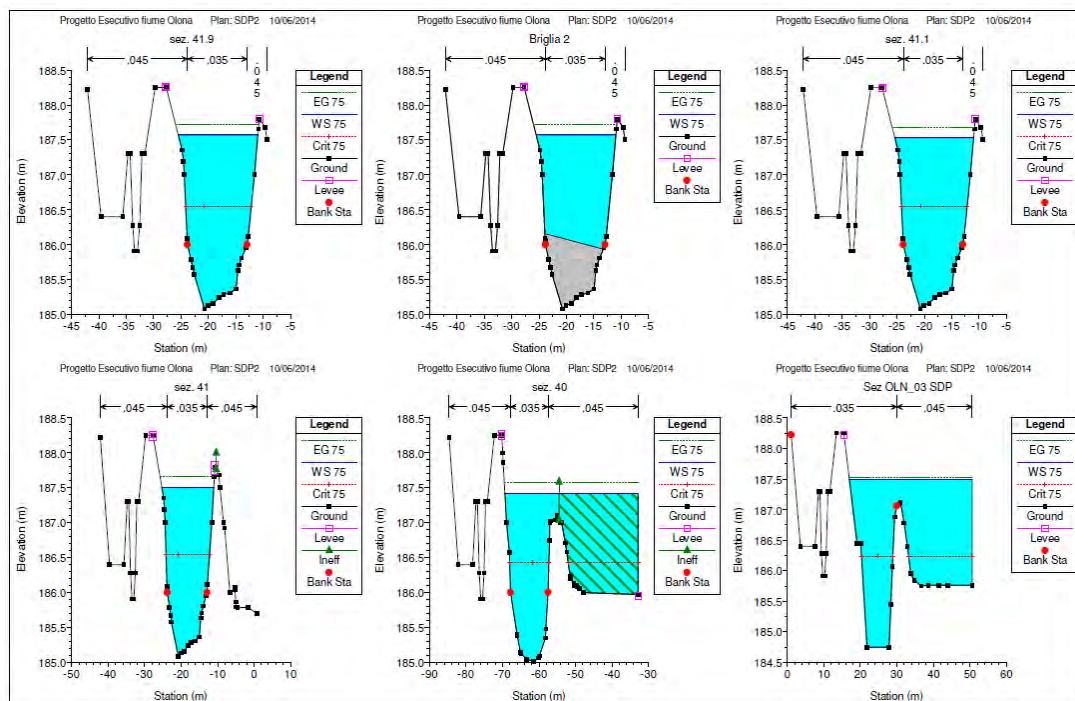


Figura 1.18 – Risultati modello Hec-Ras – Ramo destro $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$, sdp paratoie chiuse



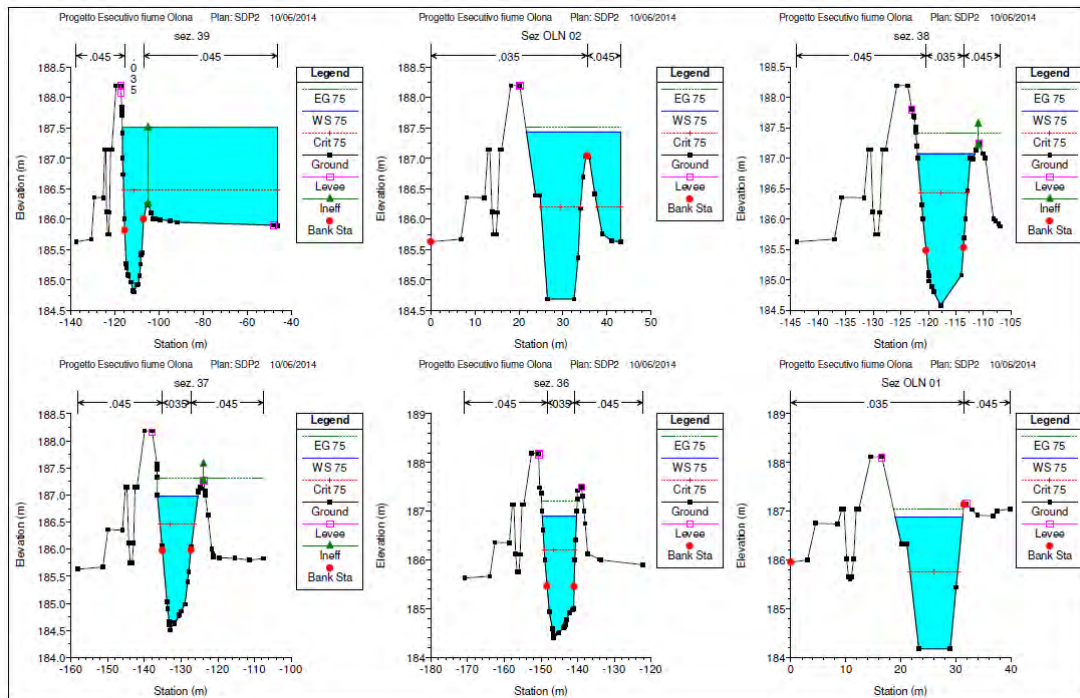


Figura 1.19 – Risultati modello Hec-Ras – Ramo sinistro $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$, sdg paratoie chiuse

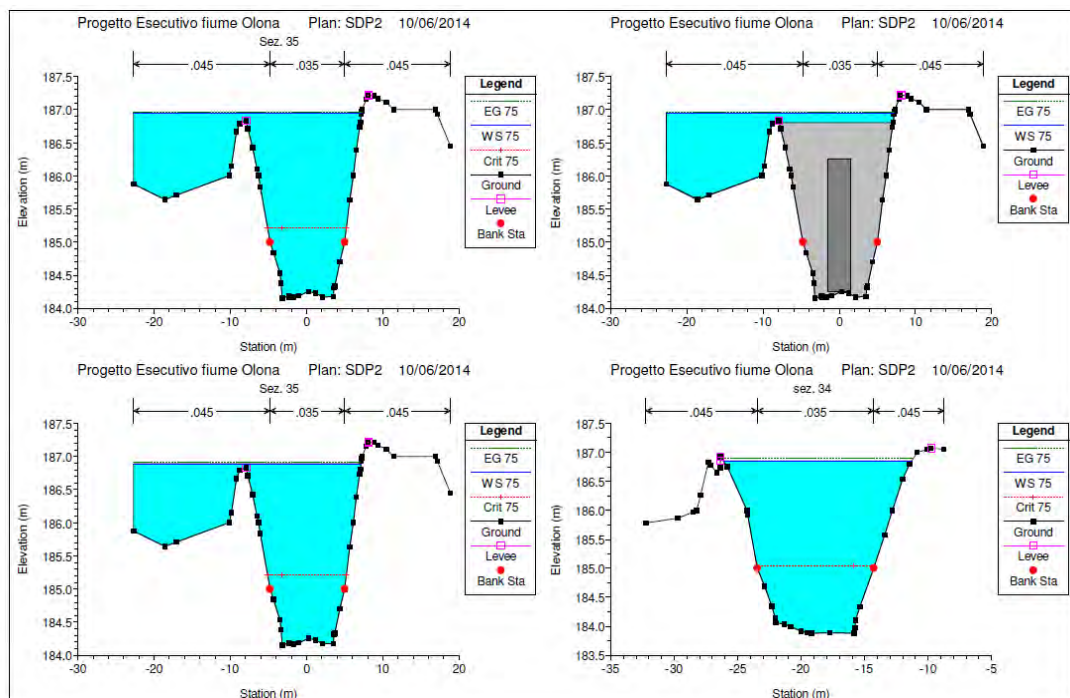


Figura 1.20 – Risultati modello Hec-Ras – Ripartitore $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$, sdg paratoie chiuse

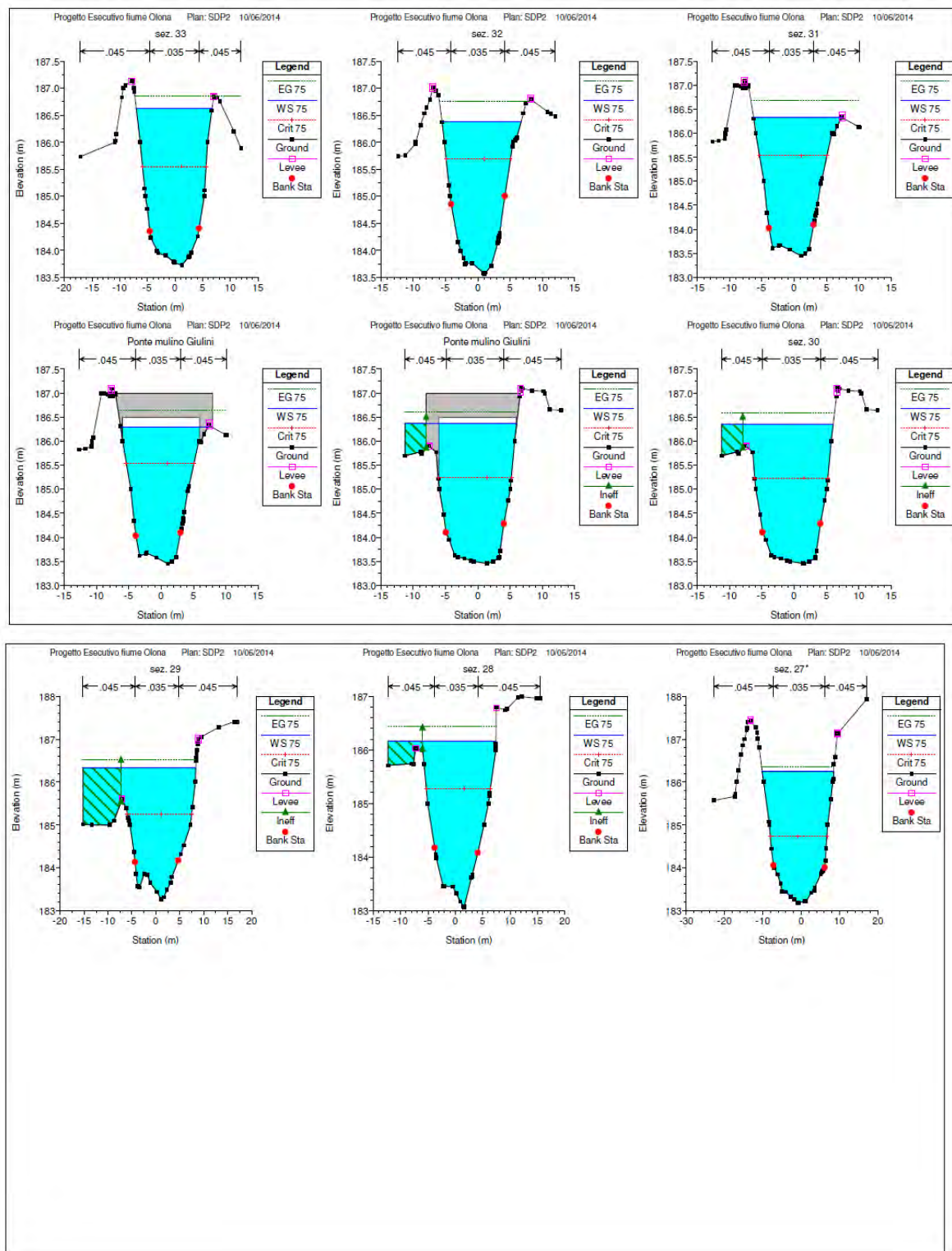


Figura 1.21 – Risultati modello Hec-Ras – Ramo destro 2 $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$, sdg paratoie chiuse

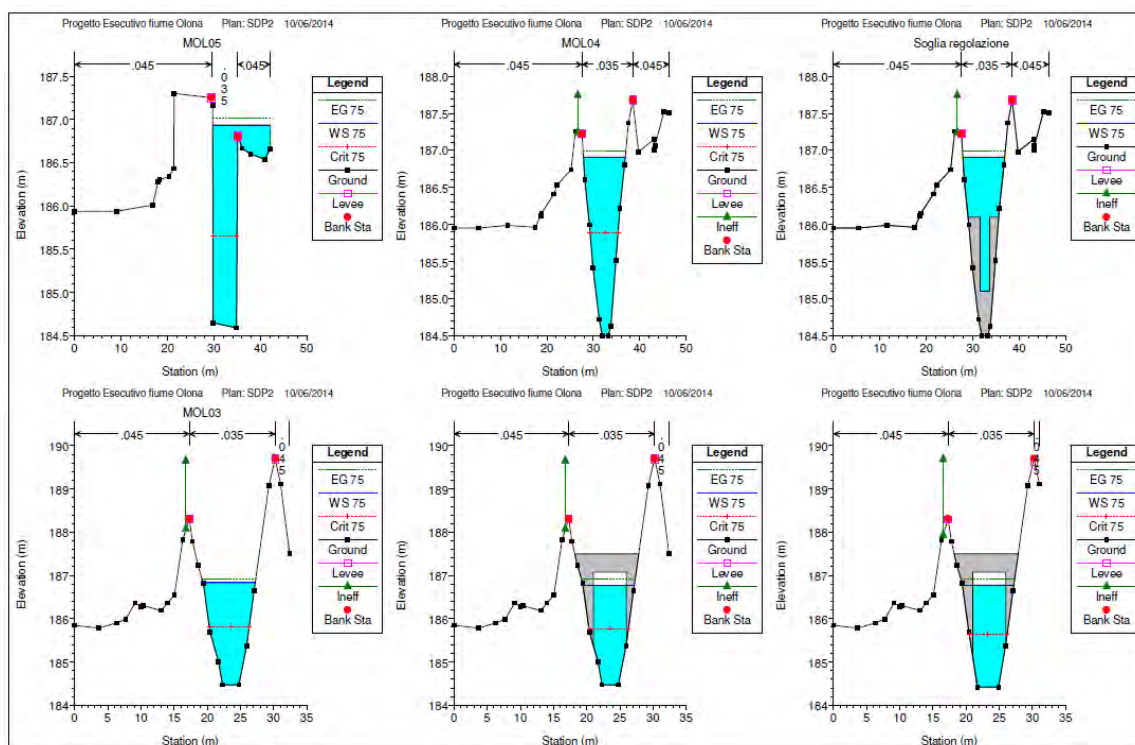


Figura 1.22 – Risultati modello Hec-Ras –Roggia Molinara $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$, sdp paratoie chiuse

Dall'analisi dei risultati ottenuti si è riscontrato che in corrispondenza del ramo sinistro, ove è previsto il rialzo arginale, con relativo spostamento del canale scolmatore, il franco idraulico, al passaggio della piena centenaria aumenta notevolmente, impedendo l'inondazione dell'area compresa tra il fiume Olona e la Roggia Bellona.

Un aumento del franco idraulico si ottiene anche lungo il ramo della Roggia Molinara. Grazie alla realizzazione delle casse e delle sistemazioni in progetto, quali l'adeguamento del ponticello esistente e la rettifica del fondo della Roggia, il franco idraulico aumenta notevolmente, diminuendo il rischio idraulico delle aree circostanti.

L'intervento di adeguamento del ponticello esistente inoltre consente il transito delle portate in maniera indisturbata, senza provocare rigurgito a monte e pertanto influire il funzionamento dell'opera di presa.

In generale, le opere di sistemazione idraulica previste in progetto, non sono risolutive ma consentono di ridurre notevolmente lo stato di rischio molto elevato delle aree edificate all'interno dell'isola di valle, anche nel caso di malfunzionamento dell'opera di derivazione.

2. DIMENSIONAMENTO DEI MANUFATTI DI REGOLAZIONE

I manufatti di regolazione idraulica hanno il compito di consentire un'opportuna derivazione e ripartizione della portata in arrivo tra i due settori della cassa, in modo da permettere il funzionamento del sistema secondo uno schema idraulico prefissato.

2.1. Schema di funzionamento generale

L'obiettivo della cassa di espansione è quello di limitare le portate del fiume Olona defluite a valle al valore massimo denominato portata di progetto e indicata nel seguito con il simbolo Q_{PROG} .

Tale valore è stato indicato nello studio propedeutico alla redazione del PAI e dal successivo Studio di Fattibilità, in $45 \text{ m}^3/\text{s}$ a fronte dell'arrivo della portata massima centenaria di $75 \text{ m}^3/\text{s}$; tale configurazione prevede la realizzazione di due casse di espansione, una in destra e l'altra in sinistra idraulica. Entrambe le casse sono suddivise in tre settori.

I lavori di 1° lotto prevedono l'esecuzione dei due settori della cassa in sinistra idrografica. In questa configurazione la portata di progetto viene assunta pari a $Q_{\text{PROG}} = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ pertanto, a parità di massima piena centenaria, la portata derivata è pari a $25 \text{ m}^3/\text{s}$.

I tre settori nei quali è stata suddivisa la cassa di espansione in sinistra idrografica sono stati denominati SX1, SX2 e SX3 procedendo da monte verso valle. Con riferimento alla configurazione di 1° lotto, il settore di monte non verrà realizzato. Per chiarezza, continueremo a indicare con SX2 e SX3 i due settori che fanno parte del presente progetto.

Per ciascuno di questi settori è stata imposta la quota di massima regolazione oltre la quale entrano in funzione gli sfioratori di superficie a deflusso libero, inseriti per questioni di sicurezza.

L'opera di presa viene localizzata in corrispondenza della Roggia Molinara, tra la sezione MOL04 e MOL05 (si veda tavola PE_TOP_PL_02) ed è costituita da un manufatto dotato di 4 (+ 1 di riserva) paratoie piane con luce a battente.

A valle del sistema di paratoie verrà realizzato un canale di adduzione che alimenta il settore SX2.

Il funzionamento idraulico delle luci a battente sarà a efflusso libero per tutta la fase di riempimento del settore SX2 e parzialmente rigurgitato una volta raggiunto un livello prossimo alla massima regolazione.

Le paratoie, aventi ciascuna dimensione $2.60 \times 0.80 \text{ m}$, saranno movimentate in funzione della diversa portata in arrivo in Olona, in modo da derivare la portata che eccede la portata di progetto.

I volumi derivati vengono invasati all'interno della cassa di espansione secondo un criterio che prevede di localizzare le acque inizialmente derivate all'interno del settore di valle (SX3) al fine di limitare l'allagamento delle altre aree. Per ottenere questo risultato è stato necessario progettare un canale per il trasferimento delle acque dall'opera di presa verso il settore di valle.

Con riferimento alla configurazione definitiva del sistema (1° e 2° lotto dei lavori), per garantire il controllo delle portate e permettere la gestione della cassa di espansione secondo lo schema di funzionamento descritto, sono state previste le seguenti opere idrauliche (canali e manufatti idraulici):

- opera di presa;
- canale di adduzione dalla presa al settore SX2;
- canale di trasferimento delle acque in uscita dal canale di adduzione al bacino SX3;
- opera di regolazione tra bacino SX2 e bacino SX3;
- opera di restituzione al fiume Olona.

2.2. Criteri di dimensionamento idraulico, franchi di sicurezza

I criteri di dimensionamento idraulico dei manufatti di regolazione adottati nella redazione del progetto a base di appalto, sono:

- franco di sicurezza idraulico di 1.50 m tra la sommità arginale e la quota di massima regolazione;
- franco di sicurezza idraulico di 0.80 m tra la sommità arginale e la quota di massima piena.

Nella formulazione di questa perizia di variante del progetto il franco di sicurezza minimo della massima piena sulla sommità arginale è stato portato a 1.00 m.

Nella definizione della massima piena e di criteri specifici per la soluzione adottata, si è fatto riferimento alla normativa applicabile ovvero:

- LEGGE REGIONALE 23 marzo 1998, n.8 “Norme in materia di costruzione, esercizio e vigilanza degli sbarramenti di ritenuta e dei bacini di accumulo di competenza regionale”;
- DELIBERAZIONE DELLA GIUNTA REGIONALE 5 marzo 2001, n.7/3699 “Direttive per l'applicazione della legge regionale 23 marzo 1998, n.8”;
- DECRETO MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI 24 Marzo 1982 “Norme tecniche per la progettazione e la costruzione delle dighe di sbarramento”.

Per quanto riguarda il dimensionamento dei dispositivi di scarico superficiale, la DGR n.7/3699 del 5 marzo 2001 - PARTE II *Progettazione* (punto 9.1), richiede che per gli sbarramenti in materiale sciolto di altezza inferiore a 10 m il franco non deve essere inferiore a 1.00 m e la larghezza del coronamento non inferiore a 3.00 m.

Per quanto riguarda la portata di piena di progetto, nella stessa Delibera (punto 9.2) viene definita come la somma della portata naturale di piena del bacino sotteso dallo sbarramento e della portata massima entrante nell'invaso dalle eventuali opere idrauliche in esso affluenti. Nel caso in esame entrambi questi contributi sono nulli. La cassa di espansione è infatti stata concepita secondo uno schema di funzionamento "in derivazione"; si tratta pertanto di un sistema di bacini separato dal corso d'acqua naturale, non soggetto ad essere attraversato dalle onde di piena naturali.

Il concetto di "portata di massima piena" viene pertanto sostituito con il concetto di "massima portata derivata". Anche in questo caso tuttavia, essendo le luci dell'opera di presa completamente presidiate, la completa chiusura dei dispositivi di regolazione annullano la portata derivata. Il criterio di dimensionamento degli sfioratori di sicurezza ha fatto riferimento ad una situazione di avaria (condizioni di emergenza) in cui il 50% dei dispositivi a presidio rimangono bloccati nella posizione più sfavorevole dal punto di vista della sicurezza idraulica. Essendo l'opera di derivazione dotata di n.4 paratoie piane, la portata massima derivata viene calcolata considerando aperte due delle quattro paratoie.

Analogamente, per il manufatto di sfioro, dotato di sfioratore superficiale libero e di n.2 scarichi di fondo presidiati di identiche dimensioni, si considera funzionante l'intera luce sfiorante superiore e una delle due paratoie a presidio degli scarichi di fondo.

Nelle verifiche che seguono, si dovrà quindi distinguere tra funzionamento in **condizioni normali**, ovvero nel caso in cui tutti gli organi di regolazione mobili funzionino perfettamente, e funzionamento in **condizioni di emergenza**, nell'ipotesi che alcuni di essi non siano in grado di attuare le manovre richieste per malfunzionamenti o per mancanza di alimentazione elettrica.

Funzionamento in condizioni normali

Con riferimento all'idrogramma di piena centenario, la cassa di espansione deve contenere il volume derivato entro il livello di massima regolazione assicurando l'effetto di riduzione della portata transitata a valle nel limite definito dal PAI. In questo caso il franco di sicurezza arginale deve essere almeno di 1.50 m.

Funzionamento in condizioni di emergenza (malfunzionamento degli organi mobili)

Il dimensionamento dei manufatti idraulici è avvenuto anche con riferimento alla possibilità che gli organi di regolazione mobili siano in grado di funzionare solo per il 50% dei dispositivi presenti nel manufatto. Il caso più critico per la sicurezza è quello che prevede il blocco di due delle quattro paratoie a piane a presidio del manufatto di derivazione, in posizione di massima apertura, il blocco di una delle due paratoie piane a presidio del manufatto di regolazione intermedio (o del manufatto di restituzione per il quale valgono gli stessi criteri) in posizione chiusa e il contemporaneo passaggio in Olona della portata di massima piena centenaria.

A fronte di questa situazione, il franco di sicurezza dovrà essere pari a quello precedentemente indicato.

Il rispetto del franco di sicurezza in condizioni di emergenza, è stato ottenuto anche con limitazioni d'uso (*prescrizioni di gestione*) delle paratoie poste a presidio dell'opera di presa, come meglio descritto più avanti.

2.3. Prescrizioni di gestione degli organi mobili

Nel caso gli organi di regolazione mobili funzionino correttamente (condizioni di normale funzionamento), i livelli potranno essere adeguatamente gestiti in modo da rispettare i franchi idraulici di sicurezza definiti sopra. Sarà sufficiente chiudere le paratoie poste sull'opera di presa per annullare la portata derivata una volta raggiunte le due quote di massima regolazione nei due settori.

In caso contrario, l'entrata in funzione degli sfioratori di sicurezza sull'opera di regolazione intermedia tra i bacini SX2 e SX3 produrrebbe un sovrizzo idraulico e un profilo di rigurgito a monte, portando il livello idrometrico a quote superiori a quelle "di regolazione". A fronte della massima portata derivata sarà raggiunta la quota di massima piena.

Per garantire che anche in queste condizioni venga verificato il franco idraulico prima definito, è stato necessario il rispetto delle seguenti regole:

- La paratoia di riserva dovrà restare sempre in posizione chiusa, per tutta la durata della piena;
- In caso di malfunzionamento di una o più paratoie, prima del sollevamento di quella di riserva si dovrà controllare il grado di apertura del sistema e agire di conseguenza.

In questo modo si potrà garantire che per nessun motivo potranno rimanere sollevate più di due paratoie. La massima portata derivata in queste condizioni, anche permanendo uno stato idrometrico centenario sul fiume Olona, non sarà mai superiore a **12.5 m³/s**.

In questo modo si limita la massima portata entrante nel sistema dei bacini di laminazione anche in caso non si riesca a operare correttamente con la chiusura delle paratoie a settore. Pertanto, in condizioni di emergenza, con paratoie bloccate in posizione aperta, la massima portata entrante risulta pari a:

- 25 m³/s durante la fase in cui il bacino è solo parzialmente invasato (in questo caso resterebbero aperte le paratoie piane a presidio del manufatto di regolazione del settore SX2, limitando il sovrizzo idraulico al di sopra dello sfioro);
- 12.5 m³/s in caso di bacino pieno.

A ulteriore margine di sicurezza, le paratoie potranno essere azionate in modalità manuale, secondo i seguenti criteri.

In caso di blocco di una o entrambe le paratoie a settore, sarà necessario provvedere:

- alla loro chiusura manuale;
- all'apertura delle paratoie a battente sui manufatti di regolazione e restituzione.

In caso di malfunzionamento anche di queste paratoie, sarà necessario intervenire con l'ausilio di generatore di emergenza o di manovra manuale. La modesta dimensione delle paratoie garantisce la possibilità di realizzare questa manovra in tempi sufficientemente celeri.

2.4. Canale di adduzione

Il canale di adduzione che consente il trasferimento delle acque dal fiume al settore SX2, è stato dimensionato per la portata massima derivabile pari a 25 m³/s.

Il canale, costituito da uno scatolare in c.a. avente base pari a 4.20 m e altezza 2.30 m, è stato dimensionato in modo da consentire il passaggio della massima portata derivabile mantenendo un franco di 50 cm.

La quota del fondo canale, si porta da un valore iniziale di 184.20 m s.m.m. a uno finale di 183.60 m s.m.m. (all'ingresso del settore SX2), per una pendenza media di circa 0.14%.

Per derivare la portata richiesta è necessario mantenere totalmente sollevate tutte le paratoie a presidio dell'opera.

In caso di emergenza, la quota di 186.60 raggiunta in prossimità dell'opera di presa inizia a far sentire il suo effetto di rigurgito delle paratoie limitando naturalmente la portata derivata.

A valle del canale di adduzione verrà realizzata una vasca di dissipazione il cui dimensionamento viene riportato nel paragrafo successivo.

2.5. Verifica della vasca di dissipazione

A valle del canale di adduzione è prevista la realizzazione di una vasca di dissipazione. La necessità di localizzare le perdite di energia cinetica all'interno della vasca riguarda le fasi iniziali del funzionamento della cassa ovvero con cassa vuota, in quanto nel caso di cassa parzialmente o completamente riempita il tirante di valle favorisce e stabilizza la localizzazione del risalto idraulico al suo interno.

I profili idrometrici che si instaurano nel canale di adduzione, a valle dell'opera di presa, dimostrano che anche in caso di derivazione di una portata relativamente modesta porta all'instaurarsi di un livello idrometrico tale da rigurgitare la vena liquida in corrente rapida che giunge nella vasca di dissipazione.

Per verificare tale comportamento, si è analizzato il caso di derivazione di 25 m³/s.

La verifica è stata condotta mediante l'uso del modello HEC-RAS, che ha consentito di stabilire la lunghezza della vasca di dissipazione, stimata 6.00 m, necessaria a localizzare il risalto idraulico.

La vasca è delimitata da un muretto alto 40 cm.

Di seguito vengono riportati i profili ottenuti mediante l'implementazione del modello, dai quali è possibile rilevare che il risalto si localizza all'interno della vasca sia nelle fasi iniziali di riempimento della vasca, sia al raggiungimento del massimo riempimento della cassa stessa.

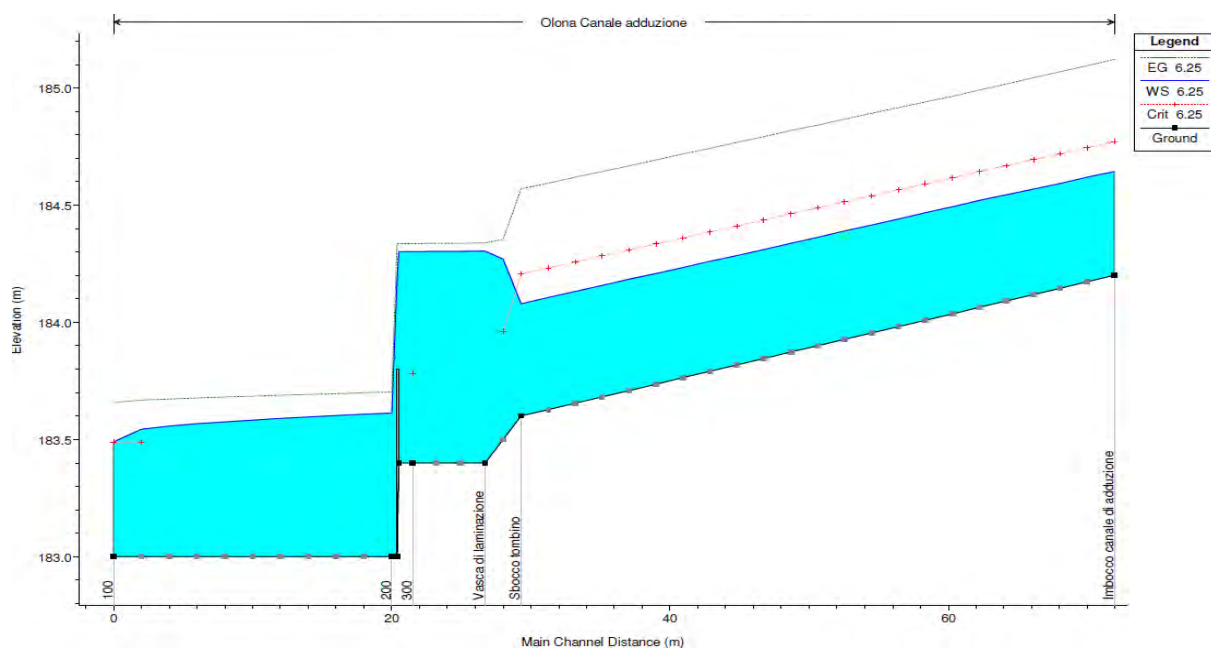


Figura 2.1 – Localizzazione risalto all'interno della vasca di dissipazione – cassa vuota

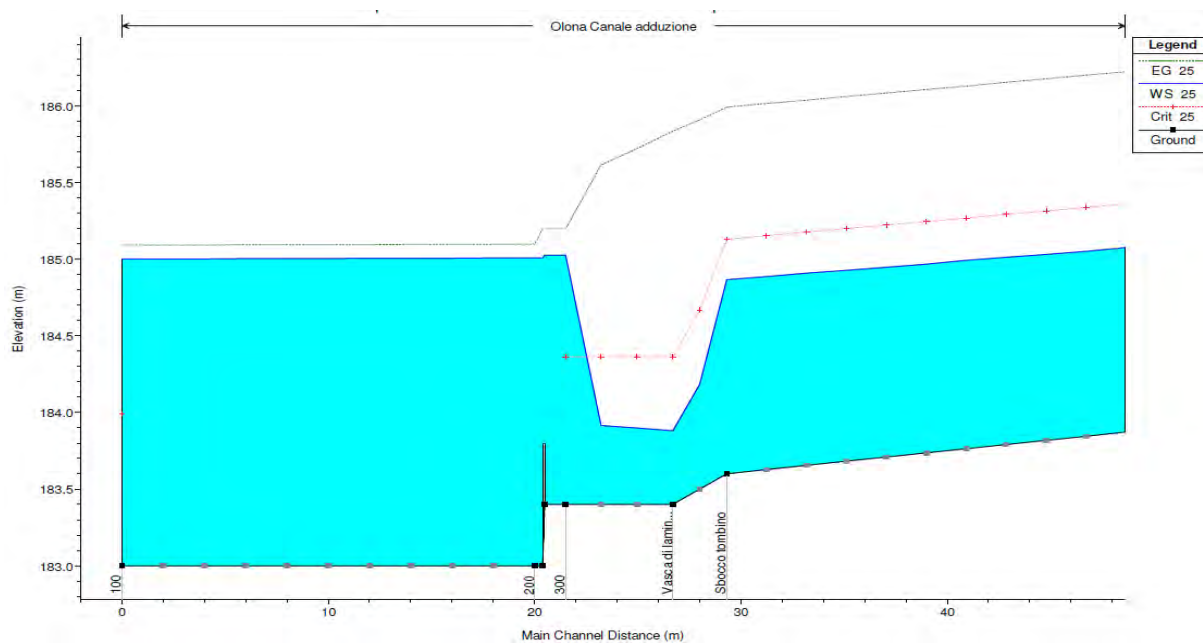


Figura 2.2 – Localizzazione risalto all'interno della vasca di dissipazione – condizione di massimo riempimento della cassa

2.6. Opera di presa

L'opera di presa è composta da un canale di adduzione, un sistema di regolazione dotato di paratoie piane, un canale di adduzione a valle del quale è prevista una vasca di dissipazione.

L'intero sistema è stato dimensionato individuando un livello a fiume considerato "critico", in quanto s'instaura al passaggio di portate elevate che comunque non provocano sormonti arginali a valle. Al superamento di tale livello, fissato pari a 186.60 m s.l.m.m., avrà inizio l'apertura graduale delle paratoie.

A partire dalla quota critica è stato possibile fissare i seguenti parametri:

- Quota del fondo della platea del manufatto di derivazione, pari a 184.80 m s.l.m.m.;
- Dimensione delle paratoie (2.60x0.80 m);
- Quota e lunghezza del muretto di sfioro a valle delle paratoie (185.60 m s.l.m.m. per 16 m di lunghezza);
- Quota della soglia di regolazione (186.60 m s.l.m.m.).

2.6.1. Dimensionamento delle paratoie piane

Le paratoie piane a presidio dell'opera di presa sono state dimensionate, in modo tale che in posizione di massima apertura (0.80 m), consentano di derivare 25.00 m³/s.

Facendo riferimento alla nota formula della foronomia

$$Q = c_q \cdot B \cdot H \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_0}$$

dove il coefficiente di portata c_q vale:

$$c_q = c_c \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + c_c \frac{H}{h_0}}}$$

e il coefficiente di contrazione c_c , vale 0.61.

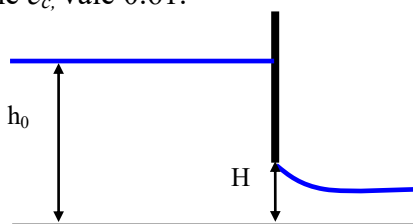


Figura 2.3 - Efflusso libero attraverso una luce a battente

nota la portata massima da derivare e fissato il carico idraulico di monte h_0 , pari a 1.80 m (quota livello critico meno quota d'imposta della platea dell'opera), è stato possibile fissare le dimensioni e il numero delle paratoie.

Di seguito vengono riportati i parametri fondamentali per il dimensionamento dell'opera Tabella 2.2.

Tabella 2.1 – Parametri per il dimensionamento delle paratoie piane

n. di paratoie	4
Base (B)	2.60 m
Altezza (H)	0.80 m
Cc	0.611
Livello critico (ZM)	186.60 m s.m.m.
Quota di appoggio delle paratoie (Z0)	184.80
h_0	1.80 m
H/H0	0.4444
CQ	0.5418
Q	26.78 m³/s
Lunghezza totale (L)	16.00 m

2.6.1. Dimensionamento del muretto di sfioro

A monte delle paratoie piane è prevista la realizzazione di un muretto di sfioro avente la funzione di mantenere in asciutto la zona paratoie in condizioni idrologiche ordinarie.

La quota del muretto è stata fissata in modo tale che all'instaurarsi del livello critico (186.60 m s.l.m.m.), la sua influenza sul profilo che s'instaura durante la derivazione sia trascurabile.

Tale situazione è stata verificata come segue:

utilizzando la seguente formula:

$$Q_1 = c_q \cdot h_{\max}^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot L}$$

e ipotizzando l'instaurarsi del seguente profilo

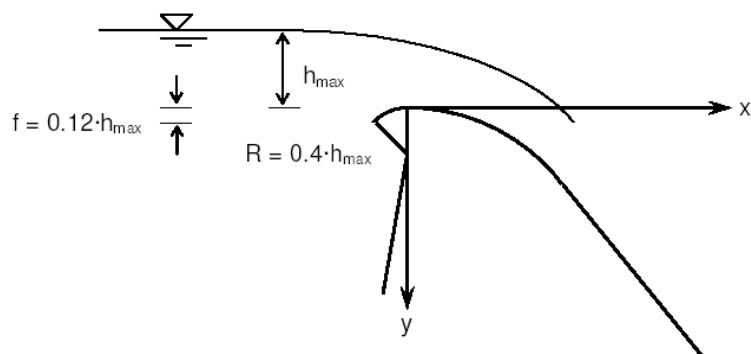


Figura 2.4 - Schema di uno stramazzo Creager - Scimemi

fissando la quota di sfioro sul valore di 185.60, la portata derivata è pari a 40 m³/s, di molto superiore ai 25 m³/s (le paratoie rigurgitano il muretto).

Di seguito vengono riportati i parametri utilizzati per il dimensionamento del muretto di sfioro (Tabella 2.3):

Tabella 2.2 – Parametri per il dimensionamento del muretto di sfioro

B	16.00 m
C _Q	0.42
Z' ₁₀₀	186.80 m s.m.m
Z _{SF}	185.60 s.m.m
Dh	1.20 m
Q	39.12 m³/s

2.7. Opera di restituzione

L'opera di restituzione ha il compito di rilasciare il volume invasato nella cassa una volta esaurita la fase di piena del fiume Olona. La restituzione potrà avere inizio dopo che la portata nel fiume sarà diminuita entro valori di sicurezza per il territorio di valle.

La stessa opera sarà dotata di uno sfioratore superficiale avente l'obiettivo di garantire le condizioni di sicurezza della cassa di espansione anche in caso di mancato funzionamento dei dispositivi di controllo di monte in concomitanza di un fenomeno di piena di eccezionale intensità e durata, in grado di portare al superamento del livello di regolazione.

2.7.1. Dimensionamento dello scarico di fondo

L'opera di restituzione delle acque al fiume è dotata di uno scarico di fondo con due luci rettangolari presidiate da paratoie piane a scorrimento verticale, mantenute in posizione chiusa o con ridotto grado di apertura, durante la fase di riempimento della cassa. Lo scarico verrà aperto una volta esaurita la fase di massima piena al fine di svuotare il bacino di laminazione.

Lo scarico di fondo viene posizionato alla quota di arrivo del canale di trasferimento delle portate provenienti dal settore intermedio della cassa e precisamente alla quota di 181.20 m s.m.m.

Alla quota di massima regolazione nel settore di valle, il carico idraulico sulla luce sarà pari a 3.80 m e la luce funzionerà a battente. Lo svuotamento della cassa potrà avvenire solo al termine della fase di massima piena, durante la fase di esaurimento, una volta che il livello in Olona sarà sceso sotto la quota in cassa.

Una volta che il livello in cassa sarà sceso al di sotto della quota del battente, il funzionamento della luce si modificherà da battente a stramazzo in soglia lunga.

La dimensione della luce di scarico è stata calcolata tenendo conto dell'esigenza di poter svuotare il bacino di laminazione in tempi non troppo elevati, ma congruenti con i tempi di esaurimento della piena in Olona. Si osservi, infatti, che una volta scesa la portata in Olona al di sotto della portata di progetto (Q_{PROG}), sarà possibile l'apertura parzializzata dello scarico di fondo e il rilascio di una portata non superiore a ($Q_{\text{PROG}} - Q_{\text{OLONA}}$).

Osservando l'andamento della curva di esaurimento degli idrogrammi di piena, la modalità di svuotamento dell'invaso ha imposto i seguenti vincoli:

- la portata massima rilasciabile a fiume è di 15 m³/s;
- il raggiungimento di questa portata dovrà avvenire in modo progressivo nell'arco temporale di 24 ore.

L'aumento della dimensione della luce oltre un certo valore, non produrrà sensibili benefici in termini di riduzione dei tempi di svuotamento.

In coerenza con questi criteri si è giunti ad un dimensionamento della luce che prevede:

larghezza $B = 3.00$ m

altezza $H = 1.50$ m

In caso di funzionamento a battente il valore della portata è stato ottenuto con la nota formula della foronomia; facendo riferimento alla seguente Figura 2.5, detto c_q il coefficiente di portata, h_0 il carico idraulico di monte, H l'altezza del battente e B la larghezza della luce, la portata Q defluente attraverso la sezione risulta:

$$Q = c_q \cdot B \cdot H \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_0}$$

dove il coefficiente di portata c_q vale:

$$c_q = c_c \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + c_c \frac{H}{h_0}}}$$

e il coefficiente di contrazione c_c , vale 0.61.

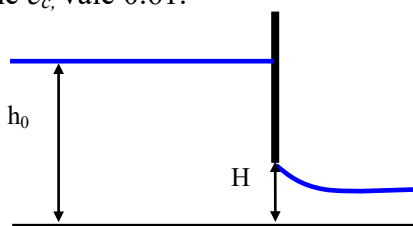


Figura 2.5 - Efflusso libero attraverso una luce a battente

Una volta che il carico a monte si è ridotto fino a valori prossimi a quello dell'altezza del battente H avrà inizio il funzionamento in soglia lunga e la portata è stata determinata con la:

$$Q = c_q \cdot B \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_0^{3/2}}$$

dove il coefficiente C_q assume valore pari a 0.385.

L'andamento temporale del livello idrometrico e della portata scaricata viene riportato in Figura 2.6 dalla quale si evince che la portata rilasciata non supera mai il valore di $13 \text{ m}^3/\text{s}$. Nelle prime 24 ore la portata è imposta dalle condizioni idrometriche del fiume e nel periodo successivo, essendo diminuito il livello in cassa, la portata è ridotta a causa del ridotto carico idraulico h_0 . Lo svuotamento viene ottenuto in un tempo complessivo di 36 ore.

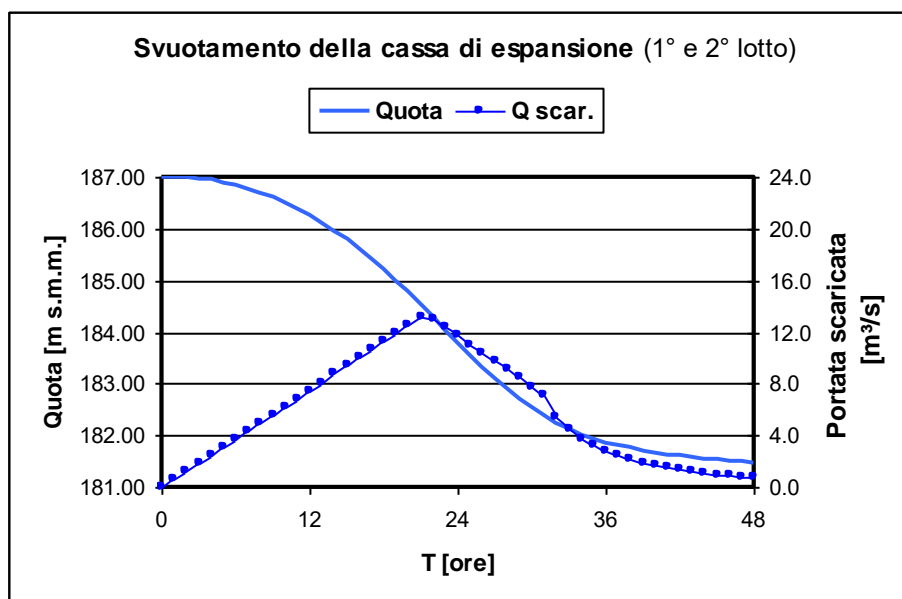


Figura 2.6 - Svuotamento della cassa a partire da un invaso iniziale di 187.00 m s.m.m.

La dimensione verticale della luce ha influenza quasi nulla sul tempo di svuotamento in quanto nella fase terminale del processo di svaso il funzionamento della luce è a stramazzo libero. La larghezza della luce ha invece una maggiore influenza in quanto permette una maggiore portata a fronte di un modesto carico sulla soglia.

2.8. Opera di regolazione intermedia tra i bacini SX2 e SX3

Il manufatto di regolazione idraulica posto all'ingresso del settore di valle SX3 presenta una configurazione del tutto simile al manufatto di restituzione finale precedentemente descritto e dimensionato. Come il precedente, è dotato di due luci rettangolari presidiate da paratoie piane, che agiscono da scarico di fondo, e da uno sfioratore di sicurezza superficiale a deflusso libero.

Lo sfioratore si rende necessario in caso di malfunzionamento della paratoia a presidio della luce di scarico di fondo e blocco su posizione chiusa, e contemporaneo malfunzionamento dell'opera di presa, con l'impossibilità di chiusura delle paratoie a settore.

Lo sfioratore di sicurezza è posto alla quota di massima regolazione, 185.50 m s.m.m. e presenta le stesse dimensioni del precedente.

Per quanto riguarda lo scarico di fondo, la sua finalità è diversa dal semplice svuotamento della cassa al termine della piena; in questo caso la luce di fondo, in occasione degli eventi più intensi deve permettere la ripartizione della portata tra i due settori SX2 e SX3

invasando parte del volume nel settore SX3 e parte nel settore SX2. Tale condizione richiede la capacità della luce di far defluire, in condizioni rigurgitate, metà della portata massima di progetto che risulta pari a 15.0 m³/s.

Le luci sono state dimensionate per un totale di:

larghezza $B = 3.00$ m

altezza $H = 1.50$ m

L'invaso dei due settori avviene secondo le seguenti modalità:

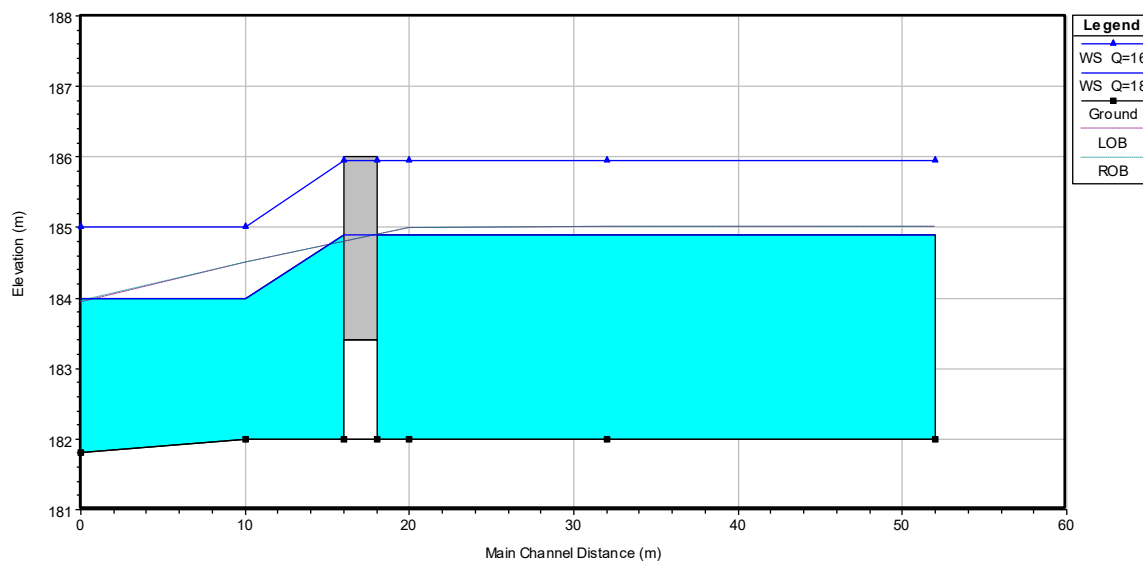
- 1) all'inizio della derivazione, la corrente verrà fatta defluire completamente al settore SX3;
- 2) una volta invasato il settore SX3 fino al rigurgito del manufatto, verrà fatta defluire solo una parte della portata in arrivo causando il riempimento contemporaneo di entrambi i settori della cassa;
- 3) in occasione della massima derivazione prevista la gestione ottimale del manufatto di regolazione intermedio deve garantire il deflusso di 15.0 m³/s a fronte di un dislivello monte – valle di 1.00 m in modo da giungere al completo invasamento dei due settori in modo contemporaneo.

Quest'ultima situazione rappresenta la più gravosa e per la verifica idraulica si ricorre ancora una volta alla nota formula:

$$Q = C' \cdot B \cdot H \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_0'}$$

dove il coefficiente C' viene determinato come indicato nel precedente capitolo.

Il problema è stato risolto sfruttando le capacità di calcolo del modello HEC-RAS, e in vengono riportati due profili di moto che illustrano la modalità di deflusso attraverso il manufatto di regolazione. La prima situazione fa riferimento all'istante in cui il livello idrometrico nel settore SX3 è pari a 184.00 m s.m.m. e si osserva che la luce è in grado di far transitare portate fino a 18 m³/s mantenendo il dislivello monte-valle su valori non superiore a 1.00 m. La seconda fotografia la situazione che si viene a realizzare nella fase terminale del processo di invasamento ed evidenzia come la portata defluita si mantiene superiore ai 15 m³/s.



Naturalmente, se le condizioni lo richiedono, è sempre possibile ridurre le portate defluite verso il settore di valle parzializzando la luce di fondo. Al contrario, l'eventualità di un riempimento troppo rapido del settore intermedio, rispetto a quello di valle, porterebbe all'innescò dello sfioratore superficiale, senza peraltro compromettere la buona gestione del processo.

Per quanto riguarda lo sfioratore, valgono le stesse verifiche svolte nel capitolo precedente.

A. Il modello matematico HEC-RAS

Il modello di simulazione HEC-RAS (HEC - River Analysis System) è uno dei modelli più conosciuti a livello mondiale in quanto, oltre ad essere stato uno dei primi codici di calcolo sviluppati per applicazioni nel campo dell'idraulica, è stato aggiornato costantemente fino ai giorni nostri aumentando notevolmente le potenzialità di calcolo.

È stato sviluppato dall'US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (USACE), di Davis (USA), inizialmente per lo studio idrodinamico nelle reti di canali aperti attraverso la ricostruzione dei profili idraulici di moto permanente in regime sub-critico e supercritico; successivamente sono state aggiunte capacità di calcolo superiori che lo hanno reso strumento di riferimento a livello internazionale anche per lo studio di fenomeni di moto vario, fenomeni di trasporto solido, fenomeni di diffusione di contaminanti. Il modello opera nell'ipotesi di mono-dimensionalità del flusso e con geometria fissa o variabile (modello a fondo mobile).

Lo sviluppo del modello è stato reso possibile dalla politica dell'USACE, che da un lato ha dichiarato e rispettato un programma di sviluppo pluriennale ben preciso e che, dall'altro, ha saggiamente sfruttato, in qualità di *beta-tester*, un numeroso gruppo di utenti selezionati, i quali, attraverso continue segnalazioni di malfunzionamenti e osservazioni di vario genere, hanno consentito di risolvere i problemi riscontrati (bugs), di incorporare le funzionalità aggiuntive mirate a ovviare alle carenze segnalate.

Le numerose applicazioni del modello, ha consentito di realizzare e condividere con gli utenti una nutrita banca dati riportante le applicazioni sviluppate in corsi d'acqua di varia tipologia, dove la disponibilità di dati di monitoraggio hanno consentito la taratura del modello. Per qualsiasi ambito morfologico incontrato, è sempre possibile reperire informazioni relative a casi analoghi e disporre di parametri utili per l'implementazione di modelli dove i monitoraggi dovessero risultare totalmente assenti.

A.1 Potenzialità del modello

Fino alla versione 2.*n* HEC-RAS rappresentava la semplice evoluzione del noto codice di calcolo HEC-2 (HEC, 1991), integrato con numerose funzioni e strumenti di analisi nonché di una interfaccia grafica operante in ambiente Windows, ma sempre limitato alle simulazioni dei profili idraulici nell'ipotesi di stazionarietà del moto. In seguito, a partire dalla versione 3.0 (HEC, 2001), HEC-RAS è stato integrato con gli algoritmi di calcolo del modello idraulico *UNET One-Dimensional Unsteady Flow Through a Full Network of Open Channels* (Robert L. Barkau, 1992 and HEC, 1997) che consentono di simulare il comportamento della corrente in moto vario per il solo regime subcritico. L'integrazione dei due modelli è avvenuta previa realizzazione di una particolare versione del modello UNET capace di condividere i medesimi algoritmi di analisi delle struttu-

re idrauliche presenti nella libreria di HEC-RAS. In questo modo è stato possibile unificare la struttura dei dati che provvede alla definizione geometrica del corso d'acqua rendendo condivisibile la stessa interfaccia grafica sia per l'inserimento dati che per la visualizzazione dei risultati.

Infine, a partire dalla versione 4.0, il modello ha acquisito le capacità di eseguire simulazioni nell'ipotesi di geometria variabile in conseguenza dei fenomeni di erosione e sovralluvionamento dell'alveo (modello a fondo mobile). La versione più recente disponibile è la versione 4.1 (HEC, 2010) della quale si riporta, in Figura A.1 la finestra principale.

Attualmente il modello costituisce un sistema integrato per l'analisi idraulica di reti di canali a maglie aperte e chiuse, operante in regime di moto permanente e vario, che sfrutta le medesime informazioni relative alla geometria dei corsi d'acqua e dei manufatti idraulici presenti. Nonostante ciò, la simulazione dei due fenomeni, essendo notevolmente diversi tra loro, avviene sfruttando principi teorici e schemi di calcolo differenti e pertanto si deve fare loro riferimento come a due distinti modelli idraulici.

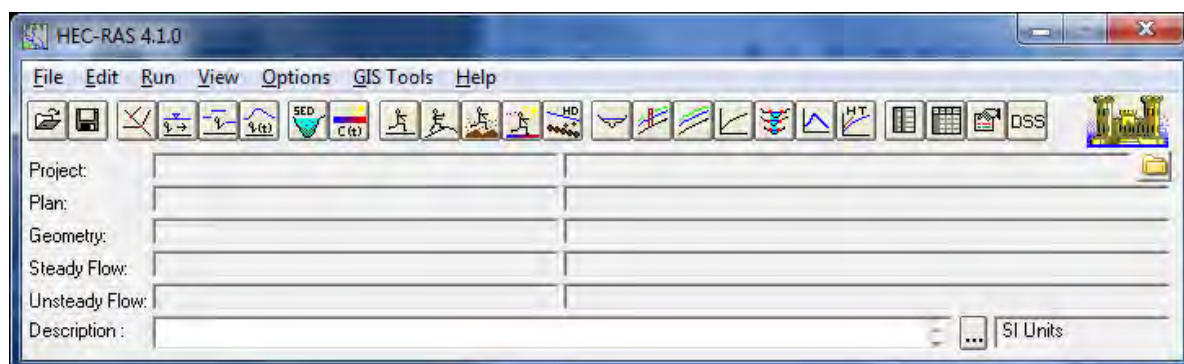


Figura A.1 - Finestra principale del modello HEC-RAS versione 4.1 (HEC, 2010)

A.1 Ipotesi di funzionamento e capacità di calcolo

Obiettivo principale del modello, utilizzato ipotizzando un regime di moto permanente, è quello di correlare l'entità della portata liquida in arrivo dal bacino di monte con le velocità e con l'altezza idrometrica raggiunta nell'alveo principale e nelle golene. Il suo utilizzo nell'ipotesi di moto vario aggiunge la capacità di analizzare i fenomeni di propagazione di un'onda di piena e valutare gli effetti di laminazione dovuti alla naturale conformazione del corso d'acqua o alla presenza di dispositivi artificiali.

La determinazione dei parametri fisici che descrivono il deflusso all'interno di una sezione d'alveo si basa sulle seguenti ipotesi semplificative:

- moto gradualmente vario;
- moto monodimensionale;

- perdite di fondo mediamente costanti fra due sezioni trasversali adiacenti;
- arginature e geometria del fondo fisse;
- regime di moto subcritico (limite riguardante solo le simulazioni a moto vario).

Nonostante la prima ipotesi è possibile valutare anche i fenomeni di moto fortemente variato a condizione di inserire opportune condizioni al contorno interne come descritto più avanti. L'errore dovuto all'imposizione di una perdita di fondo costante nel tratto compreso tra due sezioni adiacenti può essere limitata mediante l'introduzione di ulteriori sezioni ottenute per interpolazione.

Il modello simula il moto gradualmente vario monodimensionale in una rete di canali a pelo libero e può essere applicato per la soluzione di sistemi dalla geometria complessa che includono congiunzioni, biforcazioni, reti chiuse, ecc... Inoltre è consentita l'implementazione di numerose condizioni interne ed esterne che consentono la simulazione degli effetti dovuti alla presenza di paratoie, sistemi di pompaggio, ponti, salti di fondo, ecc..

Il modello è dotato di ulteriori algoritmi che permettono di indagare in dettaglio alcuni fenomeni di interesse nell'ingegneria idraulica. Possono essere studiati i fenomeni erosivi intorno alle pile e alle spalle dei ponti non plateati, valutati gli effetti della parziale ostruzione di una sezione di deflusso a causa dei depositi alluvionali (ipotizzati costanti durante una simulazione) e può essere considerata l'eventuale formazione di ghiaccio sulla superficie liquida valutando i suoi effetti sul profilo idraulico. Inoltre, pur operando nell'ipotesi di monodimensionalità, il modello consente la ricostruzione dell'andamento della velocità all'interno di una stessa sezione di deflusso, distinguendo tra zone spondali e canale centrale, in funzione della variazione di scabrezza e di tirante idraulico.

Si descrivono di seguito i principali fondamenti teorici su cui si basa il modello limitandoci al modulo dedicato alla soluzione del problema del moto permanente.

A.2 Definizione dei parametri fondamentali

Il modello utilizza, all'interno dei suoi algoritmi di calcolo, elementi dell'idraulica dei canali a pelo libero. Si ritiene opportuno, quindi, prima di procedere oltre, inserire alcuni elementi per meglio chiarire il funzionamento del modello stesso.

A.2.1 Moto permanente e vario

Il criterio di distinzione fra i due tipi di moto è il loro andamento nei confronti della variabile “tempo”. Se profondità, velocità e portata rimangono costanti nel tempo in una determinata sezione di un corso d’acqua, il moto è permanente; se una di queste caratteristiche varia, il moto è vario. Il passaggio di un’onda di piena lungo un tronco d’alveo è un esempio di moto vario perché profondità, velocità e portata cambiano nel tempo.

La ragione per cui un modello di moto permanente può essere usato per il moto vario, come è da considerarsi a rigore un’onda di piena, sta nella lentezza con cui l’onda cresce e si esaurisce. Un ipotetico osservatore sulla sponda di un corso d’acqua non è infatti in grado di apprezzare la curvatura dell’onda e non apprezza le variazioni istantanee di livello che si verificano.

Eccetto quindi casi estremi, la variazione di portata avviene gradualmente e i risultati ottenuti usando metodi analitici per moto permanente sono ugualmente di buona qualità.

A.2.2 Moto uniforme e vario

Quando il moto è uniforme, profondità e velocità sono costanti lungo un tratto di canale. La forza di gravità provoca il movimento dell’acqua, in equilibrio con gli attriti. Il moto non è accelerato né decelerato. Per un canale naturale non si può parlare di moto uniforme in senso stretto, perché la geometria delle sezioni trasversali e l’area bagnata variano lungo il canale, causando accelerazioni e decelerazioni del moto. A rigore il moto uniforme è possibile solo in un canale prismatico con sezione e pendenza costanti. D’altra parte è considerato corretto assumere che il moto sia uniforme quanto il pelo libero è approssimativamente parallelo al fondo del canale; in tal caso si assume che anche la linea dell’energia sia parallela al fondo.

Nel caso di moto vario profondità e velocità cambiano con la distanza lungo il canale; si può distinguere tra moto “gradualmente vario” quando le variazioni nell’altezza del pelo libero avvengono in una distanza relativamente lunga e modo “rapidamente vario” se le variazioni sono brusche.

Quest’ultima distinzione è importante in quanto HEC-RAS calcola i profili solamente in situazioni di moto gradualmente vario.

A.2.3 Moto subcritico e supercritico

Il moto in un canale a pelo libero può essere classificato come subcritico, supercritico o critico.

La determinazione del tipo di moto secondo questa classificazione è di fondamentale importanza nell'utilizzo del modello, perché cambia il verso in cui si procede nello studio del profilo idraulico partendo da una delle due estremità del tratto d'alveo in esame.

Le perturbazioni che interessano la superficie liquida, infatti, si propagano verso monte nel caso di moto subcritico ma non nel caso di moto supercritico, e ciò risulta fondamentale nella scelta del punto di partenza nel calcolo del profilo idraulico.

Una delle prime operazioni da fare è quindi la determinazione del tipo di moto che si sviluppa nel tratto oggetto dell'indagine condotta con il modello.

Per definire il punto di separazione fra moto subcritico e supercritico viene utilizzato il numero adimensionale di Froude, rapporto fra le forze gravitazionali e le forze inerziali:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad (\text{Eq.1})$$

dove:

V = velocità media Q/A [m/s]

g = accelerazione di gravità [m/s²]

D = raggio idraulico [m]

Se il numero di Froude risulta minore di 1, il moto è subcritico, se invece è superiore, il moto è supercritico; se risulta uguale a 1, il moto è critico e la situazione è di particolare instabilità.

Questa definizione del numero di Froude ipotizza che ci sia una distribuzione uniforme di velocità nella sezione. Per un canale simmetrico, rettangolare, triangolare, trapezoidale, ecc., questo presupposto si realizza, ma nel caso di un canale naturale, con sezioni irregolari e aree golenali, l'espressione data non è più valida e non può essere rigorosamente utilizzata per determinare il tipo di moto; in questo caso sarebbe più corretto utilizzare dei numeri di Froude particolari, che tengano conto delle variazioni geometriche, di velocità e di portata.

La ricerca di questi particolari numeri di Froude va effettuata caso per caso, consultando eventualmente la letteratura esistente.

Il modello, comunque, effettua al suo interno le necessarie approssimazioni e ridefinizioni del valore di questo parametro.

A.2.4 Altezza critica

L'altezza critica è una caratteristica molto importante per il moto, dato che, come già accennato, rappresenta un criterio per discriminare i vari regimi di moto.

Il moto che si sviluppa con un'altezza pari, o vicina, all'altezza critica è chiamato moto critico; questa situazione è molto instabile poiché una piccola variazione di energia specifica causa grandi variazioni di livello.

L'energia specifica H di una sezione trasversale è l'energia riferita al punto più basso del tratto in esame; è quindi la somma della profondità y e del termine $V^2/2g$:

$$H = y + \frac{V^2}{2g} \quad (\text{Eq.2})$$

La determinazione dell'altezza critica viene complicata dalla distribuzione delle velocità che ci si trova ad avere in sezioni irregolari, associate a flusso nelle golene. Il contributo cinetico nell'equazione dell'energia specifica deve quindi essere corretto tramite un moltiplicatore α di Coriolis. Si ha quindi:

$$H = y + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (\text{Eq.3})$$

In HEC-RAS, l'altezza critica relativa ad una sezione viene determinata ricercando il minimo dell'energia specifica.

La ricerca viene fatta con un procedimento iterativo partendo da un valore WS di primo tentativo al quale ne consegue un valore di energia specifica dato dalla (3), che verrà poi corretto fino alla determinazione del WS in grado di garantire il minimo valore di H .

HEC-RAS può calcolare l'andamento di profili subcritici e supercritici. Viene però richiesto all'utente di specificare il regime di moto all'atto del setup dell'applicazione.

Se si verifica il caso di avere la presenza dei due regimi nel tronco oggetto di studio, diventa necessario suddividere il tronco in tratti in cui si abbia presenza di un solo regime di moto. Nel punto in cui avviene il passaggio tra un regime e l'altro, infatti, HEC-RAS non effettuerà il calcolo attraverso l'altezza critica, ma assumerà al limite un'altezza pari a quella critica.

A.3 Procedure di calcolo per simulazioni in moto permanente

Come già anticipato il regime di moto permanente ipotizza l'invariabilità nel tempo t della portata Q che attraversa una sezione d'alveo di area A . Di conseguenza tutti i parametri idraulici che definiscono le caratteristiche di una corrente risultano invariabili nel tempo. Il regime di moto resta comunque libero di modificarsi lungo la dimensione spaziale non

escludendo la possibilità di assegnare portate diverse ai differenti tratti del corso d'acqua e di studiare gli effetti delle immissioni di portata laterali concentrate e distribuite.

La determinazione del profilo idraulico avviene risolvendo l'equazione del bilancio dell'energia espresso secondo la formulazione di Manning:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S_f^{1/2} \quad (\text{Eq.4})$$

S_f = pendenza relativa alle perdite di carico distribuite;

R = raggio idraulico;

n = coefficiente di scabrezza di Manning.

L'equazione (4) viene risolta per ogni tratto delimitato da due sezioni trasversali consecutive utilizzando lo "standard step method", tecnica numerica che, una volta nota l'energia in corrispondenza di una sezione, permette il calcolo della velocità e del tirante idraulico della sezione adiacente.

A.3.1 Determinazione della distribuzione del moto in una sezione trasversale

E' stato precedentemente introdotto il significato del coefficiente di Coriolis utilizzato per tener conto della non uniforme distribuzione spaziale della velocità all'interno di una stessa sezione trasversale d'alveo. Per la determinazione del suo valore nel caso di una sezione naturale, o comunque irregolare, è necessario conoscere come si suddivide la portata, ossia quanta fluisce nel canale propriamente detto e quanta nelle zone golenali. Viene a questo scopo utilizzata l'equazione di Manning:

$$V = \frac{1.486}{n} AR^{2/3} S_f^{1/2} \quad (\text{Eq.5})$$

$$Q = VA = \frac{1.486}{n} AR^{2/3} S_f^{1/2} \quad (\text{Eq.6})$$

Ponendo quindi:

$$K = \text{trasporto} = \frac{1.486}{n} AR^{2/3} \quad (\text{Eq.7})$$

si ha che:

$$Q = KS_f^{1/2} \quad (\text{Eq.8})$$

che viene scritta per ognuna delle i-esime sezioni considerate.

In HEC-RAS, il raggio idraulico R di una subarea è calcolato dividendo l'area per il perimetro bagnato. Il confine d'acqua immaginario tra due subaree viene trascurato.

Tramite alcuni passaggi si trova che:

$$\alpha = \frac{(\sum A_i)^2 (\sum K_i^3 / A_i^2)}{(\sum K_i)^3} \quad (\text{Eq.9})$$

A.3.2 Distribuzione delle pressioni in una sezione trasversale

Come già detto, una delle ipotesi di base nel calcolo del profilo da parte di HEC-RAS è la distribuzione idrostatica delle pressioni. Si può assumere che la pressione sia idrostatica in un fluido in movimento se le linee di corrente sono essenzialmente dritte e parallele. La maggior parte dei canali naturali con moto gradualmente vario rispetta queste condizioni, non rispettate invece nel caso di moto rapidamente vario.

A.3.3 Calcolo dei profili idraulici

Il calcolo dei profili idraulici avviene in due fasi tra loro intimamente collegate: bilancio dell'energia e conseguente calcolo del profilo.

A.3.3.A Bilancio dell'energia

La perdita di energia fra due sezioni trasversali, prese perpendicolarmente al flusso, è la base per il calcolo del profilo idraulico. L'energia totale, in termini di altezza, è uguale alla somma dei contributi dovuti alla quota, alla pressione e al termine cinetico. Se θ rappresenta la pendenza del fondo si ha che:

$$E = Z + d \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (\text{Eq.10})$$

Il termine $\cos \theta$ è comunemente assunto uguale a 1 per canali naturali. Si può comprendere come comunque si compia un errore molto basso imponendo questa semplificazione considerando che per una pendenza di fondo di 1:10, molto elevata, $\cos \theta$ è uguale a 0.99. L'errore compiuto in questo caso, definibile estremo, considerandolo uguale a 1 è del 1%, e quindi, nel complesso, trascurabile.

Con riferimento all'equazione dell'energia appena scritta, si può riscriverla nel caso sia applicata tra due sezioni:

$$Z_1 + y_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + y_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_e \quad (\text{Eq.11})$$

o in altri termini:

$$E_1 = E_2 + h_e \quad (\text{Eq.12})$$

L'energia totale nella sezione di monte H_1 è quindi uguale all'energia della sezione di valle H_2 più il termine di perdita di energia h_e . Questa equazione è usata in successione da HEC-RAS spostandosi per passi da una sezione all'altra, calcolando il profilo idraulico.

A.3.3.B Perdite di energia

In HEC-RAS la perdita totale di energia h_e è considerata composta da due componenti: una componente di attrito h_f , dovuta alla scabrezza delle superfici e calcolata secondo l'equazione di Manning, e una componente h_o , che rappresenta le altre perdite, soprattutto dovute a contrazioni ed espansioni.

Il programma determina se il flusso è in contrazione o espansione sottraendo il termine cinetico $V^2/2g$ alla sezione a valle dal termine cinetico alla sezione a monte. Se la differenza risulta un numero negativo, il moto è di contrazione, se positivo è di espansione. Il programma, sulla base di questo controllo, applica un coefficiente appropriato.

Se consideriamo ora un tratto di canale, la pendenza S_f della linea dell'energia in corrispondenza a una determinata sezione può essere determinata con l'equazione di Manning, inserendo la quota del pelo libero, la portata, il coefficiente di rugosità n e la geometria della sezione. L'energia persa a causa dell'attrito tra le sezioni a monte e a valle è calcolata con il seguente integrale:

$$\int_{x_2}^{x_1} S_f dx = \bar{S}_f L \quad (\text{Eq.13})$$

dove S_f è la perdita specifica per attrito e L è la lunghezza del tratto in esame.

Un'approssimazione delle perdite per attrito h_f può essere ottenuta moltiplicando il termine S_f per la lunghezza L del tronco tra le due sezioni.

Ci sono quattro equazioni in HEC-RAS per l'approssimazione delle perdite tra due sezioni e sono le seguenti:

$$\bar{S}_f = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \quad \text{trasporto medio} \quad (\text{Eq.14})$$

$$\bar{S}_f = \frac{\sqrt{S_{f_1} + S_{f_2}}}{2} \quad \text{attrito specifico medio} \quad (\text{Eq.15})$$

$$\bar{S}_f = \sqrt{S_{f_1} * S_{f_2}} \quad \text{media geometrica attrito specifico} \quad (\text{Eq.16})$$

$$\overline{S_f} = \frac{2 S_{f_1} * S_{f_2}}{S_{f_1} + S_{f_2}} \quad \text{media armonica attrito specifico} \quad (\text{Eq.17})$$

se nessuna di queste viene espressamente scelta in fase di setup dell'applicazione, il modello utilizza la prima delle quattro.

A.3.4 Standard step method

Per illustrare il metodo “standard step method” utilizzato da HEC-RAS si possono descrivere i passi necessari per il calcolo del profilo relativo a condizioni di moto subcritico con l'equazione dell'energia.

Si suppongano quindi due sezioni di cui si conosca la quota della superficie della sezione di valle; il problema che si vuole risolvere è la conoscenza della quota corrispondente alla sezione di monte.

Si può quindi scrivere il bilancio dell'energia fra le sezioni U di monte e D di valle:

$$WS_u + \frac{a_u V_u^2}{2g} = WS_d + \frac{a_d V_d^2}{2g} + h_e \quad (\text{Eq.18})$$

$$WS_u = Z_u + y_u \quad (\text{Eq.19})$$

$$WS_d = Z_d + y_d \quad (\text{Eq.20})$$

Assumendo che la geometria delle sezioni sia nota, i termini incogniti dell'equazione sono WS_u , V_u e h_e . V_u è desumibile direttamente dal valore di WS_u , per cui le incognite possono essere ridotte a due.

Con due incognite è necessaria una seconda equazione, riguardante le perdite di energia ed espressa da $h_e = h_f + h_o$, per poter ottenere una soluzione. L'irregolarità dei canali naturali richiede una ricerca della soluzione di tipo “trail and error”, per successivi tentativi.

I passi attraverso cui avviene il calcolo sono i seguenti:

- Viene supposta una quota di pelo libero per la sezione di monte. Un primo tentativo può essere fatto imponendo la pendenza della linea dell'energia pari alla pendenza del tronco d'alveo; quindi, $DWS = (Q/K)^2 L$, dove DWS rappresenta la variazione nella quota del pelo libero, Q è la portata, K il termine di trasporto e L la distanza dalla sezione a monte;
- Sulla base della quota di pelo libero assunta e della geometria della sezione, vengono determinati i termini cinetico e il trasporto totale per la sezione a monte;

- Con i valori calcolati del termine cinetico e di trasporto del passo 2, viene calcolato il valore di h_e ;
- Con il valore calcolato di h_e , viene calcolata l'altezza di pelo libero della sezione a monte utilizzando l'equazione dell'energia;
- Viene fatto un confronto fra il valore calcolato al passo 4 e il valore impostato al passo 1. Se la differenza non è inferiore a una prefissata tolleranza, il ciclo riprende cambiando il valore al passo 1.
- Questa tecnica richiede tempi di elaborazione brevissimi e non incontra problemi di convergenza nemmeno in presenza di discontinuità geometriche o idrauliche (passaggio tra regime di moto subcritico e supercritico).