

COMMITTENTE:



DIREZIONE INVESTIMENTI  
DIREZIONE PROGRAMMA INVESTIMENTI DIRETTRICE SUD

PROGETTAZIONE:



## CONTRATTO ISTITUZIONALE DI SVILUPPO PER LA REALIZZAZIONE DELLA DIRETTRICE FERROVIARIA NAPOLI-BARI- LECCE-TARANTO

U.O. INFRASTRUTTURE SUD

PROGETTO ESECUTIVO

LINEA POTENZA - FOGGIA - AMMODERNAMENTO

SOTTOPROGETTO 2: ELETTRIFICAZIONE, RETTIFICHE DI TRACCIATO,  
SOPPRESSIONE PL E CONSOLIDAMENTO SEDE.

LOTTO 4 – OPERE AGGIUNTIVE PER OTTEMPERANZA PRESCRIZIONI  
DI CDS ISTRUTTORIA – CAVALCAFERROVIA NV08 NEI COMUNI DI  
RIONERO IN VULTURE E BARILE

RELAZIONE IDRAULICA E DI COMPATIBILITA' IDRAULICA

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

I A 4 K 4 2 E 7 8 R I I D 0 0 0 2 0 0 1 A

Rev	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Esecutiva	PROGIN	11/2021	DD Documentario 	11/2021		11/2021	D. Tiberti 11/2021 

File: IA4K42E78RIID0002001A.doc

n. Elab.:

## INDICE

1	PREMESSA .....	3
1.1	ELENCO ELANBORATI ANNESSI.....	3
2	NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....	5
2.1	PIANO STRALCIO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO .....	5
2.2	NTC 2018 E RELATIVA CIRCOLARE APPLICATIVA.....	9
2.3	MANUALE DI PROGETTAZIONE FERROVIARIO .....	13
2.4	SINTESI DELLE PRESCRIZIONI PER LA COMPATIBILITÀ DEGLI ATTRAVERSAMENTI .....	15
3	DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI .....	16
4	MODELLAZIONE IDRAULICA.....	21
4.1	ASSE BARILE .....	21
4.2	ASSE CASELLO .....	28
5	COMPATIBILITA' IDRAULICA.....	36
5.1	VERIFICA DEGLI ATTRAVERSAMENTI.....	36
	APPENDICE 1 - IL MODELLO DI CALCOLO HEC-RAS .....	38
	APPENDICE 2 – ELABORAZIONI DI CALCOLO HEC-RAS .....	52

## 1 PREMESSA

Il presente elaborato è parte integrante del progetto di Ammodernamento della linea Foggia-Potenza - Sottoprogetto 2 - Elettrificazione, rettifiche di tracciato, soppressione P.L. e consolidamento sede – Lotto 4 – Opere aggiuntive per ottemperanza proscrizioni di CDS istruttoria; in particolare, dell'intervento di soppressione di un passaggio a livello mediante la realizzazione del Cavalcaferrovia al km 73+295 e della viabilità NV08 tra i Comuni di Rionero in Vulture e Barile, Basilicata.

La presente relazione descrive e riporta i risultati dello studio idraulico svolto per il dimensionamento e la verifica degli attraversamenti e delle sistemazioni idrauliche necessari per la sicurezza idraulica delle infrastrutture stradali in progetto. In particolare, gli interventi in progetto risultano interferenti con due incisioni: il Vallone Catavatto o "Asse Barile" e l'"Asse Casello". Il Vallone Catavatto è un corso d'acqua naturale rappresentato come tale sulla cartografia IGM 1:25.000. Ai fini della compatibilità con il PAI e le NTA, è stato effettuato uno studio mediante una modellazione monodimensionale (Hec-Ras) in regime di moto permanente con riferimento alla portata associata a eventi di pioggia con tempo di ritorno di 200 anni. Il vallone Catavatto è attraversato dall'Asse 4 - SS93 Lato Barile con un viadotto (NW08) e dall'Asse 8 – Via delle More con un tombino scatolare in c.a. di dimensioni 3.50 m x 3.57 m (IN05). Per l'attraversamento in viadotto è stato assicurato un franco superiore ad 1.50 m sul livello idrico nella sezione immediatamente a monte dell'opera, in ottemperanza alle NTC2018, e per l'attraversamento con tombino un franco superiore ad 1,0 m. L' "Asse Casello" è attraversato dall'Asse 6 – Rampa Casello FS con un tombino circolare in c.a. Ø1800. Lo studio è stato effettuato mediante una modellazione monodimensionale (Hec-Ras) in regime di moto permanente con riferimento alla portata associata a eventi di pioggia con tempo di ritorno di 200 anni per la verifica di compatibilità idraulica dell'attraversamento ai sensi delle NTC2018, assicurando un franco superiore a 0,50 m.

### 1.1 ELENCO ELANBORATI ANNESSI

TITOLO	SCALA	CODIFICA
Relazione idrologica	-	I A 4 K 4 2 E 7 8 R I I D 0 0 0 1 0 0 1 A
Relazione idraulica e di compatibilità idraulica	-	I A 4 K 4 2 E 7 8 R I I D 0 0 0 2 0 0 1 A
Corografia dei bacini	1:2000	I A 4 K 4 2 E 7 8 C 6 I D 0 0 0 1 0 0 1 A
Sistemazione idraulica IN06 - Pianta, profilo ante-operam	varie	I A 4 K 4 2 E 7 8 P Z I N 0 6 0 0 0 0 1 A
Sistemazione idraulica IN06 - Pianta, profilo post-operam	varie	I A 4 K 4 2 E 7 8 P Z I N 0 6 0 0 0 0 2 A
Sistemazione idraulica IN06 - Sezioni Ante-operam Tav. 1 di 2	1:200	I A 4 K 4 2 E 7 8 W 9 I N 0 6 0 0 0 0 1 A
Sistemazione idraulica IN06 - Sezioni Ante-operam Tav. 2 di 2	1:200	I A 4 K 4 2 E 7 8 W 9 I N 0 6 0 0 0 0 2 A
Sistemazione idraulica IN06 - Sezioni Post-operam	1:200	I A 4 K 4 2 E 7 8 W 9 I N 0 6 0 0 0 0 3 A
Sistemazione idraulica IN05 - Pianta, profilo ante-operam	varie	I A 4 K 4 2 E 7 8 P Z I N 0 5 0 0 0 0 1 A

RELAZIONE IDRAULICA E DI COMPATIBILITA' IDRAULICA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IA4K	42	E 78 RI	ID 00 02 001	A	4 di 101

TITOLO	SCALA	CODIFICA																				
Sistemazione idraulica IN05 - Pianta, profilo post-operam	varie	I	A	4	K	4	2	E	7	8	P	Z	I	N	0	5	0	0	0	0	2	A
Sistemazione idraulica IN05 - Sezioni Ante-operam Tav. 1 di 2	1:200	I	A	4	K	4	2	E	7	8	W	9	I	N	0	5	0	0	0	0	1	A
Sistemazione idraulica IN05 - Sezioni Ante-operam Tav. 2 di 2	1:200	I	A	4	K	4	2	E	7	8	W	9	I	N	0	5	0	0	0	0	2	A
Sistemazione idraulica IN05 - Sezioni Post-operam Tav. 1 di 3	1:200	I	A	4	K	4	2	E	7	8	W	9	I	N	0	5	0	0	0	0	3	A
Sistemazione idraulica IN05 - Sezioni Post-operam Tav. 2 di 3	1:200	I	A	4	K	4	2	E	7	8	W	9	I	N	0	5	0	0	0	0	4	A
Sistemazione idraulica IN05 - Sezioni Post-operam Tav. 3 di 3	1:200	I	A	4	K	4	2	E	7	8	W	9	I	N	0	5	0	0	0	0	5	A
Dettagli rivestimenti e opere di sistemazione	varie	I	A	4	K	4	2	E	7	8	B	Z	I	N	0	0	0	A	0	0	1	A



## 2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

- *Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico, P.A.I. (adozione dicembre 2004, approvazione novembre 2005 e successivi aggiornamenti)*
- *Norme Tecniche per le Costruzioni – DM 17 gennaio 2018;*
- *Norme Tecniche per le Costruzioni – Circolare n.7/2019;*
- *Manuale di Progettazione delle Opere Civili RFI del 20-12-2019.*

### 2.1 Piano stralcio per l'assetto idrogeologico

In materia di pianificazione idraulica del territorio, l'autorità competente nell'area di intervento è la ex Autorità di Bacino della Regione Puglia, oggi Unit of Management Regionale Puglia e interregionale Ofanto dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Meridionale. Per questo motivo, il presente studio ha preso a riferimento il Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico, P.A.I., redatto dalla ex Autorità di Bacino della Regione Puglia come strumento di pianificazione territoriale in vigore (adozione dicembre 2004, approvazione novembre 2005 e successivi aggiornamenti).

In particolare, il PAI individua le aree caratterizzate da un significativo livello di pericolosità idraulica, e, in funzione della frequenza con cui esse sono interessate da deflussi, le classifica in:

- Aree ad alta pericolosità idraulica (P3)
- Aree media pericolosità idraulica (P2)
- Aree bassa pericolosità idraulica (P1)

La classe di pericolosità alta (P3) fa riferimento ad un evento caratterizzato da una probabilità di accadimento  $Tr \leq 30$  anni. La classe di pericolosità media (P2) fa riferimento ad un evento caratterizzato da una probabilità di accadimento compresa tra  $Tr = 30 - 200$  anni. La classe di pericolosità bassa (P1) fa riferimento ad un evento di piena raro, caratterizzato da un tempo di ritorno compreso tra  $Tr = 200 - 500$  anni.

Di seguito, una tabella riepilogativa delle classi di pericolosità adottate.

Tr (anni)	Pericolosità
<30	P3
30-200	P2
200-500	P1

**Tabella 1 – Classi di pericolosità idraulica secondo il PAI**

Le Norme Tecniche di Attuazione (NTA) del PAI, in relazione alle condizioni idrauliche e agli effetti potenzialmente dannosi prodotti da interventi antropici, dettano norme specifiche per le aree a diversa pericolosità idraulica. Queste norme sono nel dettaglio riportate nei seguenti articoli:

- Art.6: Alveo fluviale in modellamento attivo ed aree golenali;
- Art.7: aree ad alta pericolosità idraulica;
- Art.8: aree a media pericolosità idraulica;
- Art.9: aree a bassa pericolosità idraulica;
- Art.10: fasce di pertinenza fluviale.

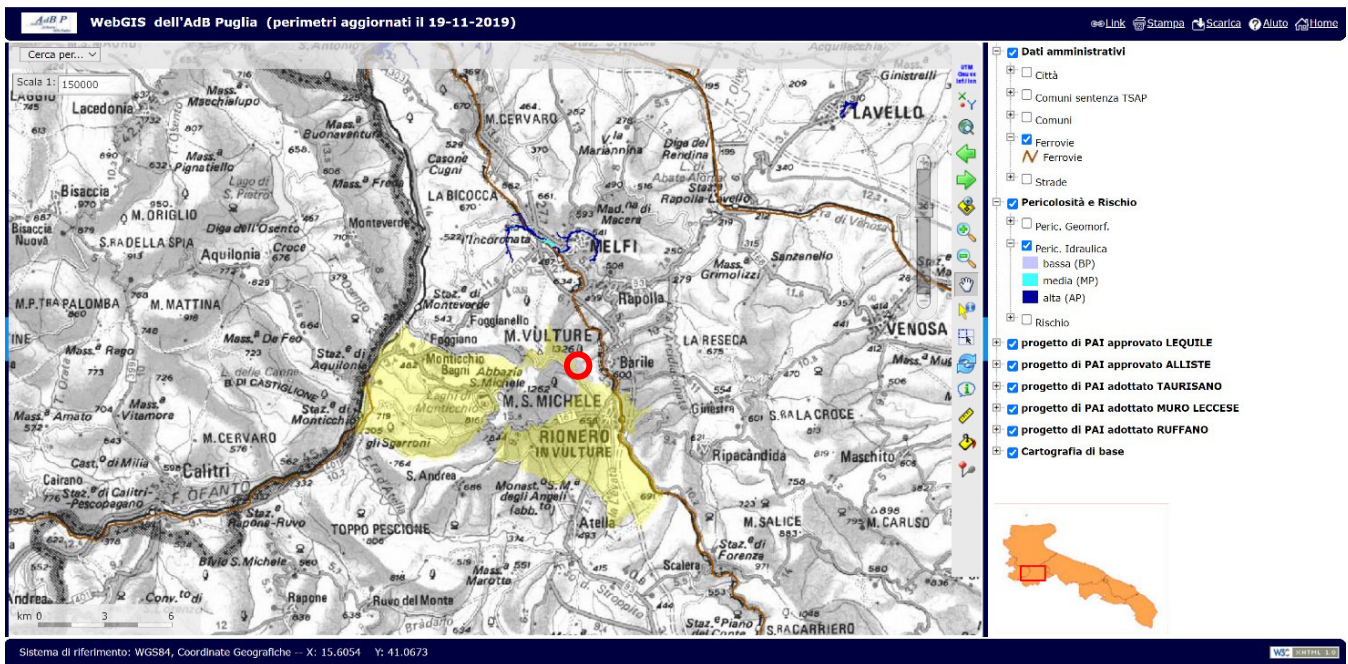
Le aree ad alta, media e bassa pericolosità idraulica risultano arealmente individuate nelle “*Carte delle aree soggette a rischio idrogeologico*” allegate al PAI, mentre l’individuazione delle aree definite “*Alveo fluviale in modellamento attivo ed aree golenali*” e “*Fasce di pertinenza fluviale*” segue i criteri riportati rispettivamente negli articoli 6 e 10 delle NTA del PAI.

In merito alle aree “*Alveo fluviale in modellamento attivo ed aree golenali*” l’art. 6 definisce che quando il reticolo idrografico, l’alveo in modellamento attivo e le aree golenali non sono arealmente individuate nella cartografia in allegato al PAI e le condizioni morfologiche non ne consentono la loro individuazione, le norme si applicano alla porzione di terreno a distanza planimetrica, sia in destra che in sinistra dell’asta fluviale, non inferiore a 75 m;

Per quanto riguarda le “*Fasce di pertinenza fluviale*”, l’art. 10 definisce che quando la fascia di pertinenza fluviale non è arealmente individuata nelle cartografie in allegato al PAI, le norme si applicano alla porzione di terreno, sia in destra che in sinistra, contermina all’area golenale, come individuata nell’art. 6, di ampiezza comunque non inferiore a 75 m.

Attualmente l'Autorità di Bacino della Puglia intende per “reticolo idrografico” tutto quanto rappresentato come tale su cartografia IGM in scala 1:25000.

Dalla sovrapposizione degli interventi in progetto con le aree del PAI e i reticoli idrografici della cartografia IGM 1:25000 è emerso che l'intervento non ricade in aree perimetrate a pericolosità idraulica della cartografia del PAI (Figura 1), ma nelle aree disciplinate dagli art. 6 e 10 delle NTA (Figura 2).



**Figura 1– Individuazione dell'area di intervento su cartografia IGM con sovrapposizione delle aree a pericolosità idraulica – fonte WebGis dell'AdB Puglia con perimetrazione aggiornata al 19/11/2019.**

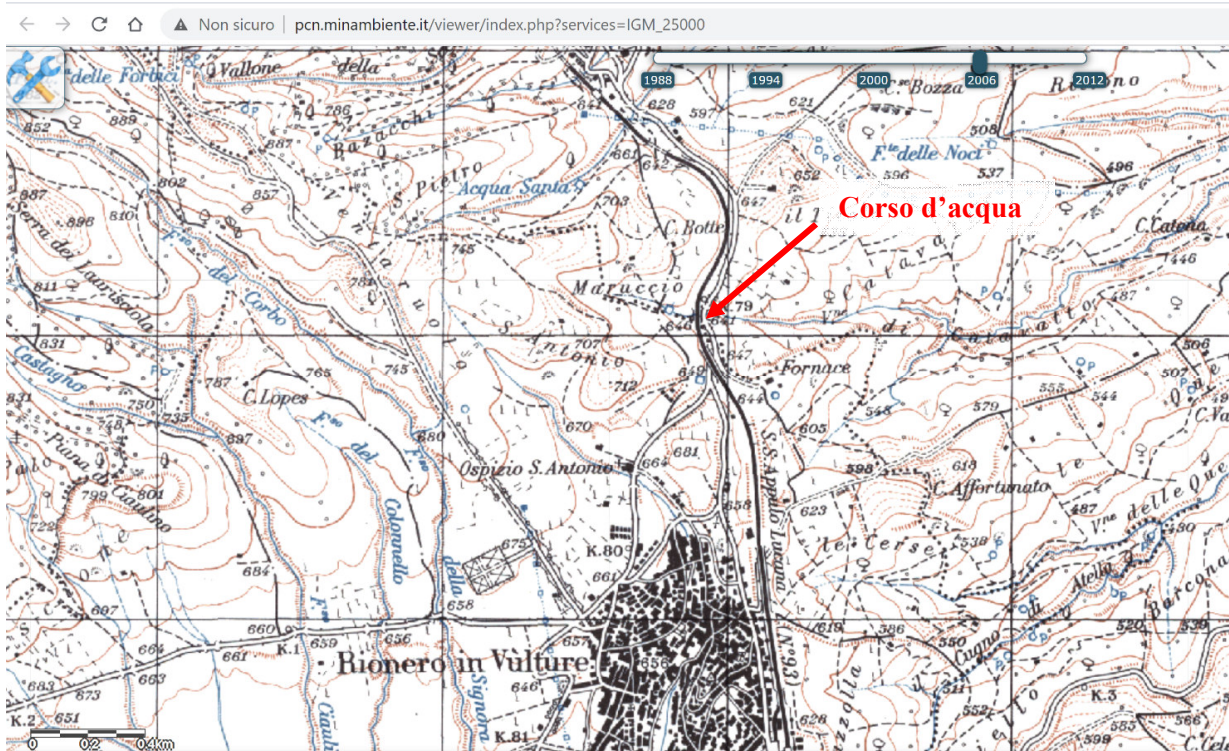


Figura 2 – Corso d'acqua su cartografia IGM 1:25000

In particolare, con riferimento all'art. 6, nelle aree definite come “Alveo fluviale in modellamento attivo ed aree golenali sono consentiti “l'ampliamento e la ristrutturazione delle infrastrutture pubbliche o di interesse pubblico esistenti, comprensive dei relativi manufatti di servizio, riferite a servizi essenziali e non delocalizzabili, nonché la realizzazione di nuove infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico, comprensive dei relativi manufatti di servizio, parimenti essenziali e non diversamente localizzabili, purché risultino coerenti con gli obiettivi del presente Piano e con la pianificazione degli interventi di mitigazione”.

Per quanto previsto dell'art. 10 “Disciplina delle fasce di pertinenza fluviale” gli interventi consentiti sono tutti quelli “previsti dagli strumenti di governo del territorio, a condizione che venga preventivamente verificata la sussistenza delle condizioni di sicurezza idraulica.”

La sicurezza idraulica è, secondo la definizione riportata all'art. 36, la “condizione associata alla pericolosità idraulica per fenomeni di insufficienza del reticolo di drenaggio e generalmente legata alla non inondabilità per eventi di assegnata frequenza. Agli effetti del PAI si intendono in sicurezza idraulica le aree non inondate per eventi con tempo di ritorno fino a 200 anni”.

Il presente studio idraulico dimostra che tutti gli interventi, che ricadono tra quelli ammissibili dall'art.6 e dall'art.10, sono in una condizione di sicurezza idraulica rispetto alle aree inondabili per eventi con tempo di ritorno fino a 200 anni e quindi compatibili con quanto previsto dalle NTA del PAI.

## 2.2 NTC 2018 e relativa Circolare Applicativa

L'Aggiornamento delle Norme Tecniche delle Costruzioni (D.M. 17 Gennaio 2018) e la Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 "Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 17 gennaio 2018, contengono le istruzioni per la progettazione dei ponti stradali e ferroviari interessanti corsi d'acqua naturali o artificiali, con particolare riferimento ai tempi di ritorno e ai franchi idraulici da adottare per le verifiche di compatibilità idraulica.

In particolare, al § 5.1.2.3 delle NTC 2018 "Compatibilità idraulica" si prescrive che:

*Quando il ponte interessa un corso d'acqua naturale o artificiale, il progetto deve essere corredato da uno studio di compatibilità idraulica costituito da una relazione idrologica e da una relazione idraulica riguardante le scelte progettuali, la costruzione e l'esercizio del ponte.*

*L'ampiezza e l'approfondimento dello studio e delle indagini che ne costituiscono la base devono essere commisurati all'importanza del problema e al livello di progettazione. Deve in ogni caso essere definita una piena di progetto caratterizzata da un tempo di ritorno  $T_r$  pari a 200 anni ( $T_r=200$ ).*

*Coerentemente al livello di progettazione, lo studio di compatibilità idraulica deve riportare:*

- l'analisi idrologica degli eventi di massima piena e stima della loro frequenza probabile;*
- la definizione dei mesi dell'anno durante i quali siano da attendersi eventi di piena, con riferimento alla prevista successione delle fasi costruttive;*
- la definizione della scala delle portate nelle condizioni attuali, di progetto, e nelle diverse fasi costruttive previste, corredata dal calcolo del profilo di rigurgito indotto dalla presenza delle opere in alveo, tenendo conto della possibile formazione di ammassi di detriti galleggianti;*
- la valutazione dello scavo localizzato con riferimento alle forme ed alle dimensioni di pile, spalle e relative fondazioni, nonché di altre opere in alveo provvisoriale e definitive, tenendo conto della possibile formazione di ammassi di detriti galleggianti oltre che dei fenomeni erosivi generalizzati conseguenti al restringimento d'alveo;*
- l'esame delle conseguenze di urti e abrasioni dovuti alla presenza di natanti e corpi flottanti.*

*Il manufatto non dovrà interessare con spalle, pile e rilevati la sezione del corso d'acqua interessata dalla piena di progetto e, se arginata, i corpi arginali.*

*Qualora fosse necessario realizzare pile in alveo, la luce netta minima tra pile contigue, o fra pila e spalla del ponte, non deve essere inferiore a 40 m misurati ortogonalmente al filone principale della corrente. Per i ponti esistenti, eventualmente interessati da luci nette di misura inferiore, è ammesso l'allargamento della piattaforma, a patto che questo non comporti modifiche dimensionali delle pile, delle spalle o della pianta delle fondazioni di queste, e nel rispetto del franco idraulico come nel seguito precisato.*

*In tutti gli altri casi deve essere richiesta l'autorizzazione all'Autorità competente, che si esprime previo parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.*

*Nel caso di pile e/o spalle in alveo, cura particolare è da dedicare al problema delle escavazioni in corrispondenza delle fondazioni e alla protezione delle fondazioni delle pile e delle spalle tenuto anche conto del materiale*



*galleggiante che il corso d'acqua può trasportare. In tali situazioni, una stima anche speditiva dello scalzamento è da sviluppare fin dai primi livelli di progettazione.*

*Il franco idraulico, definito come la distanza fra la quota liquida di progetto immediatamente a monte del ponte e l'intradosso delle strutture, è da assumersi non inferiore a 1,50 m, e comunque dovrà essere scelto tenendo conto di considerazioni e previsioni sul trasporto solido di fondo e sul trasporto di materiale galleggiante, garantendo una adeguata distanza fra l'intradosso delle strutture e il fondo alveo.*

*Quando l'intradosso delle strutture non sia costituito da un'unica linea orizzontale tra gli appoggi, il franco idraulico deve essere assicurato per una ampiezza centrale di 2/3 della luce, e comunque non inferiore a 40 m.*

*Il franco idraulico necessario non può essere ottenuto con il sollevamento del ponte durante la piena.*

*Lo scalzamento e le azioni idrodinamiche associate al livello idrico massimo che si verifica mediamente ogni anno (si assuma  $Tr = 1,001$ ) devono essere combinati con le altre azioni variabili adottando valori del coefficiente  $\psi_0$  unitario.*

*Lo scalzamento e le azioni idrodinamiche associati all'evento di piena di progetto devono essere combinate esclusivamente con le altre azioni variabili da traffico, adottando per queste ultime i coefficienti di combinazione  $\psi_1$ .*

Al § C5.1.2.4 della Circolare applicativa si prescrive inoltre:

*Ai fini dell'applicazione del punto 5.1.2.3 della Norma, s'intende per alveo la sezione occupata dal deflusso della portata di piena di progetto. Quest'ultima è a sua volta caratterizzata da un tempo di ritorno pari a  $Tr = 200$  anni, dovendosi intendere tale valore quale il più appropriato da scegliere, non escludendo tuttavia valori anche maggiori che devono però essere adeguatamente motivati e giustificati.*

*Gli elementi del ponte, quali le opere strutturali, di difesa ed accessorie, quando interessino l'alveo di un corso d'acqua, fanno parte di un progetto unitario corredato dallo studio di compatibilità idraulica di cui al punto 5.1.2.3 delle NTC. Il progetto sarà impostato tenendo in considerazione la necessità di garantire l'accesso per il ripristino dell'ufficiosità idraulica degli attraversamenti parzialmente o totalmente intasati dai detriti durante gli eventi di piena.*

*Fermo restando quanto previsto dalla Norma, nello studio di compatibilità idraulica, in funzione delle diverse situazioni, è opportuno siano tra l'altro illustrati i seguenti aspetti:*

*- analisi degli eventi di massima piena; esame dei principali eventi verificatisi nel corso d'acqua; raccolta dei valori estremi in quanto disponibili, e loro elaborazione in termini di frequenza probabile del verificarsi; per i ponti in sezioni di un corso d'acqua che abbiano a monte manufatti artificiali che limitino il naturale deflusso delle piene, queste sono da valutarsi anche nell'ipotesi che tali manufatti siano dismessi;*

*- ricerca e raccolta, presso gli Uffici ed Enti competenti, delle notizie e dei rilievi esistenti, anche storici, utili per lo studio idraulico da svolgere;*

*- giustificazione della soluzione proposta per: l'ubicazione del ponte, le sue dimensioni e le sue strutture in pianta, in elevazione ed in fondazione, tenuto conto del regime del corso d'acqua, dell'assetto morfologico attuale e della sua possibile evoluzione, nonché delle caratteristiche geotecniche della zona interessata;*

*- allontanamento delle acque dall'impalcato e prevenzione del loro scolo incontrollato sulle strutture del ponte stesso o su infrastrutture sottostanti.*

*Inoltre, è di interesse stimare i valori della frequenza probabile ( $1/Tr$ ) di ipotetici eventi che diano luogo a riduzioni del franco stesso.*

*Nello studio idraulico, in funzione delle diverse situazioni, sono inoltre considerati, ove applicabili, i seguenti problemi:*

- classificazione del corso d'acqua ai fini dell'esercizio della navigazione interna: per ponti posti su vie classificate navigabili va rispettata la luce minima sotto il ponte che compete ai natanti per i quali il corso è classificato, fino alla portata per la quale sia consentita la navigazione;*
- valutazione dell'influenza dello scavo localizzato che si realizza in corrispondenza delle pile e delle spalle, sulla stabilità di argini e sponde, oltre che delle fondazioni di altri manufatti presenti nelle vicinanze;*
- esame delle conseguenze della presenza di corpi flottanti, considerando anche il possibile disormeggio dei natanti, trasportati dalle acque in relazione a possibili ostruzioni delle luci (specie se queste possono creare invasi anche temporanei a monte), sia in fase costruttiva sia durante l'esercizio delle opere;*
- sollecitazioni indotte dall'acqua per evento sismico quando sia di qualche rilievo la superficie immersa delle pile (e, per i ponti esistenti, delle spalle) con riferimento al livello idrico massimo che si verifica mediamente ogni anno.*

*Per la stima del livello idrico massimo che si verifica mediamente ogni anno, in assenza di dati che garantiscano una robusta caratterizzazione statistica degli eventi, è da utilizzarsi il minimo fra i valori di portata massimi annuali registrati. Scalzamento e azioni idrodinamiche devono in tal caso essere combinate con tutte le altre azioni variabili, mentre nella situazione corrispondente all'evento di piena di progetto, nella combinazione con le altre azioni variabili sono da considerare solo quelle variabili da traffico.*

*In situazioni particolarmente complesse può essere opportuno sviluppare le indagini anche con l'ausilio di modelli fisici.*

*Quando, per caratteristiche del territorio e del corso d'acqua, si possa verificare nella sezione oggetto dell'attraversamento il transito di tronchi di rilevanti dimensioni, in aggiunta alla prescrizione di un franco normale minimo di 1,50 m, è da raccomandare che il dislivello tra fondo e sottotrave sia indicativamente non inferiore a 6÷7 m. Nel caso di corsi di acqua arginati, la quota di sottotrave sarà comunque non inferiore alla quota della sommità arginale per l'intera luce. Per tutti gli attraversamenti è opportuno sia garantito il transito dei mezzi di manutenzione delle sponde e/o delle arginature.*

*Le limitazioni alle modifiche delle pile o delle spalle e relative fondazioni di ponti esistenti previste al punto 5.1.2.3 della Norma, sono da riferirsi agli elementi che interessano l'alveo, come sopra definito, o i corpi arginali. La possibilità di deroga, subordinata all'autorizzazione dell'Autorità competente come previsto allo stesso punto della norma, è relativa alle sole pile.*

*Per i ponti esistenti sono ammessi gli interventi per l'incremento della sicurezza strutturale in analogia a quanto prescritto al § 8.4 della Norma, solo nel caso in cui siano esclusi incrementi, rispetto all'attuale, del livello di traffico di progetto e gli stessi interventi non vadano in alcun modo a peggiorare le condizioni di sicurezza idraulica esistenti. Poiché in questi casi sono possibili fenomeni di instabilità locale, in applicazione del §8.3 della Norma, è opportuno effettuare la verifica delle fondazioni, e quindi la valutazione dello scalzamento di eventuali spalle o pile in alveo. Anche gli interventi necessari per l'incremento della sicurezza strutturale devono essere accompagnati dallo studio di compatibilità idraulica dove sia messa in evidenza la frequenza probabile (1/Tr) degli eventi che garantiscono il franco previsto da Norma.*

*Nelle Relazioni idrologica e idraulica sarà valutato il sistema di smaltimento delle acque meteoriche, tenendo in considerazione anche i seguenti aspetti:*

- analisi degli eventi pluviometrici brevi ed intensi della zona;*

- disposizione delle caditoie in numero e posizioni dipendenti dalle loro dimensioni, dalla geometria plano-altimetrica della sede stradale e dai dati pluviometrici, al fine di evitare ristagni;

- influenza del trasporto solido e dell'eventuale deposito residuo in condotta sul dimensionamento del sistema di tubazioni che colleghino le acque fino al tubo di eduazione;

- posizione e lunghezza dei tubi di eduazione affinché l'acqua di scolo sia portata a distanza tale da evitare la ricaduta sulle strutture anche in presenza di vento.

Fermo restando il rispetto della normativa ambientale vigente, in tutti quei casi in cui le acque di eduazione possono produrre danni e inconvenienti o nel caso di attraversamento di zone urbane, è opportuno considerare la possibilità che esse siano intubate fino a terra ed eventualmente immerse in un sistema fognante.

Nelle strutture a cassone va considerata l'opportunità di praticare, nei punti di possibile accumulo, fori di evacuazione di eventuali acque di infiltrazione. Tubi di evacuazione e gocciolatoi saranno predisposti in modo da evitare scoli di acque sul manufatto.

Restano esclusi dal punto 5.1.2.3 della Norma i tombini, intendendosi per tombino un manufatto totalmente rivestito in sezione, eventualmente suddiviso in più canne, in grado di condurre complessivamente portate fino a 50 m<sup>3</sup>/s. L'evento da assumere a base del progetto di un tombino ha comunque tempo di ritorno uguale a quello da assumere per i ponti. La scelta dei materiali deve garantire la resistenza anche ai fenomeni di abrasione e urto causati dai materiali trasportati dalla corrente.

Oltre a quanto previsto per gli attraversamenti dalla Norma, nella Relazione idraulica è opportuno siano considerati anche i seguenti aspetti:

- è da sconsigliare il frazionamento della portata fra più canne, tranne nei casi in cui questo sia fatto per facilitare le procedure di manutenzione, predisponendo allo scopo luci panconabili all'imbocco e allo sbocco e accessi per i mezzi d'opera;

- sono da evitare andamenti planimetrici non rettilinei e disallineamenti altimetrici del fondo rispetto alla pendenza naturale del corso d'acqua.

- per sezioni di area maggiore a 1,5 m<sup>2</sup> è da garantire la praticabilità del manufatto;

- il tombino può funzionare sia in pressione che a superficie libera, evitando in ogni caso il funzionamento intermittente fra i due regimi: nel caso in una o più sezioni il funzionamento sia in pressione, la massima velocità che si realizza all'interno dello stesso tombino non dovrà superare 1,5 m/s;

- nel caso di funzionamento a superficie libera, il tirante idrico non dovrà superare i 2/3 dell'altezza della sezione, garantendo comunque un franco minimo di 0,50 m;

- il calcolo idraulico è da sviluppare prendendo in considerazione le condizioni che si realizzano nel tratto del corso d'acqua a valle del tombino;

- la tenuta idraulica deve essere garantita per ciascuna sezione dell'intero manufatto per un carico pari al maggiore tra: 0,5 bar rispetto all'estradosso o 1,5 volte la massima pressione d'esercizio;

- il massimo rigurgito previsto a monte del tombino deve garantire il rispetto del franco idraulico nel tratto del corso d'acqua a monte;

- nel caso sia da temersi l'ostruzione anche parziale del manufatto da parte dei detriti galleggianti trasportati dalla corrente, è da disporre immediatamente a monte una varice presidiata da una griglia che consenta il passaggio di elementi caratterizzati da dimensioni non superiori alla metà della larghezza del tombino; in alternativa il tombino è da dimensionare assumendo che la sezione efficace ai fini del deflusso delle acque sia ridotta almeno alla metà di



quella effettiva. È in ogni caso da garantire l'accesso in alveo ai mezzi necessari per le operazioni di manutenzione ordinaria o straordinaria da svolgere dopo gli eventi di piena;

- i tratti del corso d'acqua immediatamente prospicienti l'imbocco e lo sbocco del manufatto devono essere protetti da fenomeni di scalzamento e/o erosione, e opportune soluzioni tecniche sono da adottare per evitare i fenomeni di sifonamento.

Nel caso il tombino sia opera provvisoria, ovvero a servizio di un cantiere, le precedenti disposizioni possono essere assunte come elementi di riferimento, tenendo opportunamente conto del tempo di utilizzo previsto per l'opera provvisoria stessa.

## 2.3 Manuale di progettazione ferroviario

Come previsto dal Manuale di Progettazione RFI 2020 ogni tipo di manufatto idraulico dovrà essere verificato utilizzando i seguenti tempi di ritorno  $Tr$ :

...omississ...

Manufatti di attraversamento (ponti e tombini):

- linea ferroviaria  $Tr = 200$  anni per  $S > 10 \text{ km}^2$
- linea ferroviaria  $Tr = 200$  anni per  $S < 10 \text{ km}^2$
- deviazioni stradali  $Tr = 200$  anni

...omississ...

Per la verifica idraulica delle opere di attraversamento principali il manuale prevede quanto segue:

“Relativamente ai requisiti idraulici nei confronti dei livelli di massima piena si specifica quanto segue:

- Il franco rispetto all'intradosso dell'opera dovrà essere:
  - non inferiore a 1,5 m sopra al livello idrico nella sezione immediatamente a monte dell'attraversamento, per la portata con tempo di ritorno prescritto dalla normativa nazionale o locale vigente;
  - non inferiore a 0,50 m sopra la quota del carico idraulico totale per la portata con tempo di ritorno 200 anni.
- posizionamento delle spalle del viadotto in modo tale da non ridurre significativamente la sezione di deflusso in alveo ed in golena.
- posizionamento e geometria delle pile in alveo ed in golena in modo da non provocare significativi fenomeni di rigurgito ovvero fenomeni di erosione localizzati sulle sponde ed in alveo.
- Il calcolo dello scalzamento localizzato indotto dalle opere di sostegno deve essere valutato considerando le dimensioni delle pile; nel caso in cui il plinto di fondazione venga messo allo scoperto dall'erosione, le dimensioni maggiori e le forme più tozze dello stesso provocano un ulteriore

*scalzamento e pertanto, in tale condizione, il calcolo dell'erosione localizzata va ripetuto portando in conto la diversa geometria.”*

Per la verifica idraulica delle opere di attraversamento secondarie il manuale prevede quanto segue:

*“Le tipologie ammesse sono:*

- *tombini circolari in c.a. con diametro minimo 1.5 m;*
- *tombini scatolari in c.a. con dimensione minima 2 m;*

*Sono ammessi fino a due tombini affiancati.*

*In nessun caso saranno ammessi attraversamenti con opere a sifone.*

*La pendenza longitudinale del fondo dell'opera non dovrà essere inferiore al 2‰ e ciò al fine di impedire la sedimentazione di eventuale materiale solido trasportato.*

*La sezione di deflusso complessiva del tombino dovrà consentire lo smaltimento della portata massima di piena con un grado di riempimento non superiore al 70% della sezione totale.*

*Dovranno essere previsti gli opportuni accorgimenti per evitare, in corrispondenza delle fondazioni del manufatto, fenomeni di scalzamento o erosione.”*

## 2.4 Sintesi delle prescrizioni per la compatibilità degli attraversamenti

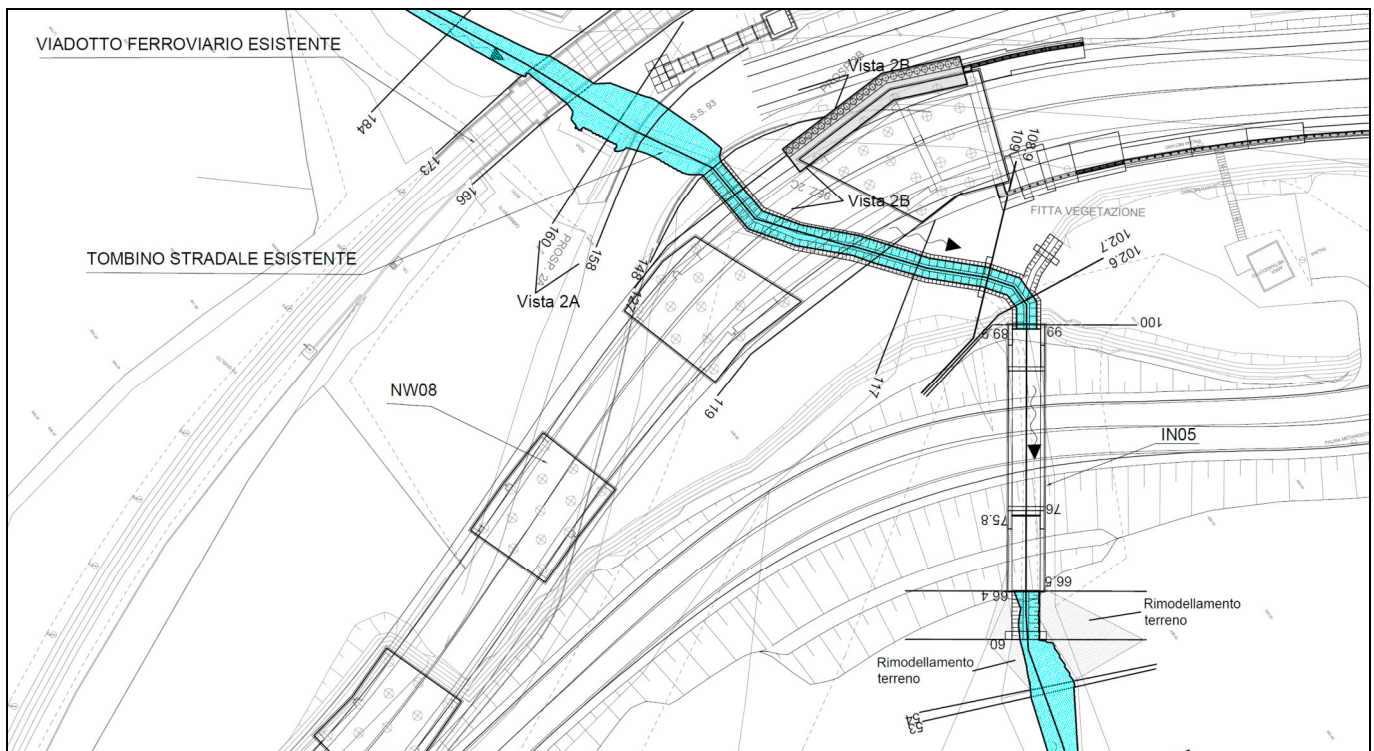
In Tabella 2 è riportata una sintesi della normativa di riferimento e di quanto previsto dal Manuale di progettazione ferroviario per la valutazione della compatibilità idraulica delle opere di attraversamento.

**Tabella 2 – Sintesi normativa di riferimento**

	Manuale di progettazione ferroviaria	NTC 2018 e circolare applicativa NTC2018
<b>Manufatti di attraversamento principali (ponti e viadotti)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• linea ferroviaria <math>Tr= 200</math> anni per <math>S &gt; 10 \text{ km}^2</math></li> <li>• linea ferroviaria <math>Tr= 200</math> anni per <math>S &lt; 10 \text{ km}^2</math></li> <li>• deviazioni stradali <math>Tr=200</math> anni</li> </ul>	$Tr = 200$ anni
<b>Verifica Franco di Progetto ponti.</b>	<i>Franco minimo tra l'intradosso dell'opera e la quota del carico idraulico totale corrispondente al livello idrico di massima piena, pari a 0.50 m e comunque non inferiore ad 1.5 m sul livello idrico.</i>	<i>Il franco idraulico, definito come la distanza fra la quota liquida di progetto immediatamente a monte del ponte e l'intradosso delle strutture, è da assumersi non inferiore a 1,50 m</i>
<b>Dislivello tra fondo e sottotrave</b>	-	<i>Non inferiore a 6÷7 m quando si possa temere il transito d'alberi d'alto fusto</i>
<b>Posizione spalle</b>	<i>Posizionamento delle spalle del viadotto in modo tale da non ridurre significativamente la sezione di deflusso in alveo ed in golena.</i>	<i>Di norma il manufatto non dovrà interessare con spalle, pile e rilevati il corso d'acqua attivo e, se arginato, i corpi arginali.</i>
<b>Manufatti di attraversamento secondari (tombini e scatolari)</b>	<i>Grado di riempimento non superiore al 70% della sezione totale.</i>	<i>Grado di riempimento non superiore ai 2/3 della sezione totale, garantendo comunque un franco minimo di 0.5m</i>

### 3 DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI

Il Vallone Catavatto è un corso d'acqua naturale rappresentato come tale sulla cartografia IGM 1:25.000 ed è attraversato dall'Asse 4 - SS93 Lato Barile con un viadotto (NW08) e dall'Asse 8 – Via delle More con un tombino scatolare in c.a. di dimensioni 3.50 m x 3.57 m (IN05).



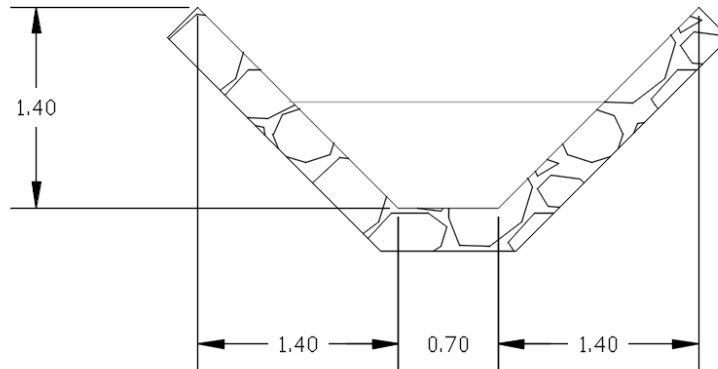
**Figura 3 – Intervento di progetto sull'“Asse Barile”.**

La campata di attraversamento del viadotto ha una luce di 20 m. In considerazione dell'inclinazione dell'asse della corrente rispetto all'asse del viadotto, la luce netta risulta inferiore, ma il posizionamento delle pile è stato effettuato in modo che il manufatto non interferisca con l'alveo attivo e senza comportare alcuna riduzione della sezione di deflusso in alveo.



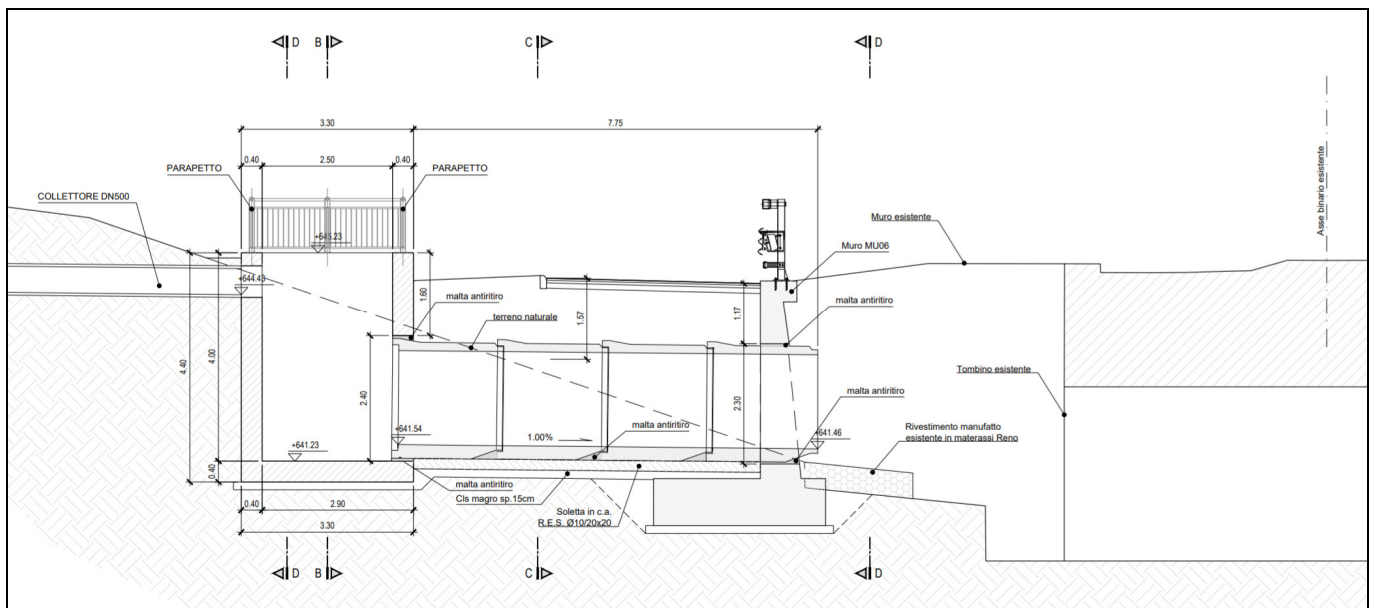






**Figura 7 – Sezione trasversale sistemazione in massi cementati.**

Per quanto riguarda l'attraversamento dell'“Asse casello”, verrà realizzato un tombino DN1800 (IN06) sotto la viabilità di nuova realizzazione Asse 6 – Rampa Casello FS immediatamente a monte del tombino ferroviario esistente. A valle del manufatto in progetto e a protezione del fondo esistente si realizza un piccolo salto di fondo di circa 30 cm protetto con materassi tipo reno per una lunghezza di circa 2.0 m. Il tombino IN06 servirà a scaricare le acque drenate dalla piattaforma all'interno del tombino ferroviario esistente.



**Figura 8 – “Asse Casello” - Tombino IN06 - Sezione longitudinale**

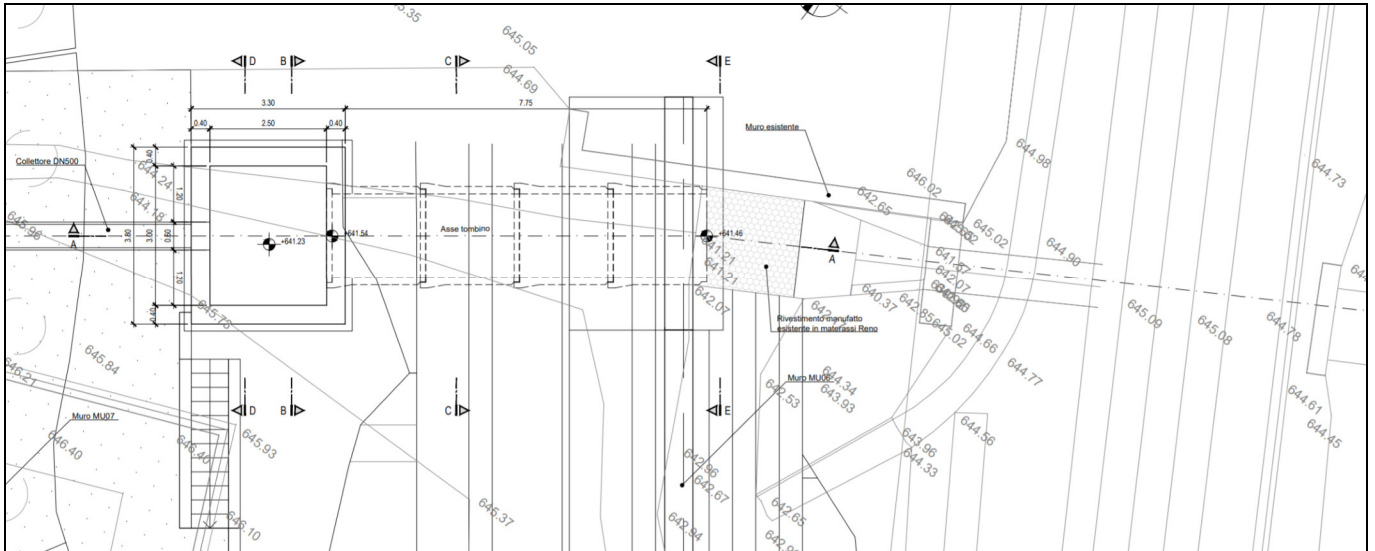


Figura 9 – “Asse Casello” - Tombino IN06 - pianta.



## 4 MODELLAZIONE IDRAULICA

Lo studio idraulico delle due interferenze idrauliche, nello stato di fatto e nello stato di progetto, è stato effettuato mediante l'implementazione e l'applicazione di un modello idraulico (HEC-RAS) monodimensionale a moto permanente.

Tale modello permette di indagare le altezze d'acqua, il carico idraulico totale e le velocità con riferimento alla piena di progetto nelle diverse sezioni in cui viene discretizzato il corso d'acqua, tenendo conto anche degli effetti localizzati delle opere idrauliche presenti.

Il modello idraulico HEC-RAS prodotto dall'Hydrologic Engineering Center dell'US Army Corps of Engineers è un modello utilizzato diffusamente nelle applicazioni idrauliche di vario genere data la sua versatilità e la relativa facilità di gestione e organizzazione delle informazioni oltre che per la sua affidabilità. Una descrizione del modello è riportata in Appendice 1.

Le portate utilizzate per il calcolo sono state determinate nello studio idrologico descritto nell'elaborato IA4K42E78RIID0001001A.

### 4.1 Asse Barile

Il modello idraulico ante e post operam è composto da una serie di sezioni trasversali che si estendono a monte e a valle delle opere in progetto. Le sezioni trasversali sono state ricavate dal modello digitale del terreno ottenuto dal rilievo celerimetrico eseguito per il presente progetto. Nel post operam le sezioni sono state aggiornate con l'inserimento della geometria della sistemazione finale e le opere in progetto.

Da un confronto con dati di letteratura e dallo studio dello stato dei luoghi attraverso materiale fotografico, si è deciso di adottare un coefficiente di scabrezza pari a  $0.035 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  per l'alveo attuale e  $0.04 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  per le zone golenali. Mentre nel caso di sistemazione in massi cementati è stato adottato un coefficiente di scabrezza pari a  $0.03 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ .

Le condizioni al contorno di monte e di valle sono poste pari all'altezza critica.

Nelle tabelle seguenti si riportano i risultati ottenuti tramite la simulazione idraulica del profilo idrico con il programma Hec-Ras in condizione di moto permanente allo stato attuale in presenza delle opere esistenti - viadotto ferroviario e tombino stradale SS93 (ante operam) - e nello stato di progetto con l'inserimento del Viadotto NW08 e del tombino IN05 in progetto (post operam).

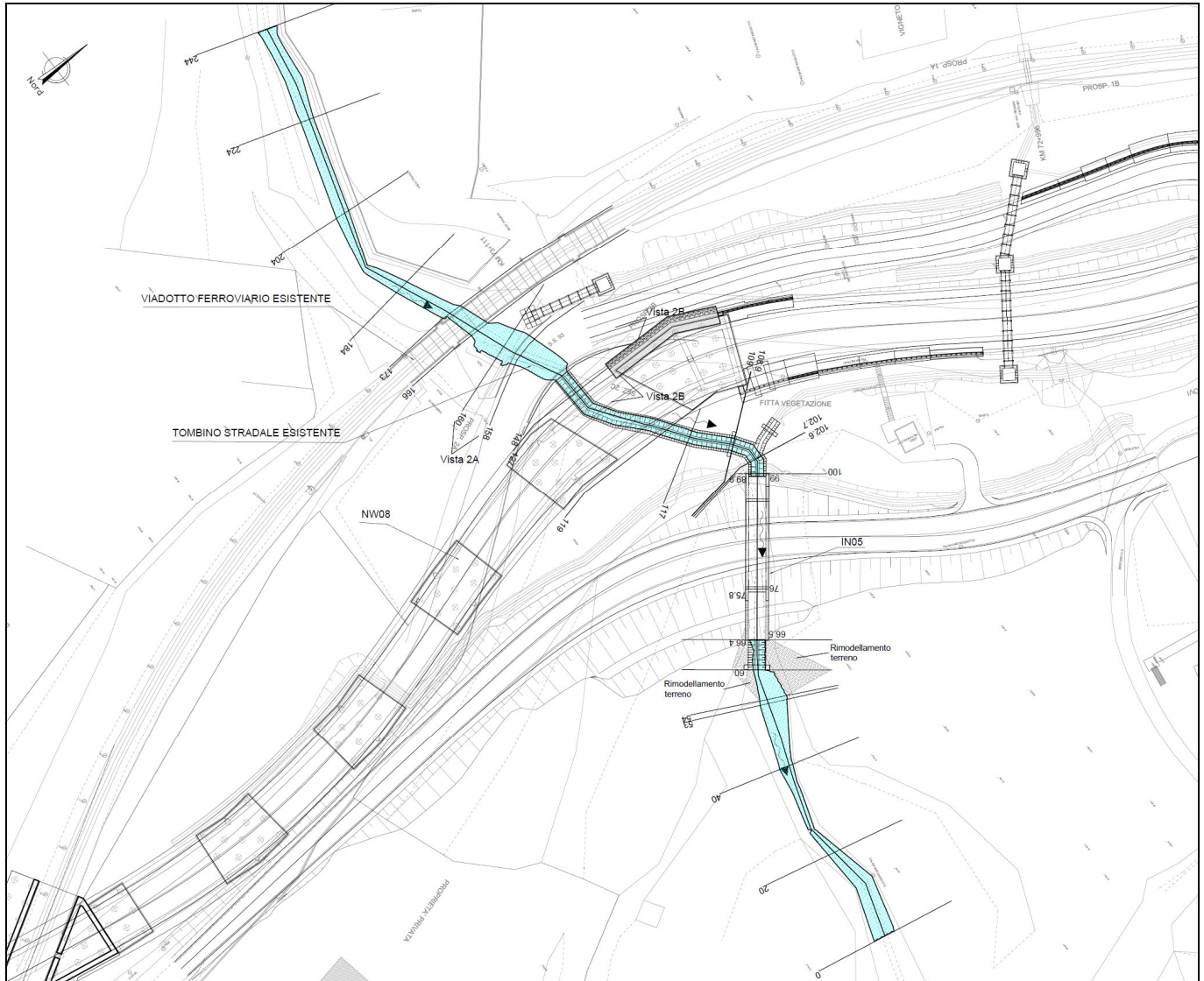
In particolare, l'elaborazione del profilo idrico ante e post operam, per la portata di progetto con tempo di ritorno duecentennale non produce esondazione nel piano campagna circostante. I livelli idrici sono interamente contenuti nelle sezioni esistenti del corso d'acqua.

Nelle seguenti figure si mostrano le sezioni utilizzate per discretizzare il corso d'acqua nella configurazione ante-

operam e nella configurazione post-operam.



**Figura 10 – Asse Barile - Planimetria con sezioni di studio ante operam**



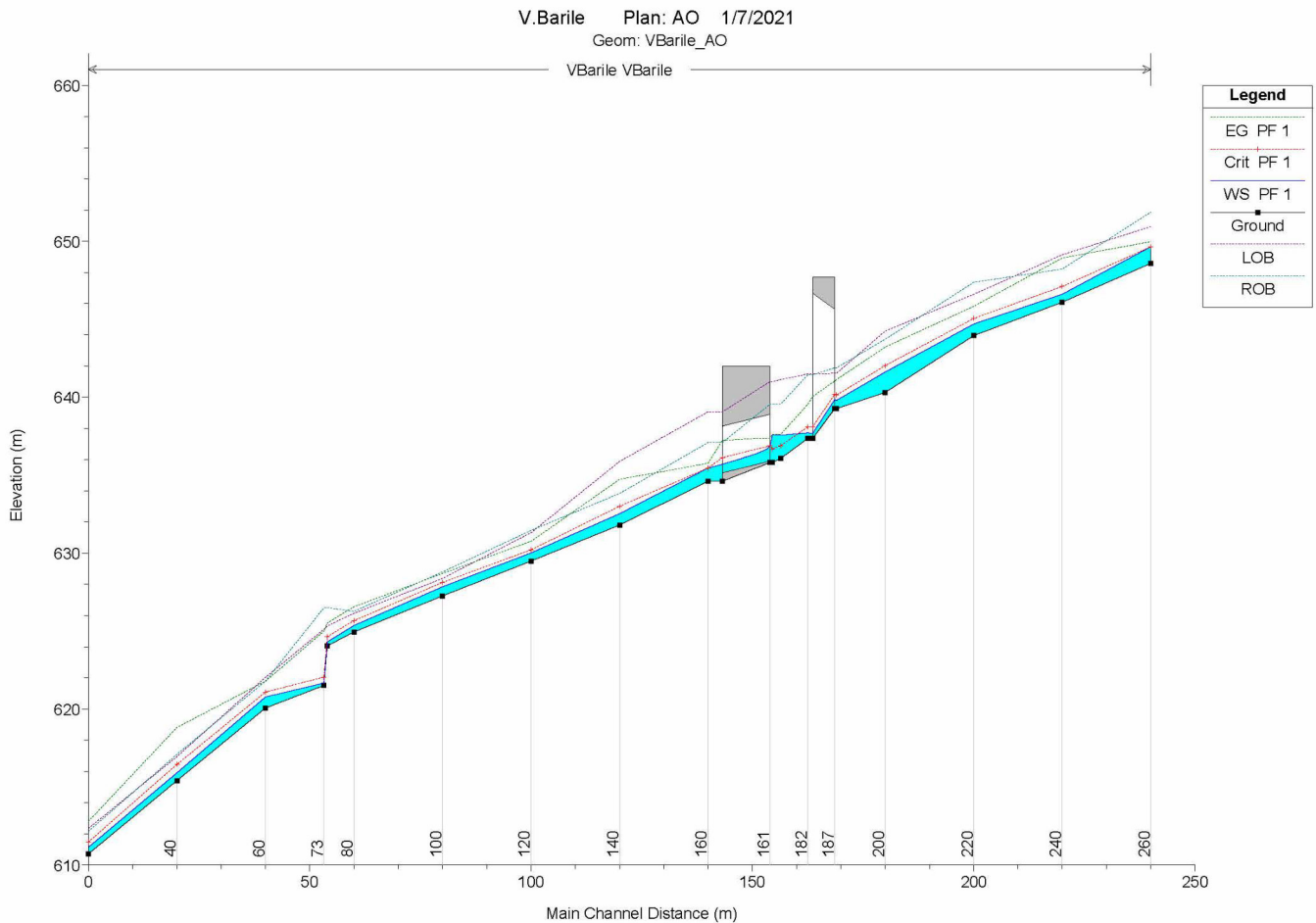
**Figura 11 – Asse Barile - Planimetria con sezioni di studio post operam**

Le seguenti figure mostrano il profilo idrico ante e post operam e le aree allagate sulla planimetria DEM.

HEC-RAS Plan: AO River: VBarile Reach: VBarile Profile: PF 1

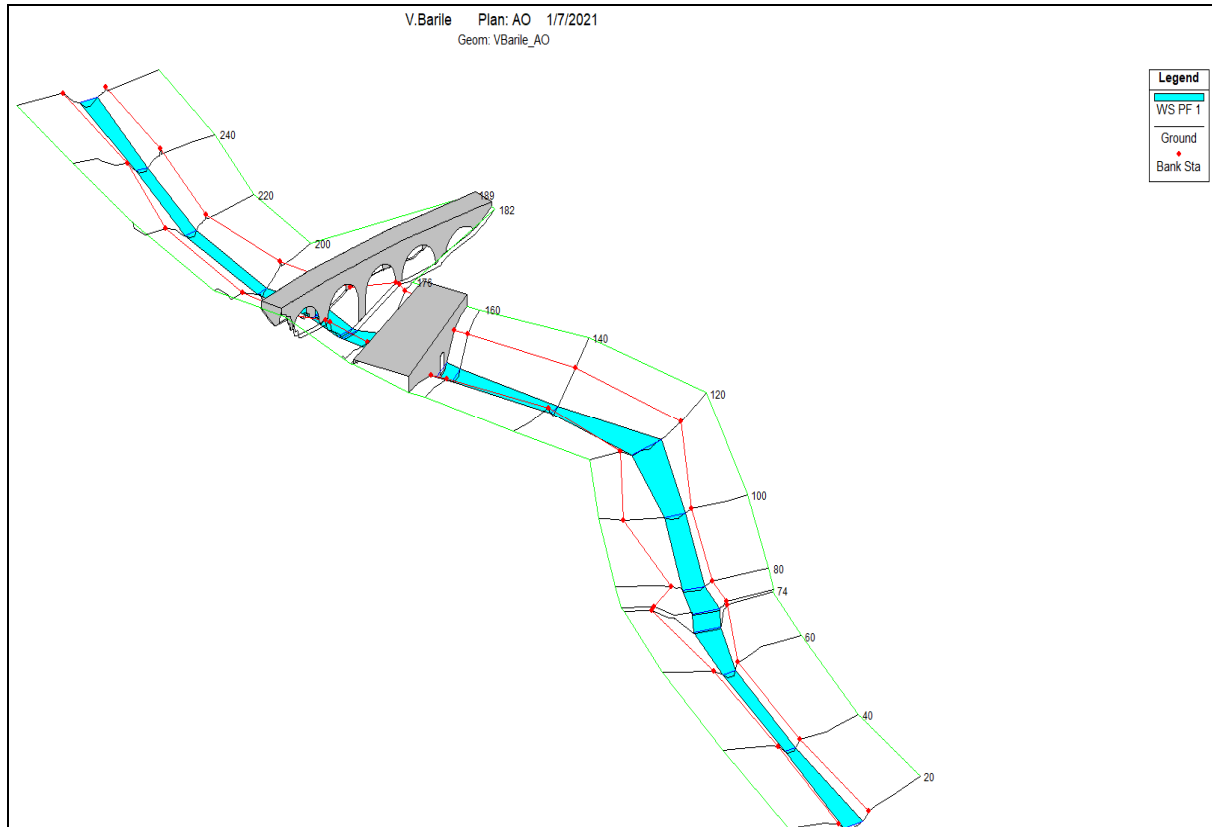
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
VBarile	260	PF 1	6.73	648.58	649.66	649.66	650.00	0.017435	2.59	2.60	3.84	1.01
VBarile	240	PF 1	6.73	646.09	646.61	647.12	648.94	0.236519	6.76	1.00	2.52	3.43
VBarile	220	PF 1	6.73	643.95	644.71	645.07	645.87	0.088459	4.76	1.41	2.78	2.13
VBarile	200	PF 1	6.73	640.31	641.63	642.04	643.25	0.204228	5.63	1.20	2.87	2.78
VBarile	189	PF 1	6.73	639.27	639.81	640.14	641.17	0.162572	5.18	1.30	4.05	2.92
VBarile	187		Bridge									
VBarile	182	PF 1	6.73	637.35	637.73	638.11	639.57	0.254983	6.01	1.12	3.99	3.62
VBarile	176	PF 1	6.73	636.08	637.61	636.92	637.67	0.001950	1.07	6.27	6.56	0.35
VBarile	174	PF 1	6.73	635.81	637.62	636.69	637.66	0.001275	0.92	7.33	6.98	0.29
VBarile	161		Culvert									
VBarile	160	PF 1	6.73	634.61	635.48	635.48	635.78	0.016704	2.42	2.78	4.70	1.01
VBarile	140	PF 1	6.73	631.81	632.54	633.02	634.75	0.236210	6.58	1.02	2.68	3.40
VBarile	120	PF 1	6.73	629.49	630.02	630.23	630.78	0.137372	3.87	1.74	7.74	2.60
VBarile	100	PF 1	6.73	627.26	627.85	628.13	628.72	0.079251	4.13	1.63	4.19	2.12
VBarile	80	PF 1	6.73	624.95	625.37	625.68	626.59	0.145786	4.89	1.37	4.33	2.77
VBarile	74	PF 1	6.73	624.05	624.31	624.66	625.55	0.208350	4.92	1.37	5.50	3.15
VBarile	73	PF 1	6.73	621.51	621.67	622.05	625.02	1.020974	8.10	0.83	5.42	6.61
VBarile	60	PF 1	6.73	620.07	620.79	621.11	621.83	0.076963	4.52	1.49	2.74	1.95
VBarile	40	PF 1	6.73	615.42	615.93	616.47	618.85	0.325536	7.57	0.89	2.44	4.01
VBarile	20	PF 1	6.73	610.71	611.14	611.49	612.85	0.246711	5.79	1.16	4.34	3.58

**Tabella 3: Asse Barile – Risultati modellazione ante operam**

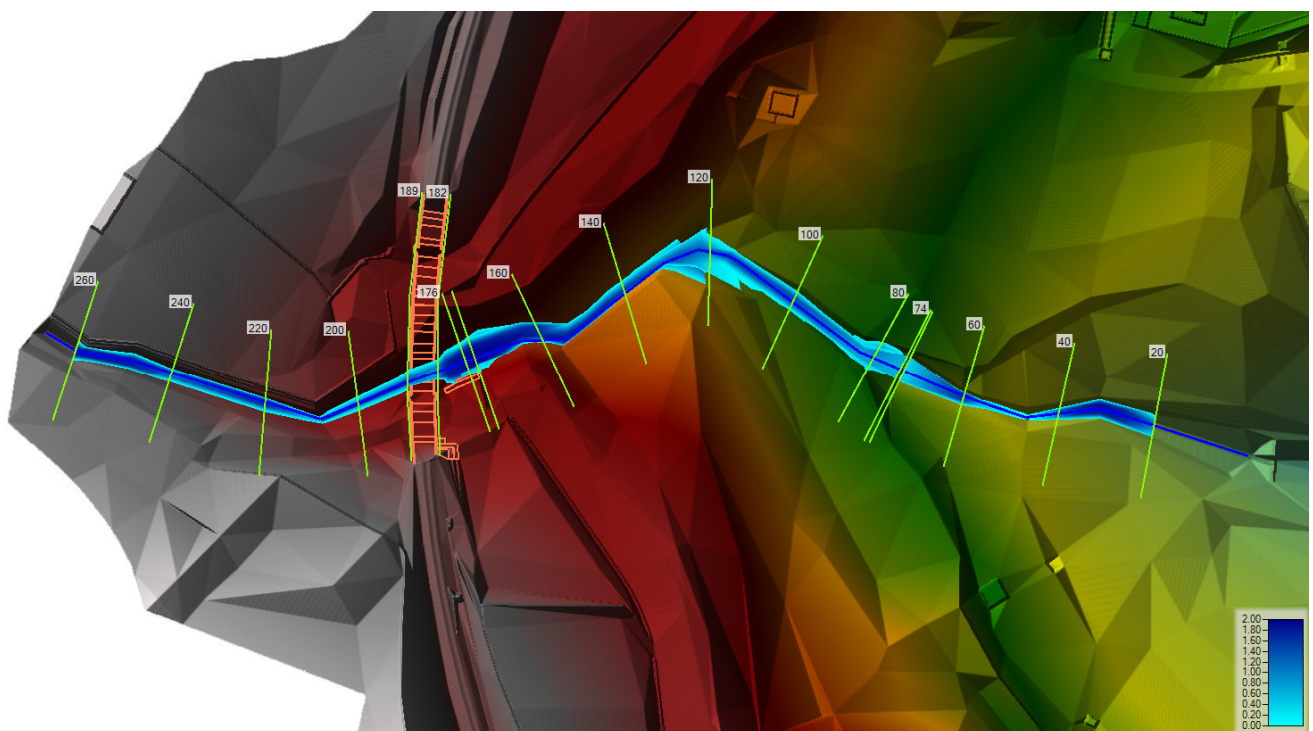


**Figura 12 – Asse Barile AO - Profilo idraulico**





**Figura 13 – Asse Barile AO - Vista prospettica**

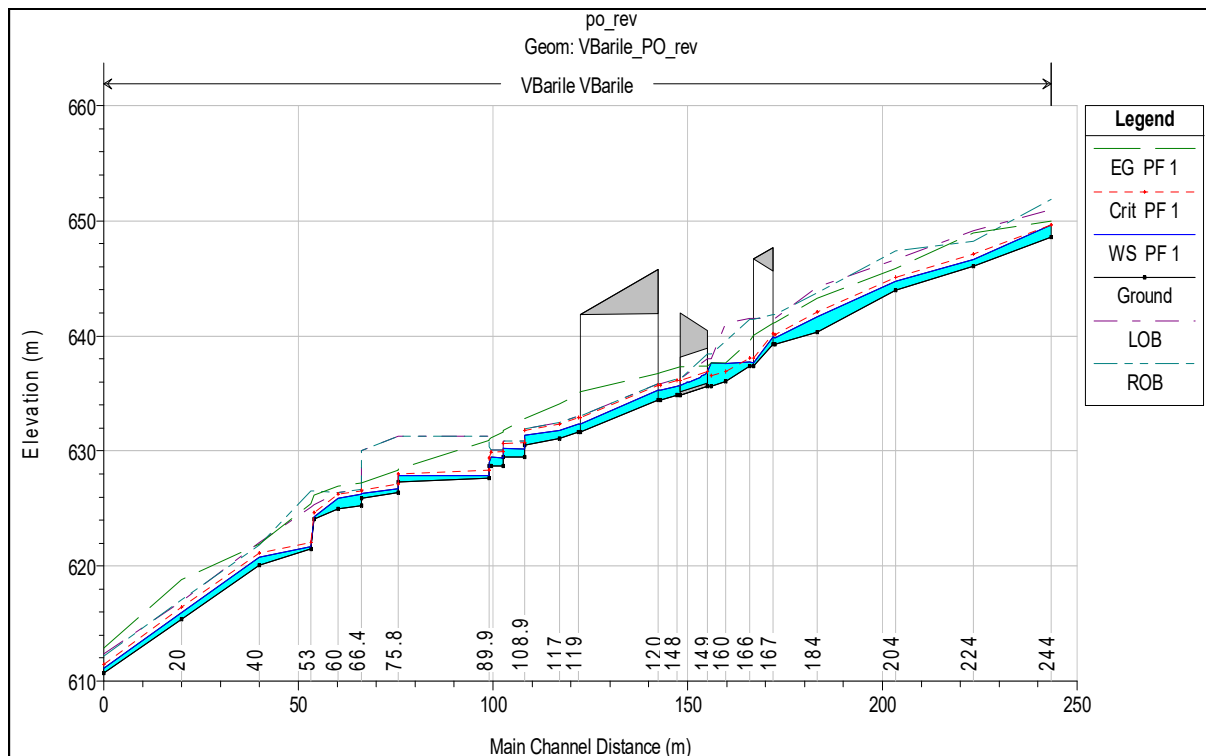


**Figura 14 – Asse Barile AO - Planimetria aree allagate su DEM**

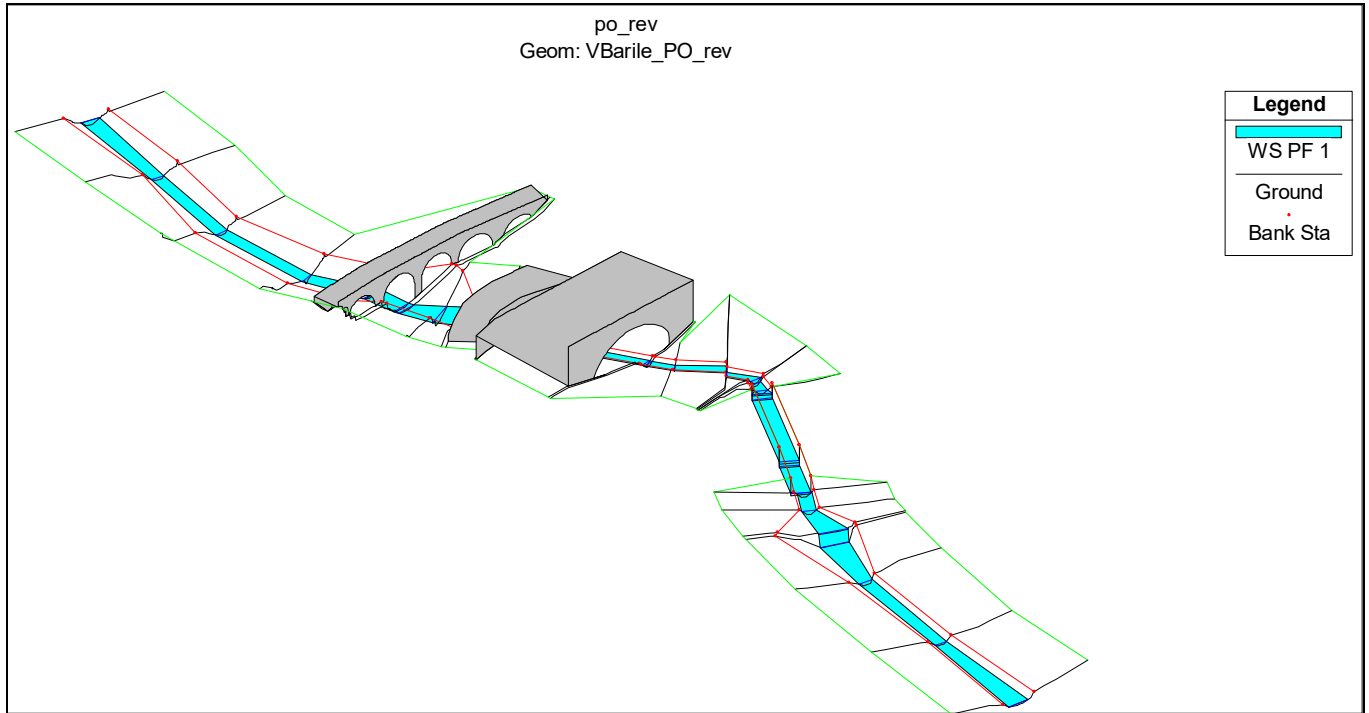
HEC-RAS Plan: po\_rev River: VBarile Reach: VBarile Profile: PF 1

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
VBarile	244	PF 1	6.73	648.58	649.66	649.66	650.00	0.017435	2.59	2.60	3.84	1.01
VBarile	224	PF 1	6.73	646.09	646.61	647.12	648.94	0.236519	6.76	1.00	2.52	3.43
VBarile	204	PF 1	6.73	643.95	644.71	645.07	645.87	0.088459	4.76	1.41	2.78	2.13
VBarile	184	PF 1	6.73	640.31	641.63	642.04	643.25	0.204228	5.63	1.20	2.87	2.78
VBarile	173	PF 1	6.73	639.27	639.81	640.14	641.17	0.162572	5.18	1.30	4.05	2.92
VBarile	167											
VBarile	166	PF 1	6.73	637.35	637.73	638.11	639.57	0.254983	6.01	1.12	3.99	3.62
VBarile	160	PF 1	6.73	636.08	637.61	636.92	637.67	0.001916	1.07	6.31	6.58	0.35
VBarile	158	PF 1	6.73	635.66	637.63	636.53	637.66	0.000780	0.78	8.67	7.38	0.23
VBarile	149											
VBarile	148	PF 1	6.73	634.84	635.63	636.09	637.27	0.097175	5.67	1.19	2.29	2.51
VBarile	127	PF 1	6.73	634.46	635.26	635.71	636.84	0.092477	5.56	1.21	2.31	2.45
VBarile	120											
VBarile	119	PF 1	6.73	631.66	632.34	632.91	634.96	0.181827	7.16	0.94	2.06	3.39
VBarile	117	PF 1	6.73	631.09	631.80	632.34	634.06	0.149433	6.66	1.01	2.13	3.09
VBarile	109	PF 1	6.73	630.54	631.36	631.79	632.85	0.085553	5.40	1.25	2.34	2.37
VBarile	108.9	PF 1	6.73	629.49	630.18	630.74	632.74	0.176934	7.09	0.95	2.07	3.35
VBarile	102.7	PF 1	6.73	629.44	630.26	630.69	631.75	0.085713	5.41	1.24	2.34	2.37
VBarile	102.6	PF 1	6.73	628.70	629.41	629.95	631.67	0.149098	6.65	1.01	2.13	3.08
VBarile	100	PF 1	6.73	628.67	629.46	629.92	631.13	0.100131	5.73	1.17	2.28	2.55
VBarile	99	PF 1	6.73	628.67	628.97	629.39	631.02	0.219770	6.34	1.06	3.50	3.68
VBarile	89.9	PF 1	6.73	627.62	627.87	628.34	630.92	0.411175	7.74	0.87	3.50	4.95
VBarile	76	PF 1	6.73	627.27	627.85	627.99	628.41	0.030610	3.34	2.01	3.50	1.40
VBarile	75.8	PF 1	6.73	626.41	626.76	627.13	628.32	0.142938	5.53	1.22	3.50	2.99
VBarile	66.5	PF 1	6.73	625.87	626.32	626.59	627.25	0.064706	4.28	1.57	3.50	2.03
VBarile	66.4	PF 1	6.73	625.30	626.23	626.55	627.24	0.051297	4.46	1.51	2.55	1.85
VBarile	60	PF 1	6.73	625.00	625.93	626.25	626.93	0.050548	4.44	1.52	2.56	1.84
VBarile	54	PF 1	6.73	624.05	624.27	624.66	626.16	0.414479	6.09	1.11	5.47	4.33
VBarile	53	PF 1	6.73	621.51	621.66	622.05	625.44	1.239928	8.60	0.78	5.41	7.23
VBarile	40	PF 1	6.73	620.07	620.77	621.11	621.87	0.082937	4.64	1.45	2.70	2.03
VBarile	20	PF 1	6.73	615.42	615.93	616.47	618.79	0.316008	7.49	0.90	2.45	3.95
VBarile	0	PF 1	6.73	610.71	611.14	611.49	612.86	0.249253	5.81	1.16	4.34	3.59

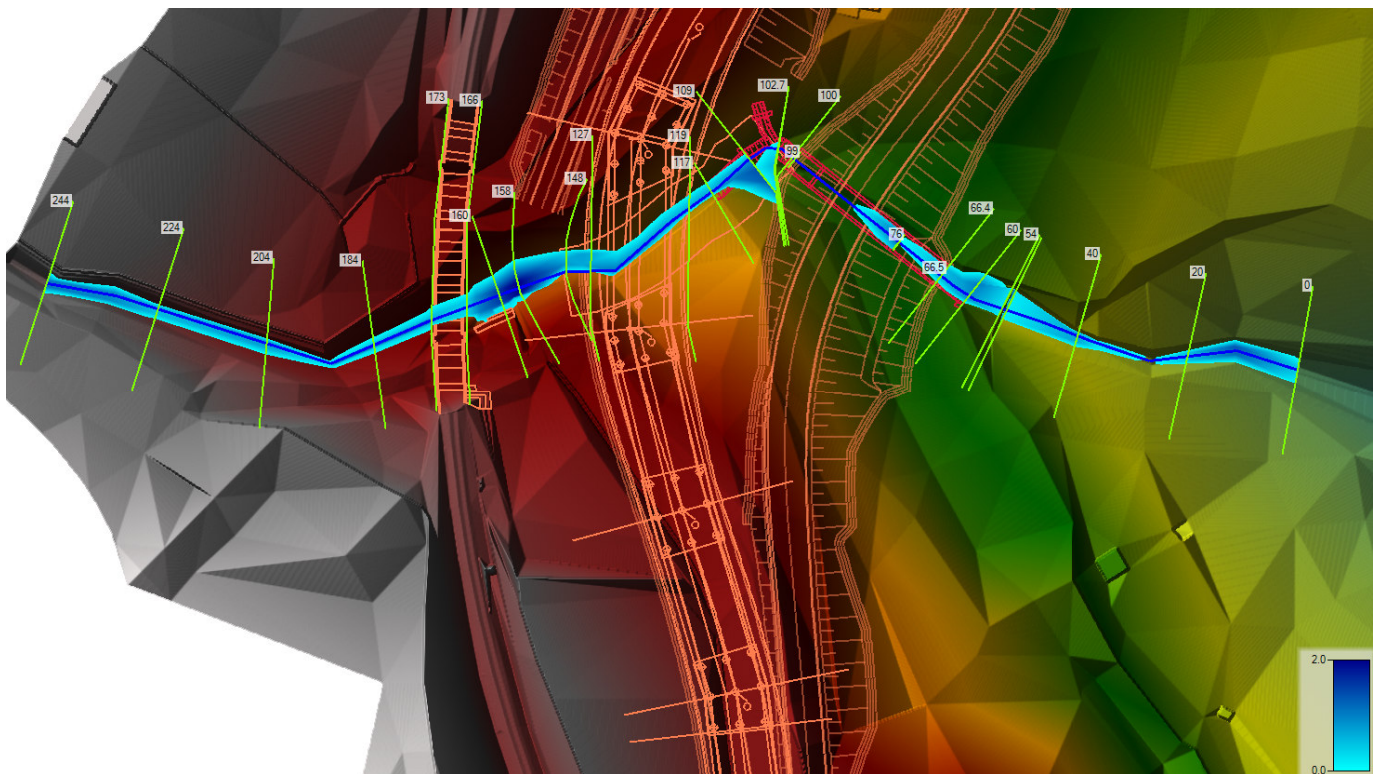
**Tabella 4: Asse Barile – Risultati modellazione post operam**



**Figura 15 – Asse Barile PO - Profilo idraulico**



**Figura 16 – Asse Barile PO - Vista Prospettica**



**Figura 17 – Asse Barile PO - Planimetria aree allagate**

## 4.2 Asse Casello

Il modello idraulico ante e post operam è composto da una serie di sezioni trasversali che si estendono a monte e a valle dell'opera in progetto. Le sezioni trasversali sono state ricavate dal modello digitale del terreno ottenuto dal rilievo celerimetrico eseguito per il presente progetto. Nel post operam le sezioni sono state aggiornate con l'inserimento della geometria dell'opera in progetto.

Da un confronto con dati di letteratura e dallo studio dello stato dei luoghi attraverso materiale fotografico si è deciso di adottare un coefficiente di scabrezza pari a  $0.035 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  per l'alveo attuale e  $0.04 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  per le zone golenali e  $0.015 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  per le parti in cls dei manufatti.

Le condizioni al contorno di monte e di valle sono poste pari all'altezza critica.

Nelle seguenti figure si mostrano le sezioni utilizzate per discretizzare l'incisione nella configurazione ante-operam e nella configurazione post-operam.

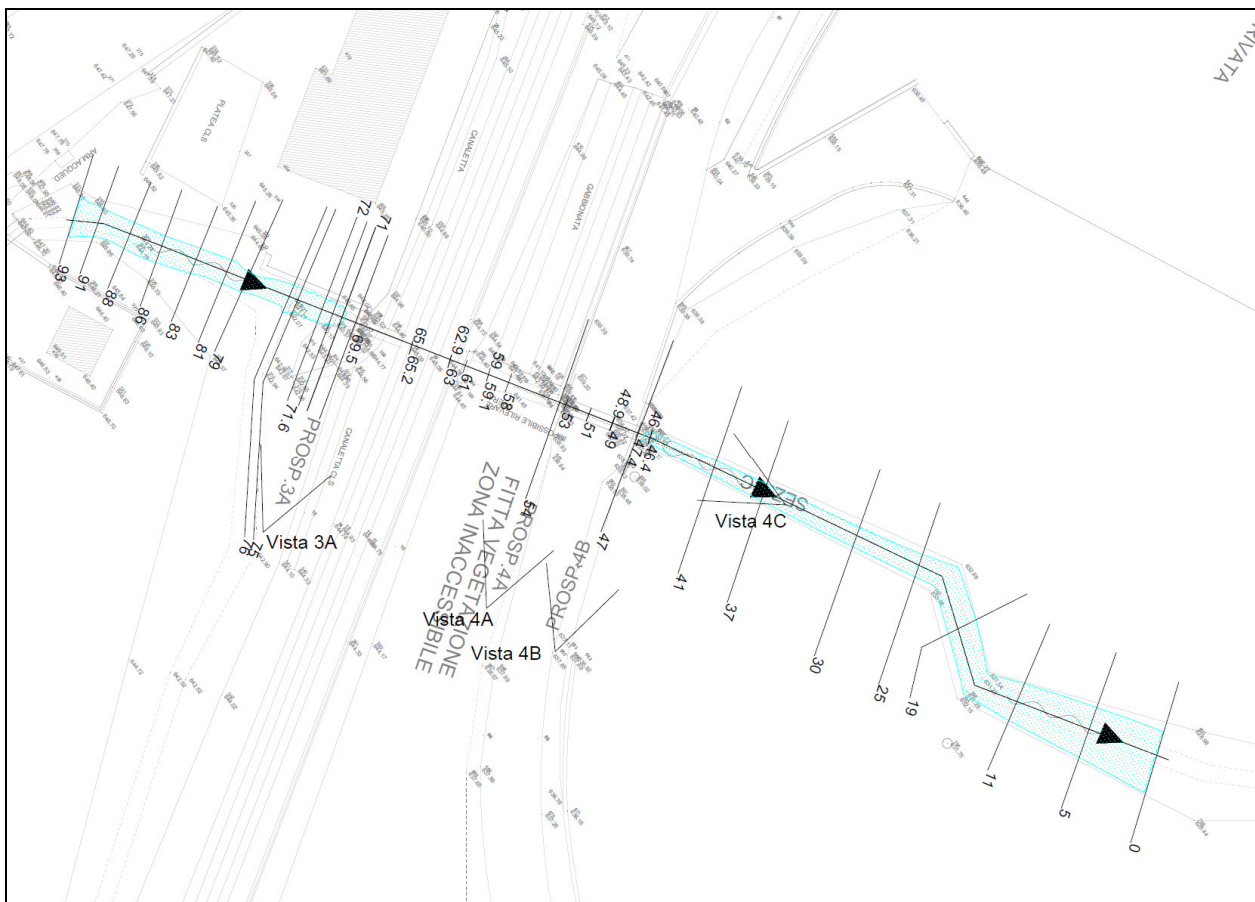
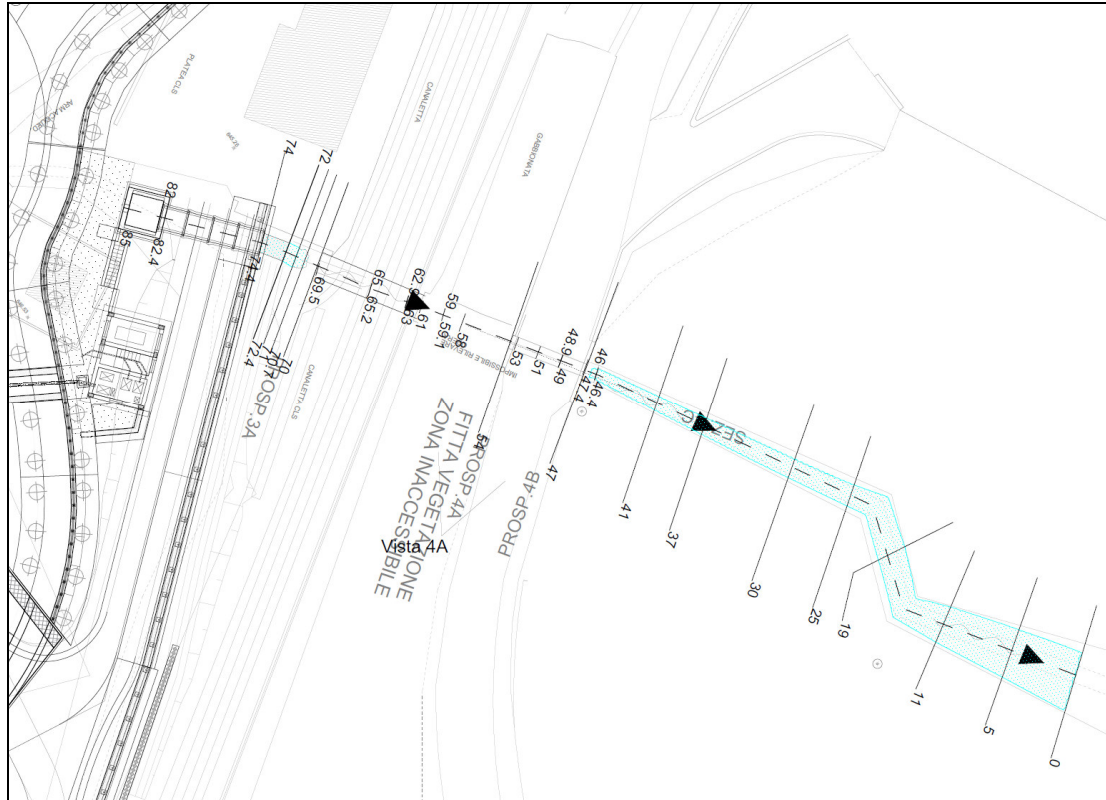


Figura 18 – Asse Casello - Planimetria con sezioni di studio ante operam





**Figura 19 – Asse Casello - Planimetria con sezioni di studio post operam**

Nelle tabelle seguenti si riportano i risultati ottenuti tramite la simulazione idraulica del profilo idrico con il programma Hec-Ras in condizione di moto permanente allo stato attuale in presenza delle opere esistenti (ante operam) e del tombino in progetto (post operam).

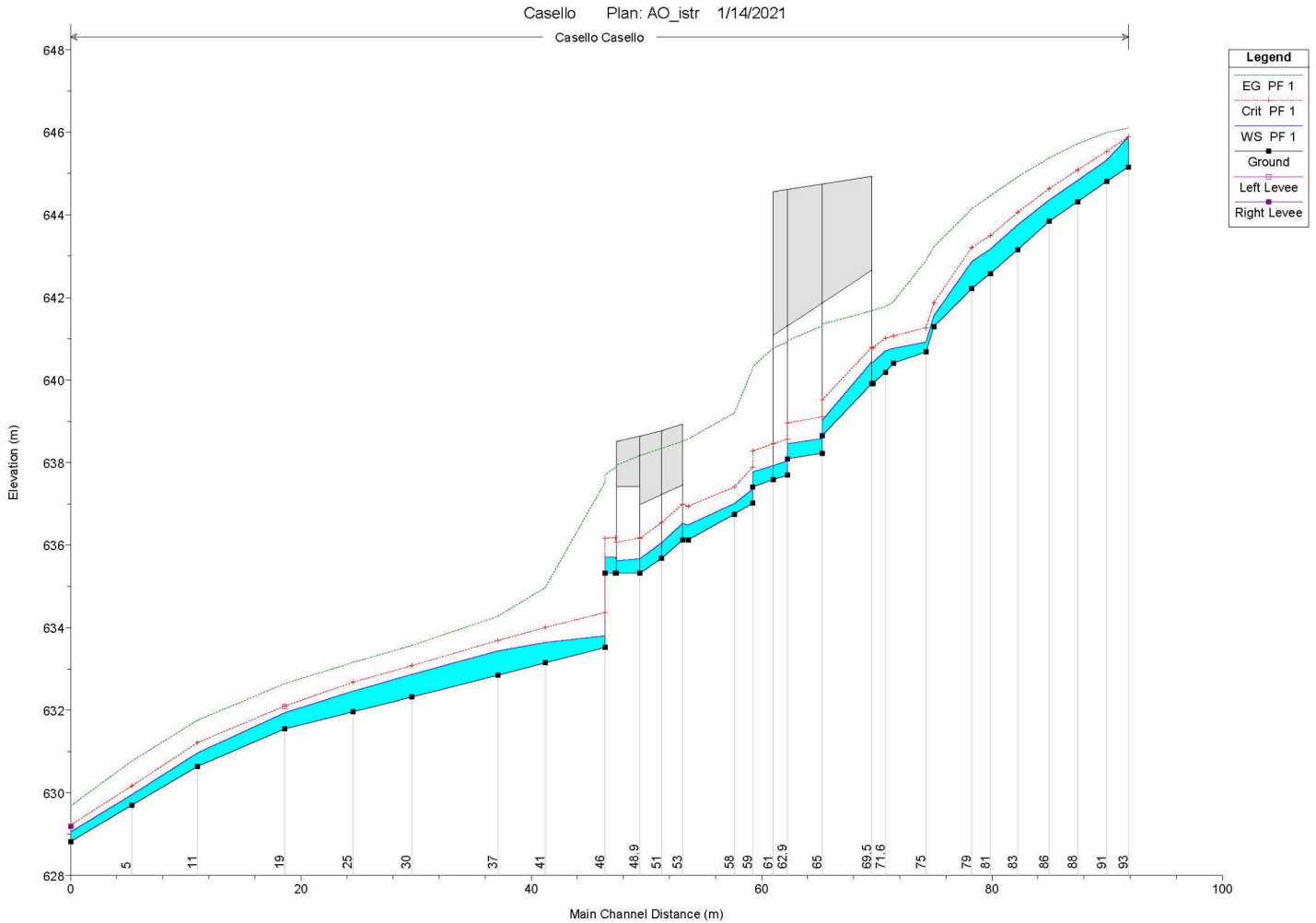
In particolare, l'elaborazione del profilo idrico ante e post operam, per la portata di progetto con tempo di ritorno duecentennale non produce esondazione nel piano campagna circostante. I livelli idrici sono interamente contenuti nelle sezioni esistenti dell'incisione.

Le figure mostrano il profilo idrico ante e post operam e le aree allagate sulla planimetria DEM.

HEC-RAS Plan: AO\_istr River: Casello Reach: Casello Profile: PF 1

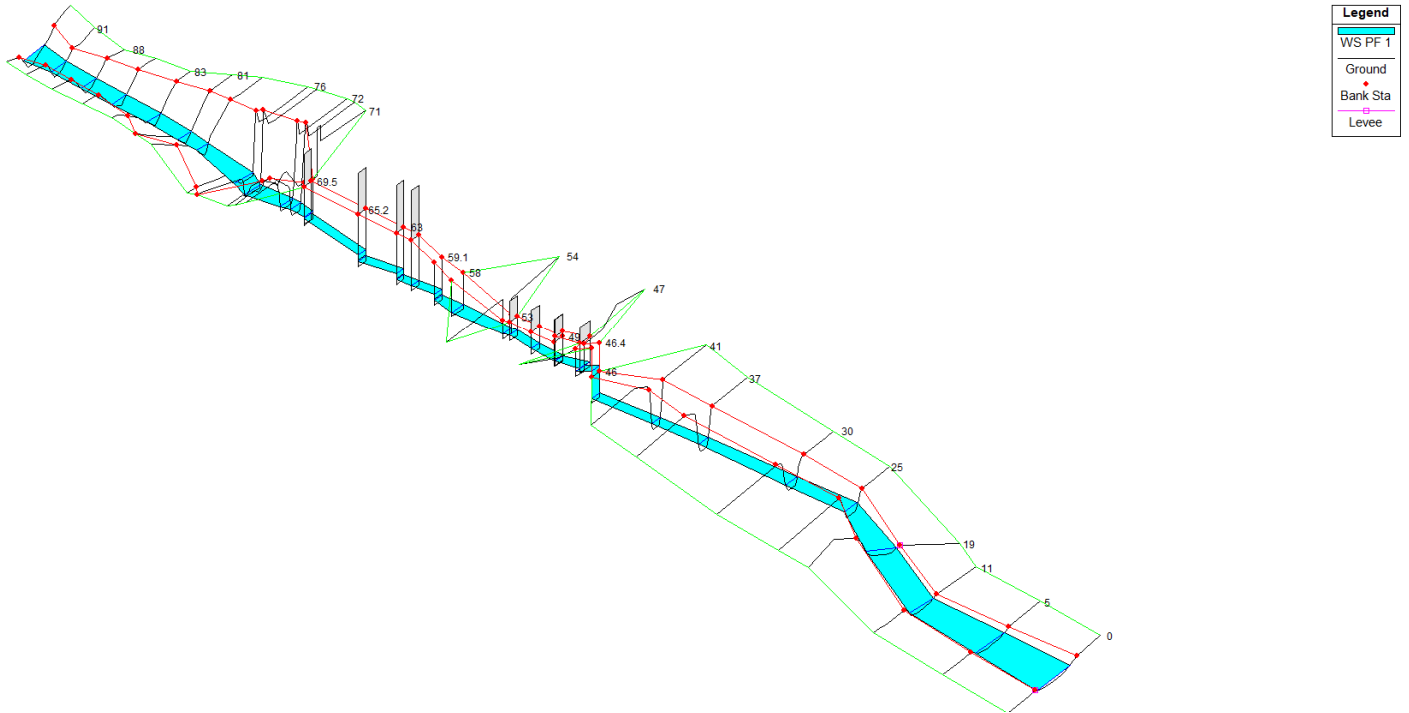
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Casello	93	PF 1	2.46	645.16	645.89	645.89	646.11	0.019925	2.07	1.19	2.79	1.01
Casello	91	PF 1	2.46	644.81	645.33	645.54	645.99	0.081469	3.62	0.68	1.89	1.93
Casello	88	PF 1	2.46	644.32	644.83	645.10	645.73	0.118639	4.18	0.59	1.77	2.31
Casello	86	PF 1	2.46	643.84	644.36	644.63	645.38	0.152962	4.48	0.55	1.83	2.61
Casello	83	PF 1	2.46	643.16	643.76	644.06	644.92	0.174077	4.77	0.52	1.63	2.70
Casello	81	PF 1	2.46	642.58	643.17	643.50	644.46	0.199418	5.03	0.49	1.56	2.87
Casello	79	PF 1	2.46	642.22	642.87	643.21	644.15	0.190497	5.01	0.49	1.35	2.65
Casello	76	PF 1	2.46	641.29	641.56	641.87	643.22	0.406181	5.71	0.43	2.14	4.07
Casello	75	PF 1	2.46	640.68	640.92	641.27	642.89	0.453178	6.23	0.40	1.83	4.28
Casello	72	PF 1	2.46	640.41	640.77	641.07	641.90	0.172502	4.72	0.52	1.54	2.59
Casello	71.6	PF 1	2.46	640.19	640.70	641.01	641.77	0.145859	4.58	0.54	1.27	2.25
Casello	71	PF 1	2.46	639.92	640.43	640.79	641.69	0.035322	4.96	0.50	0.97	2.22
Casello	69.5	PF 1	2.46	639.91	640.44	640.79	641.68	0.034820	4.93	0.50	0.97	2.20
Casello	65.2	PF 1	2.46	638.65	639.02	639.52	641.35	0.081392	6.75	0.36	0.97	3.52
Casello	65	PF 1	2.46	638.23	638.58	639.11	641.31	0.101427	7.31	0.34	0.97	3.97
Casello	63	PF 1	2.46	638.09	638.45	638.96	640.95	0.089986	7.00	0.35	0.97	3.72
Casello	62.9	PF 1	2.46	637.69	638.04	638.57	640.92	0.109224	7.51	0.33	0.97	4.13
Casello	61	PF 1	2.46	637.59	637.93	638.46	640.78	0.107748	7.47	0.33	0.97	4.10
Casello	59.1	PF 1	2.46	637.41	637.78	638.28	640.32	0.502142	7.07	0.35	0.97	3.77
Casello	59	PF 1	2.46	637.02	637.36	637.89	640.28	0.608057	7.57	0.32	0.97	4.18
Casello	58	PF 1	2.46	636.75	637.01	637.41	639.20	0.480748	6.56	0.37	1.45	4.12
Casello	54	PF 1	2.46	636.13	636.49	636.94	638.57	0.071383	6.39	0.38	1.07	3.40
Casello	53	PF 1	2.46	636.12	636.53	636.99	638.51	0.065525	6.24	0.39	0.97	3.12
Casello	51	PF 1	2.46	635.68	636.06	636.55	638.35	0.079639	6.70	0.37	0.97	3.47
Casello	49	PF 1	2.46	635.32	635.67	636.17	638.17	0.090314	7.00	0.35	1.00	3.77
Casello	48.9	PF 1	2.46	635.32	635.67	636.17	638.17	0.090314	7.00	0.35	1.00	3.77
Casello	47.4	PF 1	2.46	635.32	635.61	636.06	637.94	0.087876	6.75	0.36	1.24	3.97
Casello	47	PF 1	2.46	635.32	635.70	636.18	637.89	0.074792	6.55	0.38	0.98	3.39
Casello	46.4	PF 1	2.46	635.32	635.71	636.17	637.70	0.359062	6.25	0.39	1.00	3.18
Casello	46	PF 1	2.46	633.52	633.81	634.37	637.52	0.860011	8.54	0.29	1.00	5.08
Casello	41	PF 1	2.46	633.15	633.64	634.01	634.97	0.190846	5.11	0.48	1.10	2.47
Casello	37	PF 1	2.46	632.85	633.44	633.69	634.28	0.099843	4.06	0.61	1.24	1.85
Casello	30	PF 1	2.46	632.32	632.87	633.08	633.57	0.079089	3.70	0.66	1.48	1.77
Casello	25	PF 1	2.46	631.96	632.46	632.68	633.16	0.080676	3.70	0.67	1.62	1.84
Casello	19	PF 1	2.46	631.55	631.94	632.10	632.65	0.093836	3.72	0.66	2.08	2.10
Casello	11	PF 1	2.46	630.64	630.97	631.22	631.76	0.145540	3.95	0.62	2.70	2.62
Casello	5	PF 1	2.46	629.70	629.95	630.16	630.77	0.210309	4.00	0.62	3.59	3.08
Casello	0	PF 1	2.46	628.82	629.05	629.22	629.68	0.179683	3.52	0.70	4.43	2.83

Tabella 5: Asse Casello – Risultati modellazione ante operam

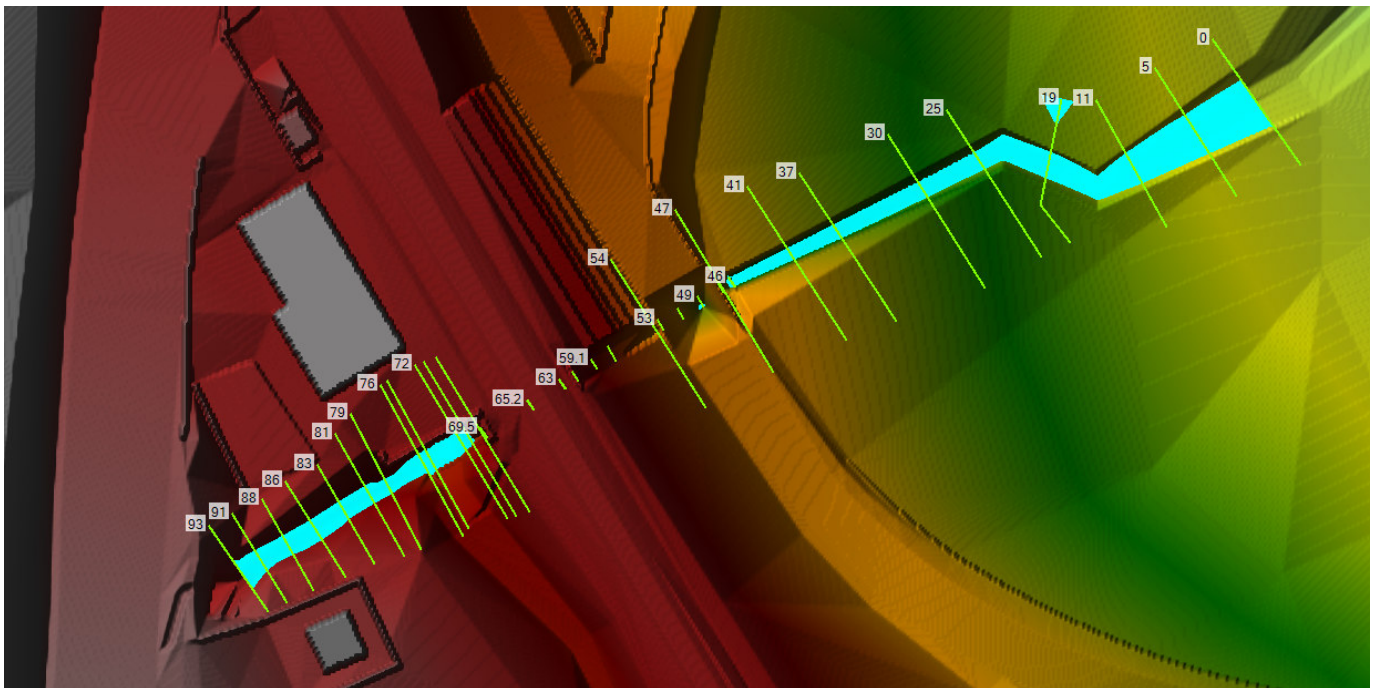


**Figura 20 – Asse Casello - Profilo idraulico Ante operam**

Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_AO\_istr



**Figura 21 – Asse Casello - Vista prospettica Ante operam**

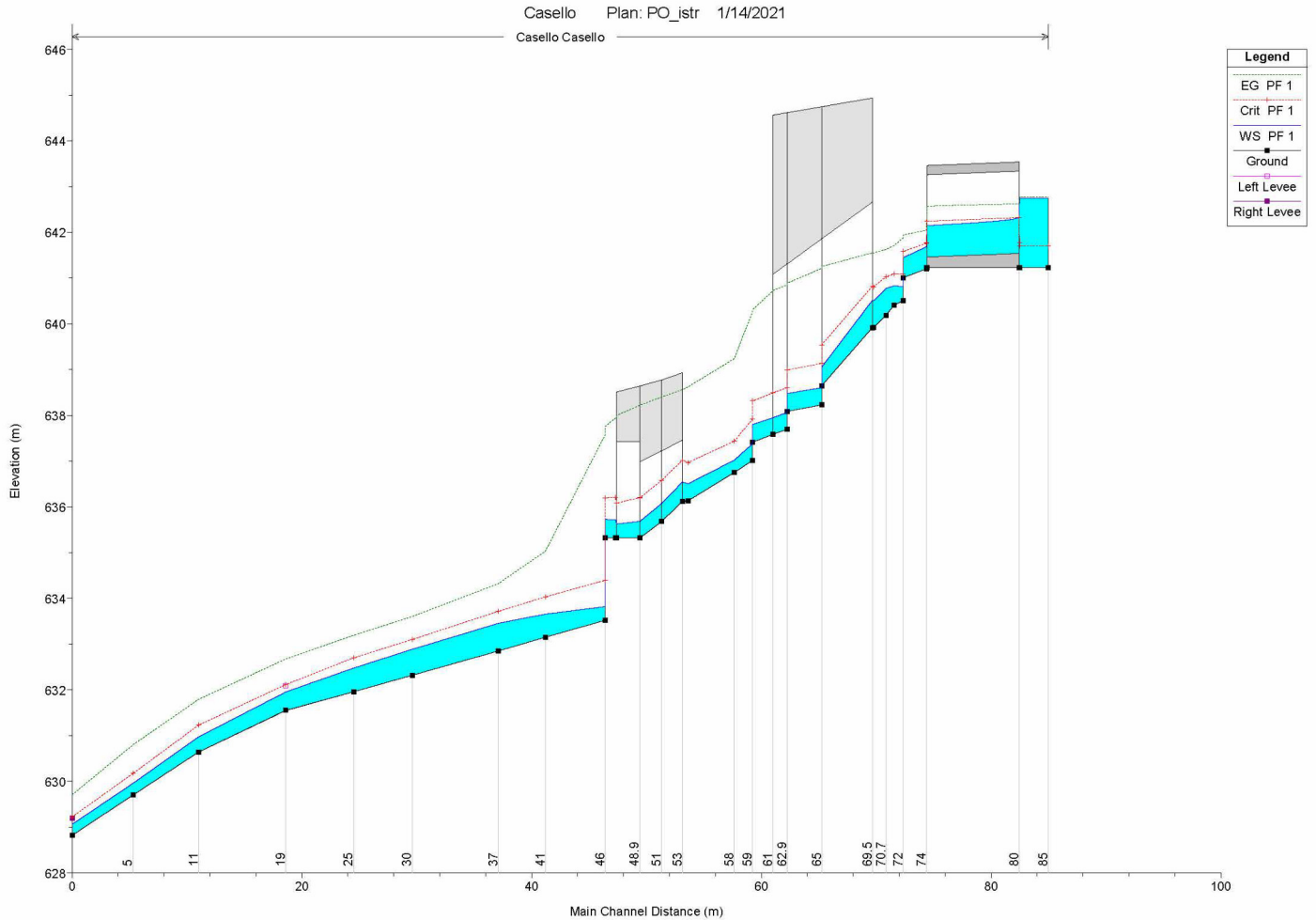


**Figura 22 – Asse Casello - Planimetria aree allagate su DEM Ante operam**

HEC-RAS Plan: PO\_istr River: Casello Reach: Casello Profile: PF 1

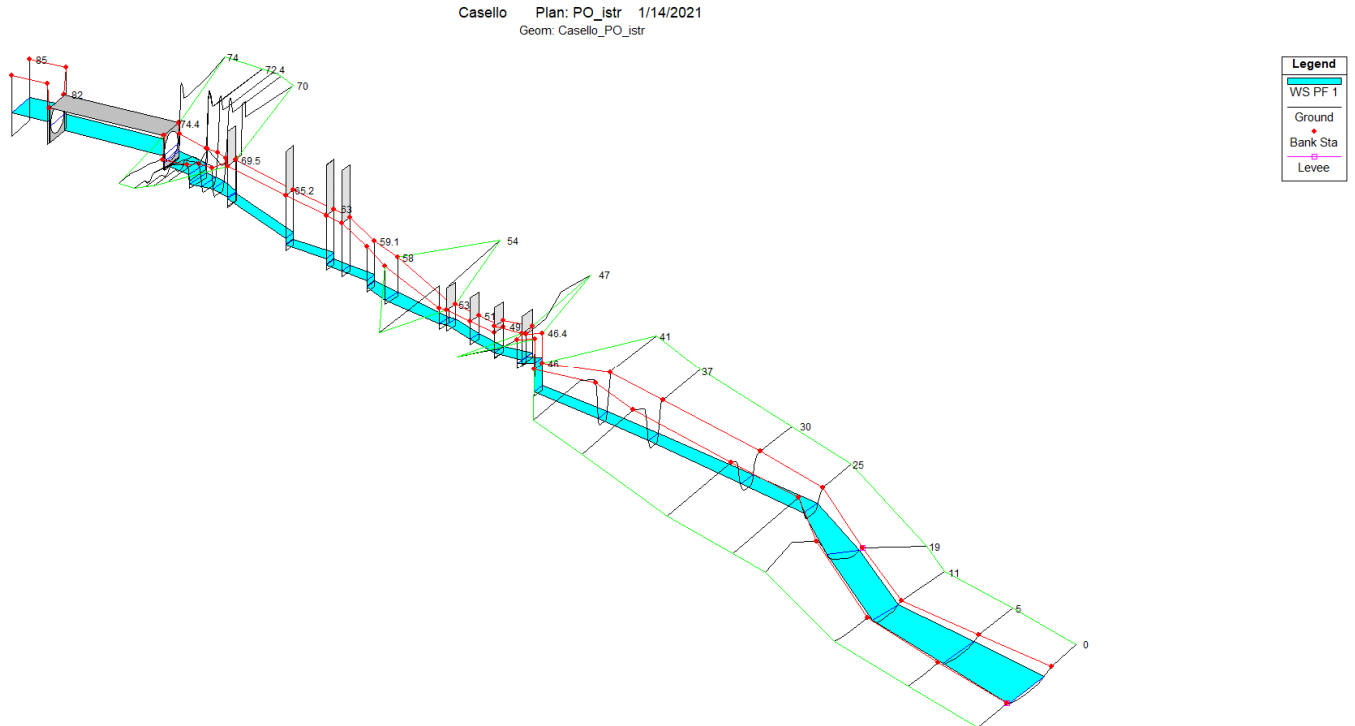
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Casello	85	PF 1	2.58	641.23	642.75	641.71	642.77	0.000171	0.68	3.80	2.50	0.18
Casello	82.4	PF 1	2.58	641.23	642.75	641.71	642.77	0.000171	0.68	3.80	2.50	0.18
Casello	82	PF 1	2.58	641.23	642.73	641.78	642.77	0.000326	0.86	3.01	2.00	0.22
Casello	80		Culvert									
Casello	74.4	PF 1	2.58	641.23	641.78	641.78	642.06	0.004876	2.34	1.10	2.00	1.00
Casello	74	PF 1	2.58	641.20	641.68	641.76	642.05	0.038541	2.68	0.96	2.07	1.25
Casello	72.4	PF 1	2.58	641.01	641.45	641.59	641.94	0.057620	3.11	0.83	1.94	1.52
Casello	72	PF 1	2.58	640.51	640.81	641.09	641.88	0.181731	4.58	0.56	1.88	2.67
Casello	71	PF 1	2.58	640.41	640.83	641.09	641.71	0.115089	4.15	0.62	1.57	2.11
Casello	70.7	PF 1	2.58	640.19	640.78	641.03	641.63	0.102951	4.08	0.63	1.30	1.87
Casello	70	PF 1	2.58	639.92	640.50	640.81	641.55	0.027129	4.54	0.57	0.97	1.90
Casello	69.5	PF 1	2.58	639.92	640.51	640.82	641.55	0.026842	4.52	0.57	0.97	1.88
Casello	65.2	PF 1	2.58	638.65	639.05	639.54	641.25	0.072798	6.57	0.39	0.97	3.30
Casello	65	PF 1	2.58	638.23	638.61	639.14	641.21	0.091754	7.15	0.36	0.97	3.75
Casello	63	PF 1	2.58	638.09	638.48	638.99	640.89	0.082650	6.88	0.38	0.97	3.54
Casello	62.9	PF 1	2.58	637.70	638.06	638.60	640.85	0.100888	7.40	0.35	0.97	3.94
Casello	61	PF 1	2.58	637.59	637.95	638.49	640.73	0.100276	7.38	0.35	0.97	3.93
Casello	59.1	PF 1	2.58	637.41	637.80	638.31	640.31	0.474524	7.01	0.37	0.97	3.64
Casello	59	PF 1	2.58	637.02	637.38	637.92	640.26	0.575684	7.52	0.34	0.97	4.04
Casello	58	PF 1	2.58	636.75	637.02	637.43	639.24	0.466660	6.60	0.39	1.45	4.06
Casello	54	PF 1	2.58	636.13	636.50	636.97	638.62	0.070389	6.45	0.40	1.07	3.37
Casello	53	PF 1	2.58	636.12	636.54	637.02	638.56	0.064760	6.29	0.41	0.97	3.09
Casello	51	PF 1	2.58	635.68	636.07	636.58	638.40	0.078589	6.76	0.38	0.97	3.43
Casello	49	PF 1	2.58	635.32	635.69	636.20	638.22	0.088938	7.05	0.37	1.00	3.72
Casello	48.9	PF 1	2.58	635.32	635.69	636.20	638.22	0.088938	7.05	0.37	1.00	3.72
Casello	47.4	PF 1	2.58	635.32	635.63	636.09	638.00	0.086674	6.82	0.38	1.24	3.94
Casello	47	PF 1	2.58	635.32	635.72	636.21	637.95	0.074098	6.61	0.39	0.98	3.35
Casello	46.4	PF 1	2.58	635.32	635.73	636.20	637.76	0.356431	6.31	0.41	1.00	3.15
Casello	46	PF 1	2.58	633.52	633.82	634.40	637.58	0.840287	8.59	0.30	1.00	5.00
Casello	41	PF 1	2.58	633.15	633.66	634.03	635.03	0.192846	5.19	0.50	1.10	2.47
Casello	37	PF 1	2.58	632.85	633.45	633.72	634.32	0.101560	4.13	0.62	1.25	1.86
Casello	30	PF 1	2.58	632.32	632.88	633.10	633.60	0.079478	3.76	0.69	1.49	1.77
Casello	25	PF 1	2.58	631.96	632.48	632.70	633.19	0.080956	3.75	0.69	1.63	1.84
Casello	19	PF 1	2.58	631.55	631.95	632.12	632.68	0.093669	3.77	0.68	2.10	2.10
Casello	11	PF 1	2.58	630.64	630.97	631.23	631.79	0.145442	4.00	0.64	2.73	2.63
Casello	5	PF 1	2.58	629.70	629.96	630.17	630.80	0.212488	4.06	0.64	3.62	3.09
Casello	0	PF 1	2.58	628.82	629.06	629.22	629.71	0.178392	3.56	0.72	4.46	2.83

**Tabella 6: Asse Casello – Risultati modellazione Post operam**

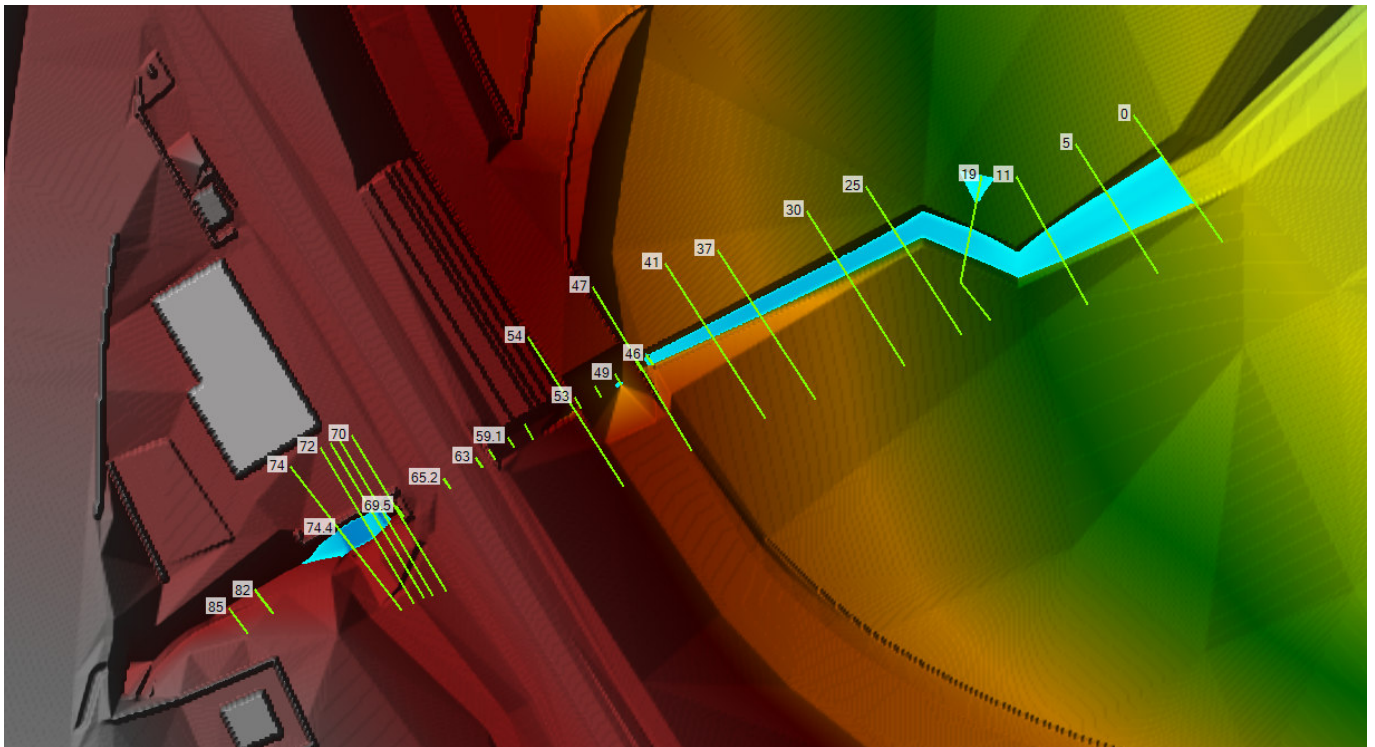


**Figura 23 – Asse Casello - Profilo idraulico Post operam**





**Figura 24 – Asse Casello - Vista Prospettica Post operam**



**Figura 25 – Asse Casello - Planimetria aree allagate Post operam**

## 5 COMPATIBILITA' IDRAULICA

### 5.1 Verifica degli attraversamenti

Le Norme Tecniche delle Costruzioni prevedono per gli intradossi dei ponti di nuova realizzazione un franco idraulico non inferiore a 1.5 m sulla piena duecentennale.

Il Manuale tecnico di progettazione ferroviario prevede, oltre al franco minimo di 1,5 m rispetto al livello idrico, anche un franco di 0.5 m rispetto al livello energetico della piena di progetto.

Le tabelle seguenti riportano le verifiche eseguite relativamente al franco idraulico ed energetico per il tempo di ritorno considerato.

Entrambi i livelli riportati sono riferiti alla sezione immediatamente a monte dell'attraversamento.

WBS	Sez. controllo di	Livello idrico Tr=200 anni [m.s.l.m.]	Intradosso [m.s.l.m.]	Franco idraulico Tr=200 anni [m]	Livello energia Tr=200 anni [m.s.l.m.]	Franco energetico Tr=200 anni [m]
NW08	127	635.26	641.90	<b>6.64</b>	636.84	<b>5.06</b>

**Tabella 7: NW08 - Verifica dei franchi**

Dai risultati riportati si evince che il nuovo manufatto verifica sia le prescrizioni delle Norme Tecniche per le costruzioni, che quelle del Manuale Tecnico ferroviario.

Il manufatto inoltre non interessa con le pile il corso d'acqua attivo.

Le Norme Tecniche delle Costruzioni prevedono per i tombini un grado di riempimento inferiore ai 2/3 della sezione utile ed un franco idraulico non minore di 50 cm. Il Manuale tecnico di progettazione ferroviario prevede per gli attraversamenti secondari, ossia quelli che sottendono un bacino di superficie inferiore ai 10 km<sup>2</sup>, che la sezione di deflusso complessiva del tombino garantisca lo smaltimento della portata di massima piena con un grado di riempimento non superiore al 70 % della sezione totale.



	WBS	Dimensioni	Livello idrico Tr=200 anni [m.s.l.m.]	Intradosso [m.s.l.m.]	Tirante [m]	Franco idraulico Tr=200 anni [m]	Grado di riempimento [%]
Asse Barile	IN05	Scatolare 3.50x3.57	627.86	631.12	0.31	<b>3.26</b>	<b>9</b>
Asse Casello	IN06	Circolare Ø1800	642.32	643.34	0.79	<b>1.01</b>	<b>44</b>

**Tabella 8: Franco idraulico tombini**

Dai risultati riportati si evince che i nuovi manufatti verificano sia le prescrizioni delle Norme Tecniche per le costruzioni, che quelle del Manuale Tecnico ferroviario.

## APPENDICE 1 - IL MODELLO DI CALCOLO HEC-RAS

Le simulazioni numeriche sono state condotte utilizzando un programma di calcolo monodimensionale a moto permanente che fornisce un'adeguata rappresentazione del fenomeno, descrivendo le principali grandezze fisiche per ogni sezione idraulica di calcolo. Per la determinazione del profilo idrico nella situazione attuale e di progetto è stato utilizzato il codice denominato HEC – RAS 4.1.0 River Analysis System del gennaio 2010, sviluppato dalla U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, i cui fondamenti concettuali sono riportati in seguito.

### Caratteristiche del modello matematico

Di seguito vengono esposti i fondamenti teorici alla base della modellazione idraulica monodimensionale, effettuata mediante il codice di calcolo HEC-RAS RIVER ANALYSYS SYSTEM versione 4.1.0 del gennaio 2010, utilizzata per il calcolo dei livelli di piena e conseguenti aree d'esondazione.

La determinazione del livello del pelo libero in ogni sezione è computata, nel caso di correnti lente, a partire dalla sezione di valle, risolvendo per via iterativa l'equazione dell'energia, ossia:

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

Dove:  $Y_1$  e  $Y_2$  rappresentano rispettivamente le profondità del pelo libero della sezione di valle e di monte,  $Z_1$  e  $Z_2$  rappresentano rispettivamente l'elevazione sul medio mare del fondo del canale della sezione di valle e di monte,  $V_1$  e  $V_2$  rappresentano rispettivamente le velocità medie nella sezione di valle e di monte,  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  i rispettivi coefficienti di Coriolis,  $g$  l'accelerazione di gravità e  $h_e$  le perdite di energia tra le due sezioni.

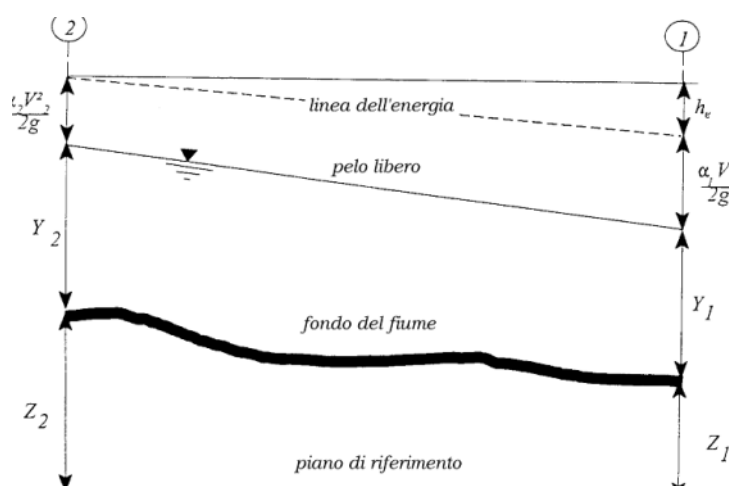


Figura 26 - Schema di calcolo per la determinazione del profilo liquido nei corsi d'acqua.

La Figura 26 mostra lo schema del bilancio di energia tra la sezione di valle e quella di monte; nella figura sono indicati i singoli termini di bilancio in accordo all'equazione (1).

Le perdite di energia complessive  $h_e$  tra le due sezioni sono dovute alle perdite continue ed a quelle localizzate dovute a fenomeni di espansione e contrazione della vena fluida; in particolare si ha:

$$h_e = L\bar{J} + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (2)$$

dove, con  $L$  è indicata la distanza tra le due sezioni, con  $\bar{J}$  le perdite di carico medie distribuite tra le due sezioni mentre il  $C$  correla le perdite, dovute all'espansione ed alla contrazione della vena in funzione dell'andamento piano – altimetrico del corso d'acqua, alla differenza dei carichi cinetici delle due sezioni.

Per la valutazione delle perdite di carico è utilizzata la formula di Manning, ossia:

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} \sqrt{J} \quad (3)$$

dove:  $Q$  rappresenta la portata,  $A$  l'area bagnata,  $R_h$  il raggio idraulico,  $n$  il coefficiente di scabrezza secondo Manning e  $J$  le perdite di energia per unità di lunghezza.

Nel caso di sezioni composte, tipiche dei corsi d'acqua naturali, è necessario suddividere la sezione in parti in modo da trattare separatamente sezioni in cui la velocità media può essere ritenuta, ai fini pratici, costante (Figura 27).

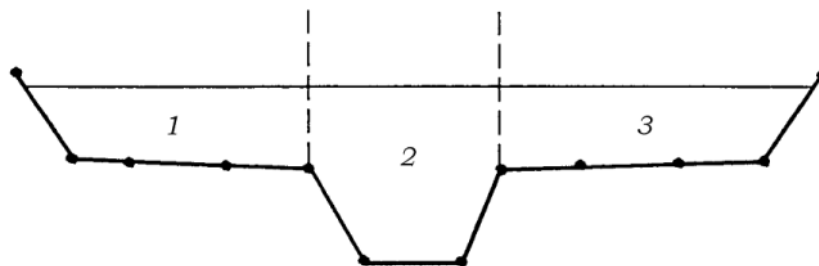


Figura 27 - Sezione schematica di un corso d'acqua naturale.

Con riferimento alla Figura 27 indicata con  $K_i = Q_i / \sqrt{J}$  la capacità di portata di ogni singola parte  $i$ -esima in cui è stata suddivisa la sezione, si ha, in accordo alla formula di Manning :

$$K_i = \frac{1}{n_i} A_i R_{h,i}^{2/3} \quad (4)$$

Calcolata la capacità di portata per ogni singola parte in cui è stata suddivisa la sezione, la perdita di carico per unità di lunghezza J risulta pari a:

$$J = \left( \frac{Q}{\sum_i K_i} \right)^2 \quad (5)$$

Questo risultato può essere facilmente ricavato osservato che, per la costanza di J, la portata di ogni singola area  $Q_i = K_i \sqrt{J}$  è proporzionale al rispettivo coefficiente di portata e che la portata totale vale  $Q = \sum_i Q_i$ .

Calcolata la perdita di carico in corrispondenza della sezione 1 e della sezione 2 la pendenza media della linea dell'energia tra le due sezioni e fornita dalla seguente equazione:

$$\bar{J} = \frac{J_1 + J_2}{2} \quad (6)$$

Calcolata la capacità di portata di ogni singola sezione, è possibile, da queste, valutare il coefficiente di Coriolis. Questo coefficiente è pari al rapporto tra l'energia cinetica reale della corrente, proporzionale a  $\sum_i Q_i^3 / A_i^2$ , e l'energia cinetica calcolata facendo uso del valore medio della velocità, proporzionale a  $Q^3 / A^2$ .

Esprese le portate delle singole parti i-esime in funzione del rispettivo coefficiente di portata si perviene con qualche semplice passaggio alla seguente espressione:

$$\alpha = \left( \frac{\sum_i K_i^3}{\sum_i A_i^2} \right) \frac{\left( \sum_i A_i \right)^2}{\left( \sum_i K_i \right)^3} \quad (7)$$

dal cui calcolo è possibile ottenere  $\alpha$ , il coefficiente di Coriolis.

Calcolate tramite le rispettive equazioni le perdite di energia  $h_e$  ed il coefficiente di Coriolis  $\alpha$  la (1), associata all'equazione di continuità, permette di calcolare la quota del pelo libero,  $Y_2 + Z_2$ , nella sezione di monte a partire dal valore dell'energia totale,  $Y_1 + Z_1 + \alpha_1 V_1^2 / 2g$  noto in corrispondenza della sezione di valle.

Essendo la (1) un'equazione non lineare, la soluzione è ottenuta con ciclo iterativo, a partire da una soluzione iniziale, approssimata, di primo tentativo.

Ogni volta che la corrente passa attraverso la condizione critica l'equazione dell'energia non viene considerata applicabile e viene utilizzata l'equazione del momento. All'interno di Hec-Ras l'equazione del momento può essere applicata ai seguenti problemi: formazione di un risalto idraulico, sovrizzo determinato dai ponti e intersezioni di corsi d'acqua.

L'equazione della conservazione del momento è definita partendo dalla seconda legge di Newton  $\sum F_x = ma$  con  $x$  la direzione del moto, applicata ad un elemento di fluido racchiuso tra due generiche sezioni 1-2, Figura 28.

Per equilibrio si ottiene:

$$P_2 - P_1 + W_x - F_f = Q\rho\Delta V_x \quad (8)$$

dove

$P_i$ , risultante della pressione idrostatica;

$W_x$ , componente della forza peso nella direzione del moto;

$F_f$ , forza d'attrito tra le due sezioni;

$Q$ , portata complessiva;

$\rho$ , densità del fluido;

$\Delta V_x$ , variazione della velocità tra le due sezioni.

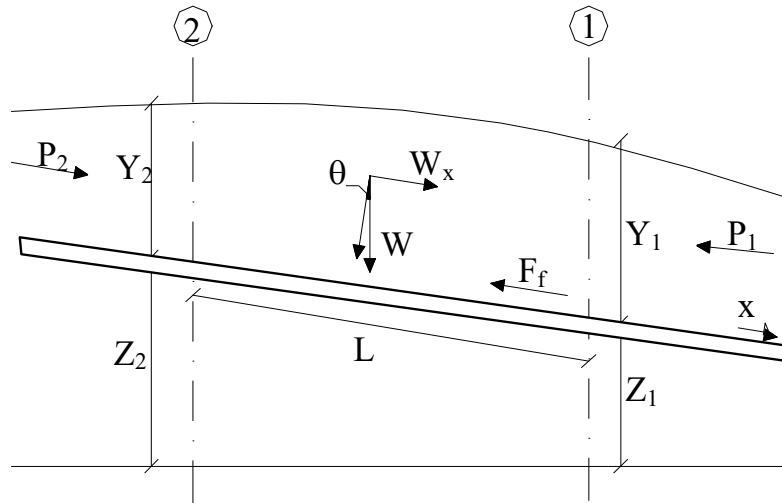


Figura 28 - Sezione schematica di un corso d'acqua naturale.

La risultante della pressione idrostatica per pendenze dell'ordine di 1 a 10 è valutabile come:

$$P = \gamma \cdot A \cdot \bar{Y} \cdot \cos\theta \cong \gamma \cdot A \cdot \bar{Y} \quad (9)$$

potendo porre, per le pendenze in esame,  $\cos\theta = 1$ .

Nella relazione (9)  $\gamma$  corrisponde al peso specifico del fluido, A l'area della sezione ed  $\bar{Y}$  l'altezza del pelo libero nel baricentro della sezione.

La componente della forza peso, noto il peso specifico del fluido, la lunghezza L del tronco e l'area totale di fluido presente, è valutata nel modo seguente:

$$W = \gamma \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) \cdot L \Rightarrow W_x = W \cdot \sin\theta \quad (10)$$

La forza d'attrito  $F_f$  è funzione delle caratteristiche del fluido come la densità dell'acqua, l'azione tangenziale che si esplica sul fondo e la cadente piezometrica J.

In particolare:

$$F_f = \tau PL$$

$$\tau = \gamma RJ \Rightarrow F_f = \gamma \frac{A}{P} JPL = \gamma \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) \cdot JL \quad (11)$$

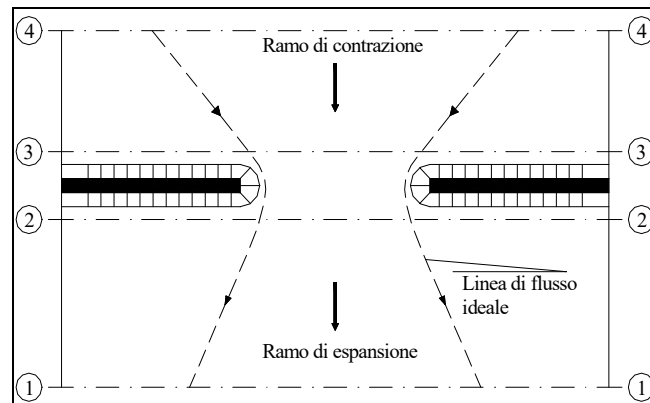
dove P ed R sono rispettivamente il perimetro bagnato ed il raggio idraulico della sezione.

La soluzione dell'equazione (8) è ottenuta per iterazioni successive.

Le equazioni (1) e (8) sono applicate anche alle sezioni caratterizzate dalla presenza di un ponte. E' sufficiente suddividere il tratto interessato in più sezioni e ripetere per la successione di esse l'analisi svolta per il tratto delimitato da sole due sezioni.

Prendendo un tratto caratterizzato dalla presenza di un ponte, Figura 29 e Figura 30, si evidenziano 3 zone:

- una zona di contrazione in cui arriva la corrente;
- una zona intermedia interessata dalla presenza del ponte;
- una zona di espansione in cui esce la corrente.



**Figura 29 - Pianta schematica di un attraversamento fluviale**

L'applicazione dell'equazione della conservazione del momento tra le sezioni 1-2 e 3-4 è del tutto analoga alla situazione vista in precedenza mentre la presenza del ponte comporta termini nuovi nella valutazione dell'equilibrio tra le sezioni 2-BD (Step 1), BD-BU (Step 2) ed BU-3 (Step 3), rappresentate in Figura 30.

Step 1; definendo con  $A_{pi}$  l'area ostruita ed con  $Y_{pi}$  la distanza verticale che intercorre tra il baricentro delle pile e la superficie libera WS nella zona di valle, l'espressione del bilancio è scritta come:

$$\frac{Q_{BD}^2 \beta_{BD}}{g A_{BD}} + A_{BD} Y_{BD} = \frac{Q_2^2 \beta_2}{g A_2} + A_2 Y_2 - A_{P_{BD}} Y_{P_{BD}} + F_f - W_x$$

Step 2 ; equilibrio tra BU e BD

$$\frac{Q_{BD}^2 \beta_{BD}}{g A_{BD}} + A_{BD} Y_{BD} + F_f - W_x = \frac{Q_{BU}^2 \beta_{BU}}{g A_{BU}} + A_{BU} Y_{BU}$$

Step 3 ; equilibrio tra BU e 3

$$\frac{Q_3^2 \beta_3}{g A_3} + A_3 Y_3 = \frac{Q_{BU}^2 \beta_{BU}}{g A_{BU}} + A_{BU} Y_{BU} - A_{P_{BU}} Y_{P_{BU}} + F_f - W_x + \frac{1}{2} C_D \frac{A_{P_{BU}} Q_3^2}{g A_3^2}$$

con CD coefficiente di resistenza idrodinamica intorno alla pila ricavabile dalla **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** in funzione del tipo di pila presente.

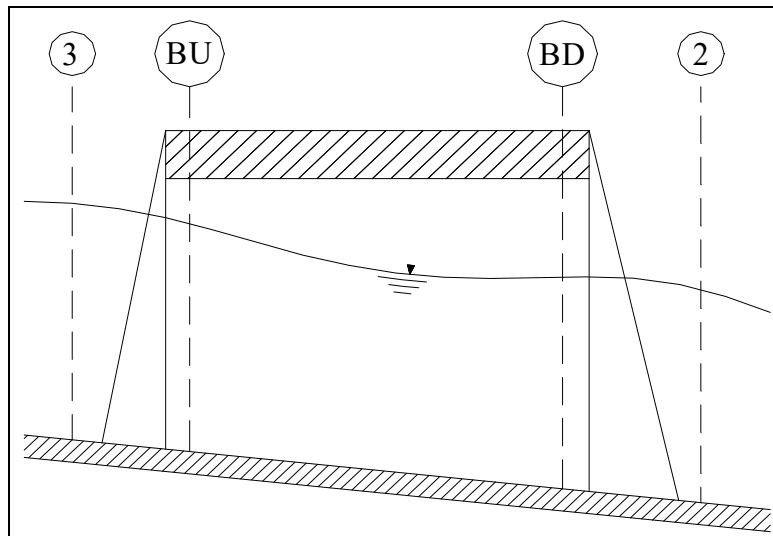


Figura 30 - Sezione schematica di un attraversamento fluviale



TIPO DI PILA	C <sub>D</sub>
Pila circolare	1.2
Pila allungata con punta semicircolare	1.33
Pila ellittica con rapporto assi 2 :1	0.6
Pila ellittica con rapporto assi 4 :1	0.32
Pila ellittica con rapporto assi 8 :1	0.29
Pila rettangolare	2.00
Pila triangolare con apertura $\alpha = 30^\circ$	1.00
Pila triangolare con apertura $\alpha = 60^\circ$	1.39
Pila triangolare con apertura $\alpha = 90^\circ$	1.60
Pila triangolare con apertura $\alpha = 120^\circ$	1.72

**Tabella 9 : Coefficiente di resistenza idrodinamico CD**

In alternativa all'equazione della conservazione del momento è utilizzata l'equazione di Yarnell che permette di valutare le perdite di energia localizzate in corrispondenza di un ponte.

Con riferimento alle Figura 29 e Figura 30, le perdite di energia tra le sezioni 2 e 3 sono valutate nel modo seguente:

$$H_{3-2} = 2K(K + 10\omega - 0.6) \cdot (\alpha + 15\alpha^4) \cdot \frac{V_2^2}{2g} \quad (12)$$

dove  $H_{i-j}$  rappresenta appunto la perdita di energia nel passaggio della corrente attraverso la sezione ostruita e  $K$ , coefficiente di Yarnell, tiene conto delle differenti sagome di pila esistenti, tab. 2;  $\omega$  rappresenta il rapporto tra la velocità e l'altezza della sezione 2;  $\alpha$  il rapporto tra l'area ostruita dalle pile e l'area totale ed infine  $V_2$  la velocità a valle della sezione.

TIPO DI PILA	K
Pila semicircolare in punta	0.9
Pila cilindrica doppia collegata con diaframma	0.95
Pila cilindrica doppia senza diaframma	1.05
Pila con punta triangolare $\alpha = 90^\circ$	1.05
Pile rettangolari	1.25
Dieci pile a cavalletto inclinate	2.5

**Tabella 10: Coefficiente di Yarnell**

Il modello elaborato prevede una corrente con un'altezza idrica minore dell'altezza di intradosso del ponte. Nel caso di correnti con altezza idrica superiore o eguale alla quota di intradosso dell'attraversamento fluviale, la valutazione delle perdite di energia è effettuata attraverso il calcolo della portata che attraversa la sezione. In particolare, in riferimento ad un caso generico, la portata è calcolata nel modo seguente:

$$Q = C_d A_1 \left[ 2g \left( Y_1 - \frac{Z}{2} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) \right]^{1/2} \quad (13)$$

Dove:

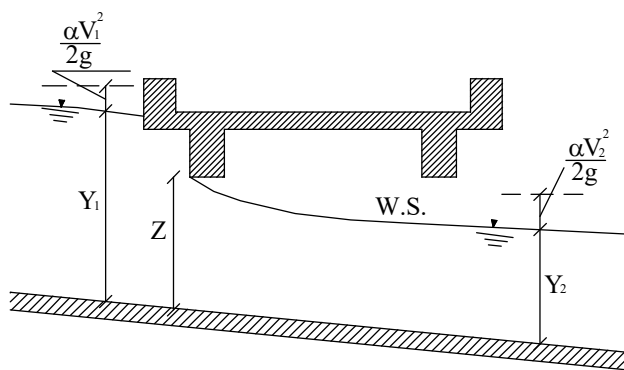
$C_d$ , coefficiente di deflusso il cui andamento è riportato nel grafico di Figura 32, assumendo valori tra 0.27 e 0.5;

$A_1$ , area della luce nella sezione di monte;

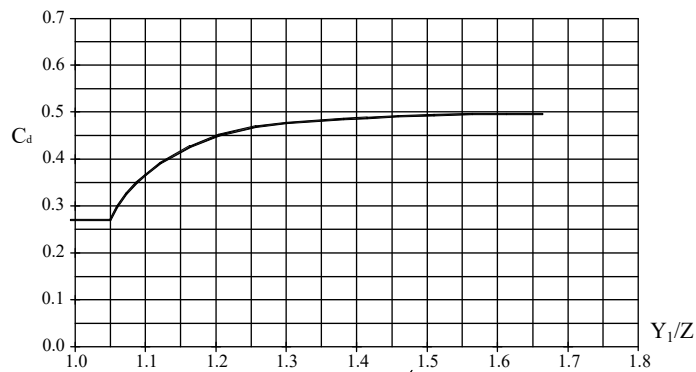
$Y_1$ , altezza idrica della sezione di monte;

$\alpha$ , coefficiente correttivo cinetico;

$V_1$ , velocità della corrente a monte.



**Figura 31 - Sezione schematica di un ponte – Schema di calcolo**



**Figura 32 - Diagramma per la stima del coefficiente di deflusso  $C_d$**

Se il ponte è in pressione sia a monte che a valle l'equazione (10) è corretta nel modo seguente:

$$Q = CA\sqrt{2gH}$$

dove C assume il valore di 0.8 ed H coincide con la perdita di energia totale tra la sezione di monte e di valle del ponte come indicato in Figura 33.

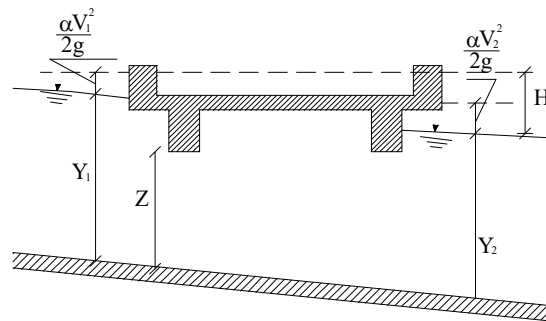


Figura 33 - Sezione schematica di un ponte – Schema di calcolo

Infine se il ponte è superato dalla corrente di piena, Figura 34, la portata si calcola nel modo seguente:

$$Q = CLH^{2/3}$$

con C si indica un coefficiente correttivo della portata, L la lunghezza del ponte ed H la differenza di energie tra monte e valle.

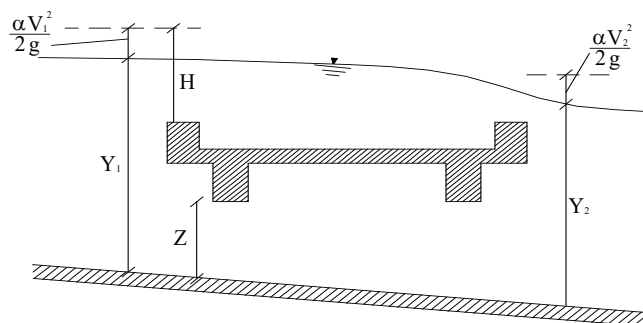


Figura 34 - Sezione schematica di un ponte – Schema di calcolo

L'analisi del deflusso attraverso un tombino si basa sul concetto di controllo all'imbocco o allo sbocco.

Il deflusso secondo il controllo all'imbocco si verifica quando la capacità di deflusso all'entrata del tombino è inferiore a quella interna. La sezione di controllo è collocata subito a valle dell'imbocco della struttura. L'altezza d'acqua passa per il livello critico e il regime di deflusso risulta essere rapido. L'energia richiesta a monte viene calcolata assumendo che l'imbocco del tombino agisca come uno stramazzo; di conseguenza il profilo che si ottiene secondo tale approccio dipende principalmente dalla geometria dell'entrata.

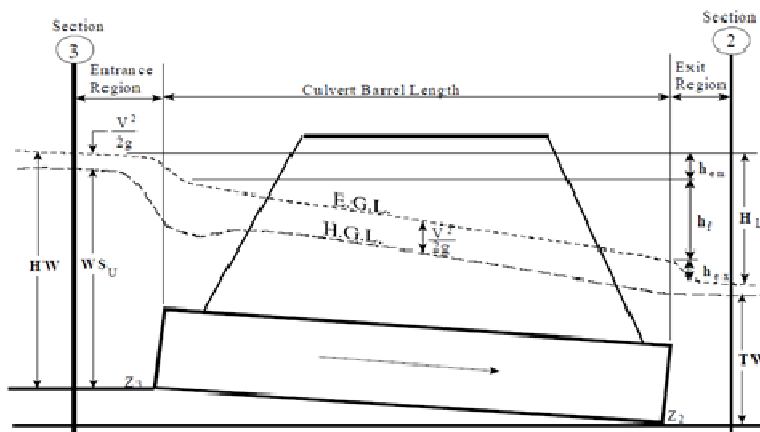


Figura 35 - Schema di un tombino ponticello

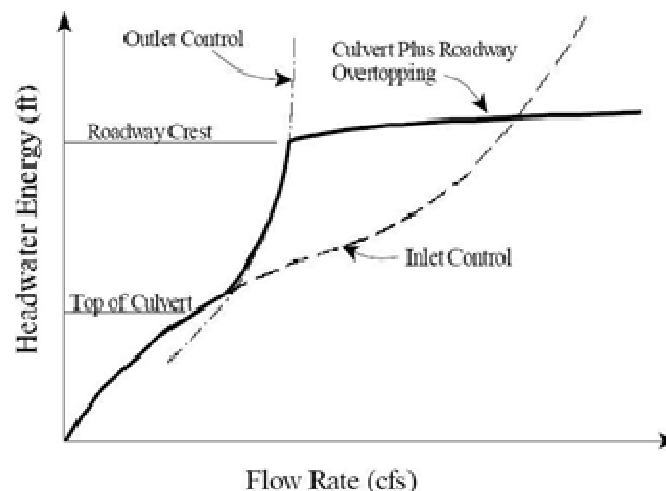


Figura 36 - Diagramma di funzionamento del tombino ponticello

Il deflusso secondo il controllo allo sbocco si verifica quando la capacità di deflusso viene limitata dalle condizioni che si instaurano a valle o dalle caratteristiche geometriche della struttura. In linea generale il livello di energia determinato a monte controlla il tipo di deflusso nel tombino, data la portata a monte e il livello a valle. Per

il controllo allo sbocco l'energia di monte viene calcolata effettuando un bilancio di energia dalla sezione di valle a quella di monte. Il modulo considera le perdite di ingresso, quelle di uscita e quelle per attrito all'interno della struttura.

Per quanto riguarda il controllo all'imbocco, la capacità della struttura è limitata dall'apertura del tombino, piuttosto che dalle condizioni che si instaurano a valle. Per il calcolo del livello vengono utilizzate le equazioni ricavate dal National Bureau of Standards e pubblicate nel "Hydraulic Design of Highway Culverts" (FHWA, 1985). Le equazioni sono:

*Deflusso libero:*

$$\frac{HW_i}{D} = \frac{H_c}{D} + K \left[ \frac{Q}{AD^{0.5}} \right]^M - 0.5S$$

$$\frac{HW_i}{D} = K \left[ \frac{Q}{AD^{0.5}} \right]^M$$

*Deflusso rigurgitato:*

$$\frac{HW_i}{D} = c \left[ \frac{Q}{AD^{0.5}} \right]^2 + Y - 0.5S$$

Dove:

$HW_i$  livello dell'energia all'imbocco

$D$  altezza interna del tombino

$H_c$  altezza critica

$Q$  portata

$A$  area della sezione interna del tombino

$S$  pendenza

$K, M, c, Y$  costanti variabili con la geometria e le condizioni di ingresso.

Per il controllo allo sbocco l'energia richiesta a monte per consentire il deflusso deve essere computata considerando diverse condizioni nel tombino e a valle di esso. Hec-Ras usa l'equazione di Bernoulli per effettuare tale calcolo:

$$Z_3 + Y_3 + \frac{\alpha_3 V_3^2}{2g} = Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + H_L$$

dove:

$Y_3, Y_2$  tirante d'acqua nelle sezioni di monte e di valle;

$Z_3, Z_2$  quota del fondo del tombino a monte e a valle;

$\alpha_3, \alpha_2$  coefficiente di Coriolis nella sezione 1 e 2;

$g$  accelerazione di gravità;

$H_L$  perdita di carico attraverso il tombino.

Nel caso in cui si verifichi moto in pressione all'interno del tombino, la perdita totale di energia viene calcolata secondo la:

$$H_L = h_{en} + h_f + h_{ex}$$

Dove:

$h_{en}$  perdite in entrata

$h_f$  perdite per attrito

$h_{ex}$  perdite in uscita.

Le perdite per attrito vengono considerate mediante la formulazione di Manning:

$$h_f = L \left( \frac{Qn}{1.486AR^{3/2}} \right)^2$$

Dove:

$h_f$  perdite per attrito

$L$  lunghezza del tombino

$Q$  portata

$n$  coefficiente di scabrezza di Manning

$A$  area della sezione di flusso

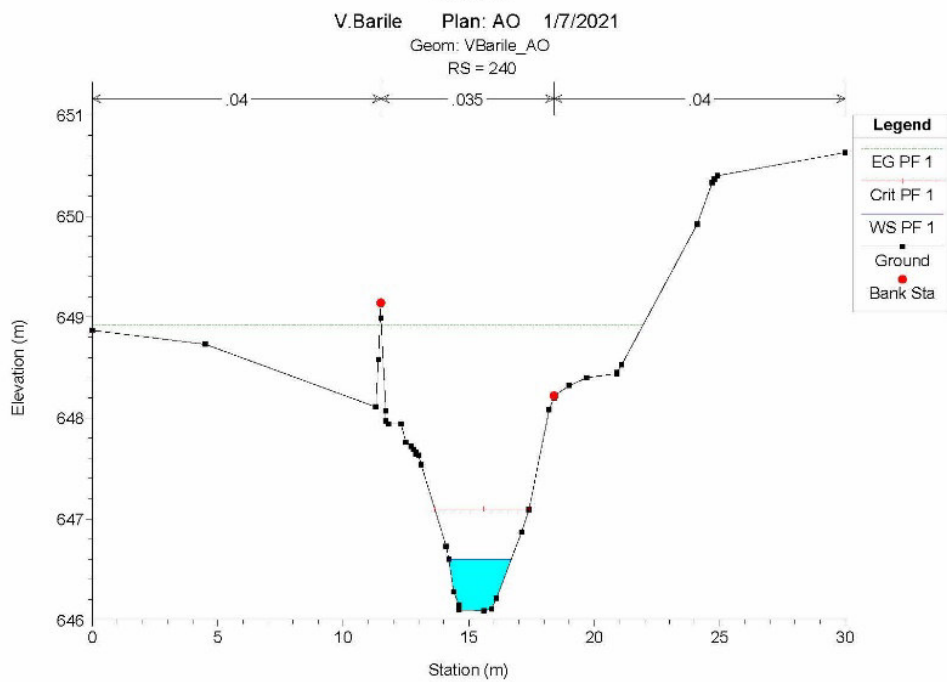
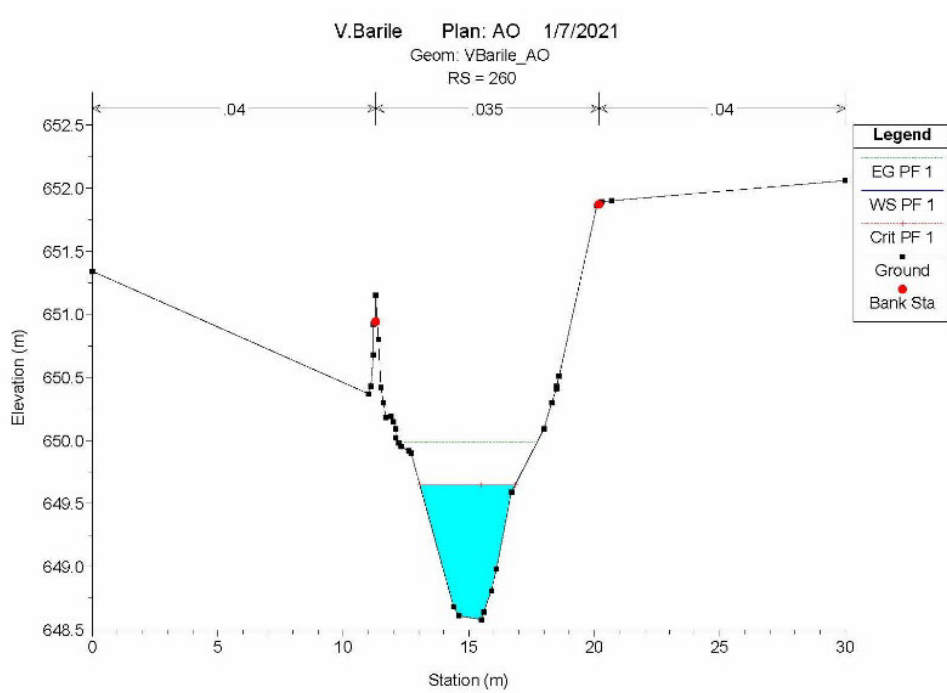
$R$  raggio idraulico.

Le perdite di ingresso sono calcolate come frazione del carico cinetico a monte, e analogamente per quelle di uscita, secondo il carico cinetico di valle. Tali coefficienti dipendono fortemente dalla geometria che caratterizza l'imbocco e lo sbocco dell'opera.

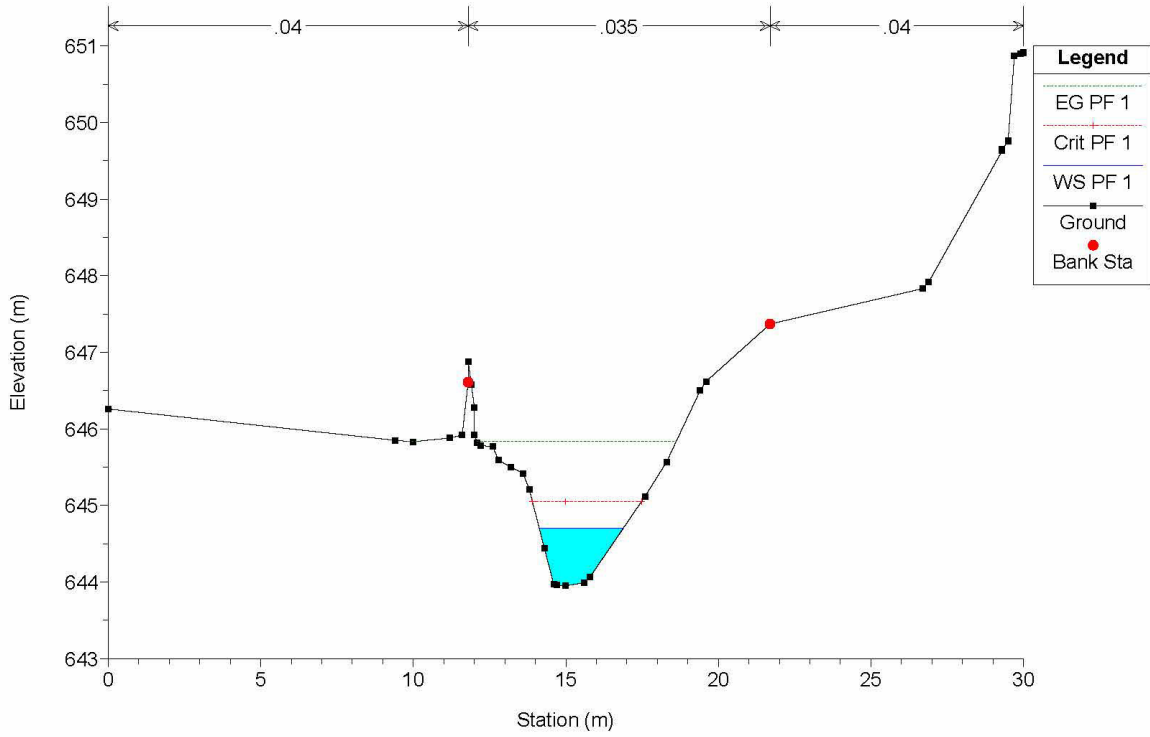


## APPENDICE 2 – ELABORAZIONI DI CALCOLO HEC-RAS

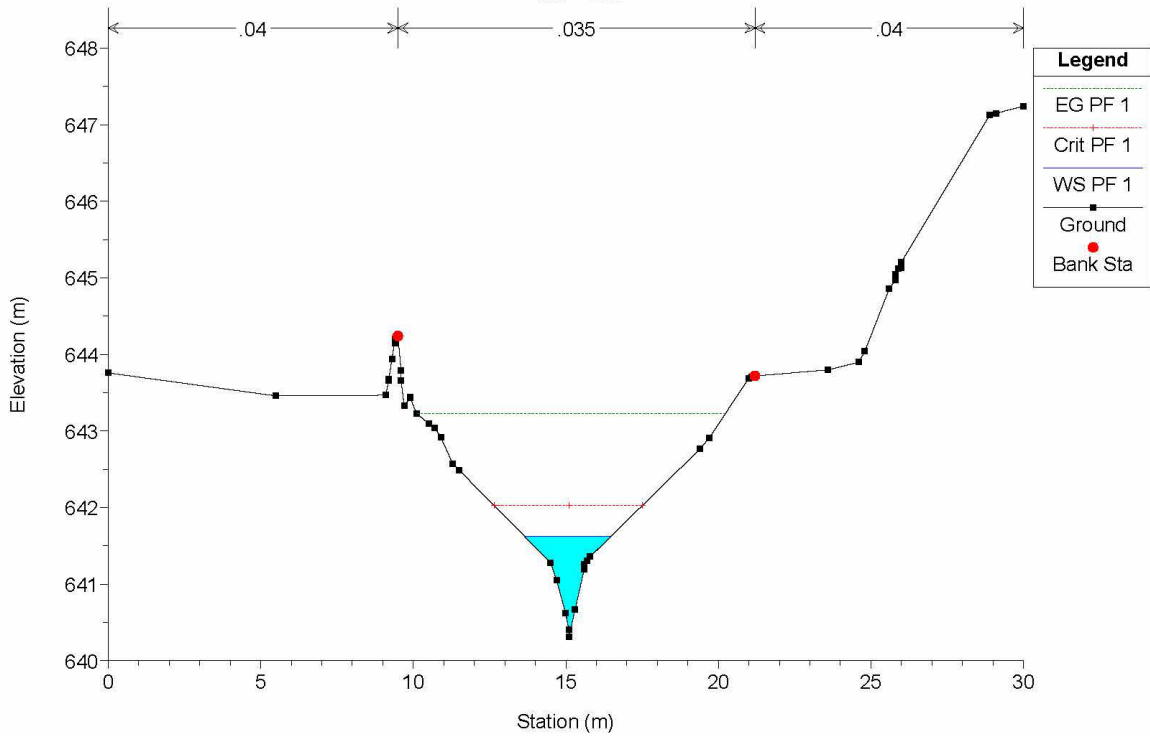
**Elaborazioni Hec-Ras**  
**Asse Barile**  
**Portata di calcolo  $Q_{200} = 6.73 \text{ m}^3/\text{s}$**   
**SEZIONI ANTE OPERAM**



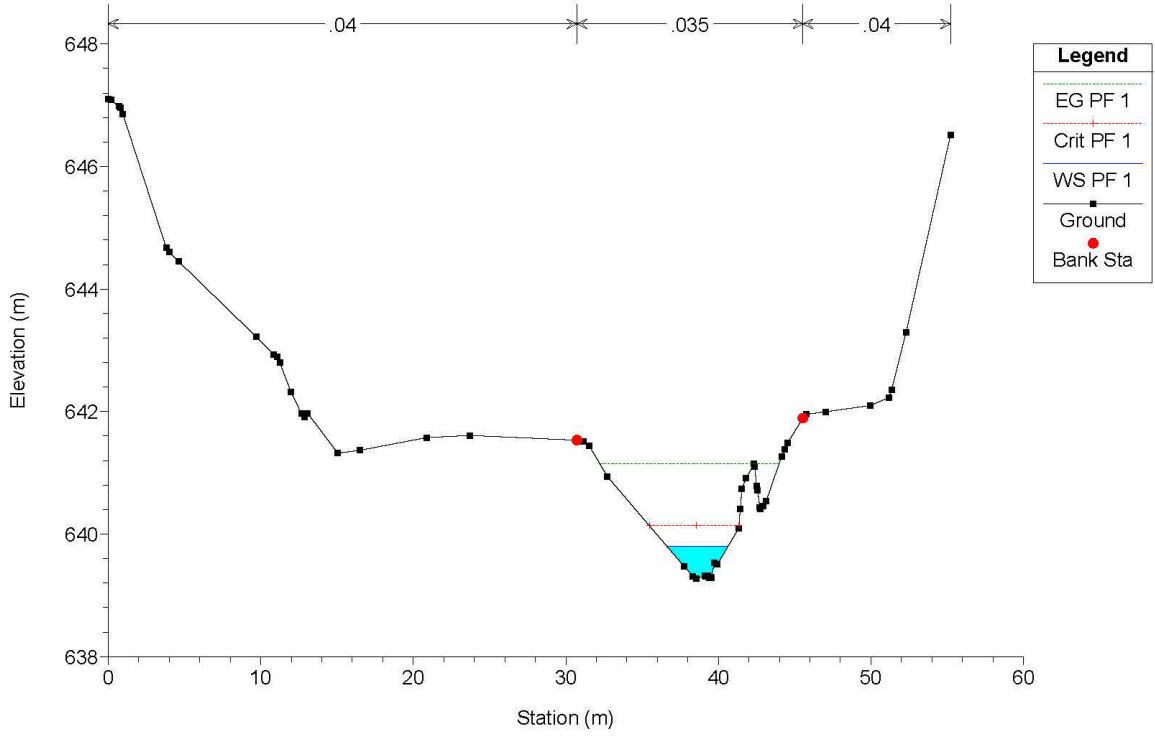
V.Barile Plan: AO 1/7/2021  
Geom: VBarile\_AO  
RS = 220



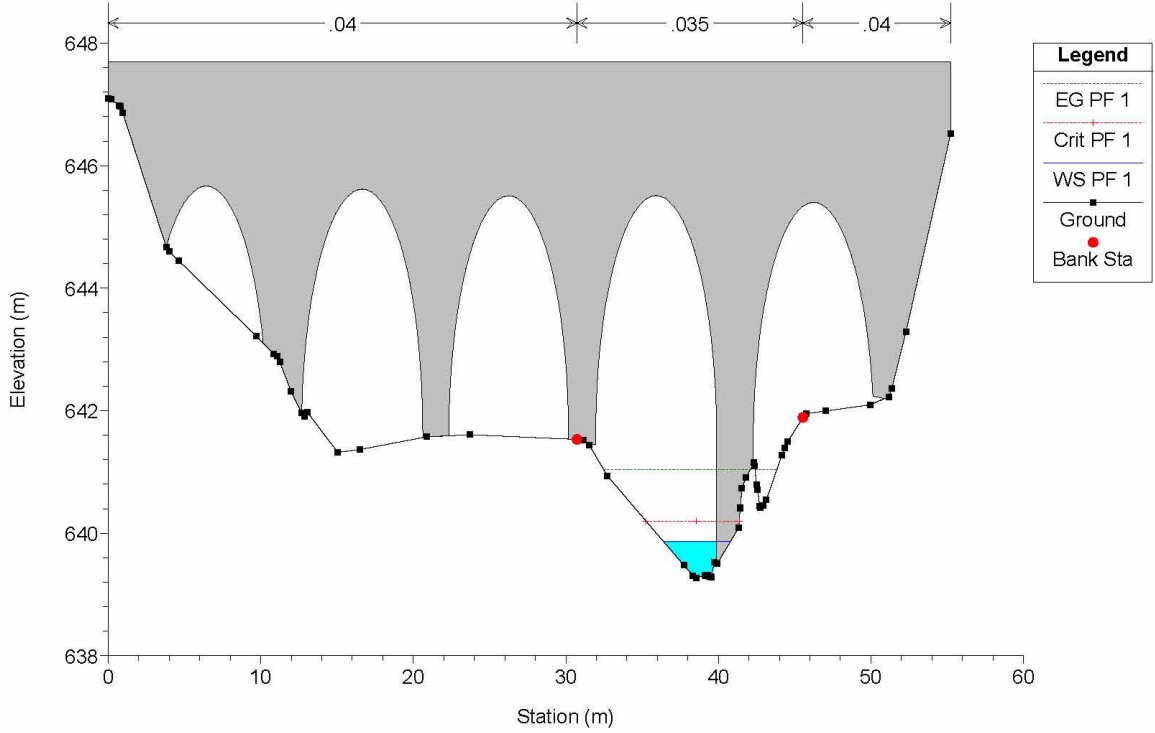
V.Barile Plan: AO 1/7/2021  
Geom: VBarile\_AO  
RS = 200



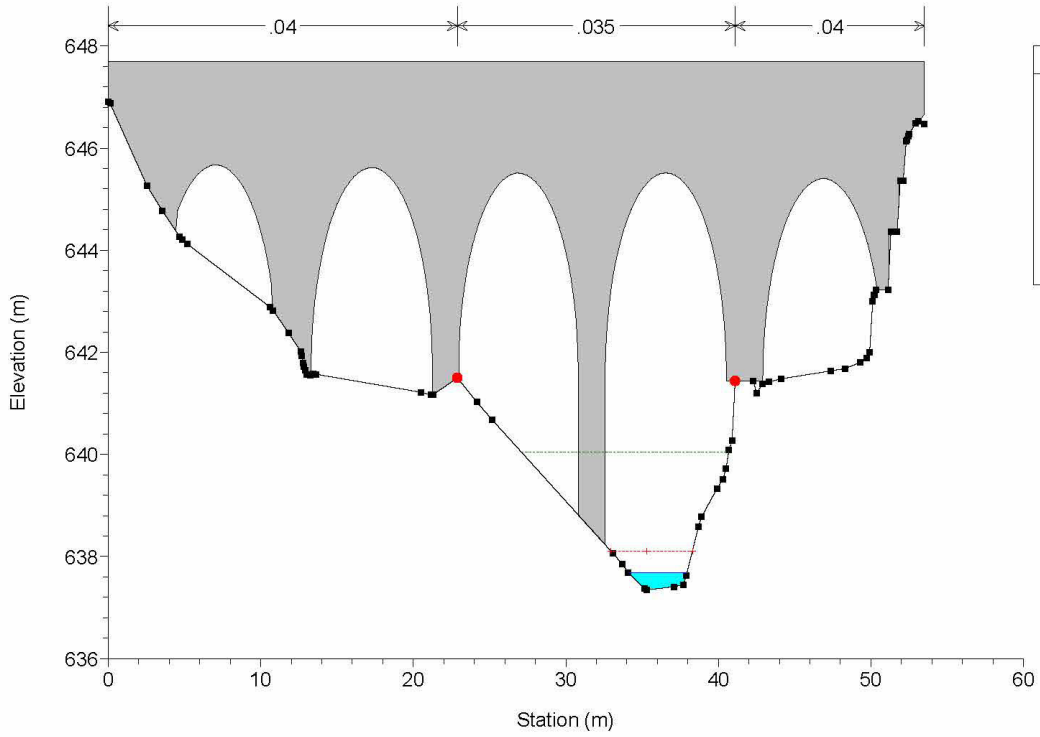
V.Barile Plan: AO 1/7/2021  
Geom: VBarile\_AO  
RS = 189



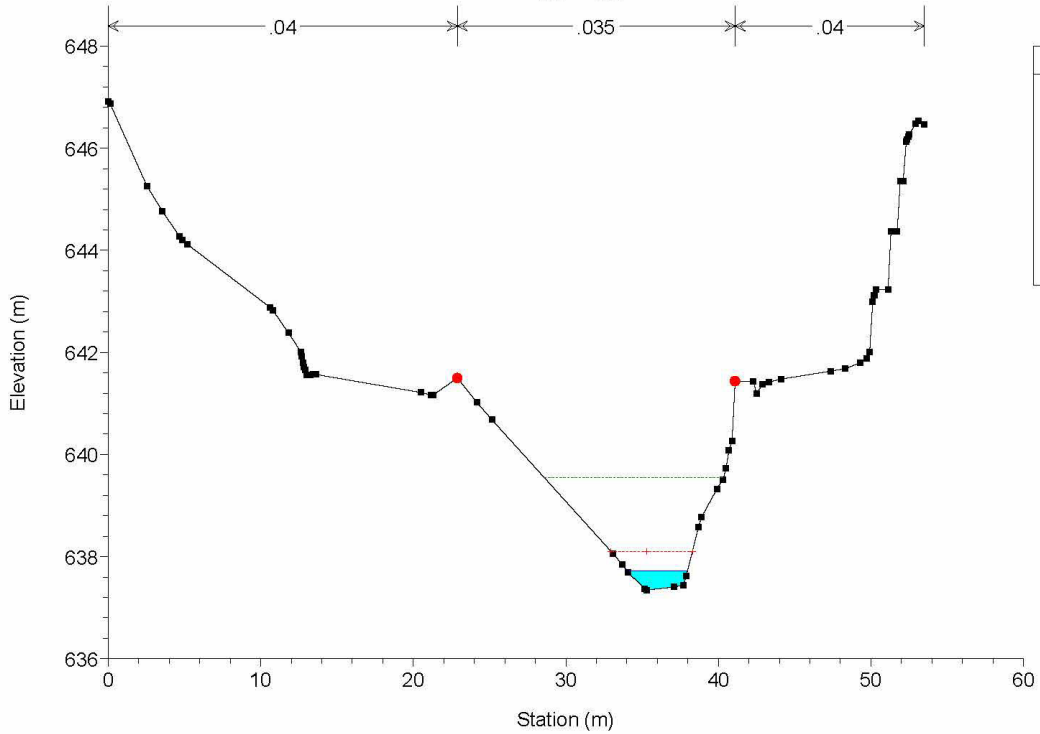
V.Barile Plan: AO 1/7/2021  
Geom: VBarile\_AO  
RS = 187 BR



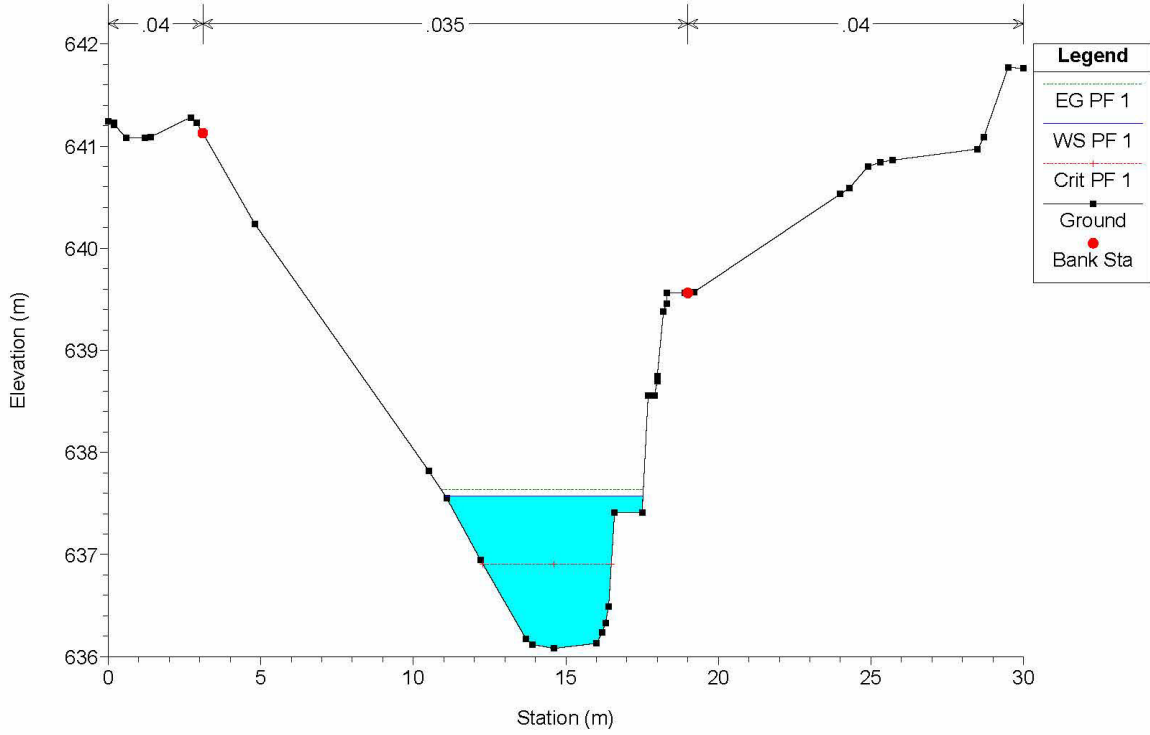
V.Barile Plan: AO 1/7/2021  
Geom: VBarile\_AO  
RS = 187 BR



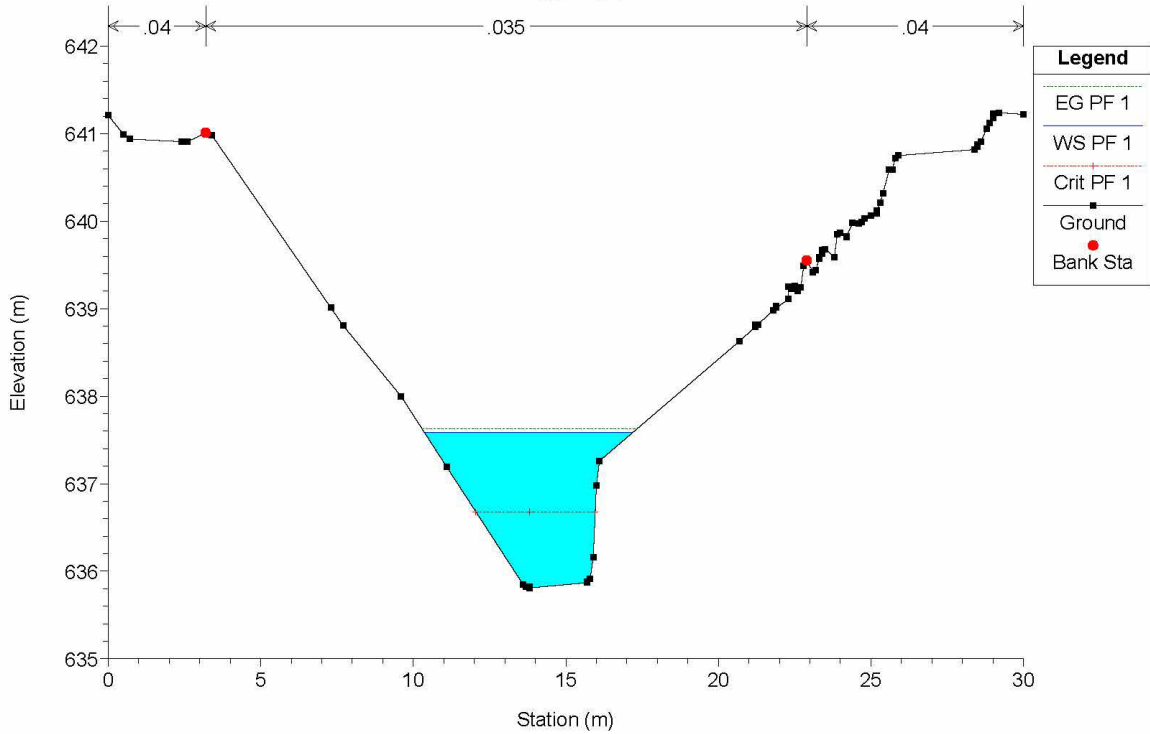
V.Barile Plan: AO 1/7/2021  
Geom: VBarile\_AO  
RS = 182



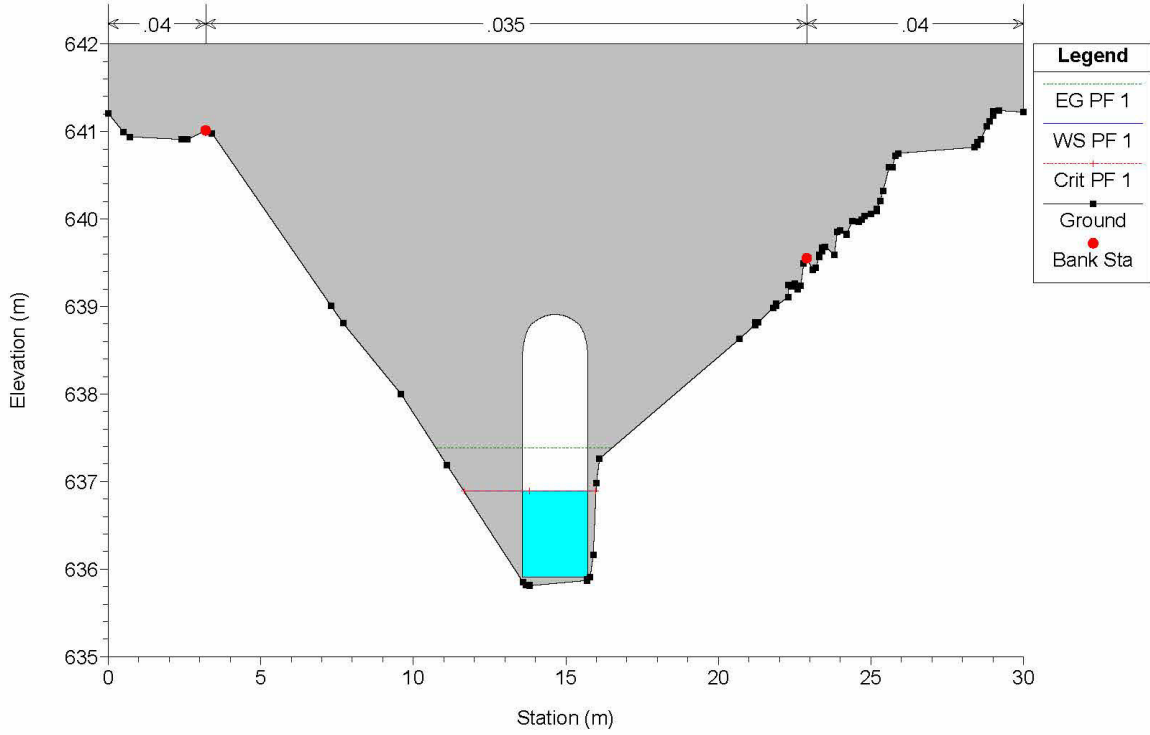
V.Barile Plan: AO 1/7/2021  
Geom: VBarile\_AO  
RS = 176



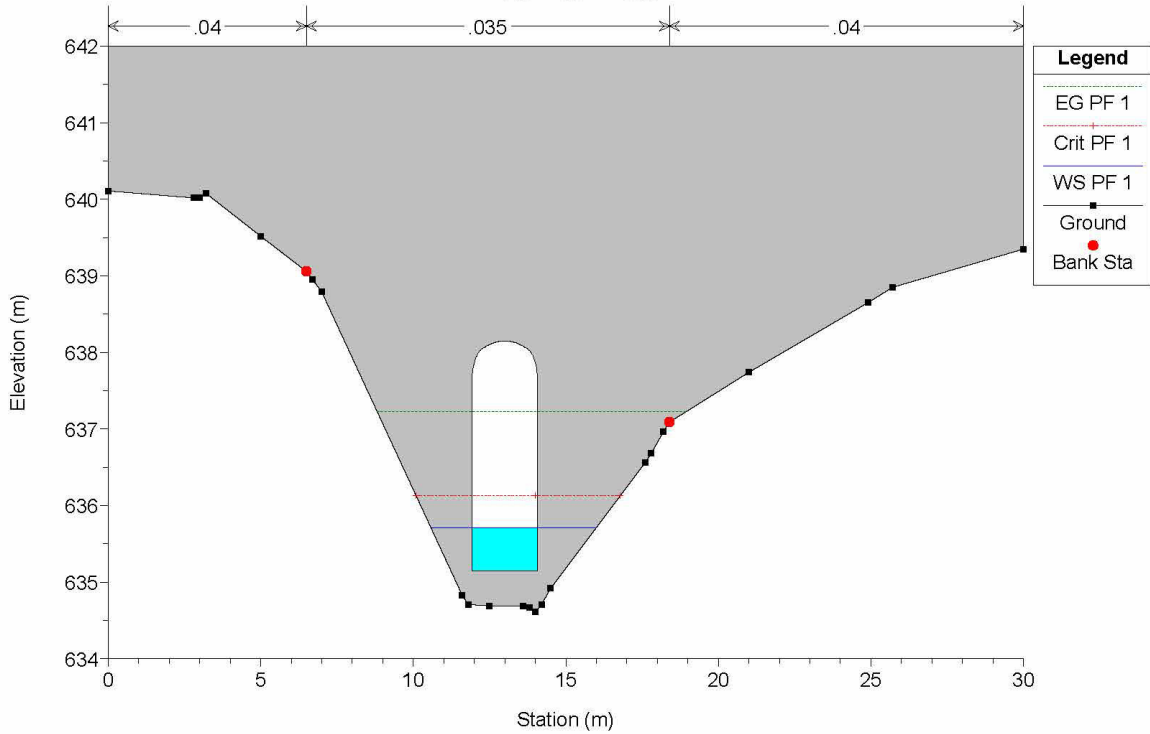
V.Barile Plan: AO 1/7/2021  
Geom: VBarile\_AO  
RS = 174



V.Barile Plan: AO 1/7/2021  
Geom: VBarile\_AO  
RS = 161 Culv

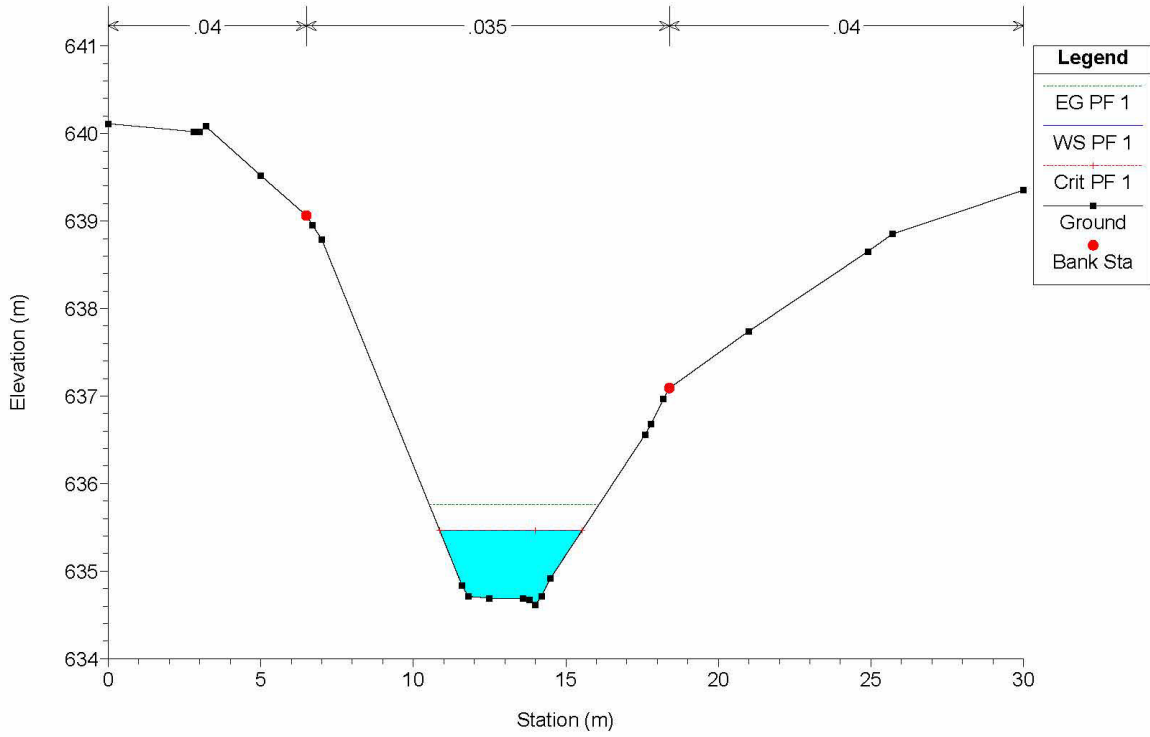


V.Barile Plan: AO 1/7/2021  
Geom: VBarile\_AO  
RS = 161 Culv

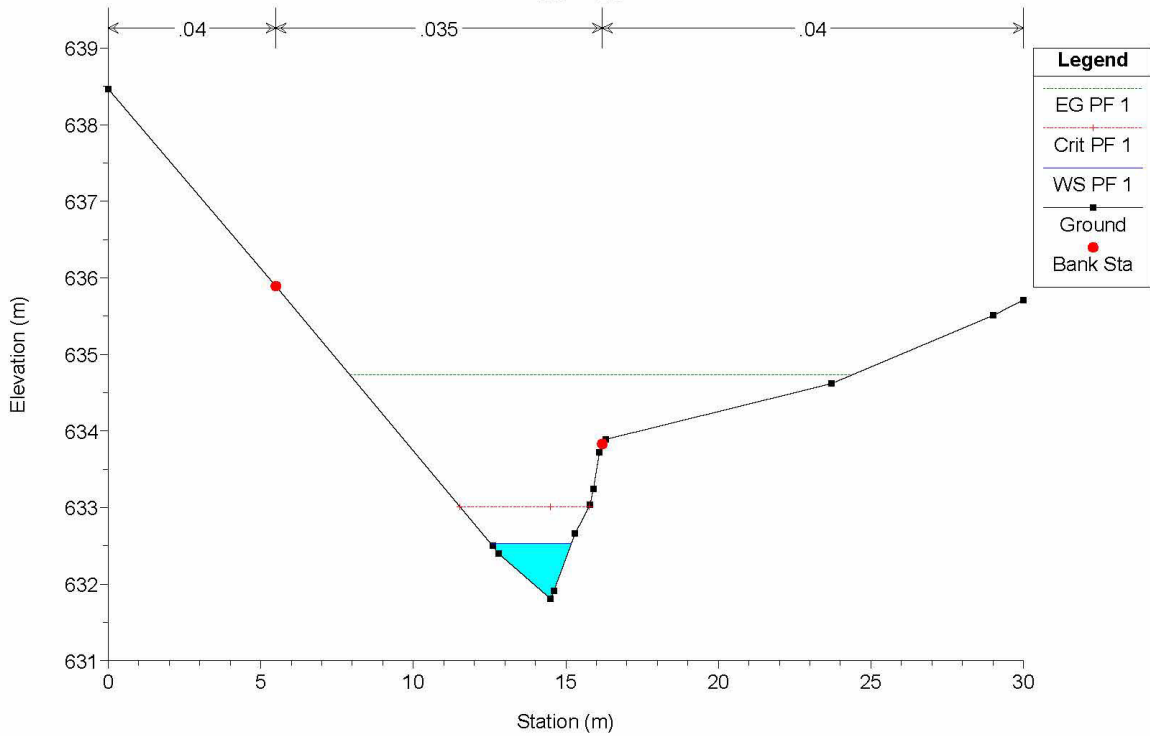




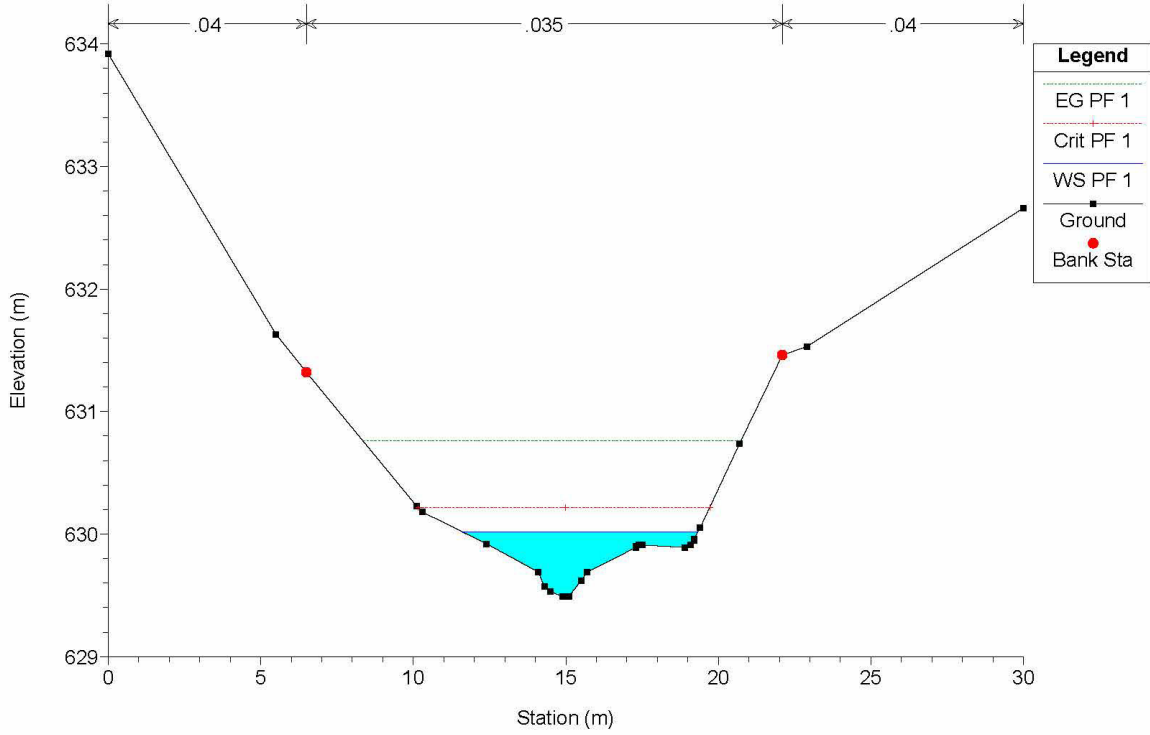
V.Barile Plan: AO 1/7/2021  
 Geom: VBarile\_AO  
 RS = 160



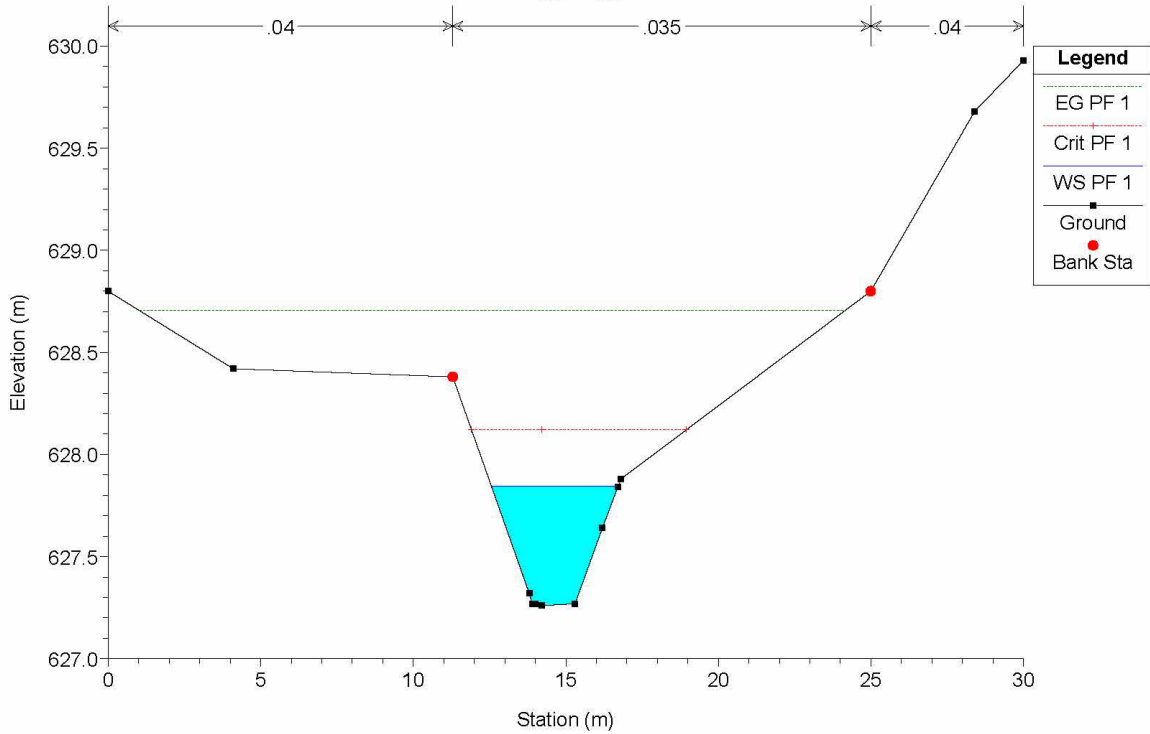
V.Barile Plan: AO 1/7/2021  
 Geom: VBarile\_AO  
 RS = 140



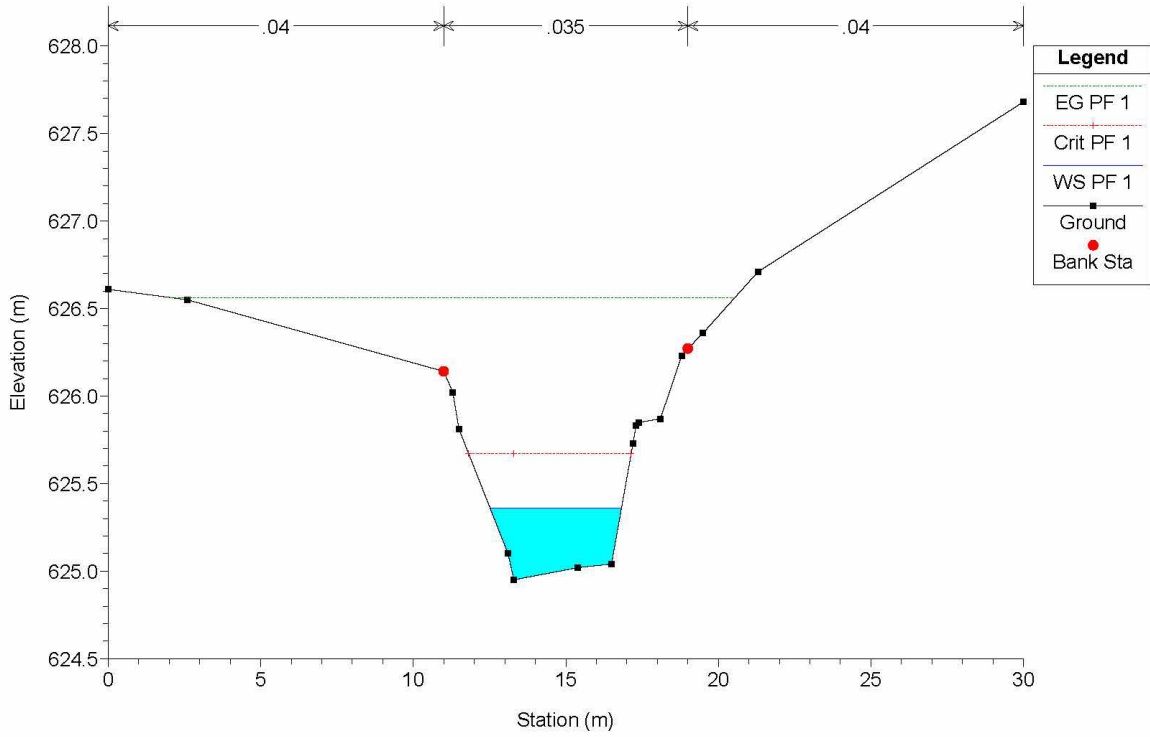
V.Barile Plan: AO 1/7/2021  
 Geom: VBarile\_AO  
 RS = 120



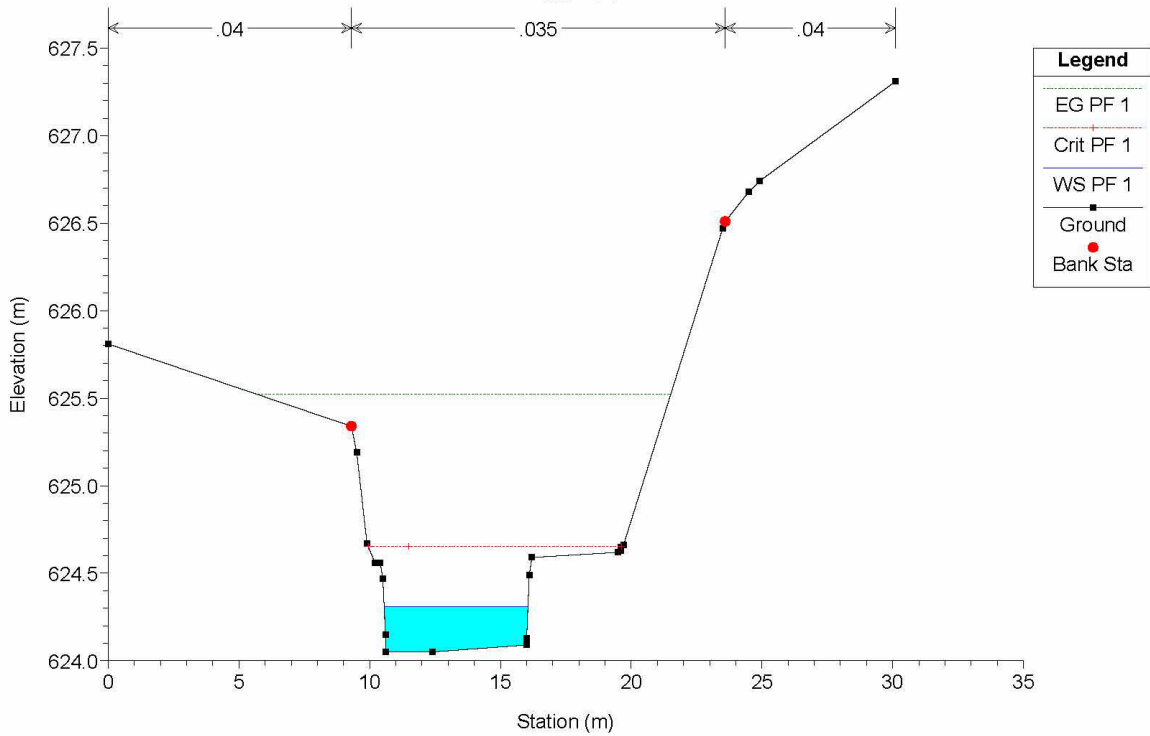
V.Barile Plan: AO 1/7/2021  
 Geom: VBarile\_AO  
 RS = 100



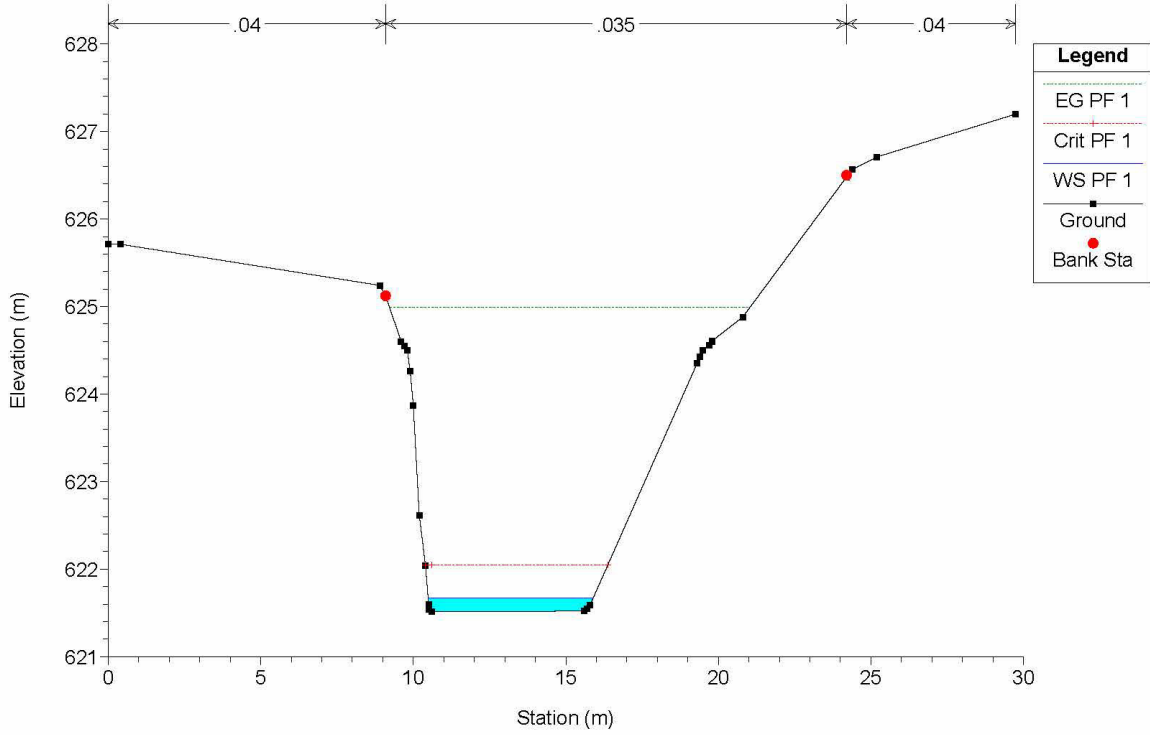
V.Barile Plan: AO 1/7/2021  
Geom: VBarile\_AO  
RS = 80



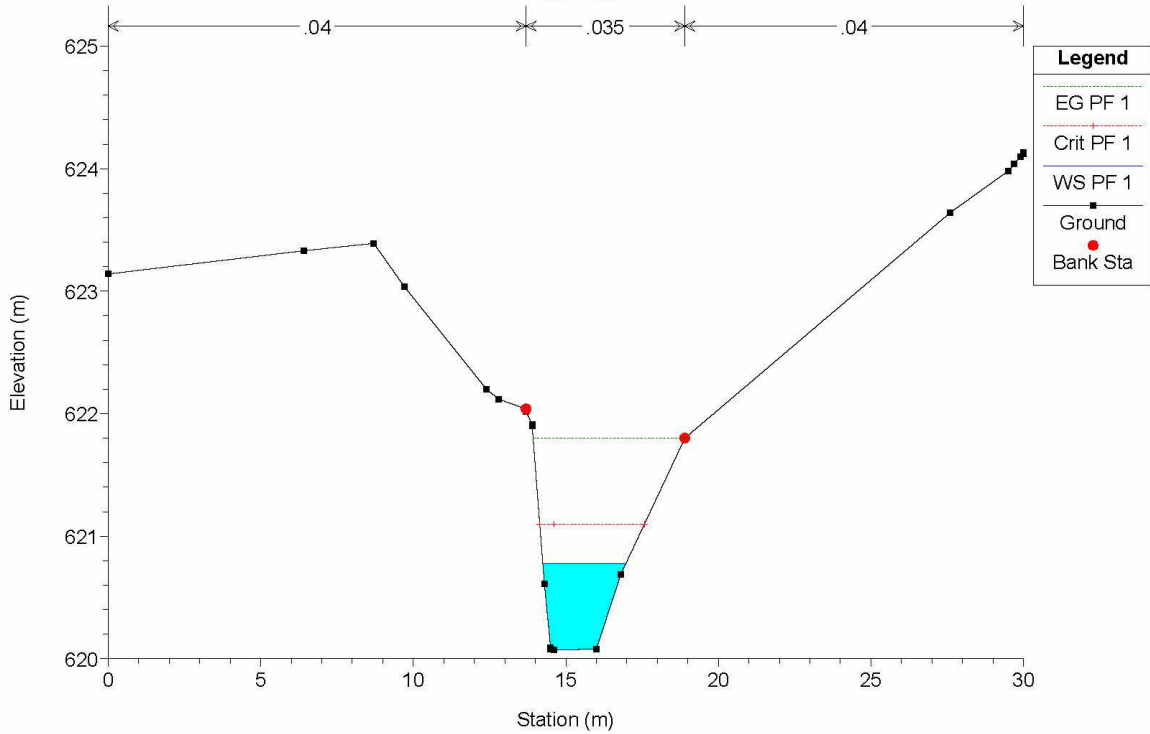
V.Barile Plan: AO 1/7/2021  
Geom: VBarile\_AO  
RS = 74



V.Barile Plan: AO 1/7/2021  
Geom: VBarile\_AO  
RS = 73



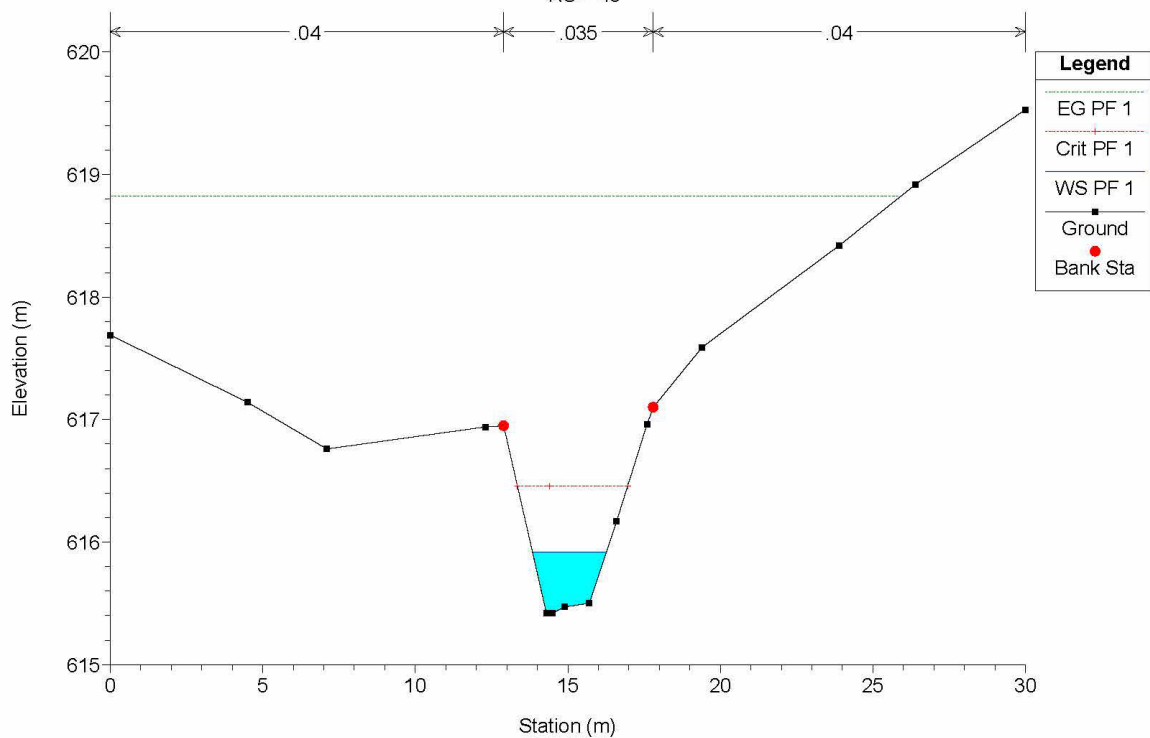
V.Barile Plan: AO 1/7/2021  
Geom: VBarile\_AO  
RS = 60



V.Barile Plan: AO 1/7/2021

Geom: VBarile\_AO

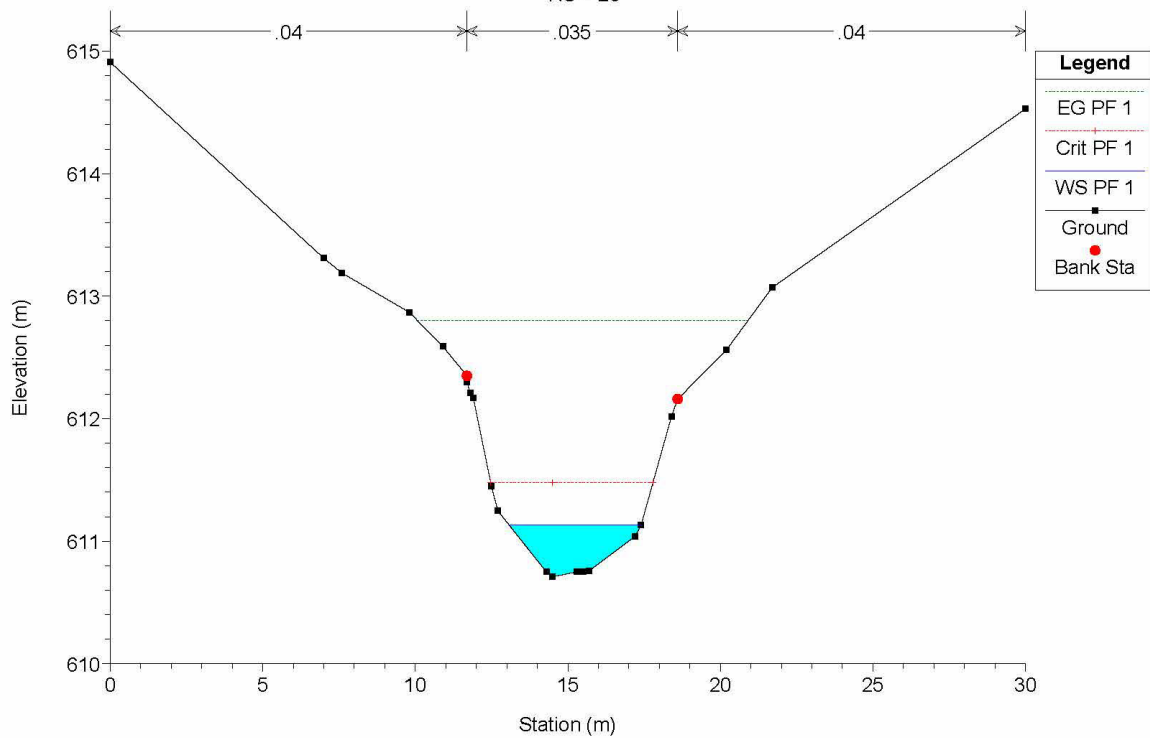
RS = 40



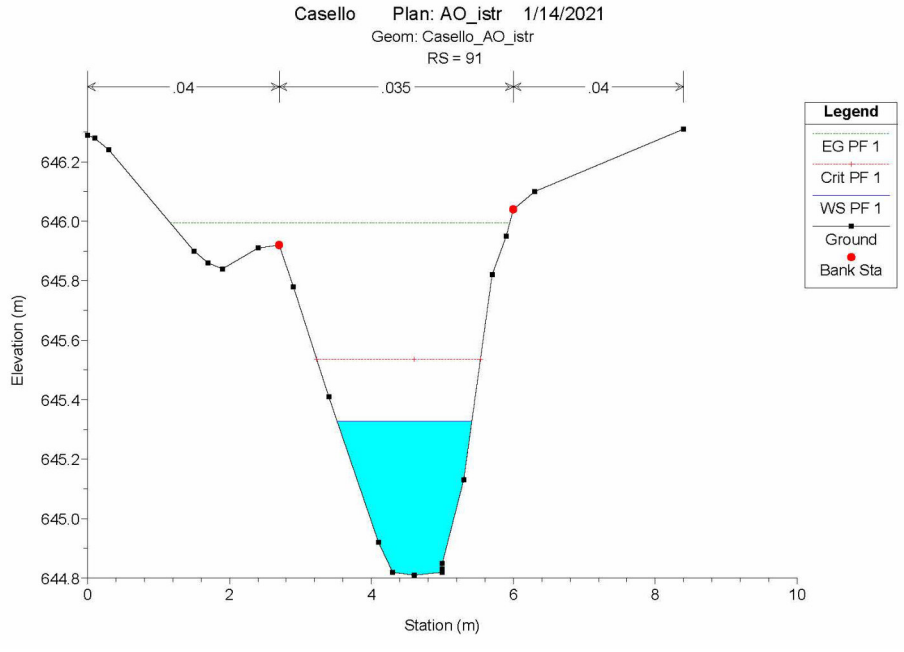
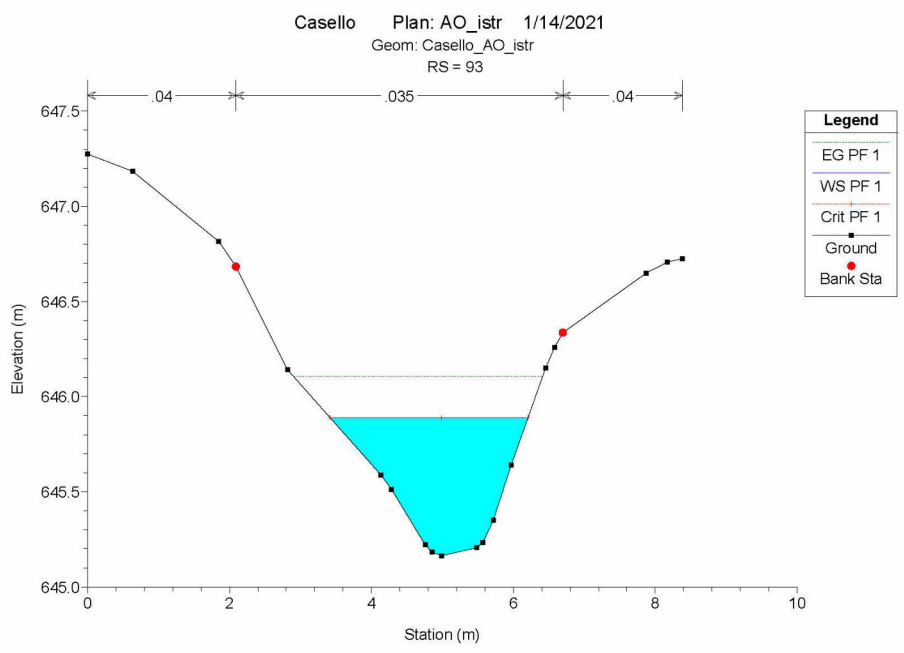
V.Barile Plan: AO 1/7/2021

Geom: VBarile\_AO

RS = 20

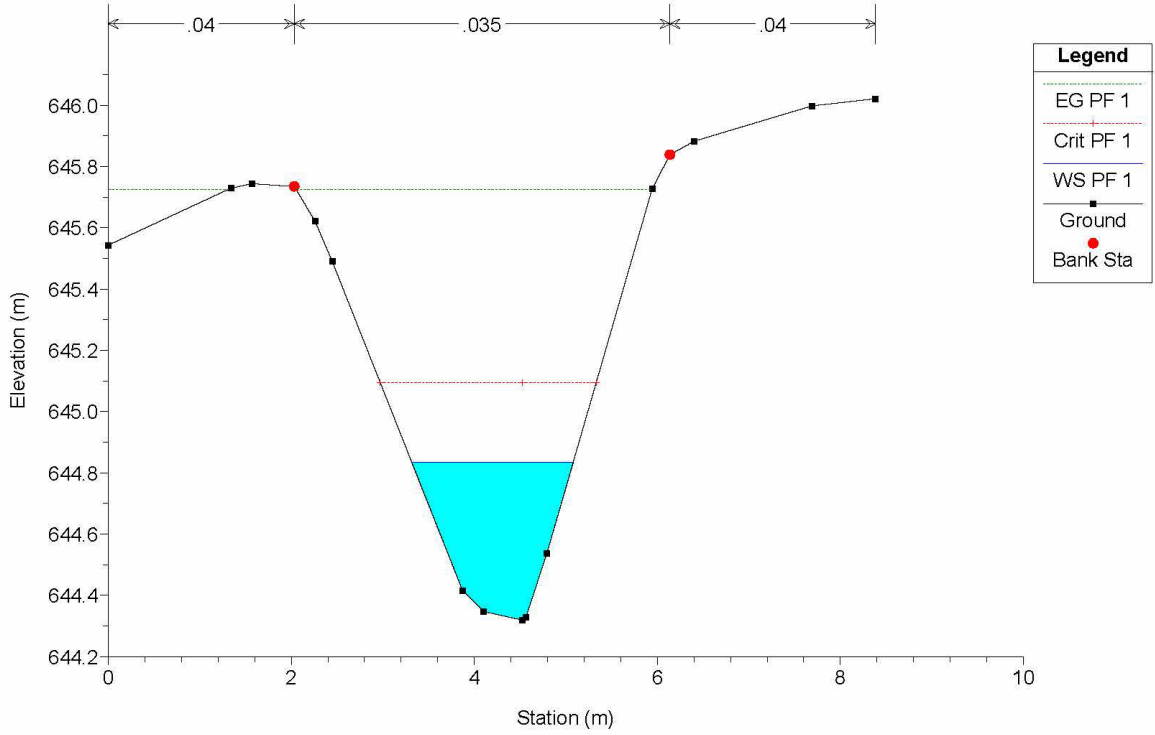


**Elaborazioni Hec-Ras**  
**Asse Casello**  
**Portata di calcolo  $Q_{200} = 2.46 \text{ m}^3/\text{s}$**   
**SEZIONI ANTE OPERAM**

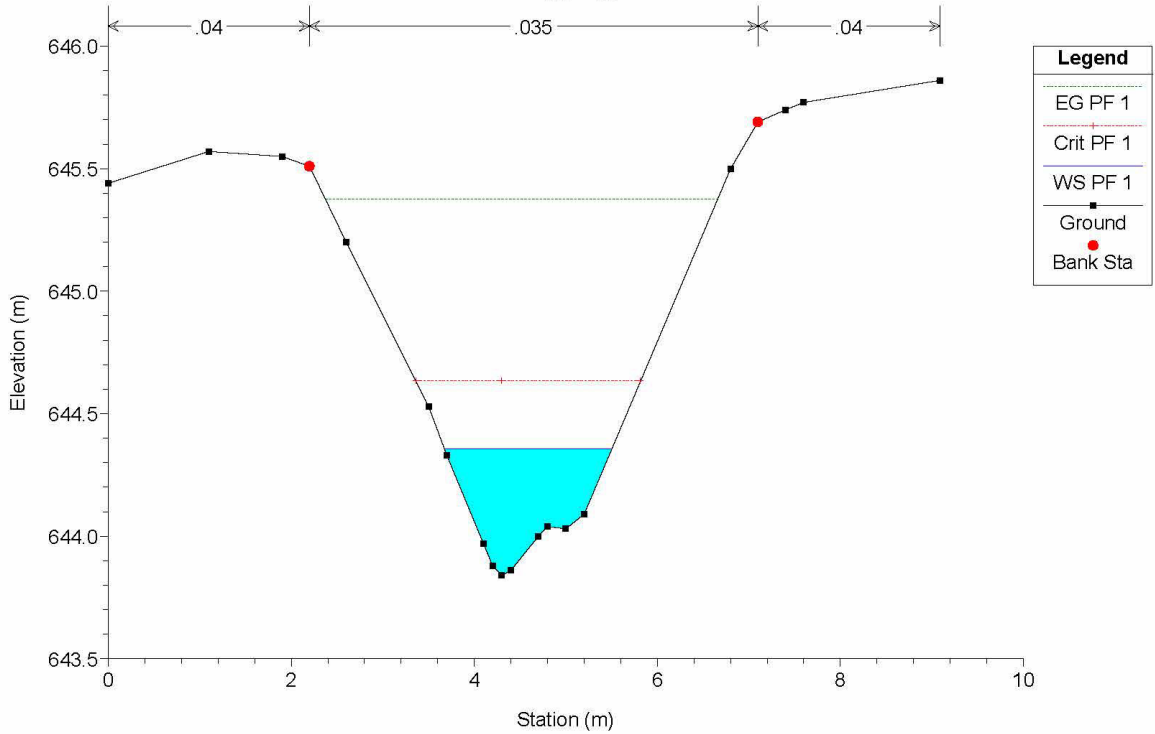




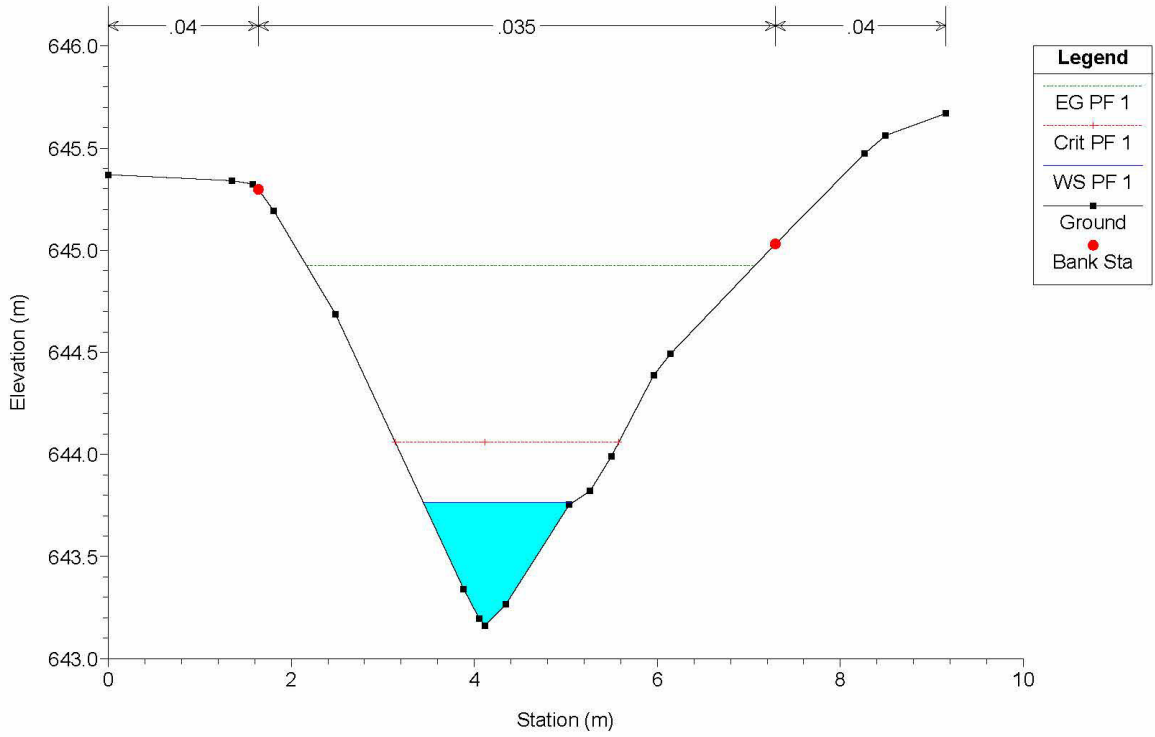
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_AO\_istr  
 RS = 88



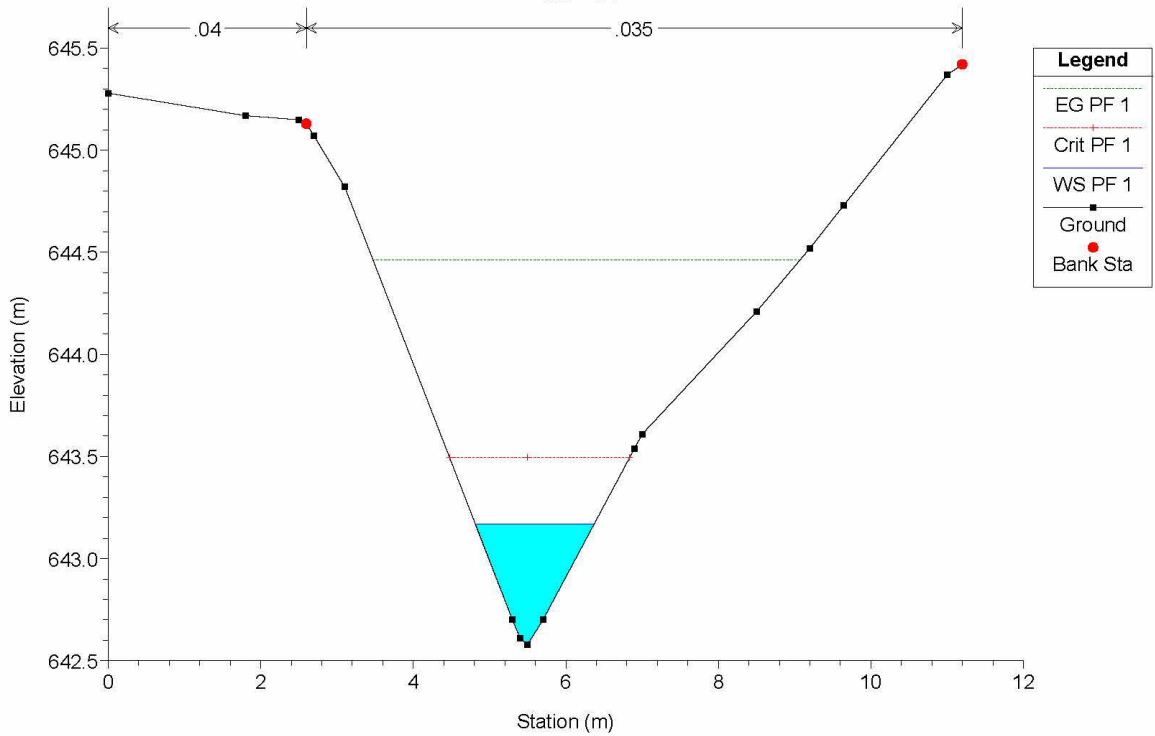
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_AO\_istr  
 RS = 86



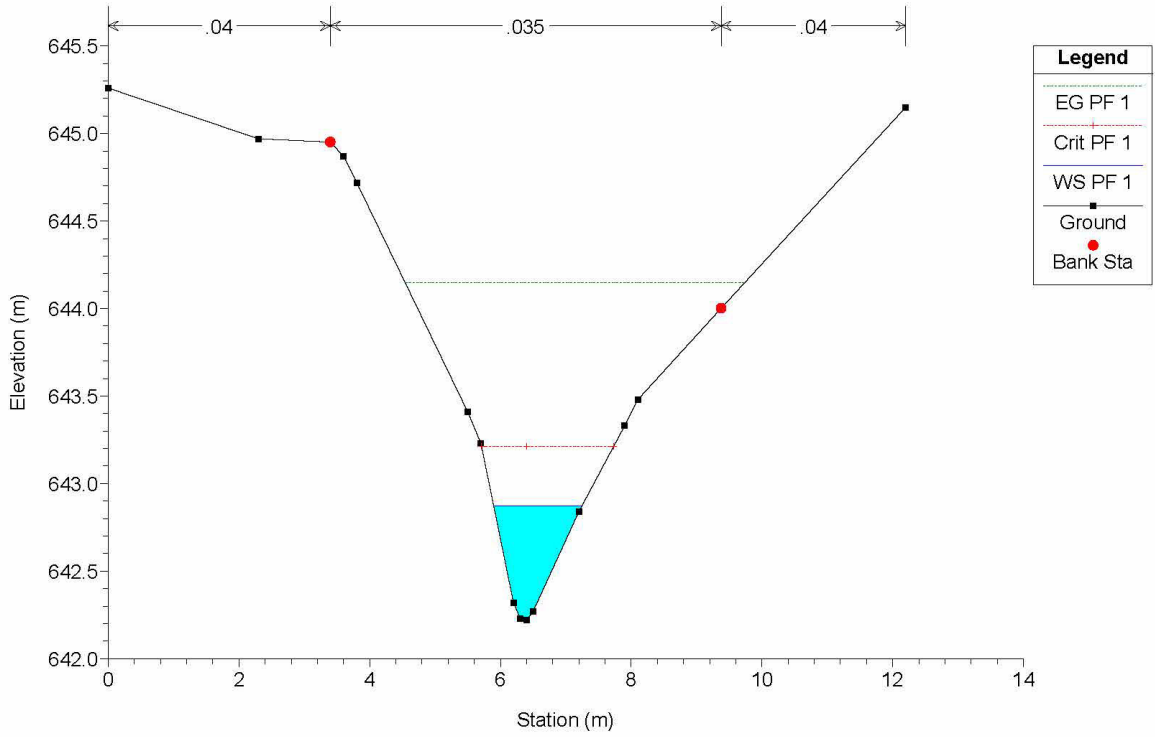
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_AO\_istr  
 RS = 83



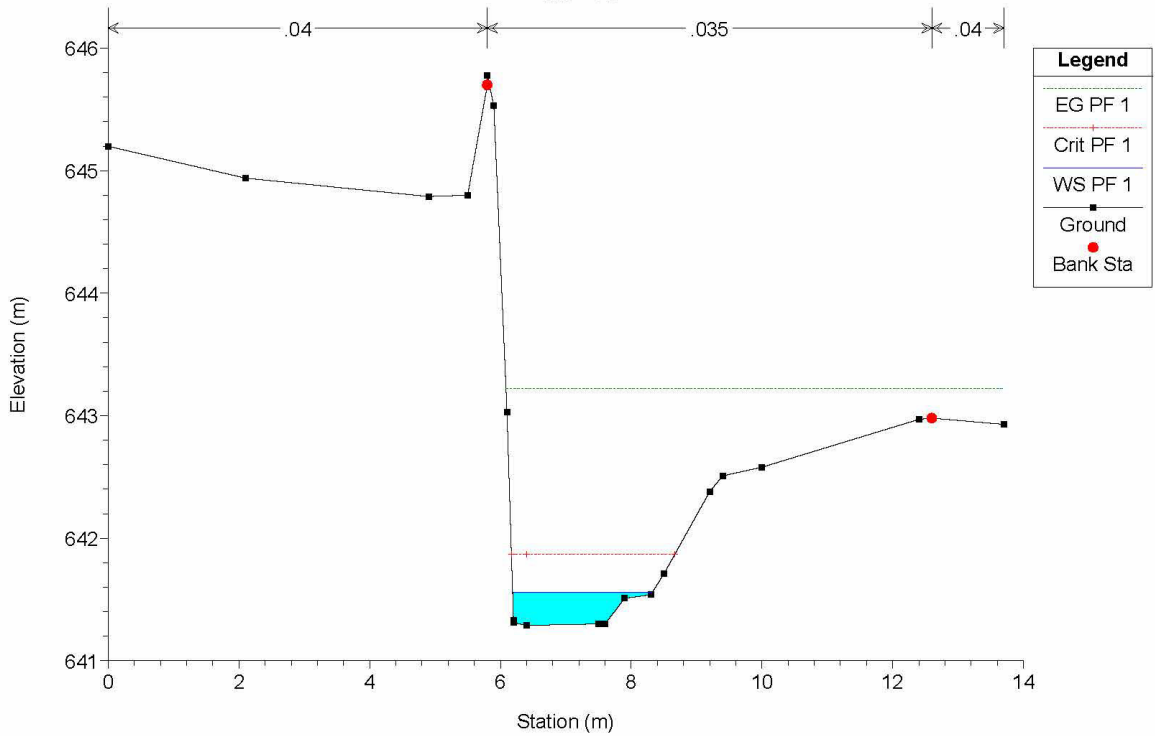
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_AO\_istr  
 RS = 81



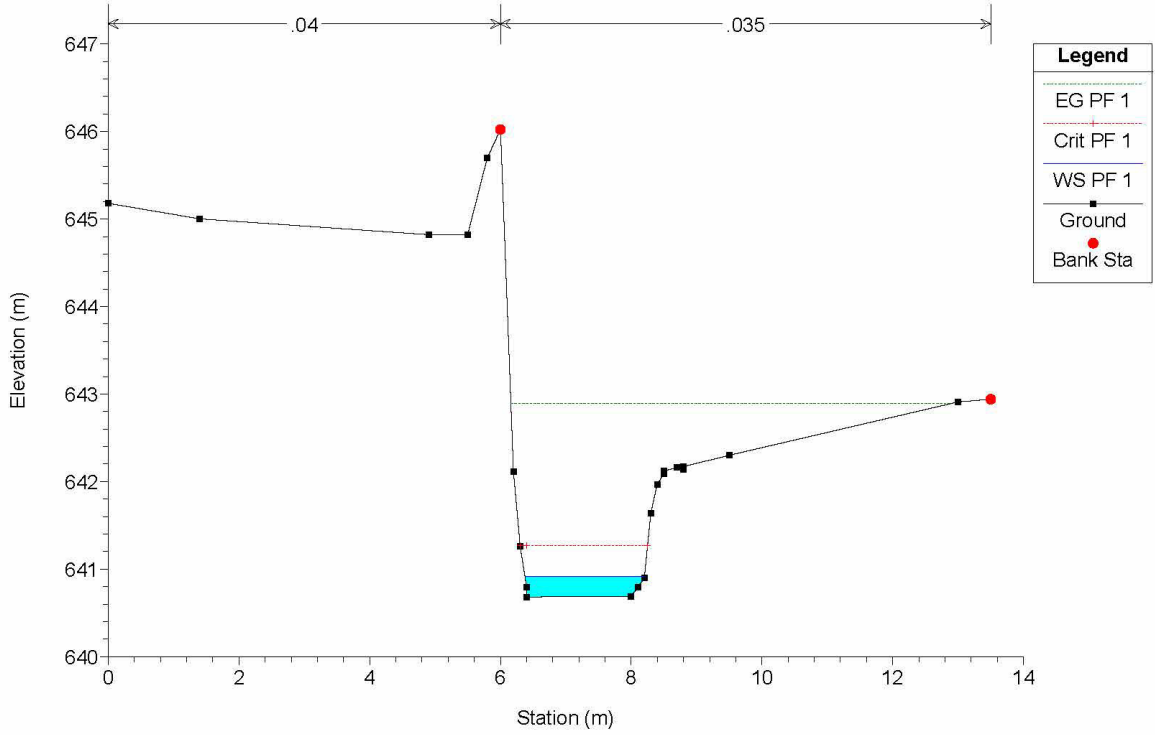
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_AO\_istr  
 RS = 79



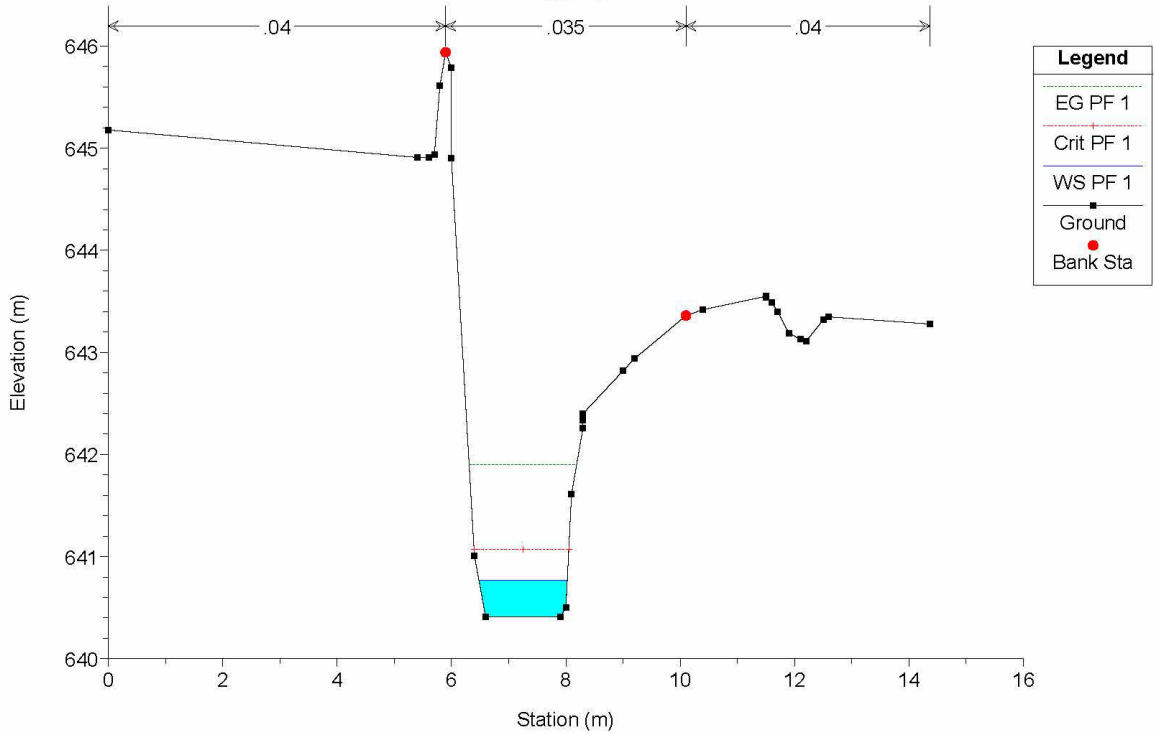
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_AO\_istr  
 RS = 76



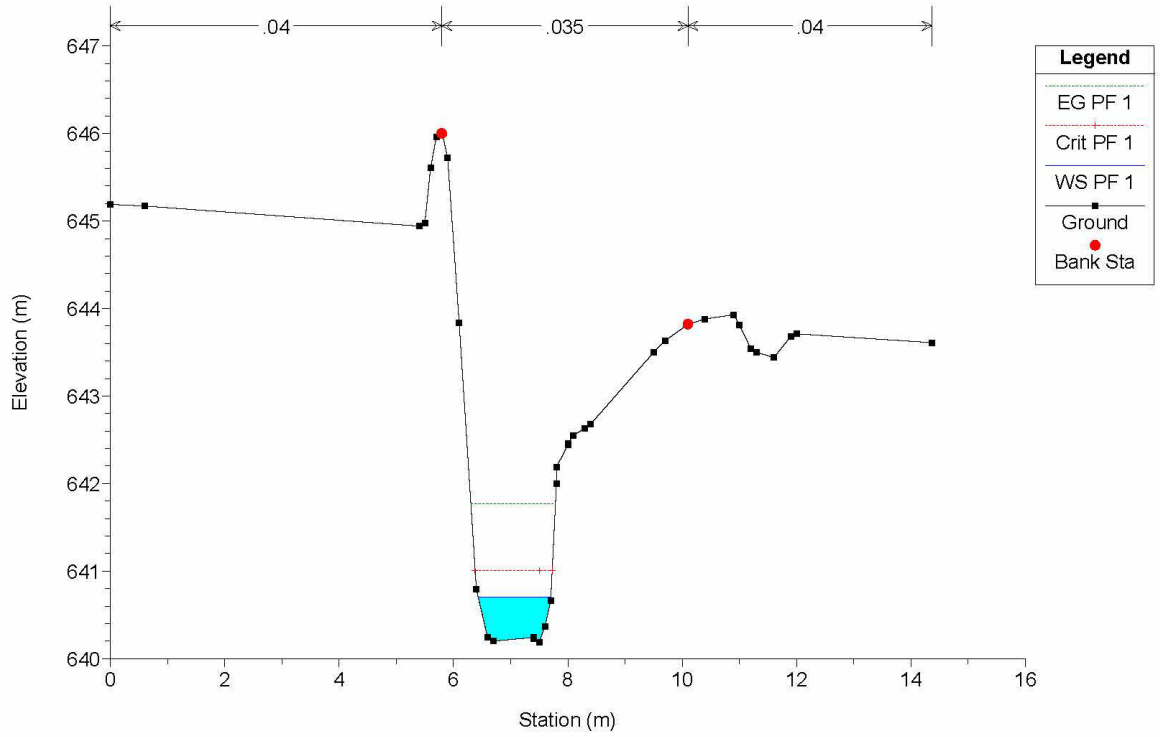
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_AO\_istr  
 RS = 75



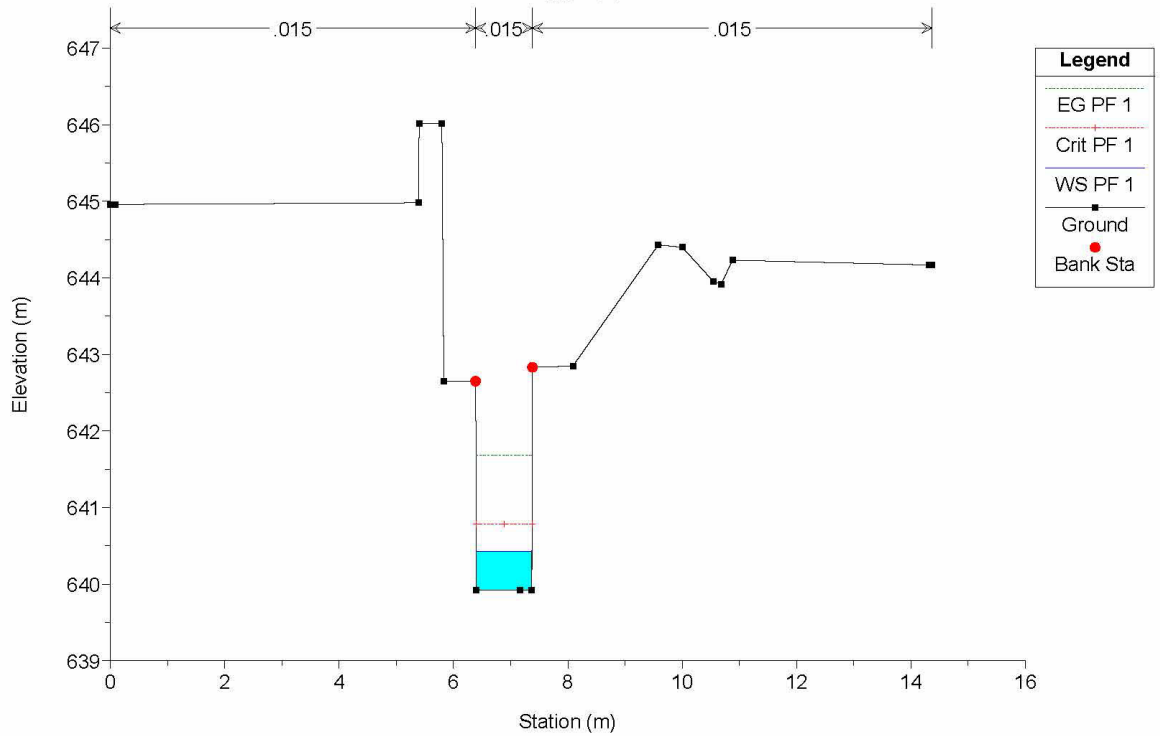
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_AO\_istr  
 RS = 72



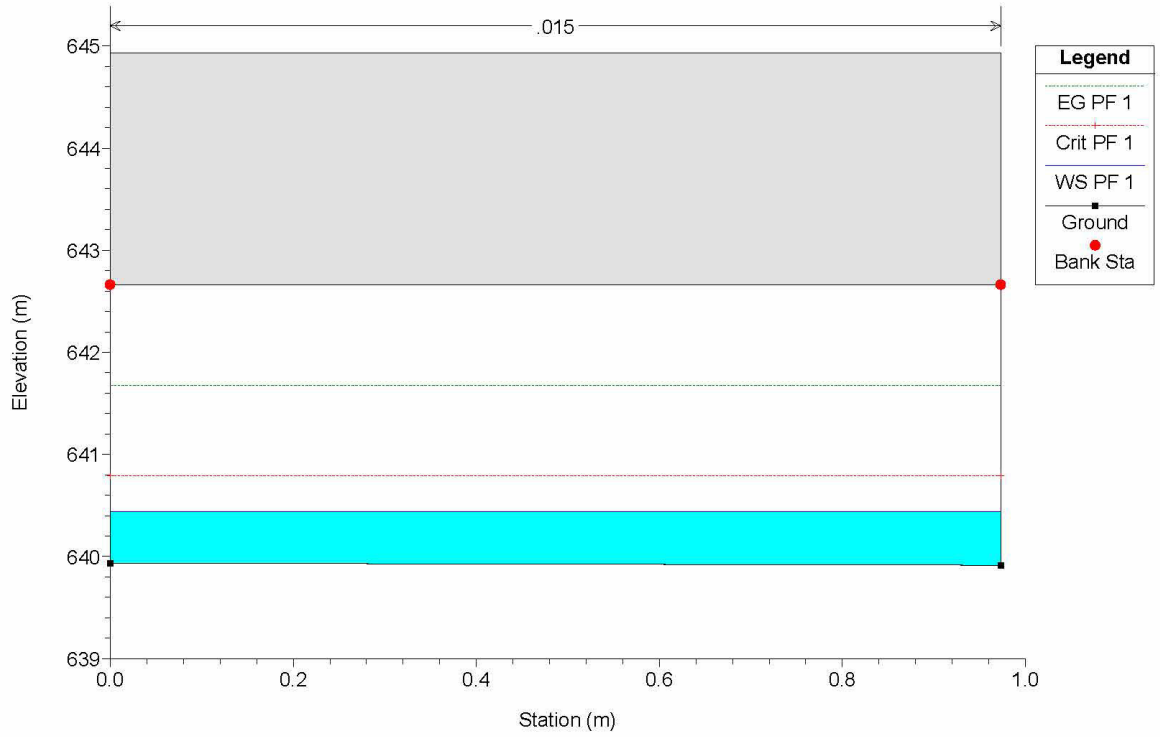
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_AO\_istr  
 RS = 71.6



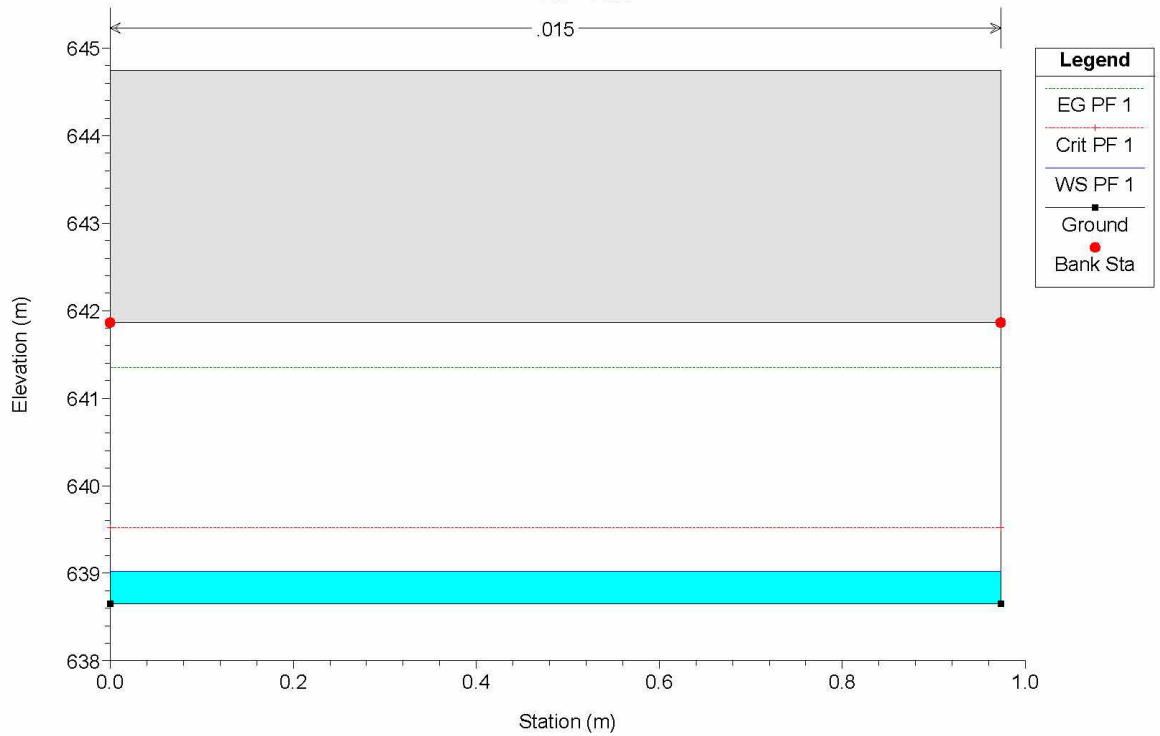
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_AO\_istr  
 RS = 71



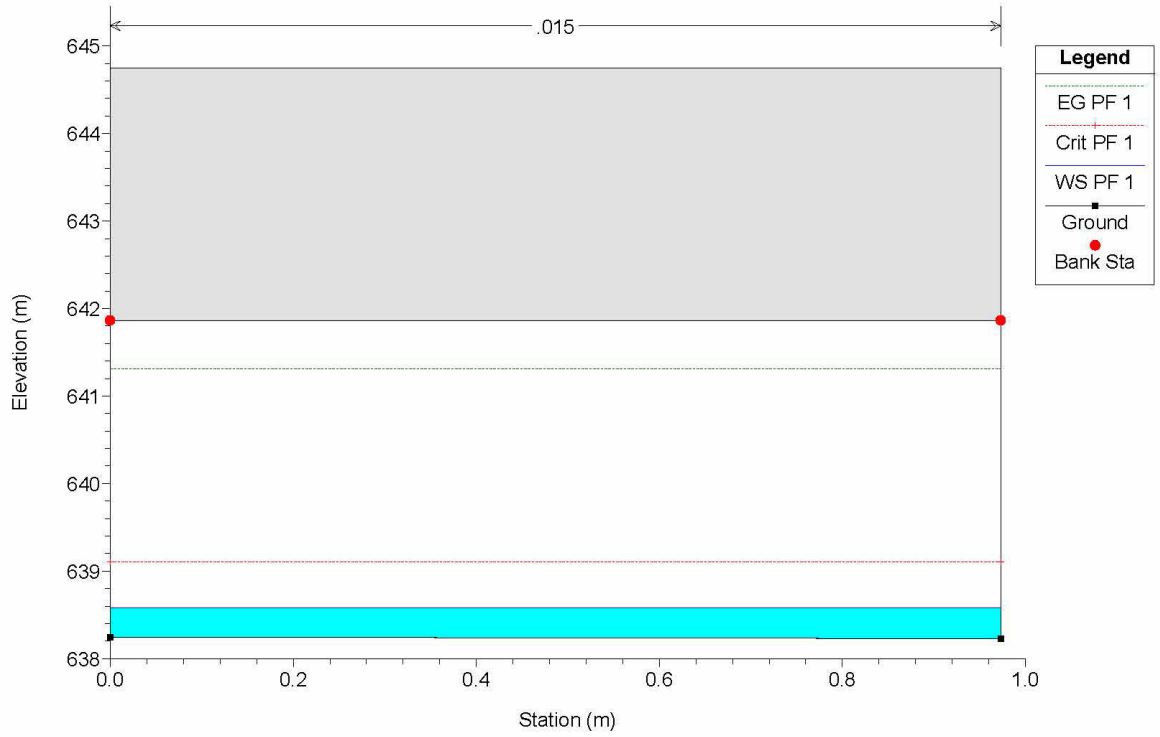
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_AO\_istr  
RS = 69.5



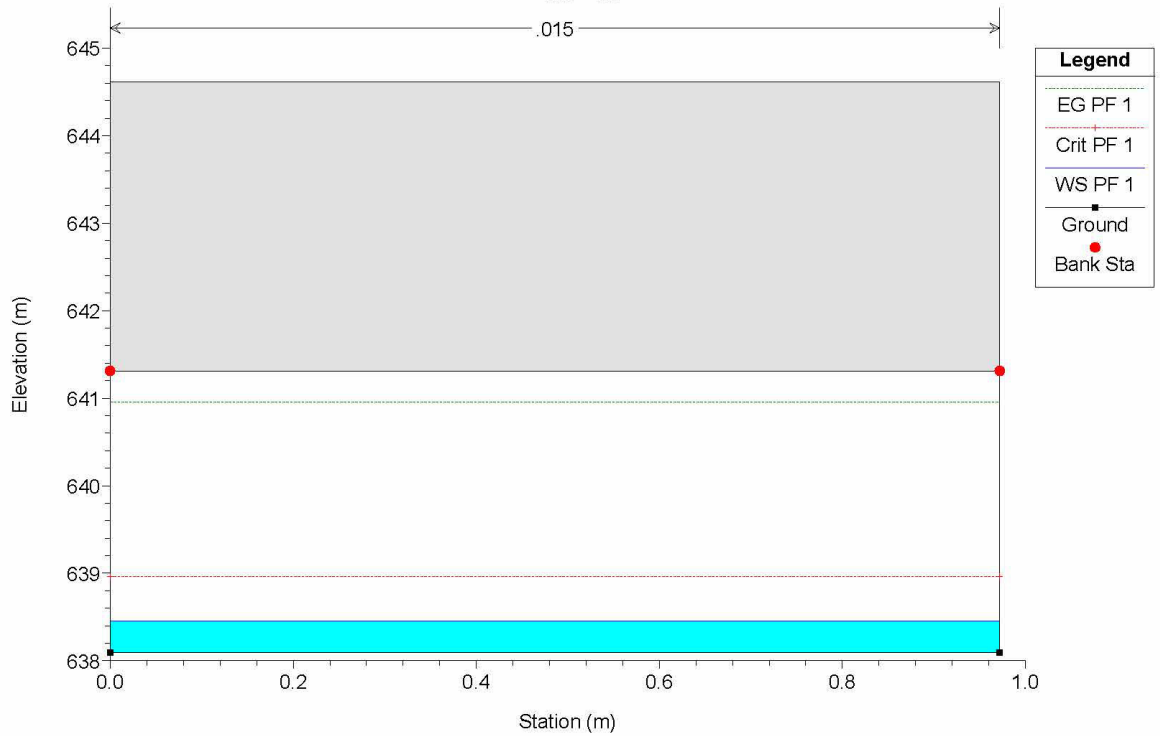
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_AO\_istr  
RS = 65.2



Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_AO\_istr  
RS = 65

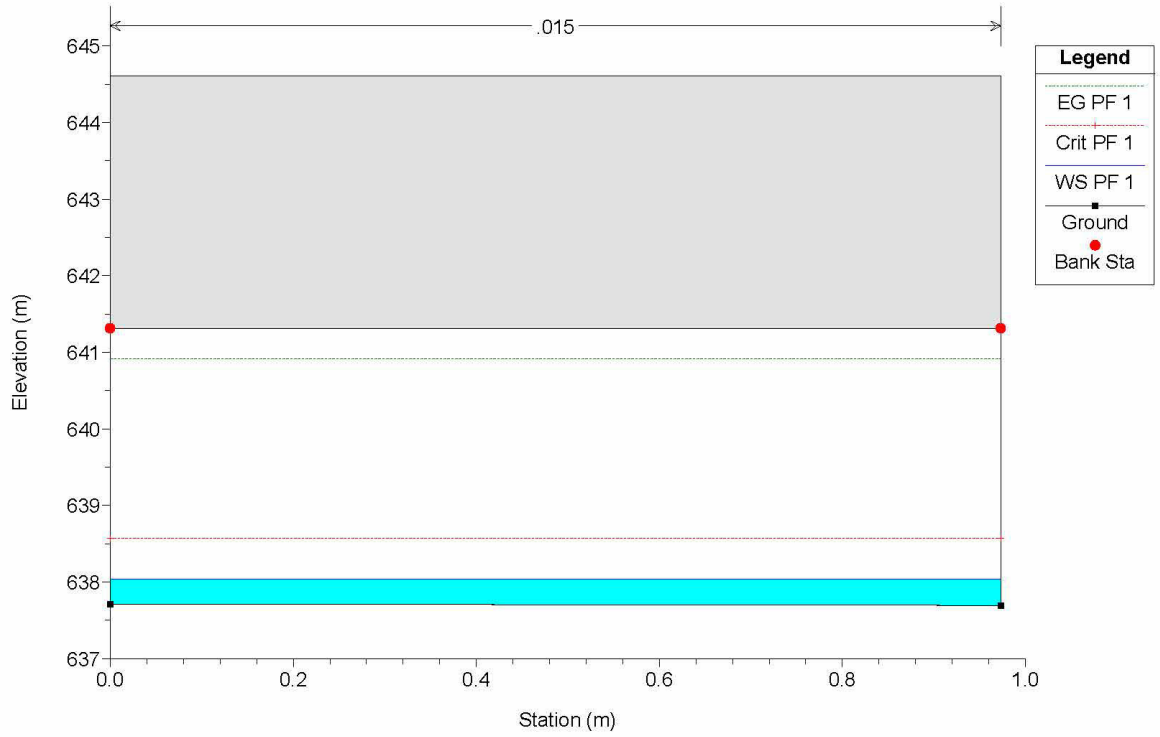


Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_AO\_istr  
RS = 63

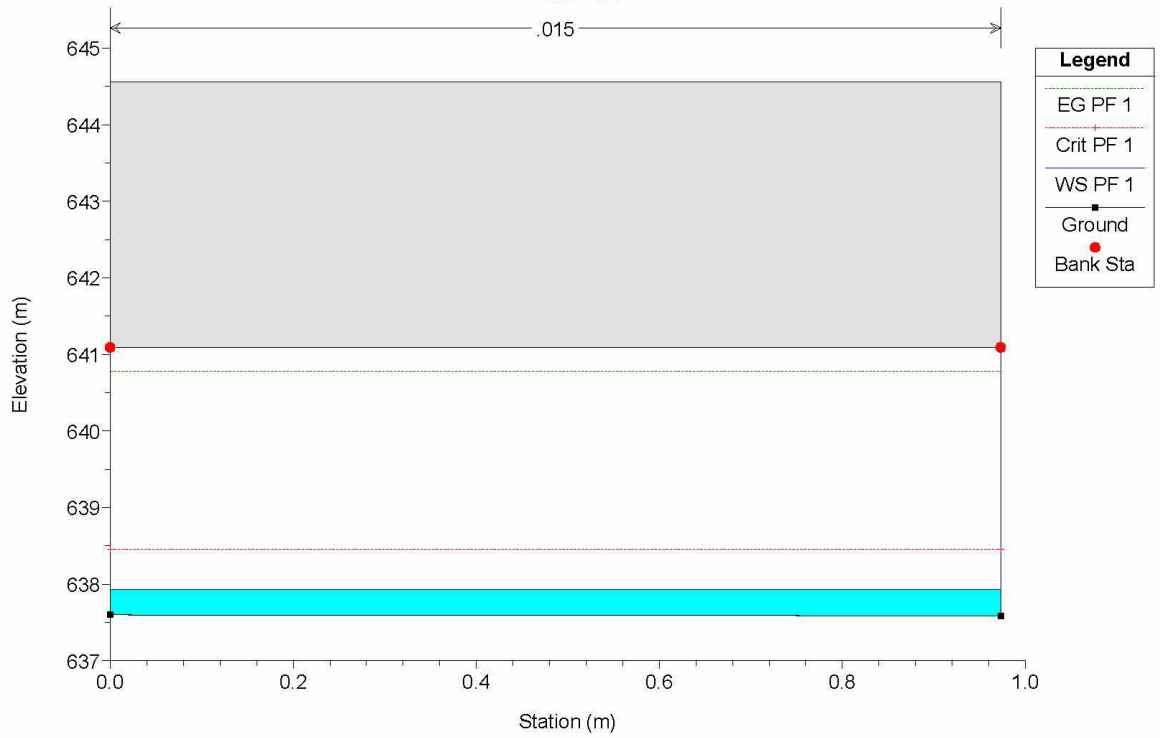




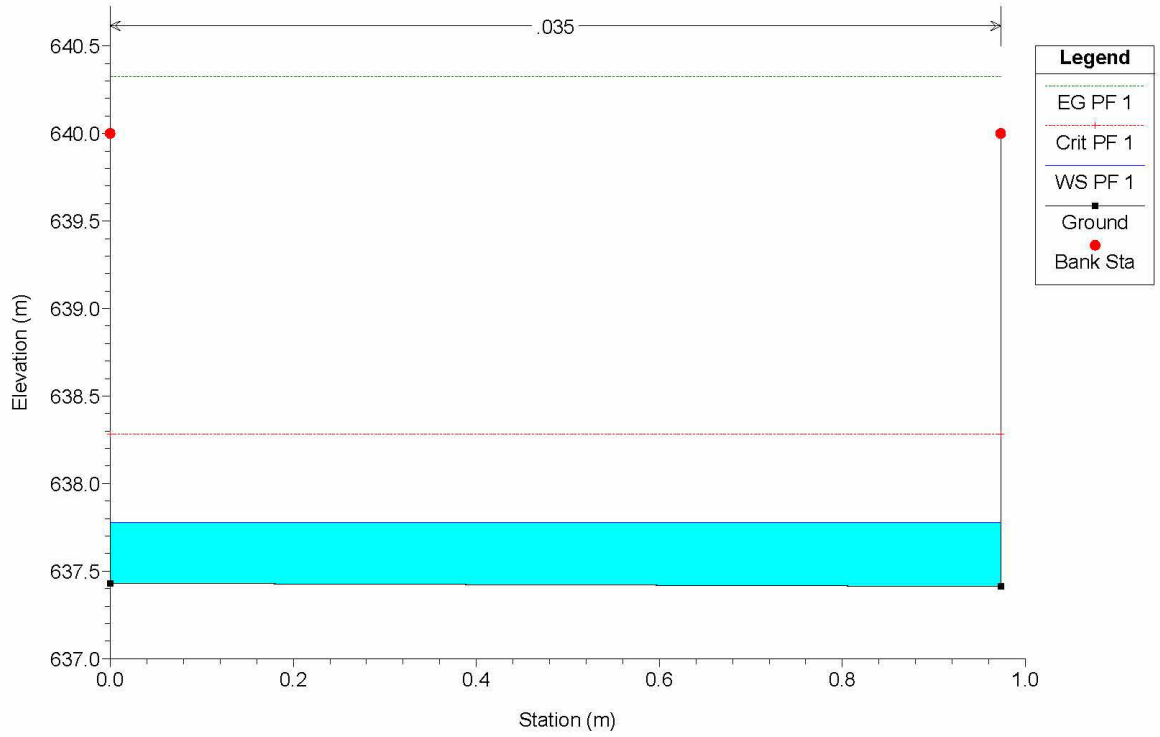
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_AO\_istr  
RS = 62.9



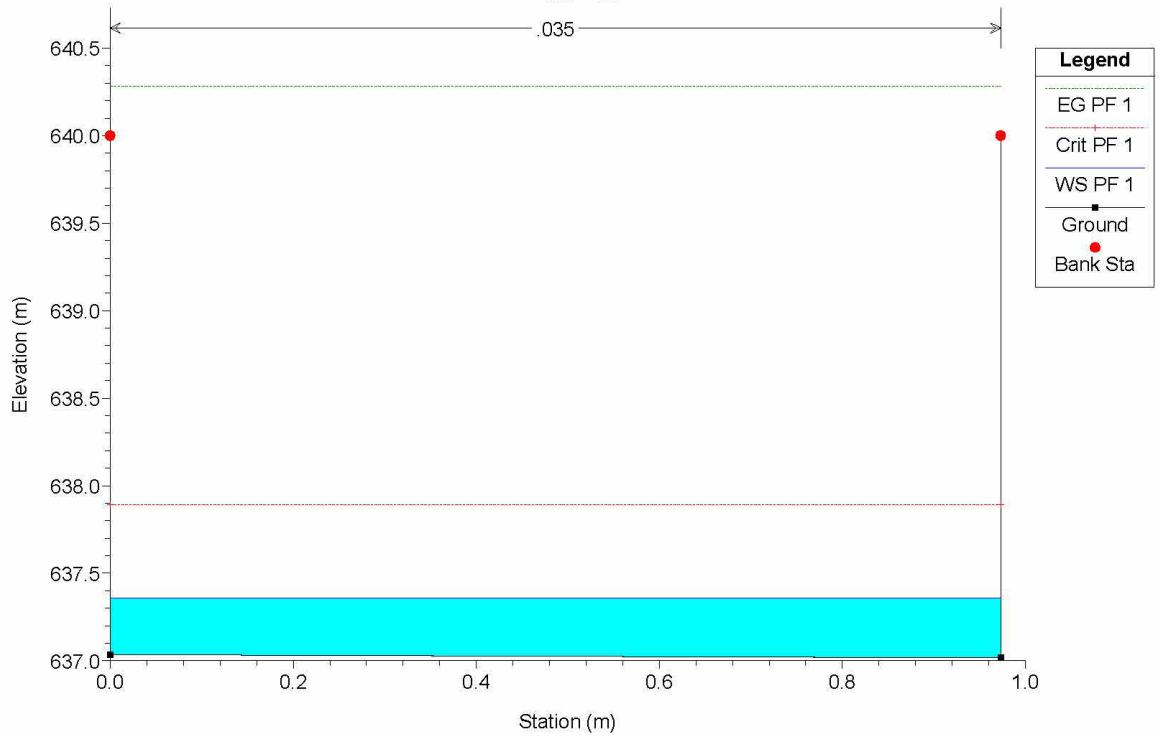
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_AO\_istr  
RS = 61



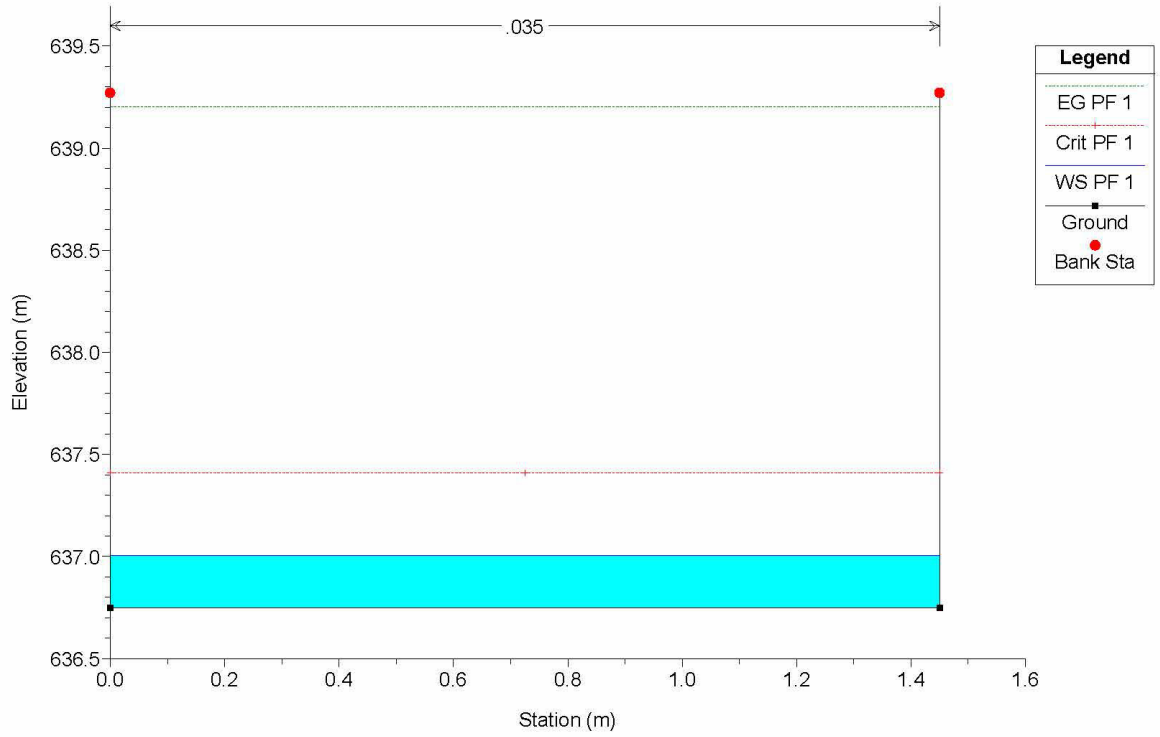
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_AO\_istr  
RS = 59.1



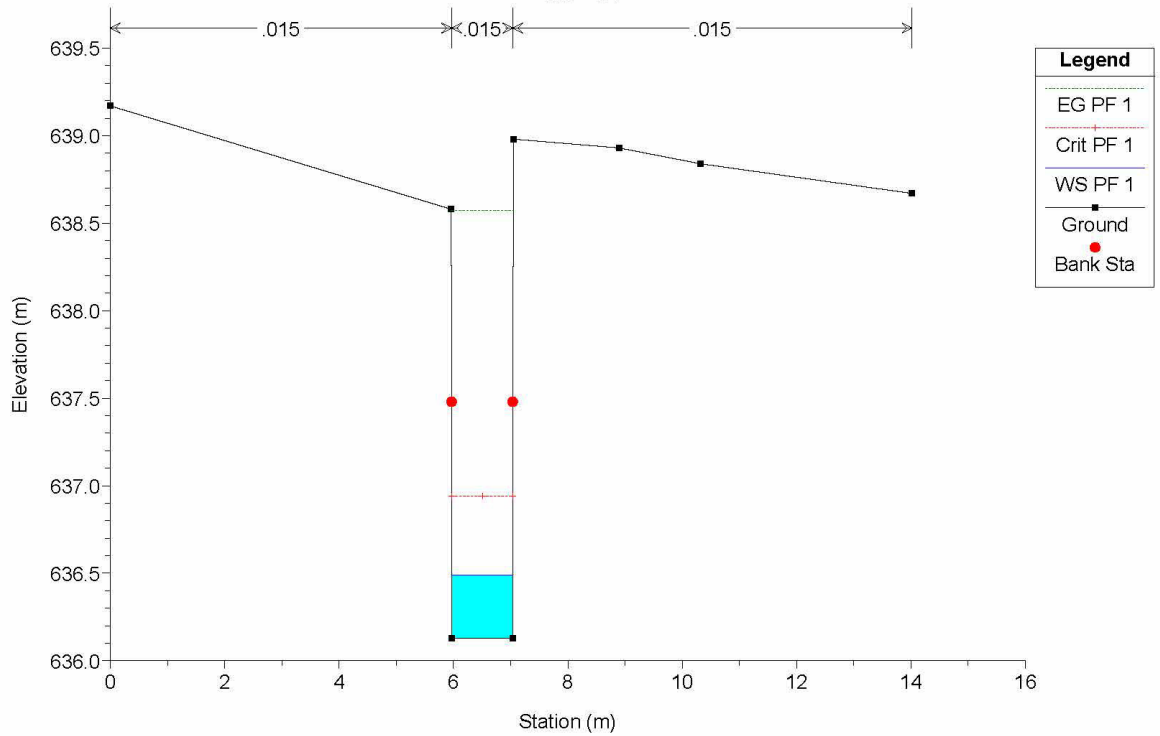
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_AO\_istr  
RS = 59



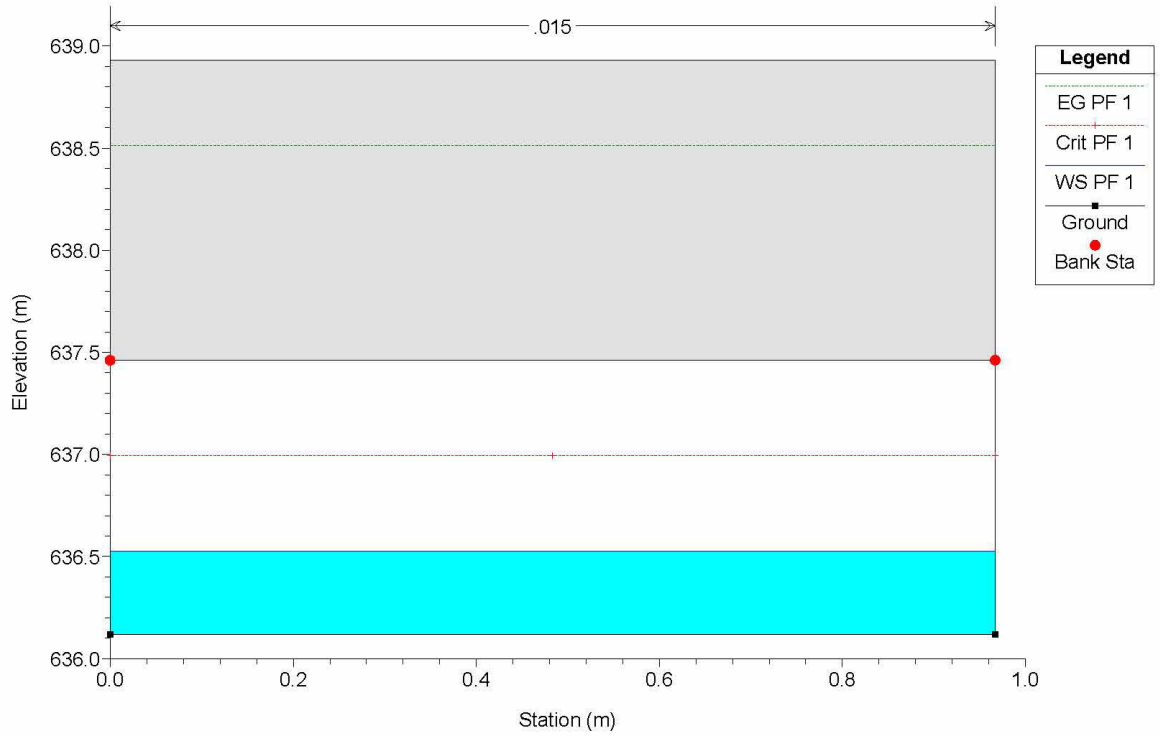
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_AO\_istr  
 RS = 58



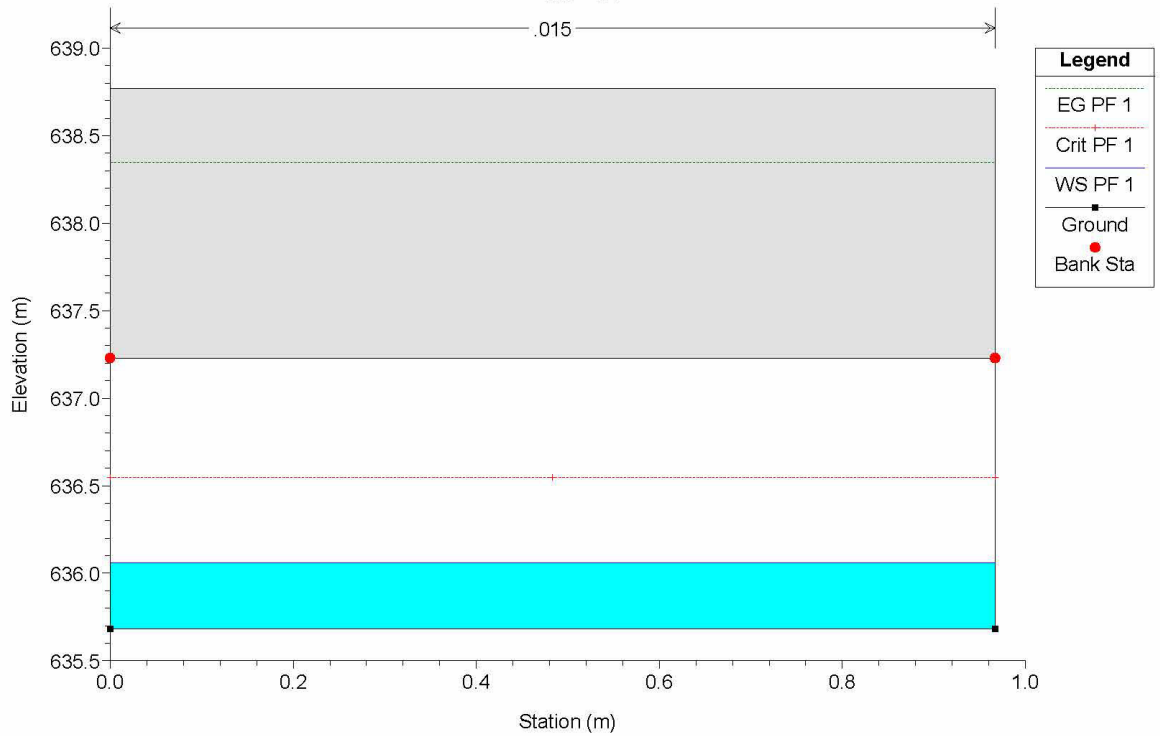
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_AO\_istr  
 RS = 54



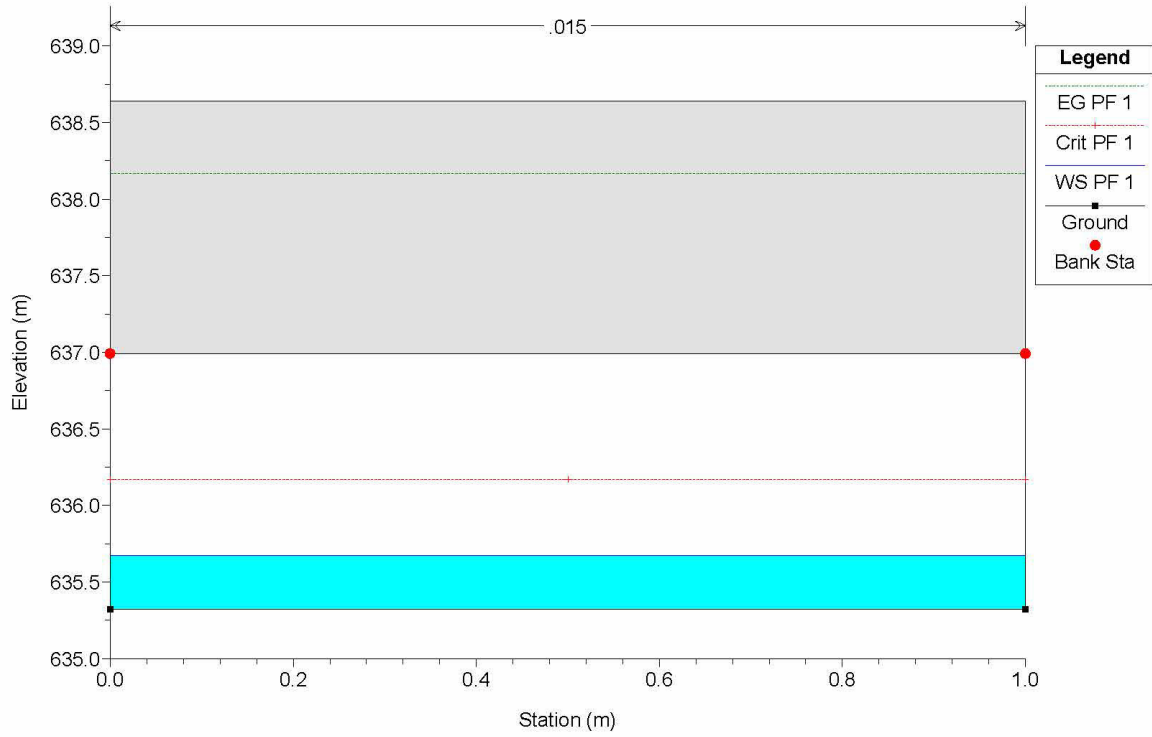
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_AO\_istr  
RS = 53



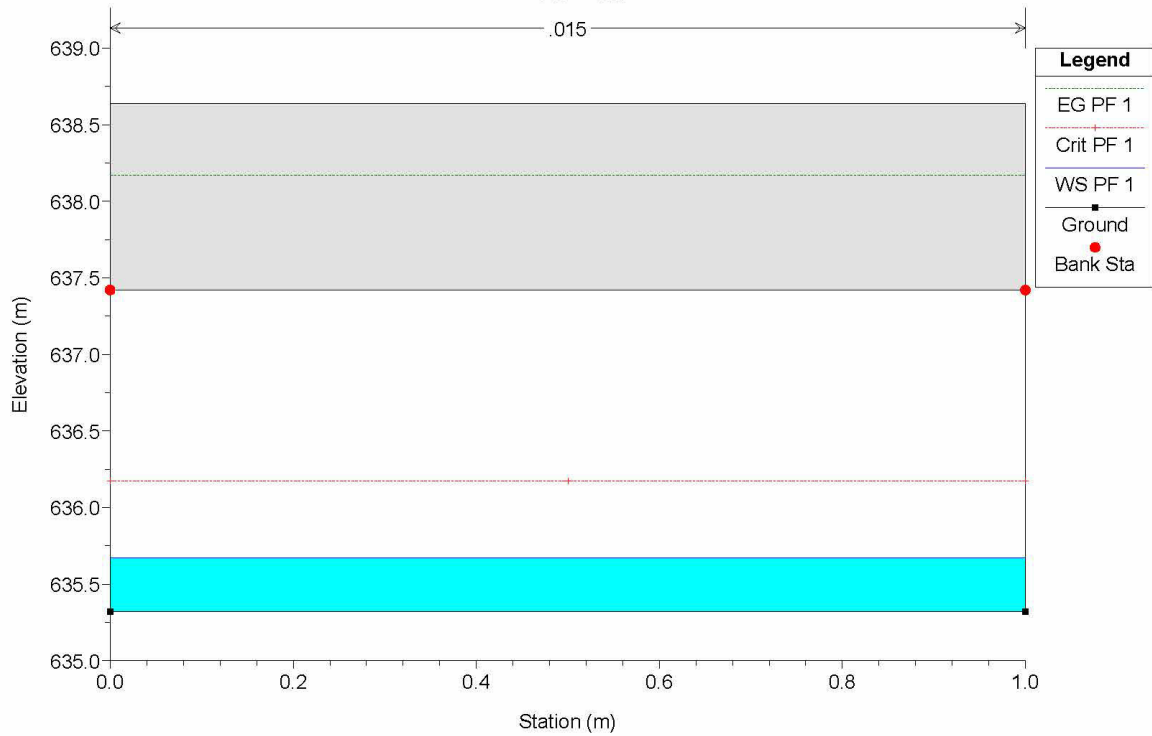
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_AO\_istr  
RS = 51



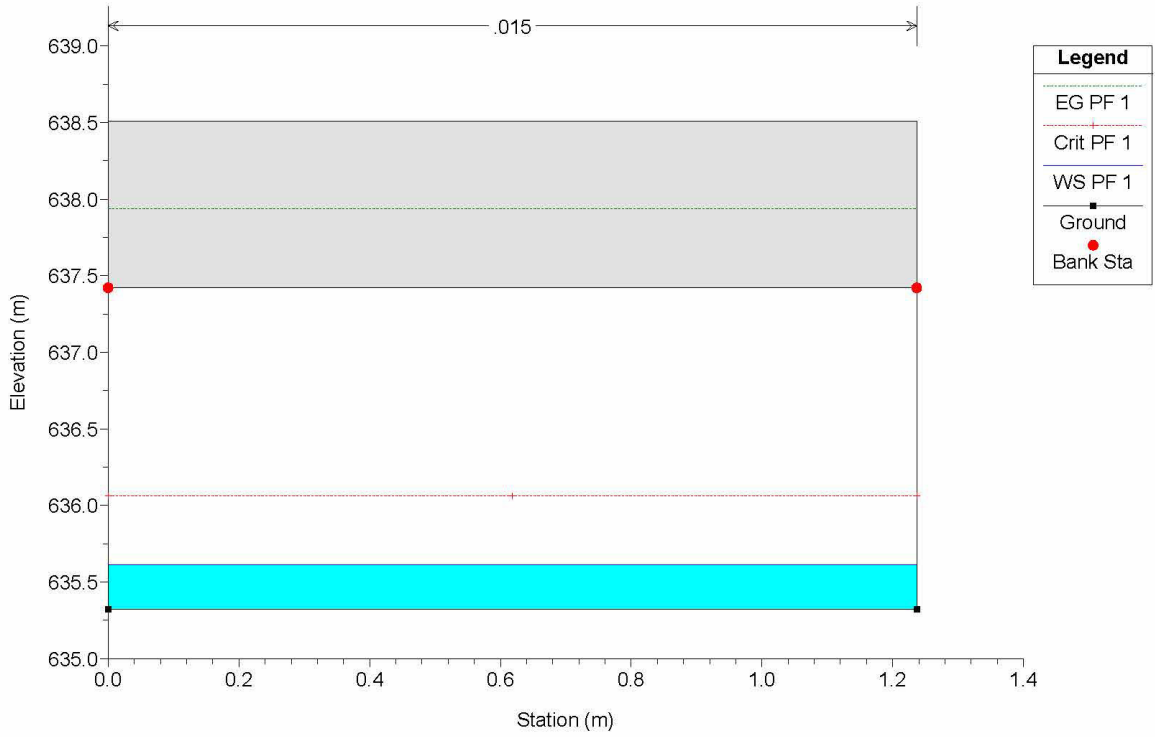
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_AO\_istr  
RS = 49



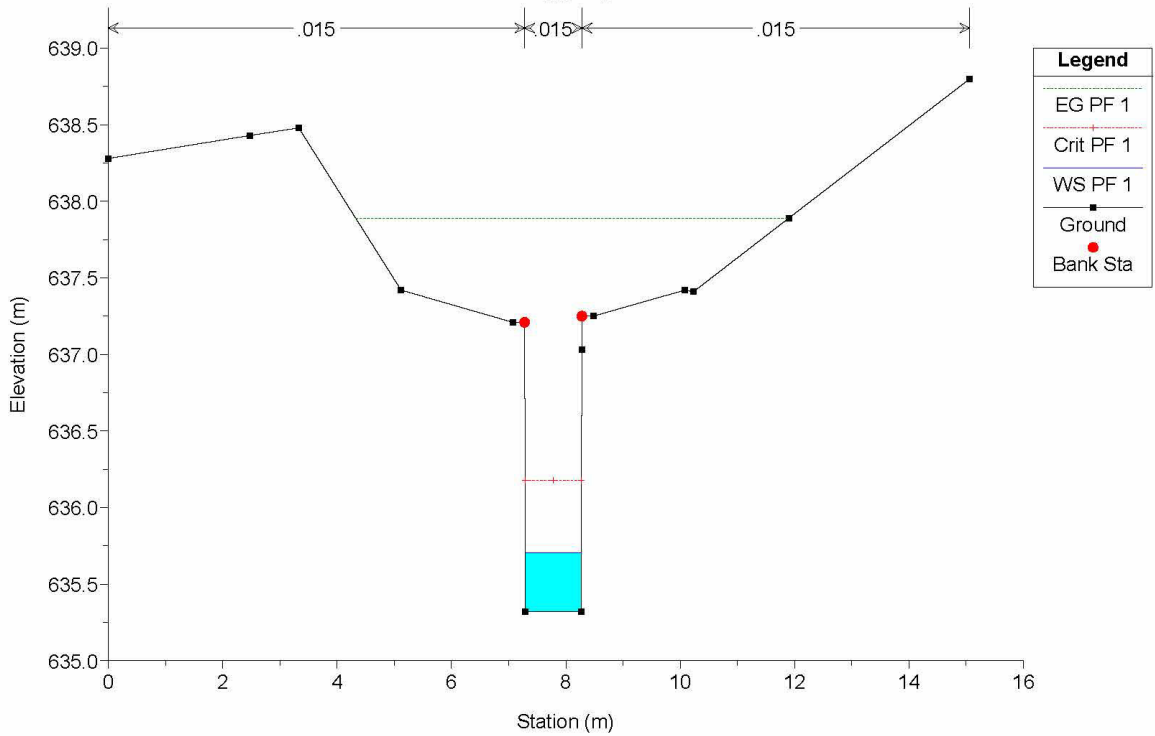
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_AO\_istr  
RS = 48.9



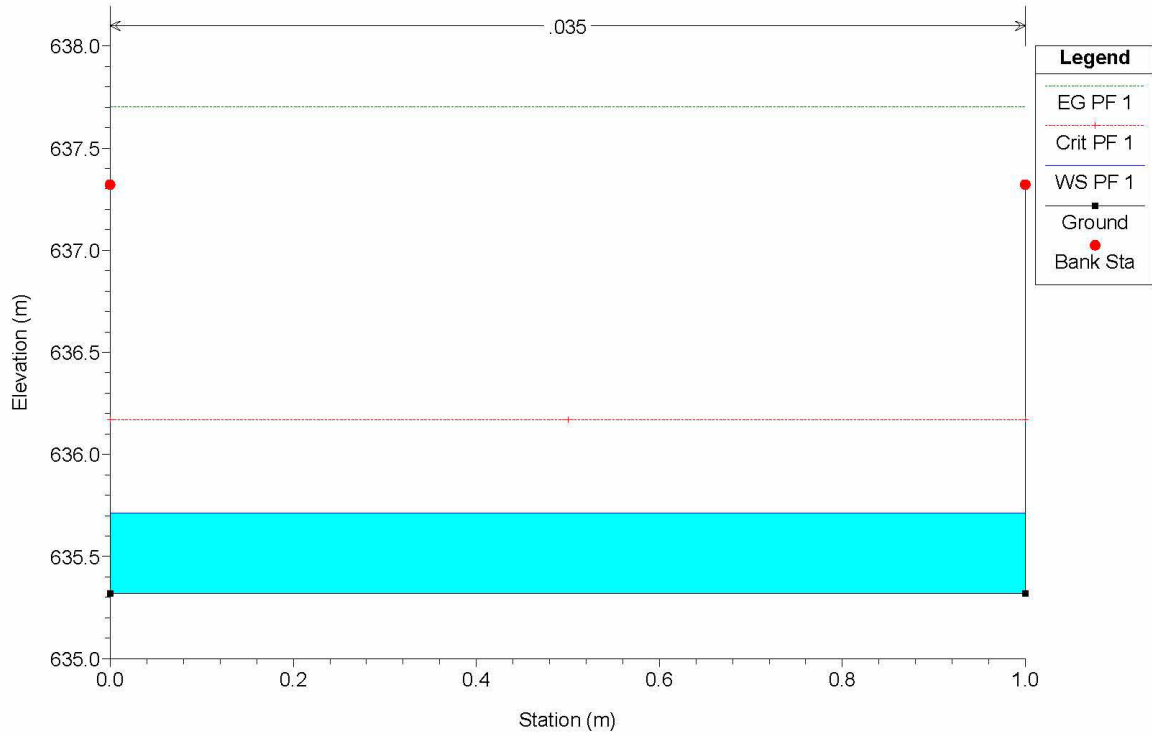
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_AO\_istr  
 RS = 47.4



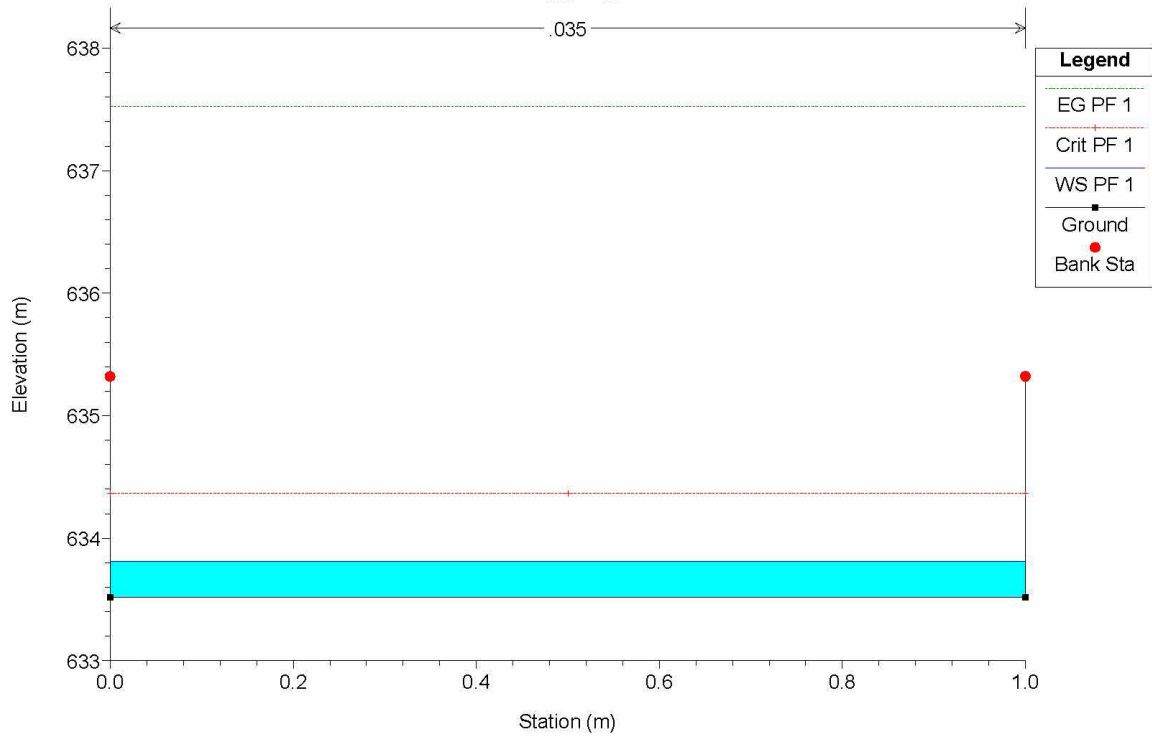
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_AO\_istr  
 RS = 47



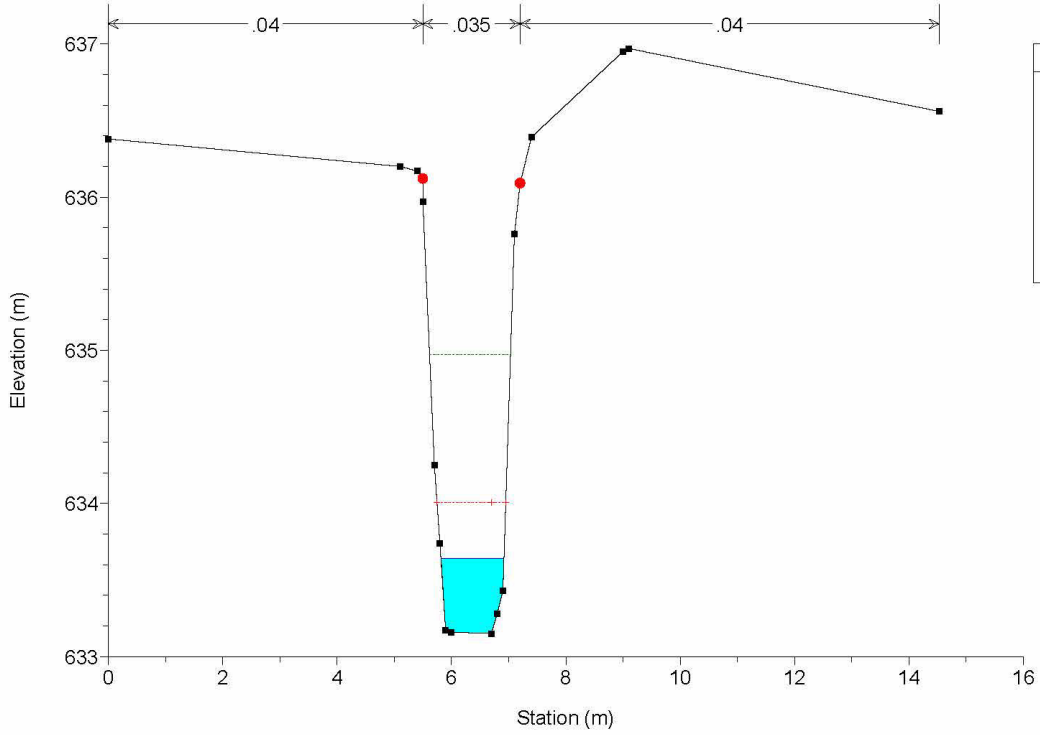
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_AO\_istr  
RS = 46.4



Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_AO\_istr  
RS = 46

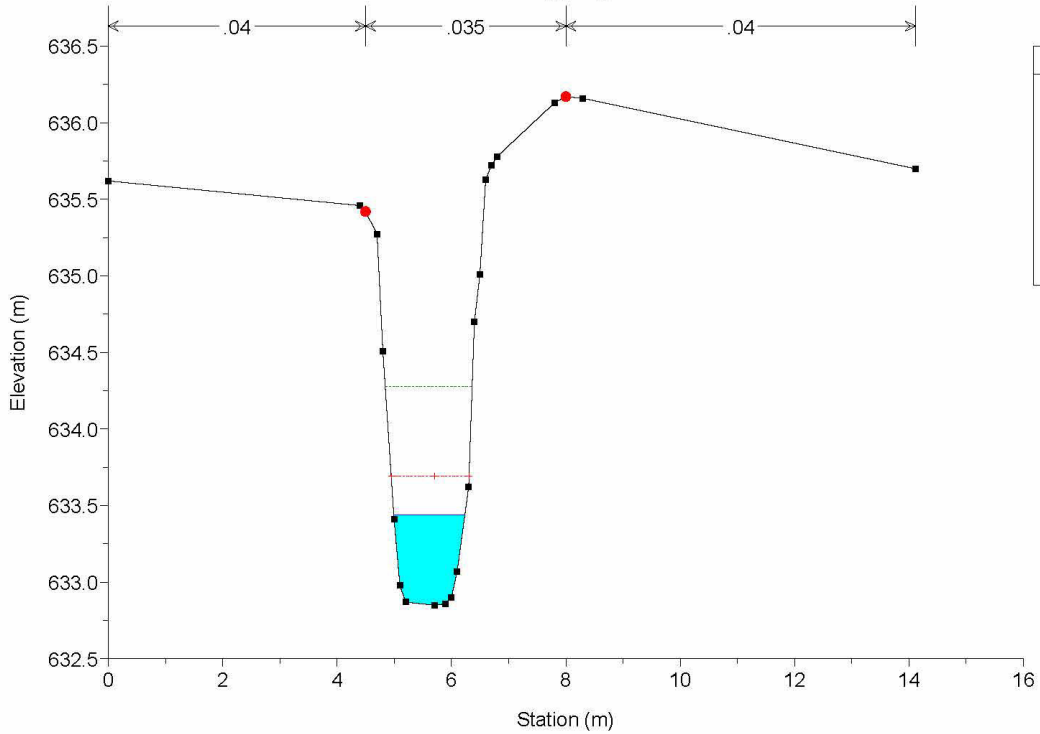


Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_AO\_istr  
RS = 41



Legend	
EG PF 1	Green dashed line
Crit PF 1	Red dashed line
WS PF 1	Blue dashed line
Ground	Black solid line with square markers
Bank Sta	Red dot

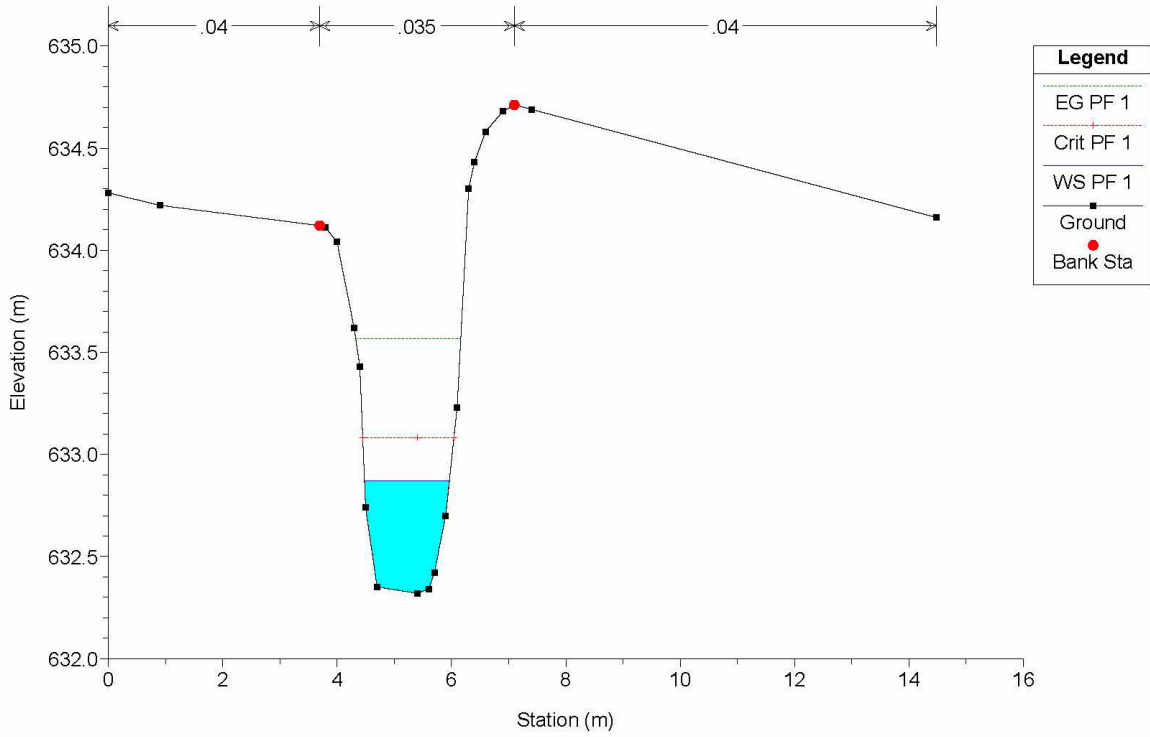
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_AO\_istr  
RS = 37



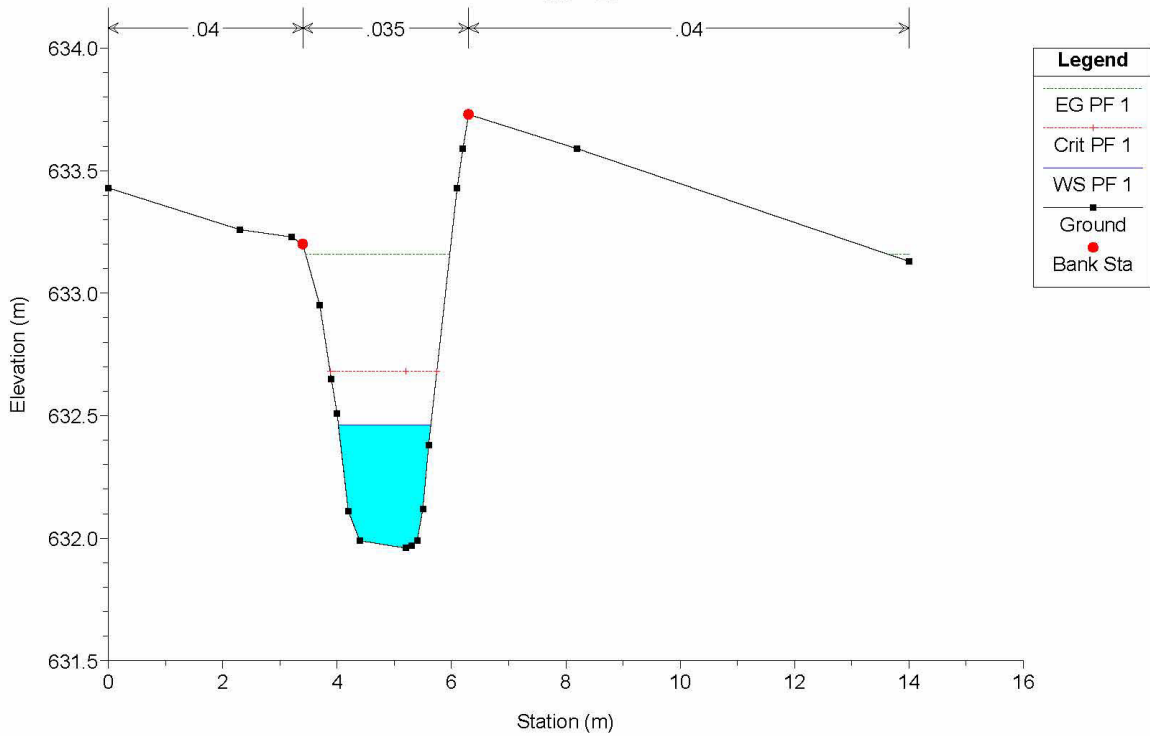
Legend	
EG PF 1	Green dashed line
Crit PF 1	Red dashed line
WS PF 1	Blue dashed line
Ground	Black solid line with square markers
Bank Sta	Red dot



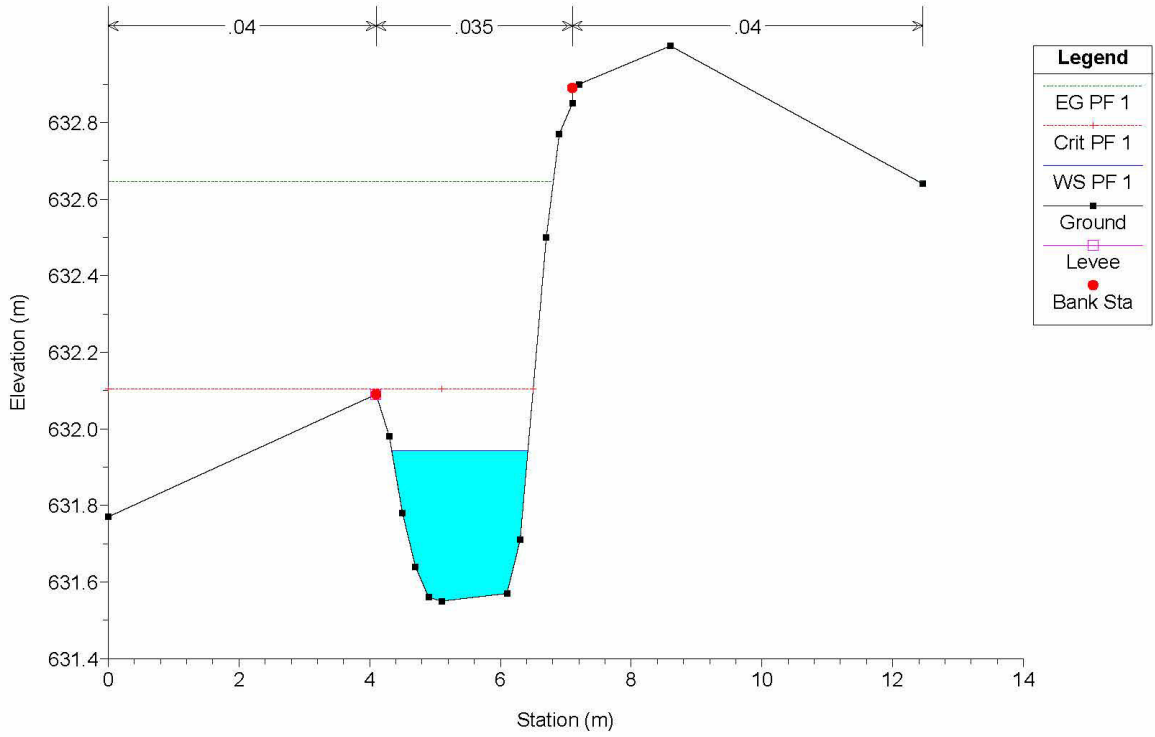
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_AO\_istr  
 RS = 30



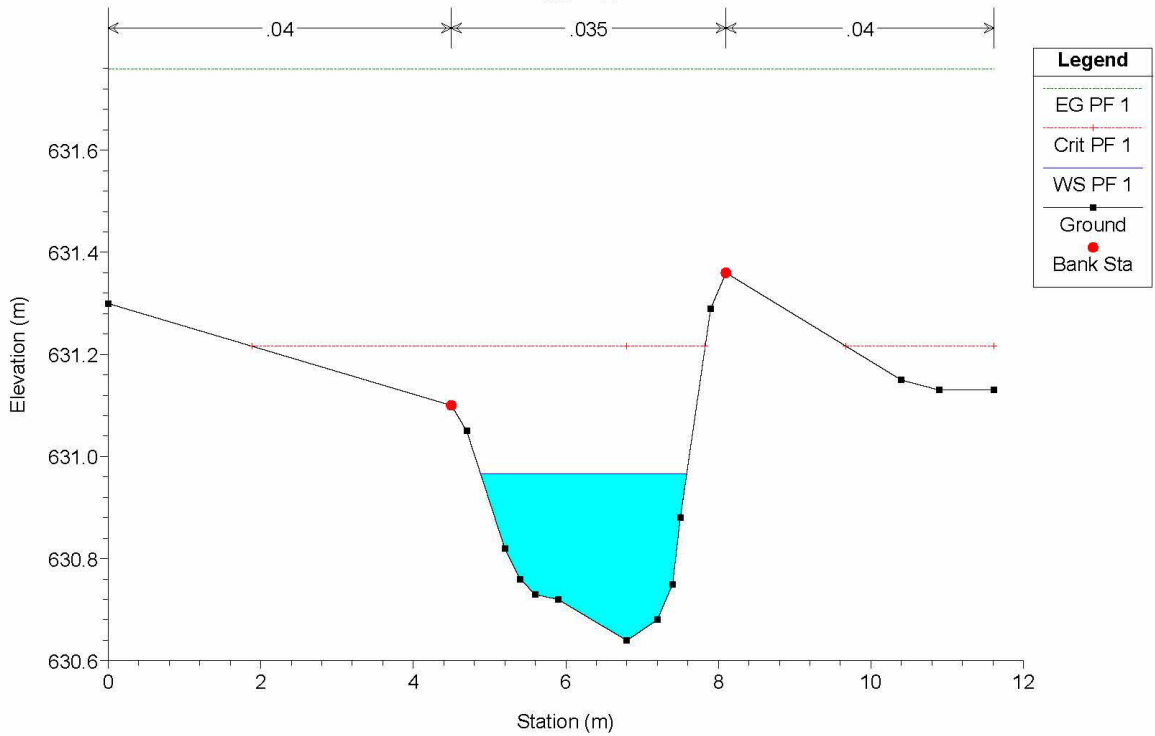
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_AO\_istr  
 RS = 25



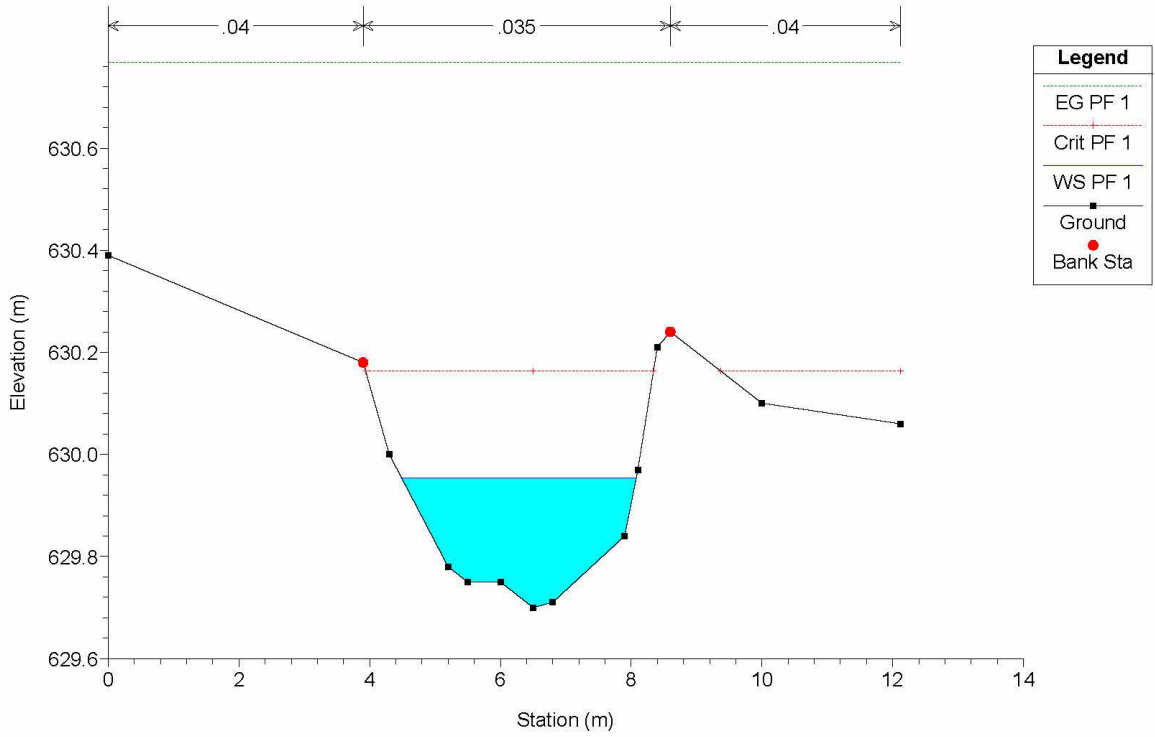
Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_AO\_istr  
 RS = 19



Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_AO\_istr  
 RS = 11

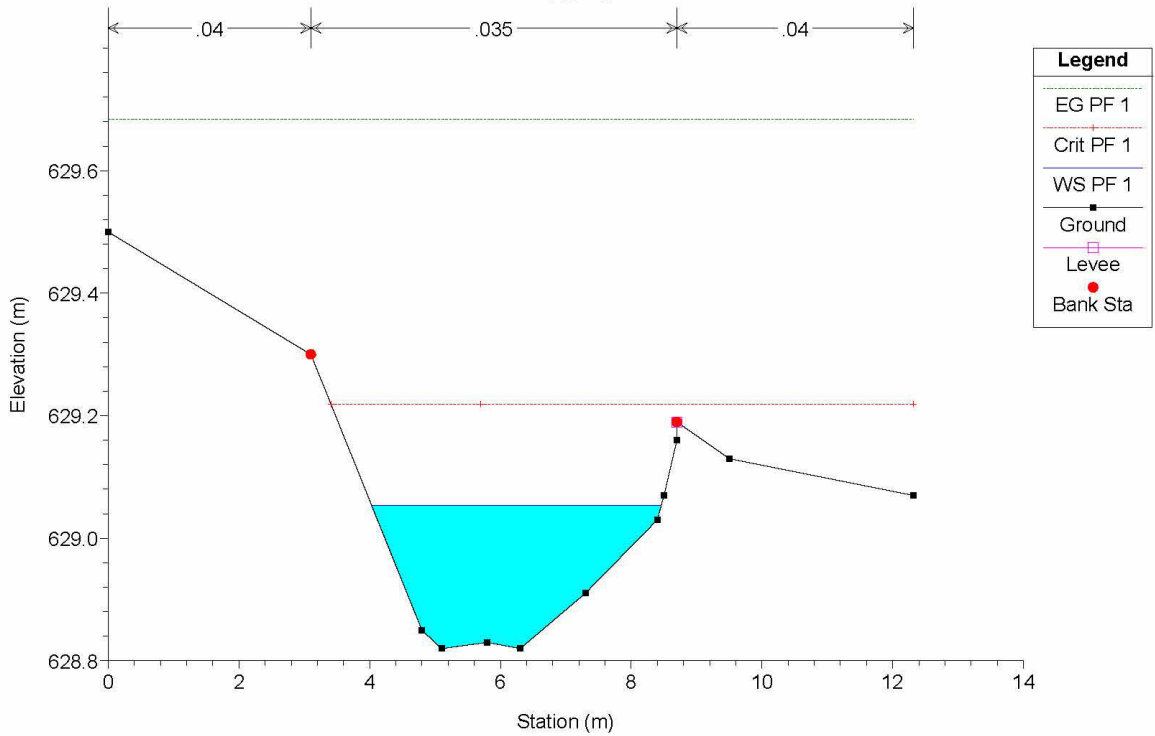


Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_AO\_istr  
 RS = 5



Legend	
EG PF 1	(Dashed line)
Crit PF 1	(Red dashed line)
WS PF 1	(Blue line)
Ground	(Black line with square markers)
Bank Sta	(Red dot)

Casello Plan: AO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_AO\_istr  
 RS = 0



Legend	
EG PF 1	(Dashed line)
Crit PF 1	(Red dashed line)
WS PF 1	(Blue line)
Ground	(Black line with square markers)
Levee	(Pink square)
Bank Sta	(Red dot)

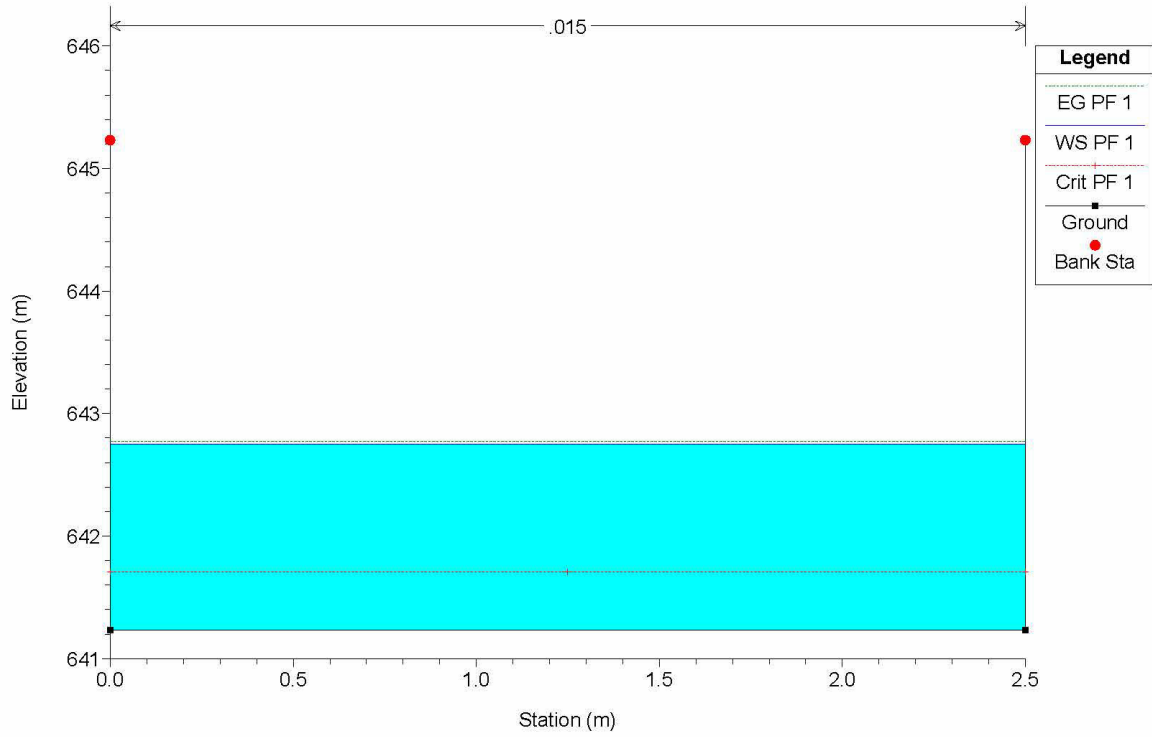
**Elaborazioni Hec-Ras**

**Asse Casello**

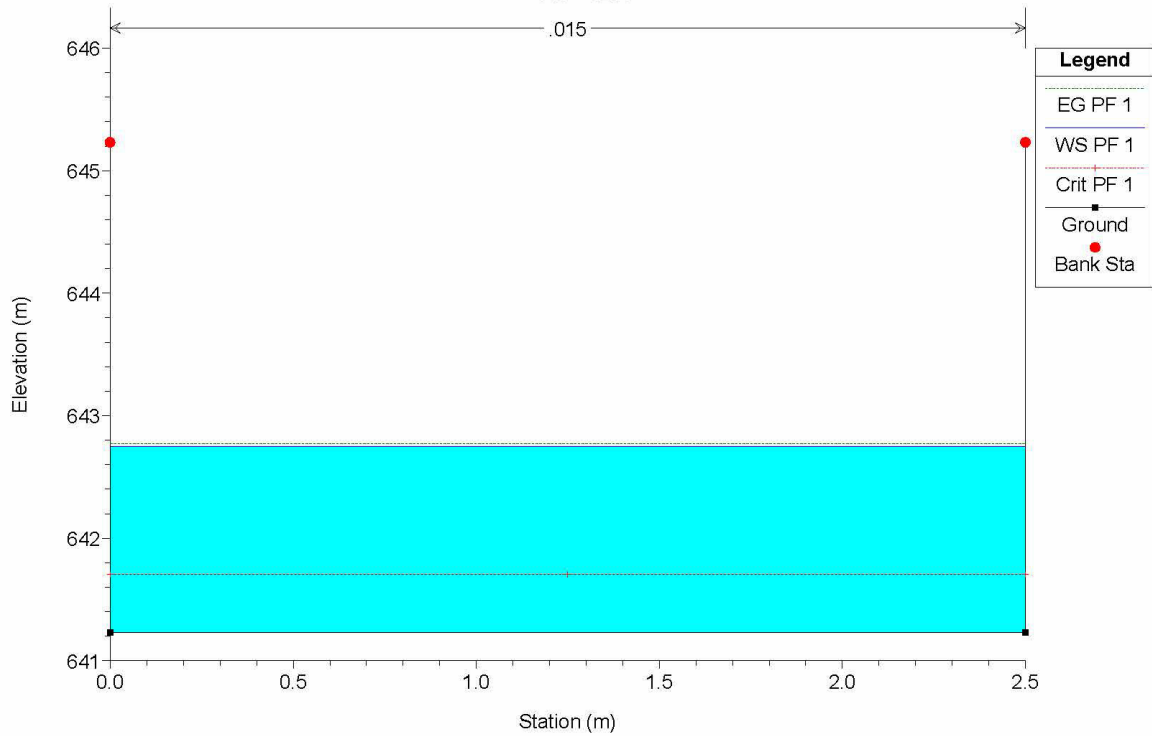
**Portata di calcolo  $Q_{200} = 2.58 \text{ m}^3/\text{s}$**

**Sezioni Post Operam**

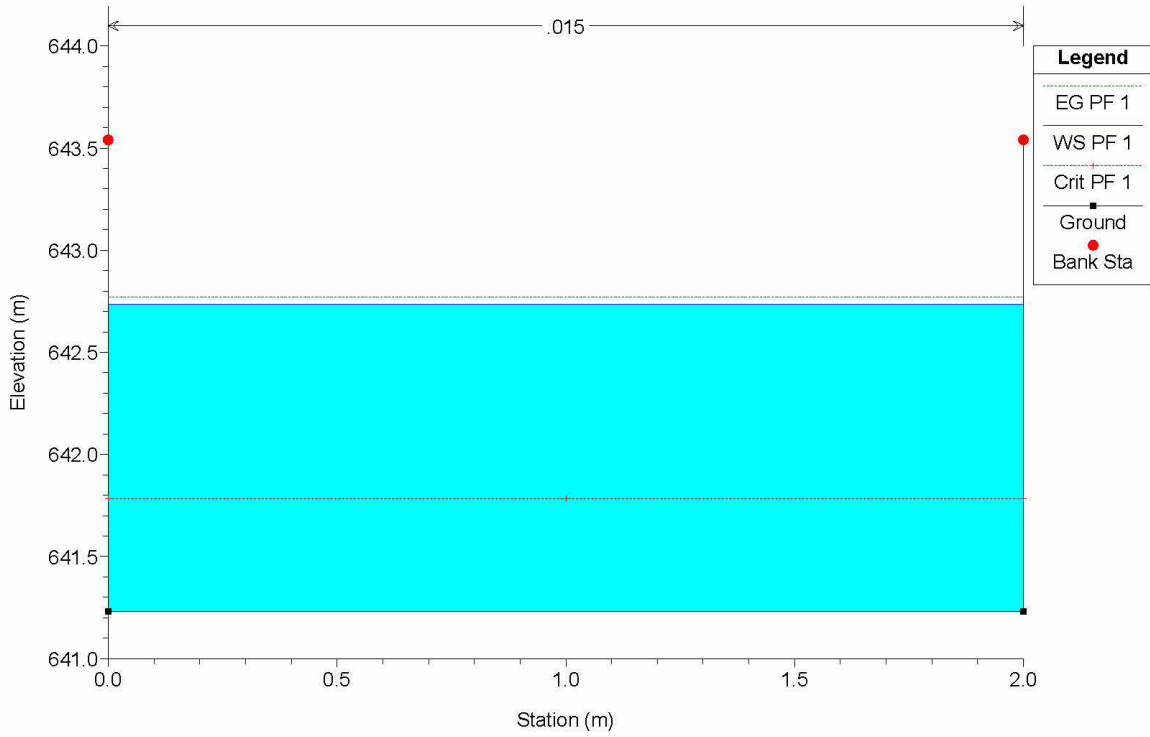
Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_PO\_istr  
RS = 85 S.Pozzetto 1



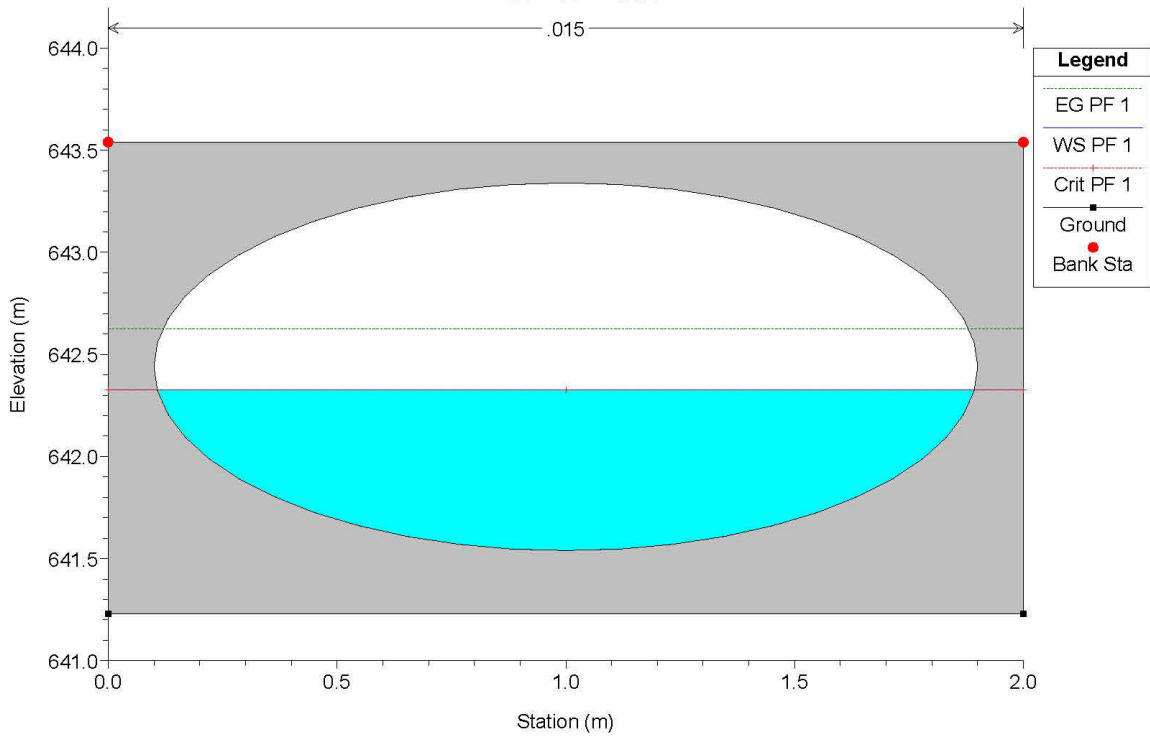
Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_PO\_istr  
RS = 82.4



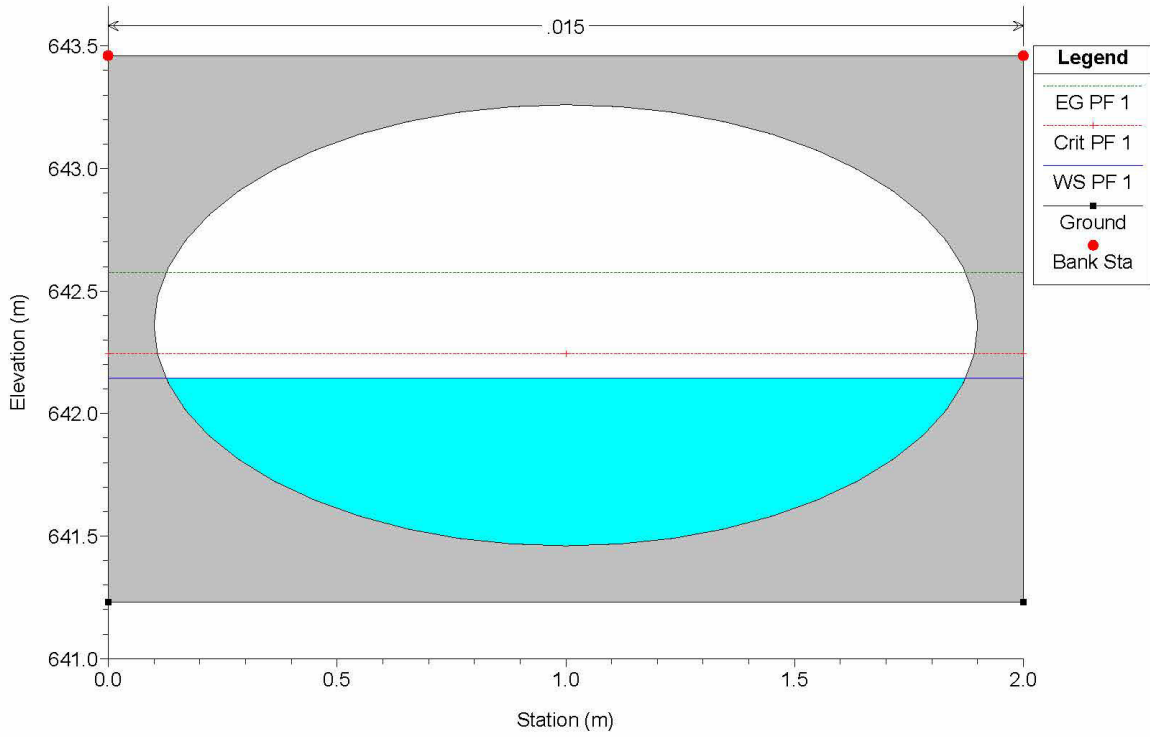
Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_PO\_istr  
RS = 82



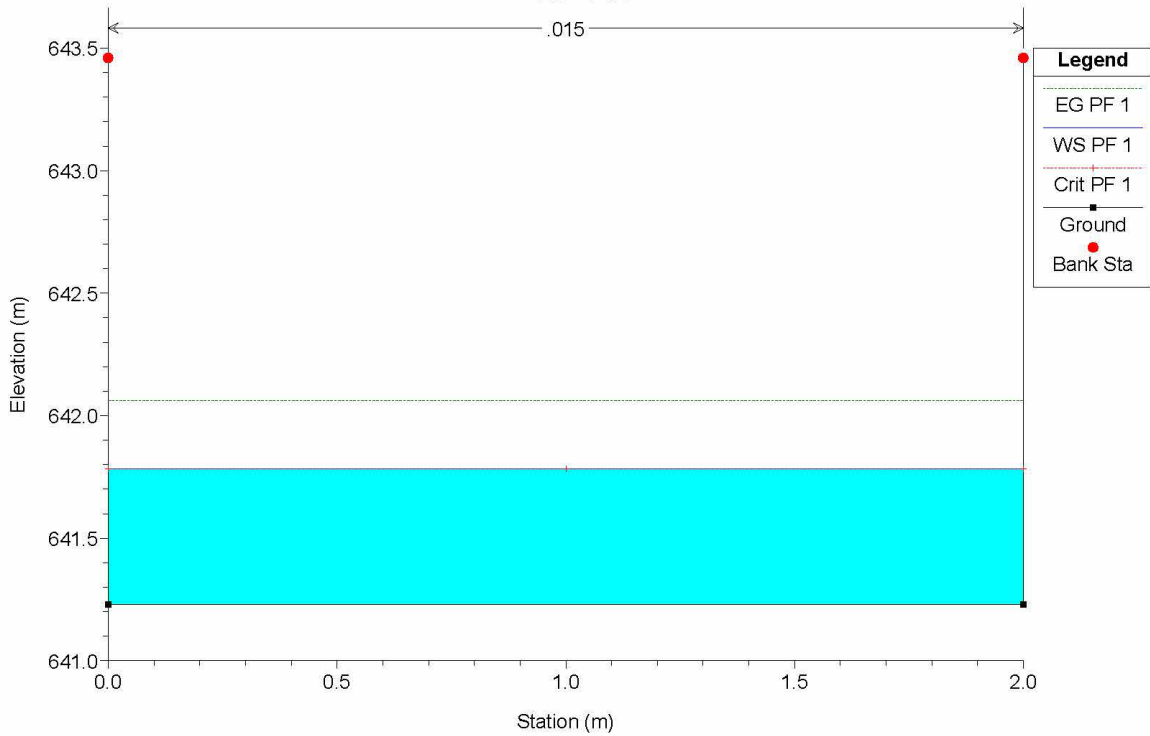
Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_PO\_istr  
RS = 80 Culv



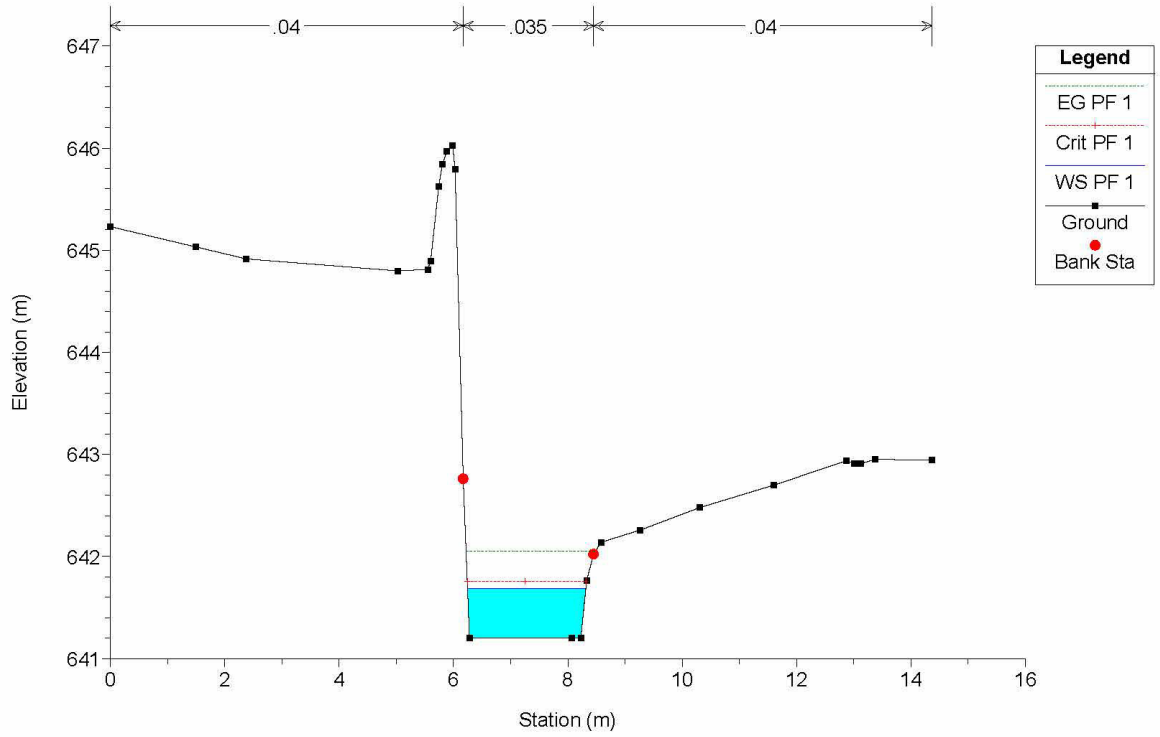
Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_PO\_istr  
RS = 80 Culv



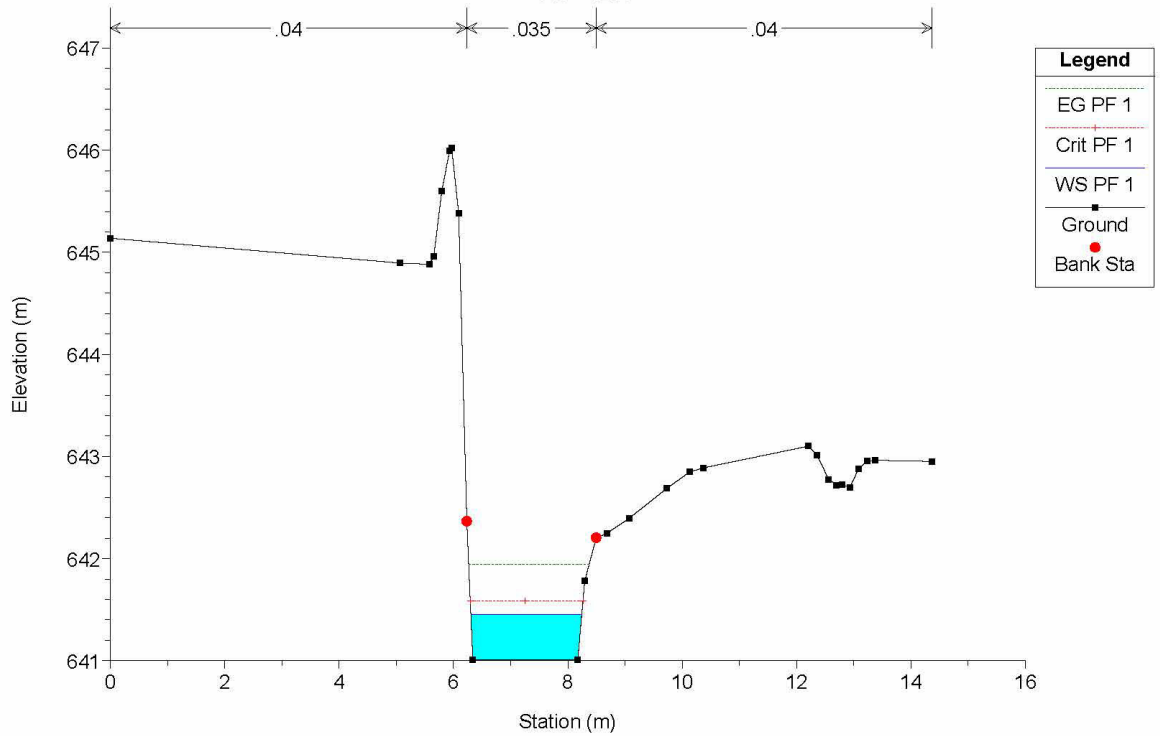
Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_PO\_istr  
RS = 74.4



Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_PO\_istr  
 RS = 74

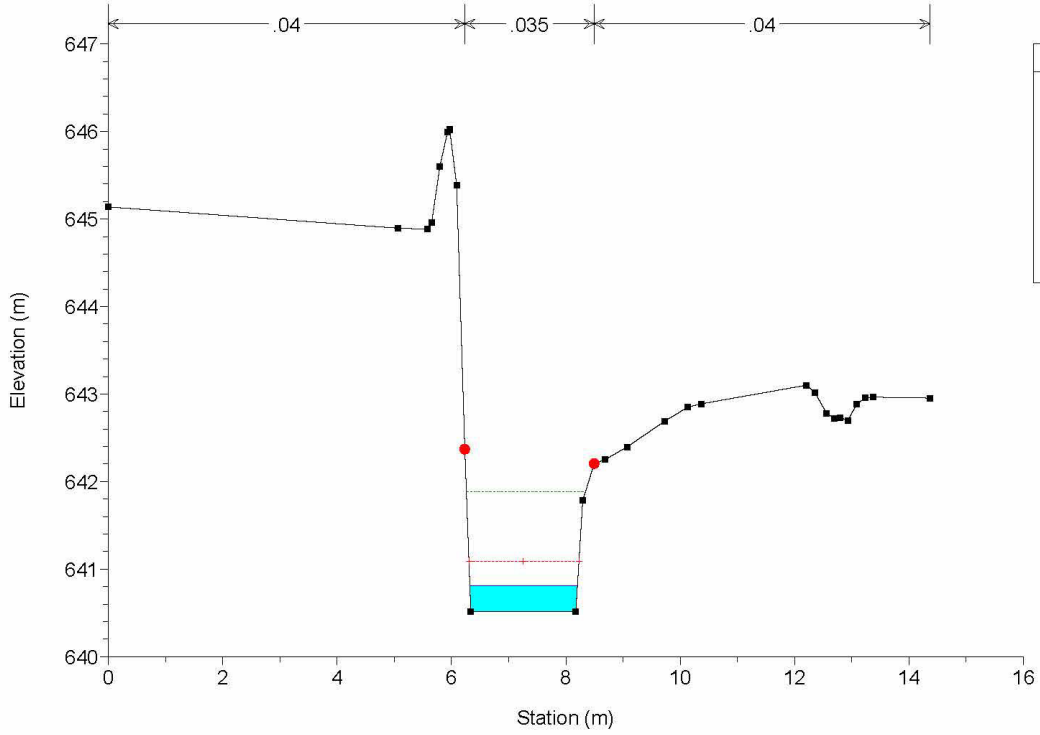


Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_PO\_istr  
 RS = 72.4

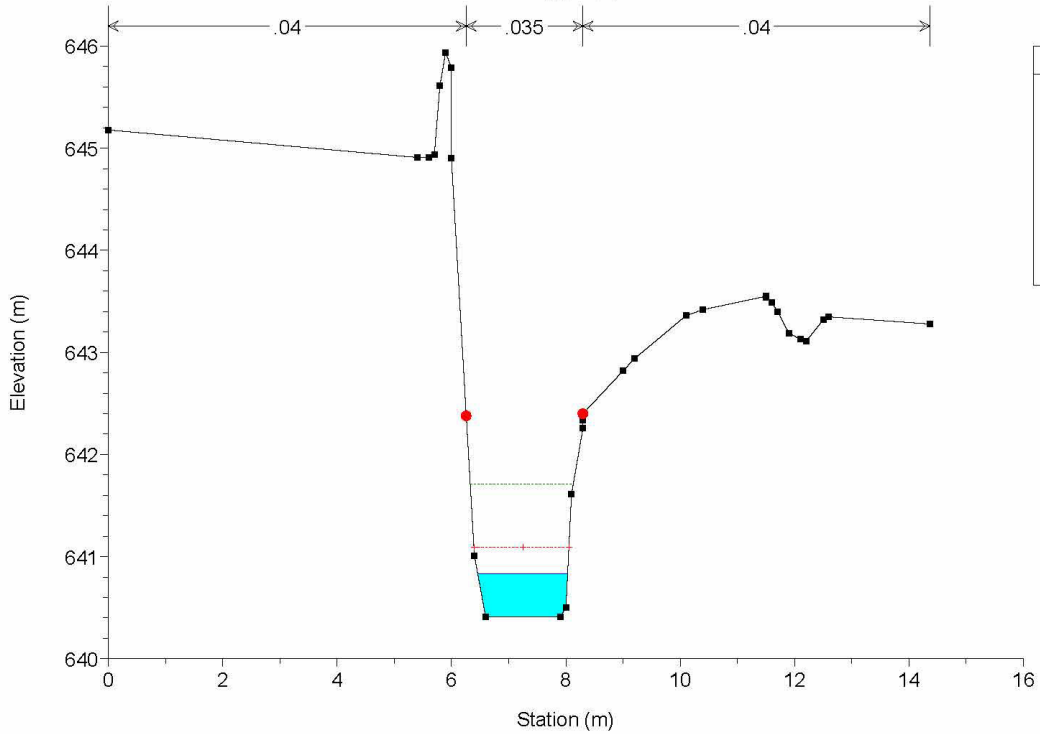




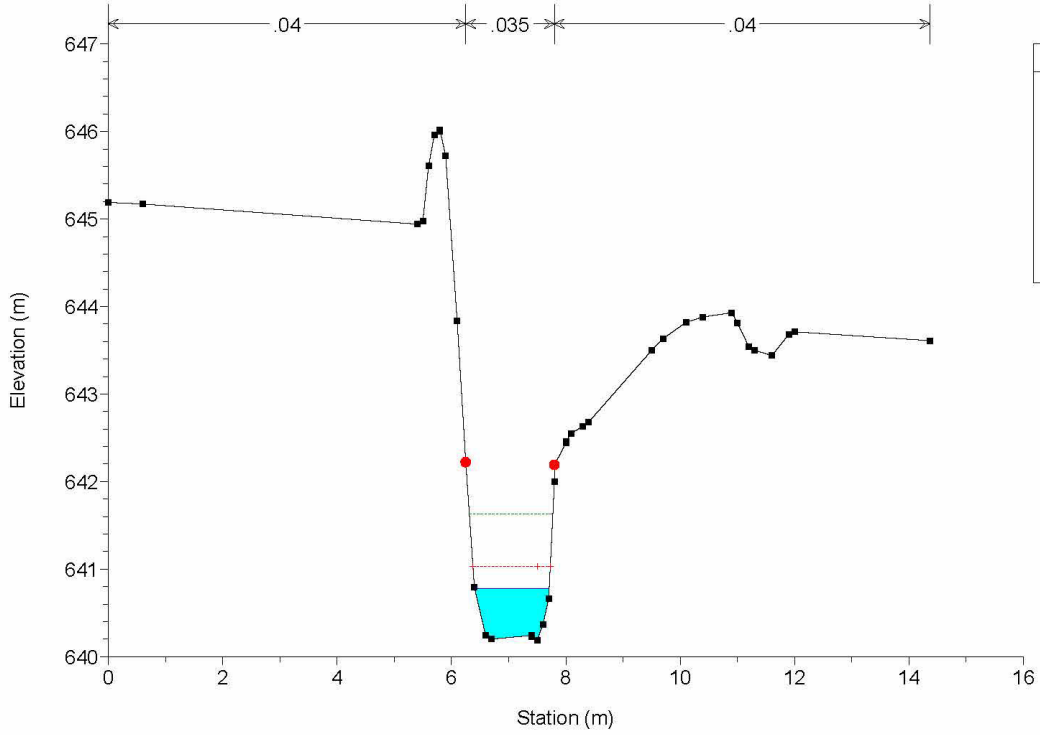
Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_PO\_istr  
RS = 72



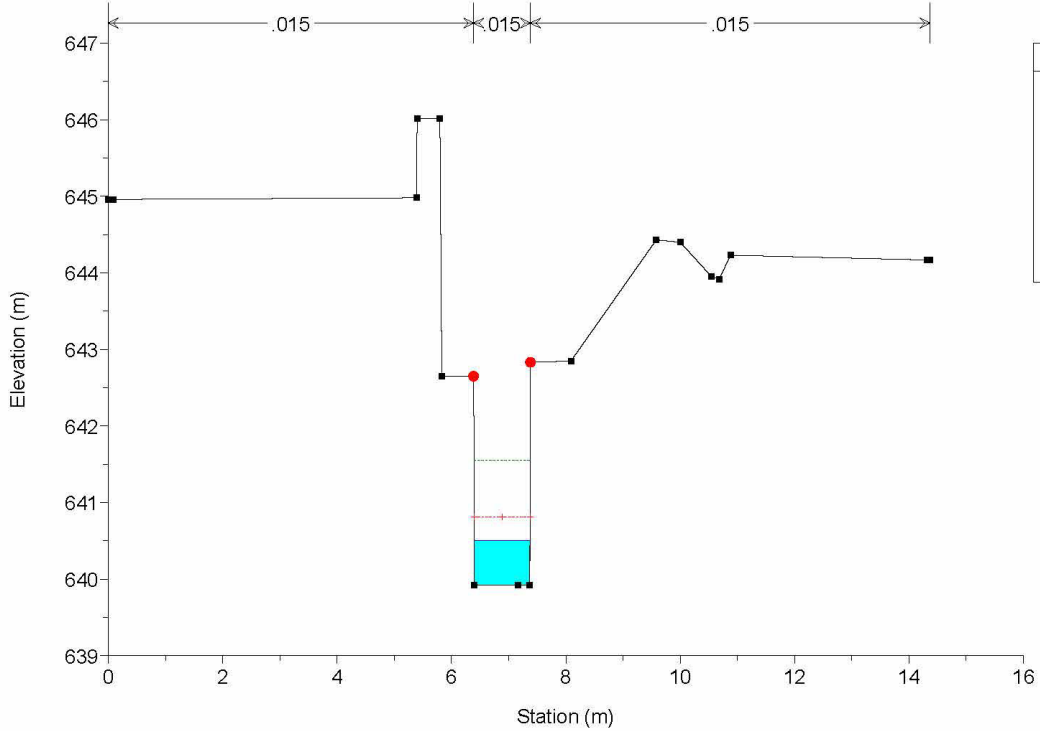
Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_PO\_istr  
RS = 71



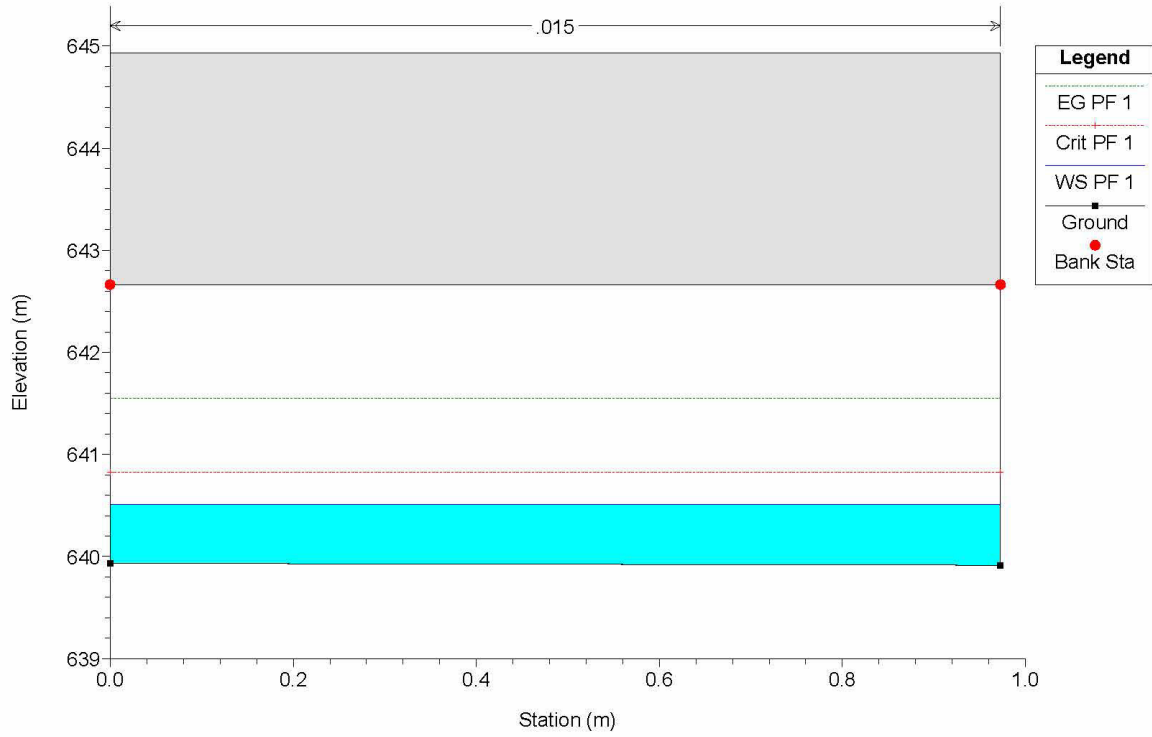
Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_PO\_istr  
 RS = 70.7



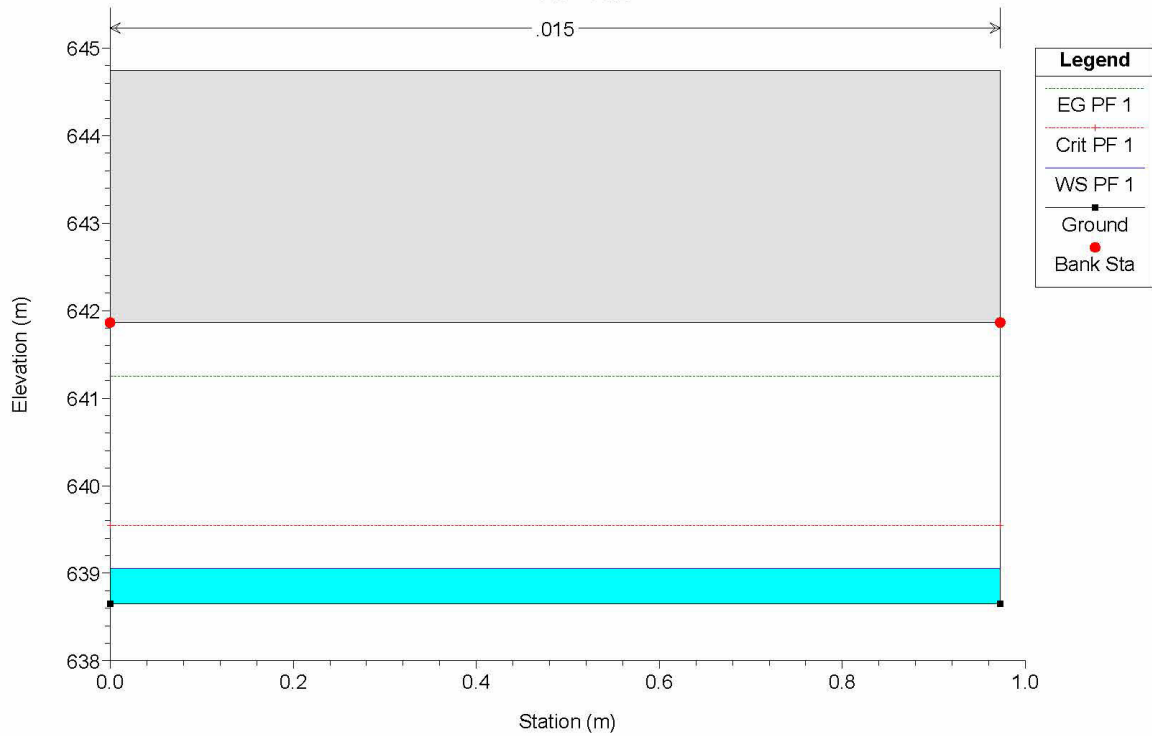
Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_PO\_istr  
 RS = 70



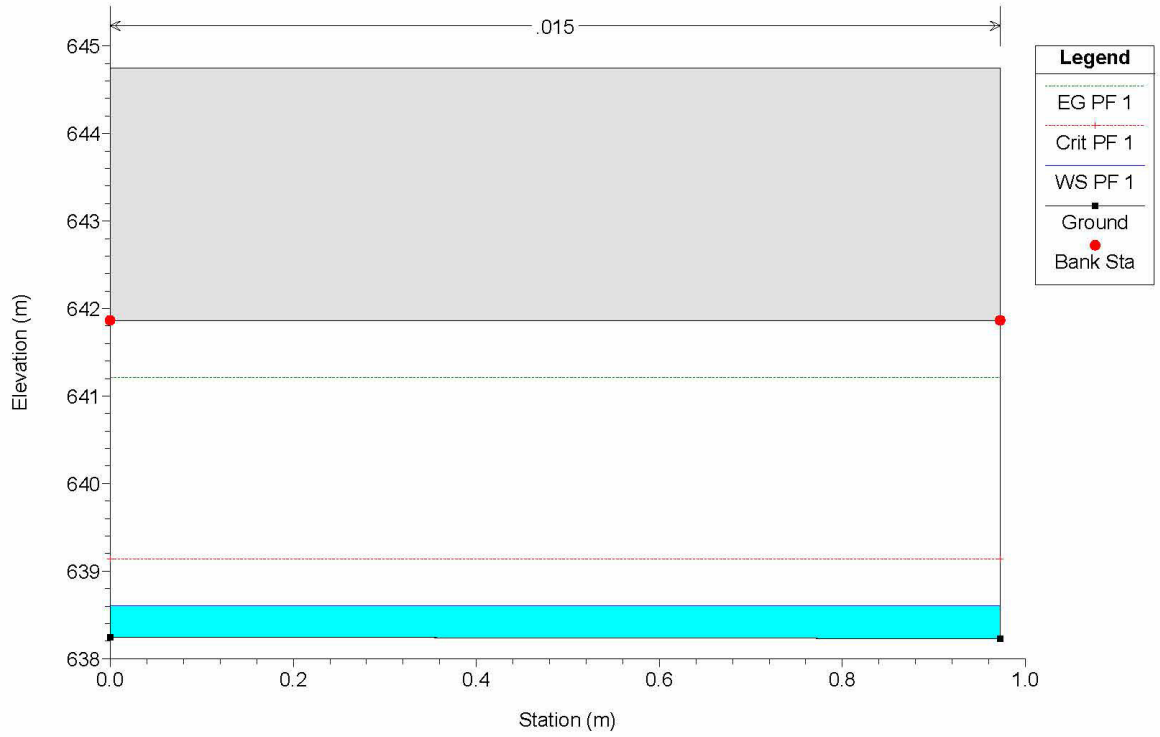
Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_PO\_istr  
RS = 69.5



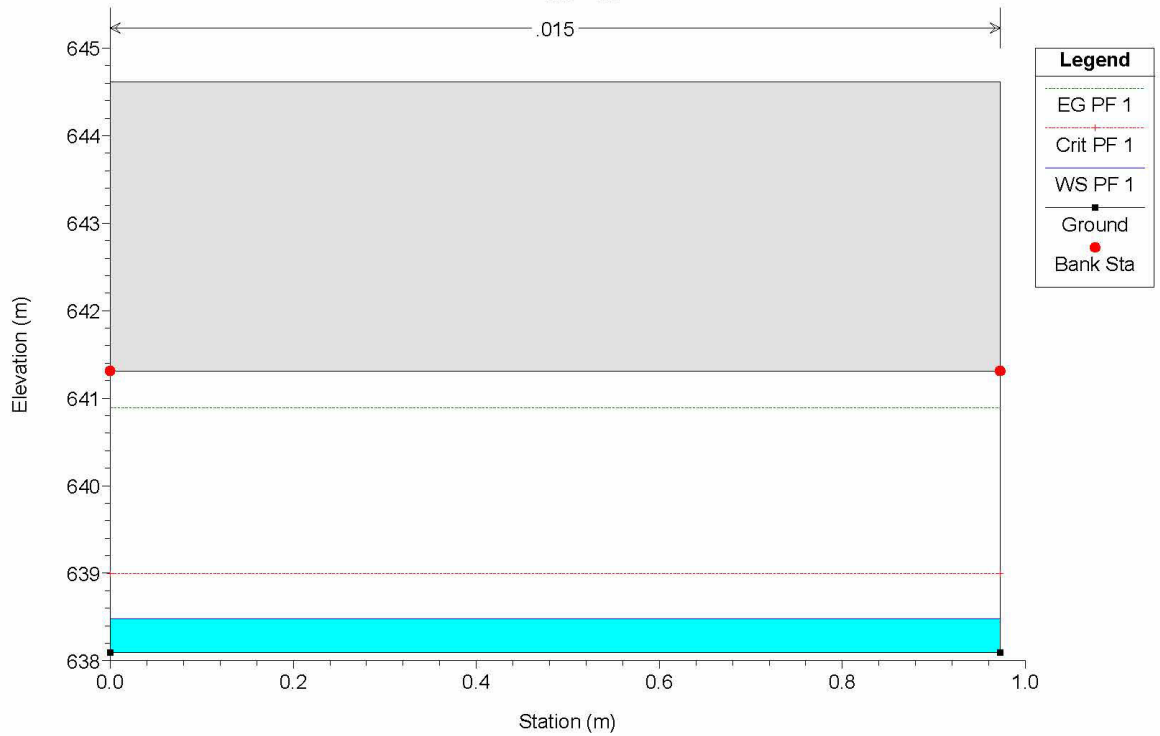
Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_PO\_istr  
RS = 65.2



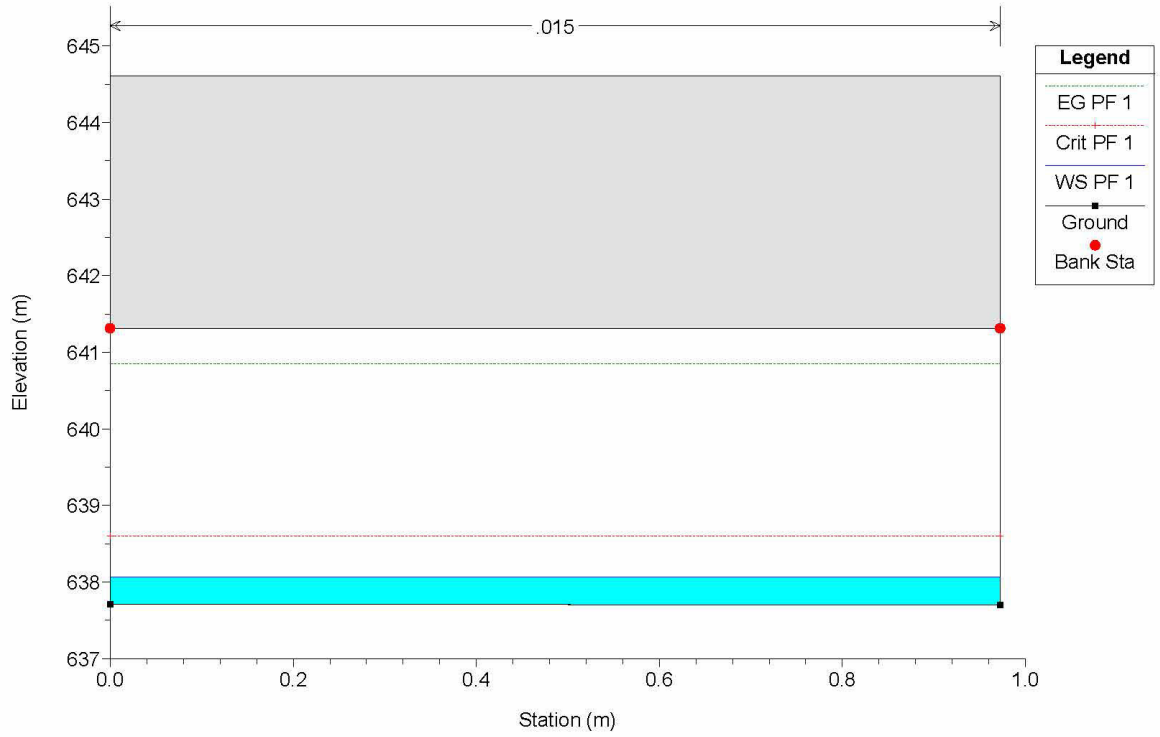
Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_PO\_istr  
RS = 65



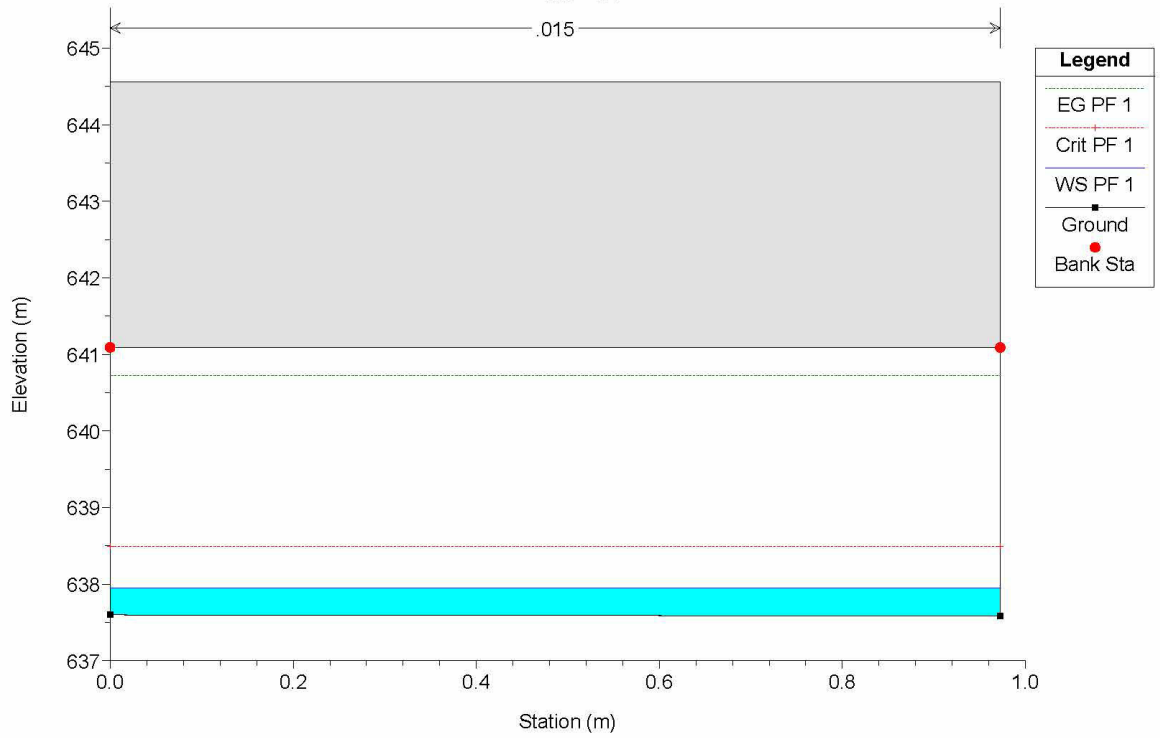
Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_PO\_istr  
RS = 63



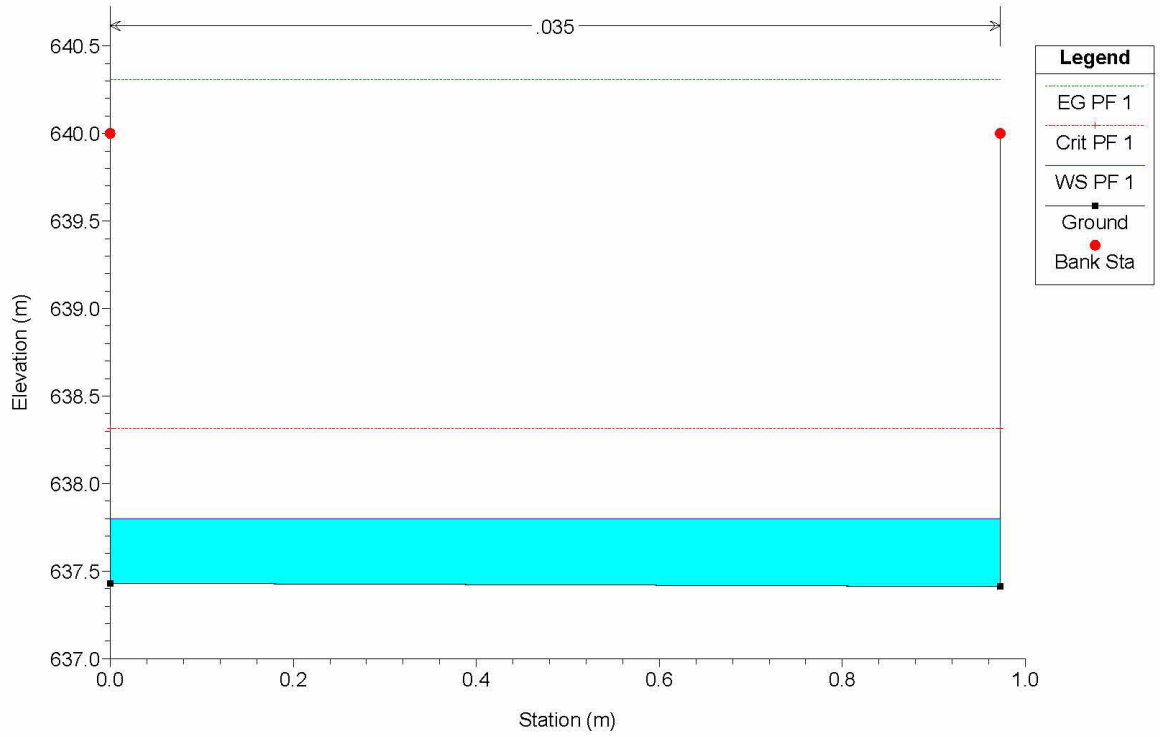
Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_PO\_istr  
RS = 62.9



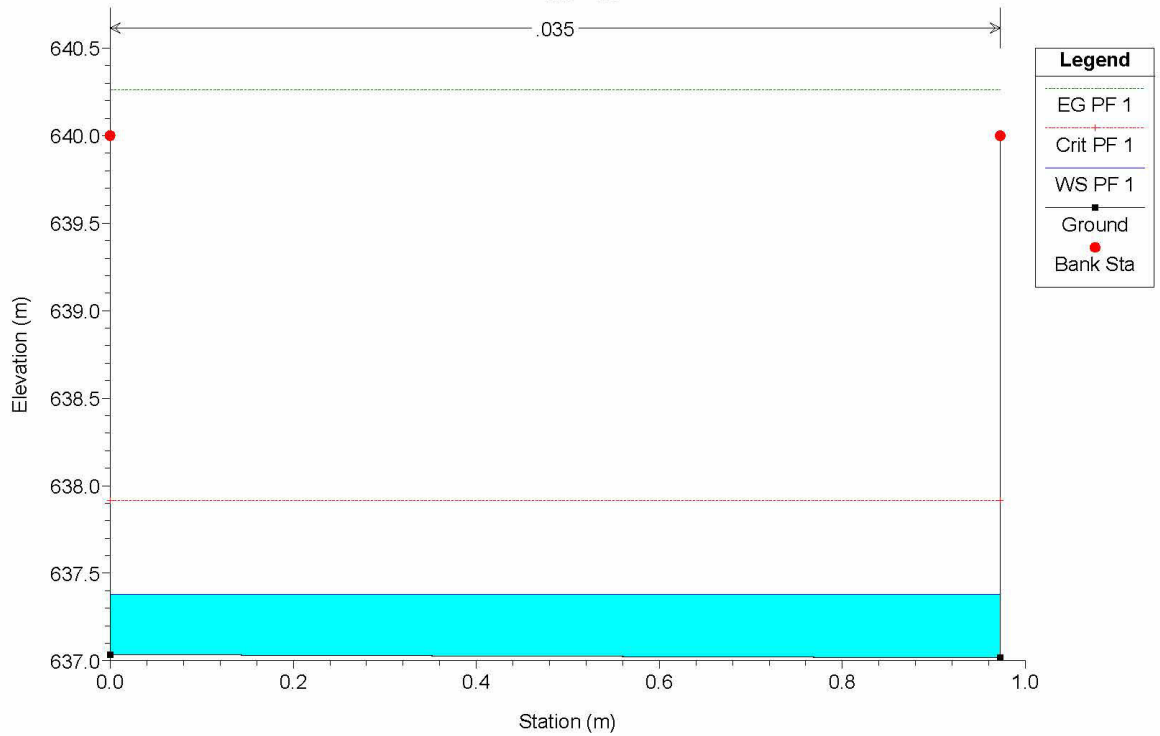
Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_PO\_istr  
RS = 61



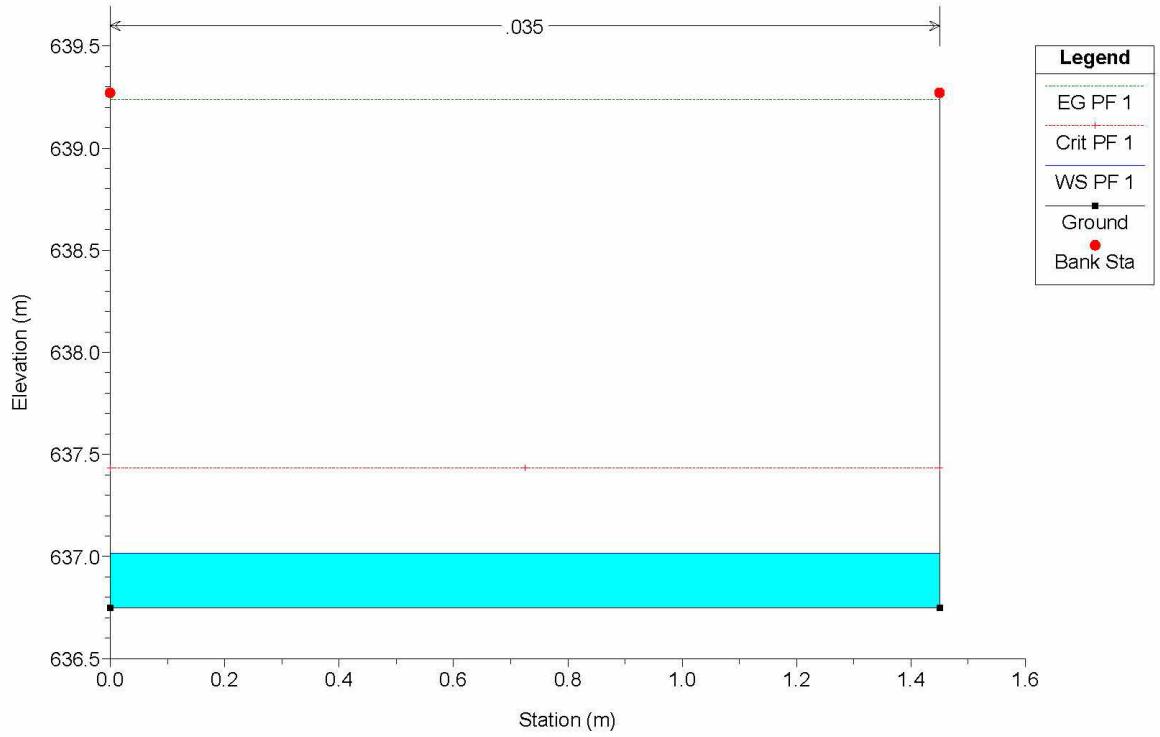
Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_PO\_istr  
RS = 59.1



Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_PO\_istr  
RS = 59

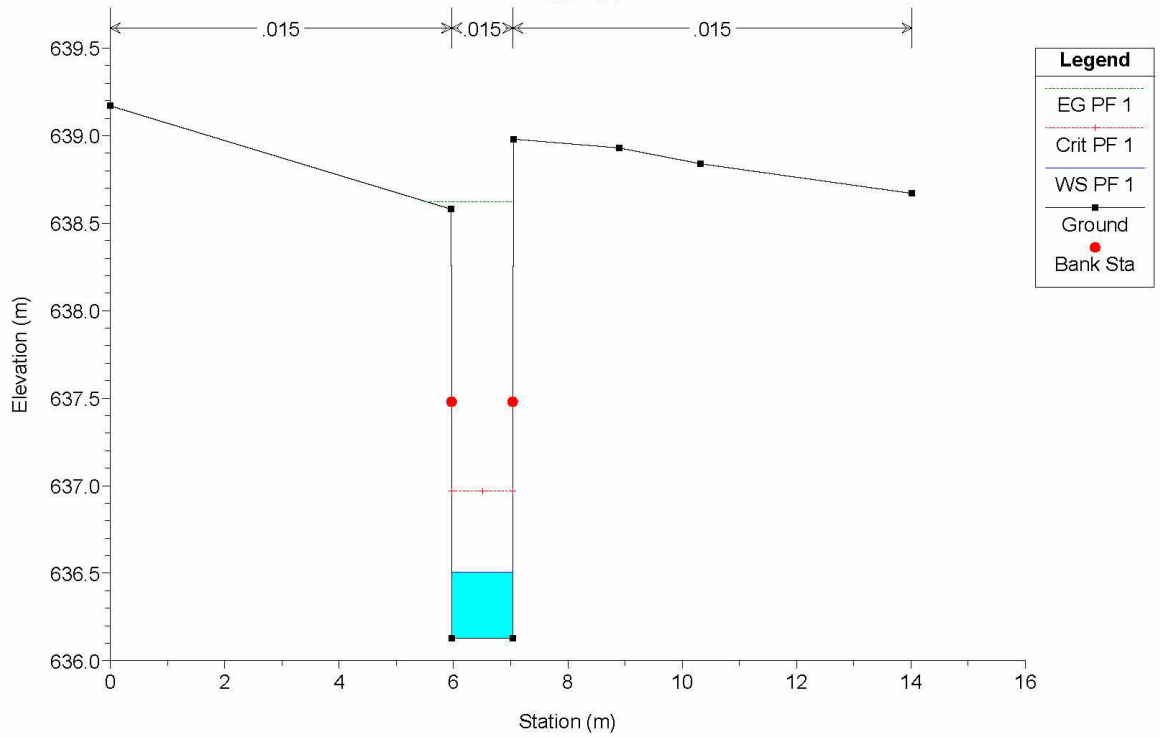


Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_PO\_istr  
 RS = 58



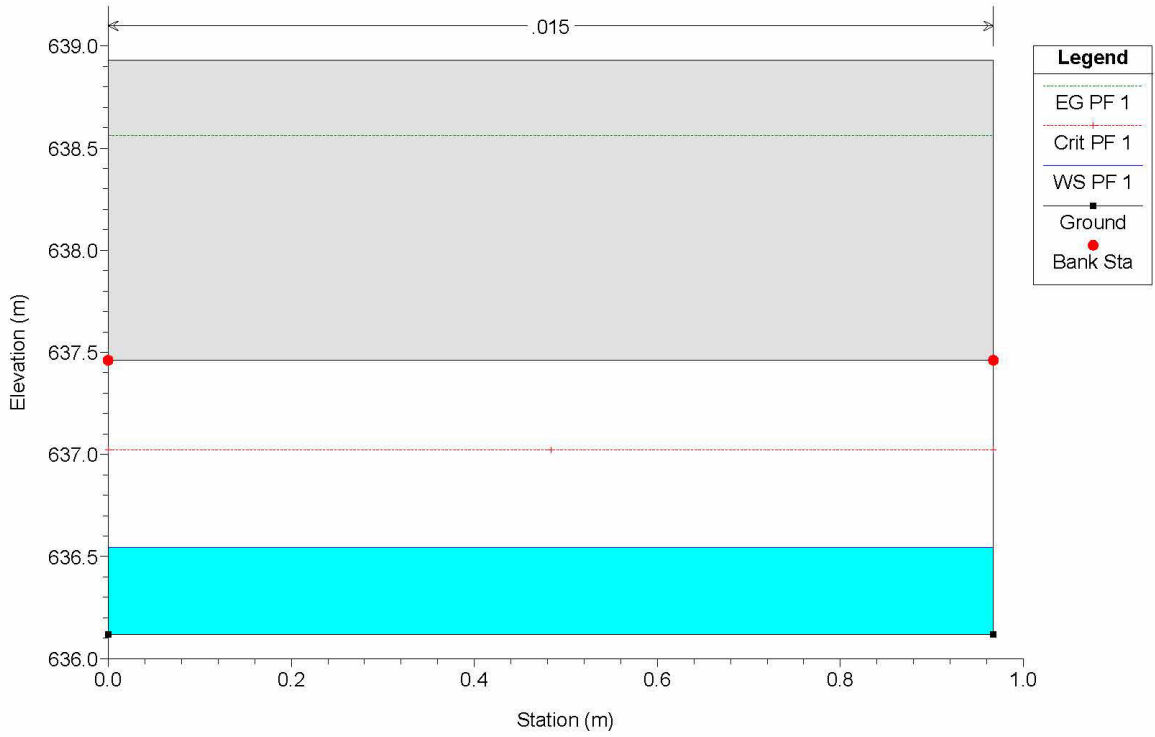
Legend	
EG PF 1	—
Crit PF 1	—
WS PF 1	—
Ground	■
Bank Sta	●

Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_PO\_istr  
 RS = 54

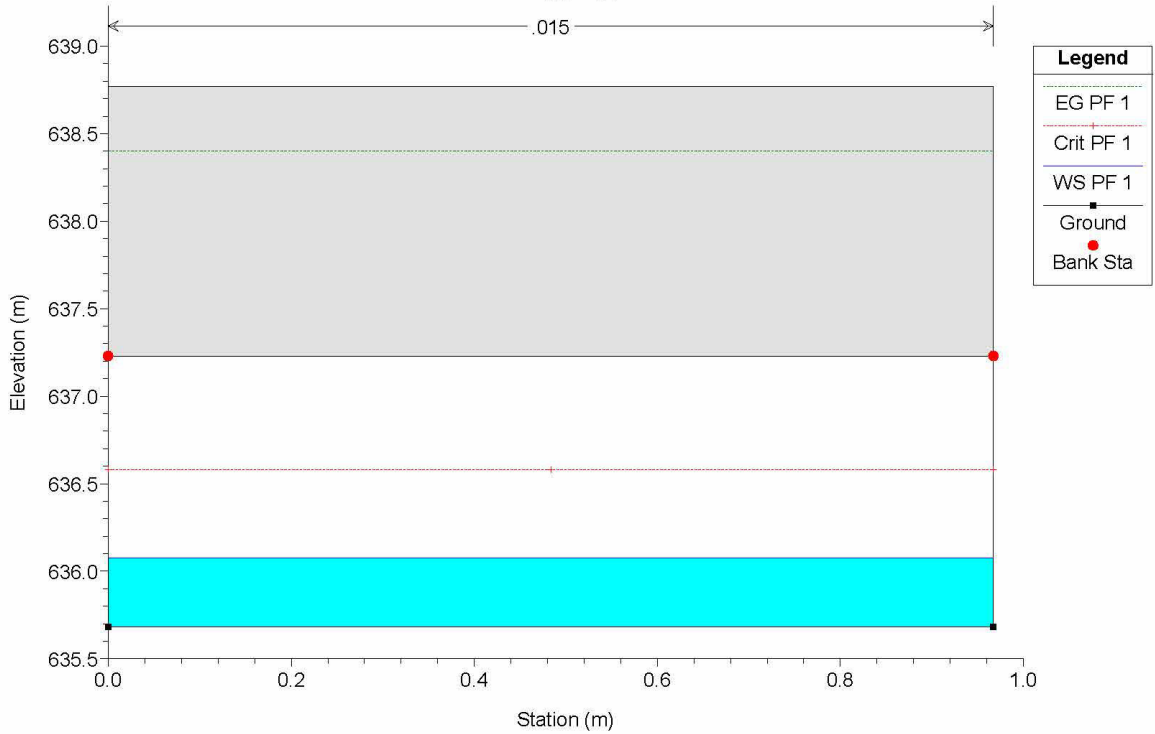


Legend	
EG PF 1	—
Crit PF 1	—
WS PF 1	—
Ground	■
Bank Sta	●

Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_PO\_istr  
RS = 53

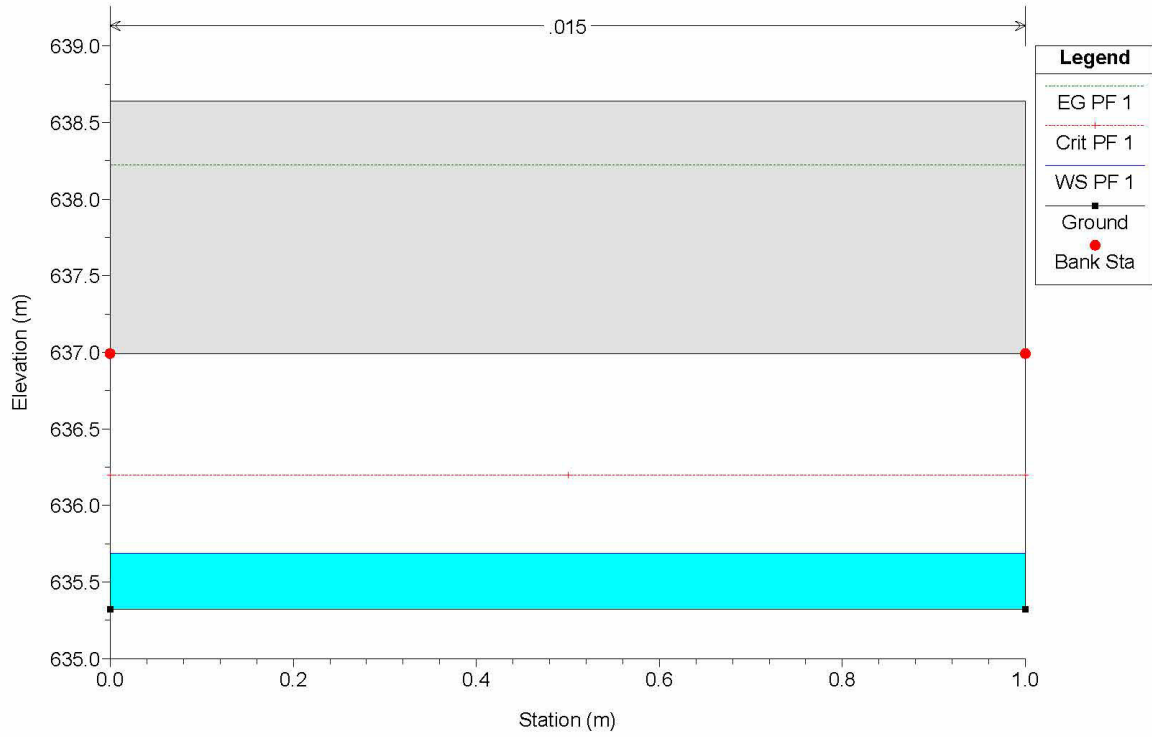


Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_PO\_istr  
RS = 51

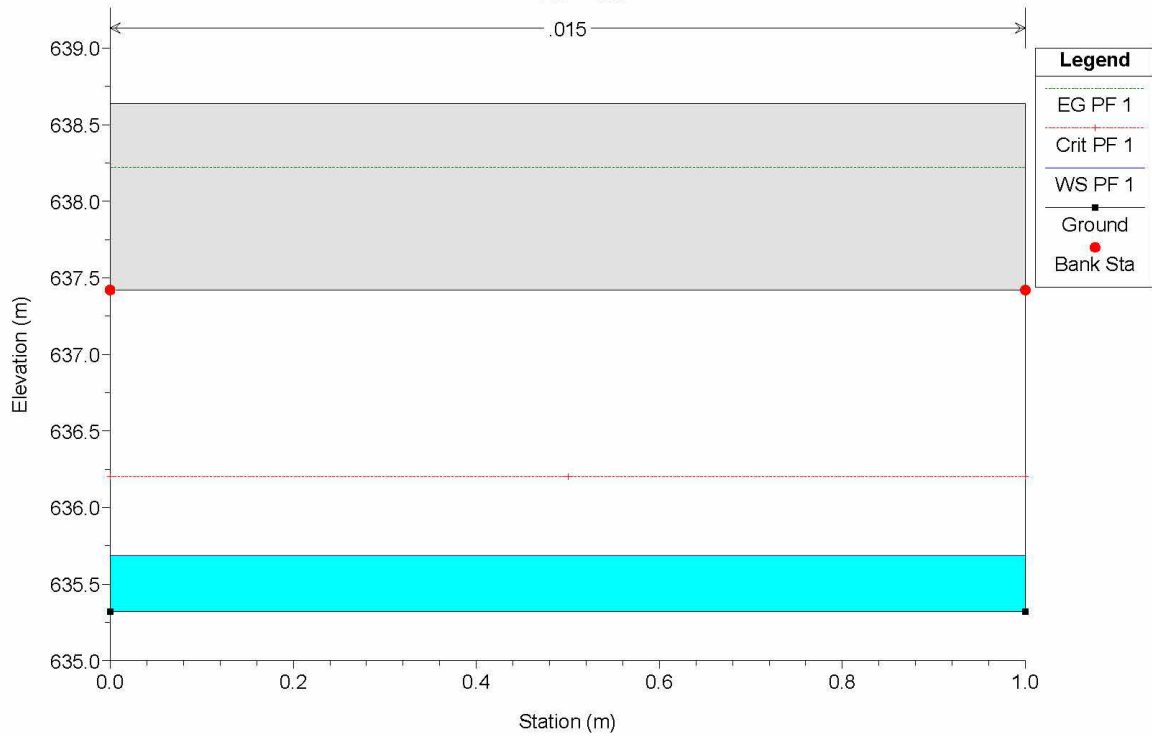




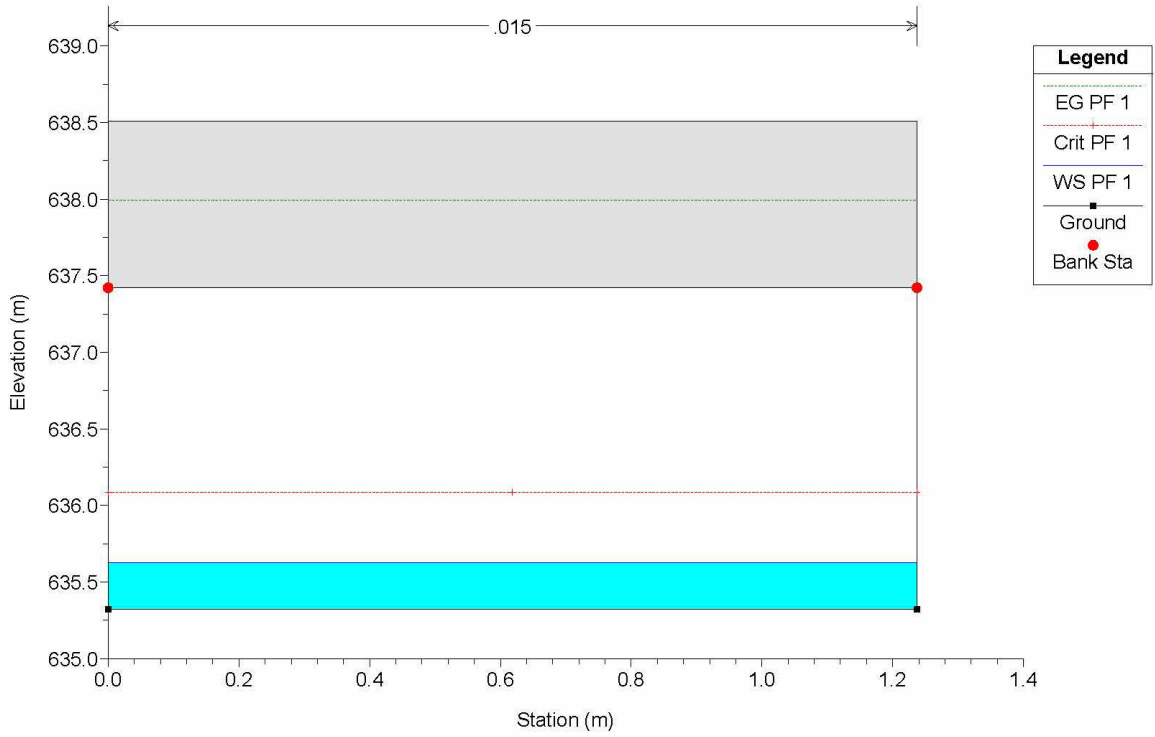
Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_PO\_istr  
RS = 49



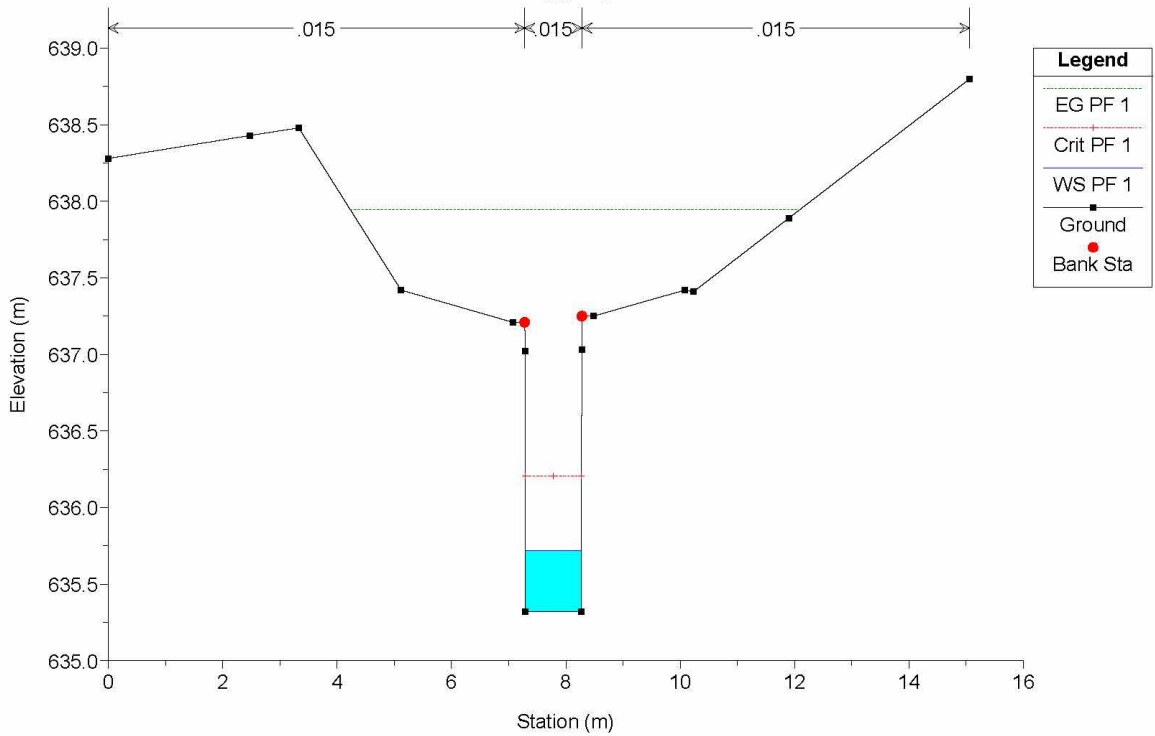
Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_PO\_istr  
RS = 48.9



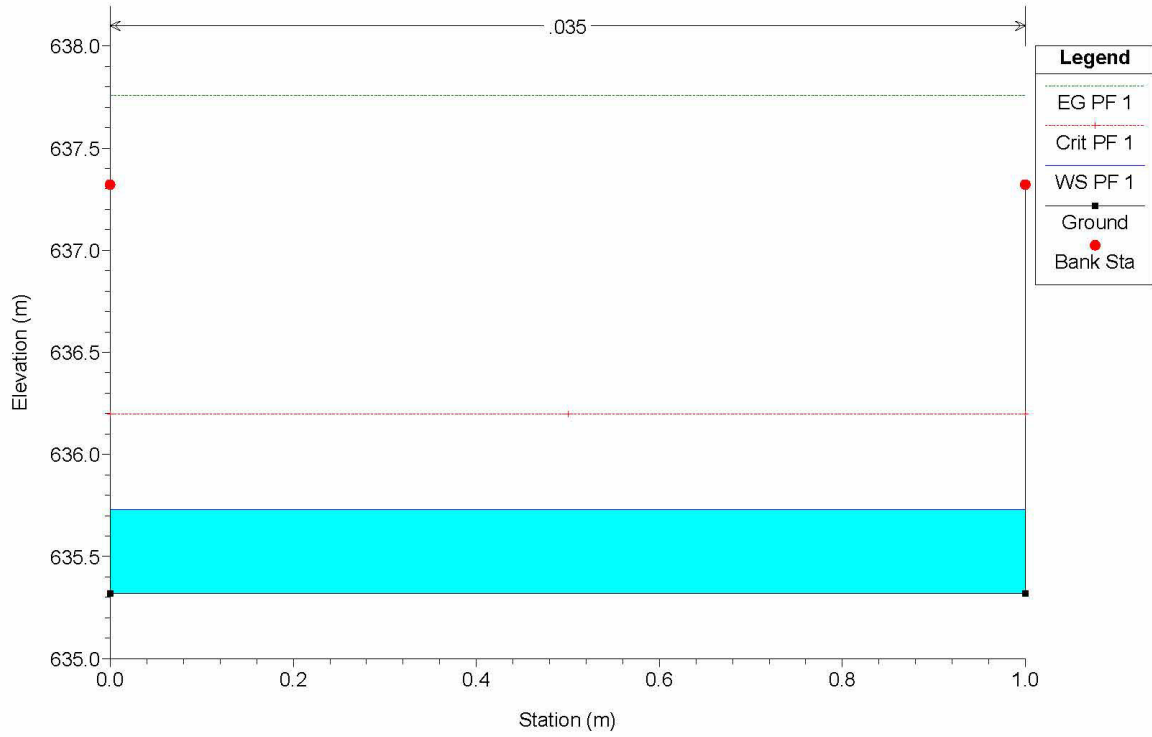
Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_PO\_istr  
 RS = 47.4



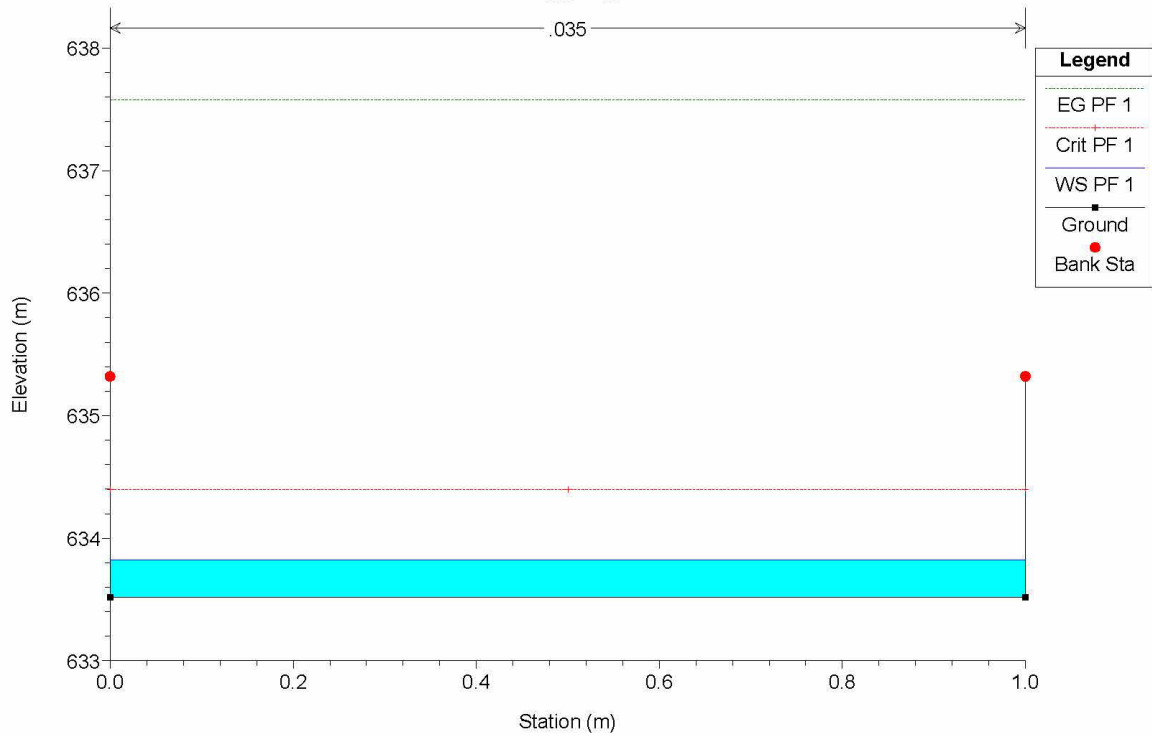
Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_PO\_istr  
 RS = 47



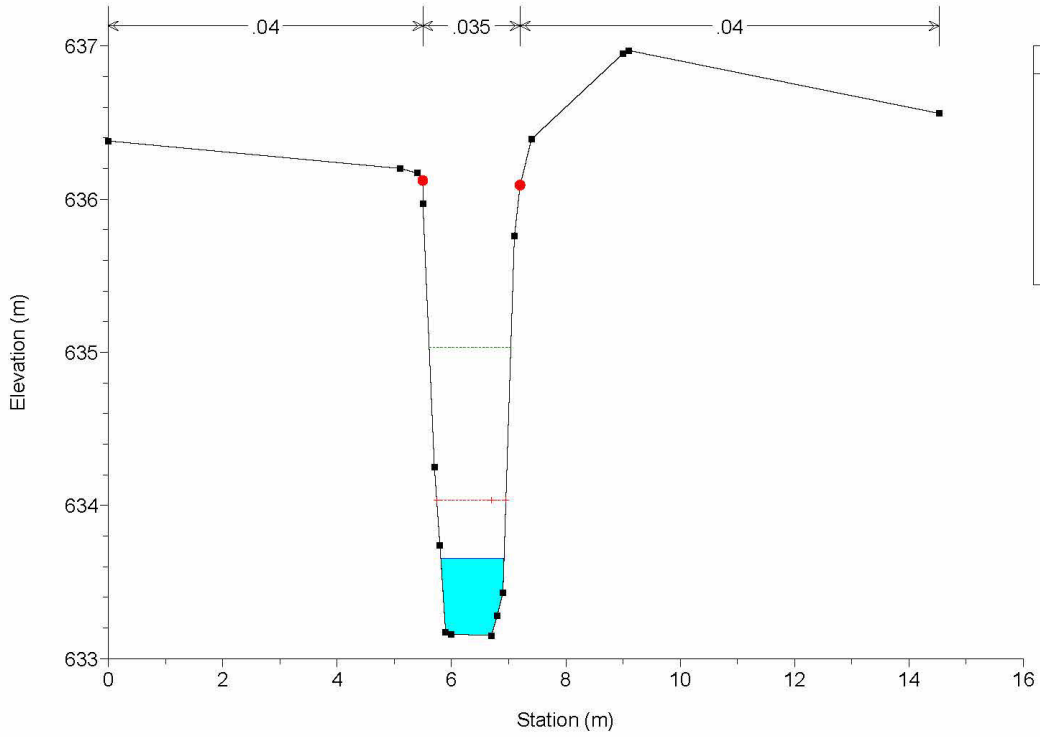
Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_PO\_istr  
RS = 46.4



Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_PO\_istr  
RS = 46

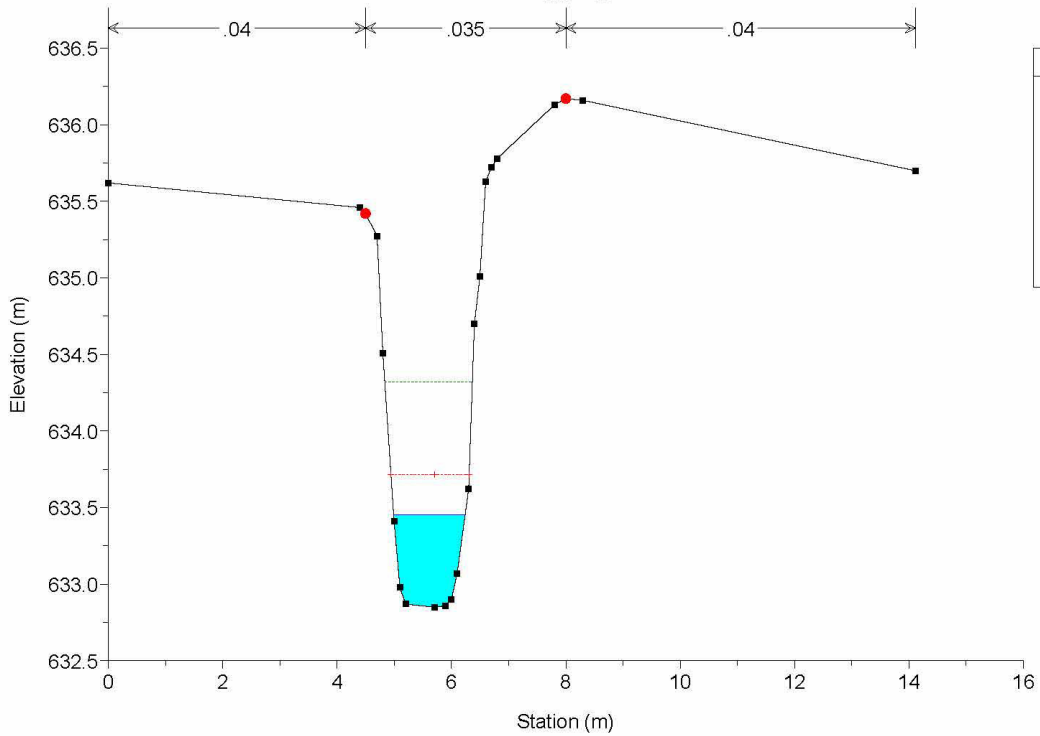


Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_PO\_istr  
 RS = 41



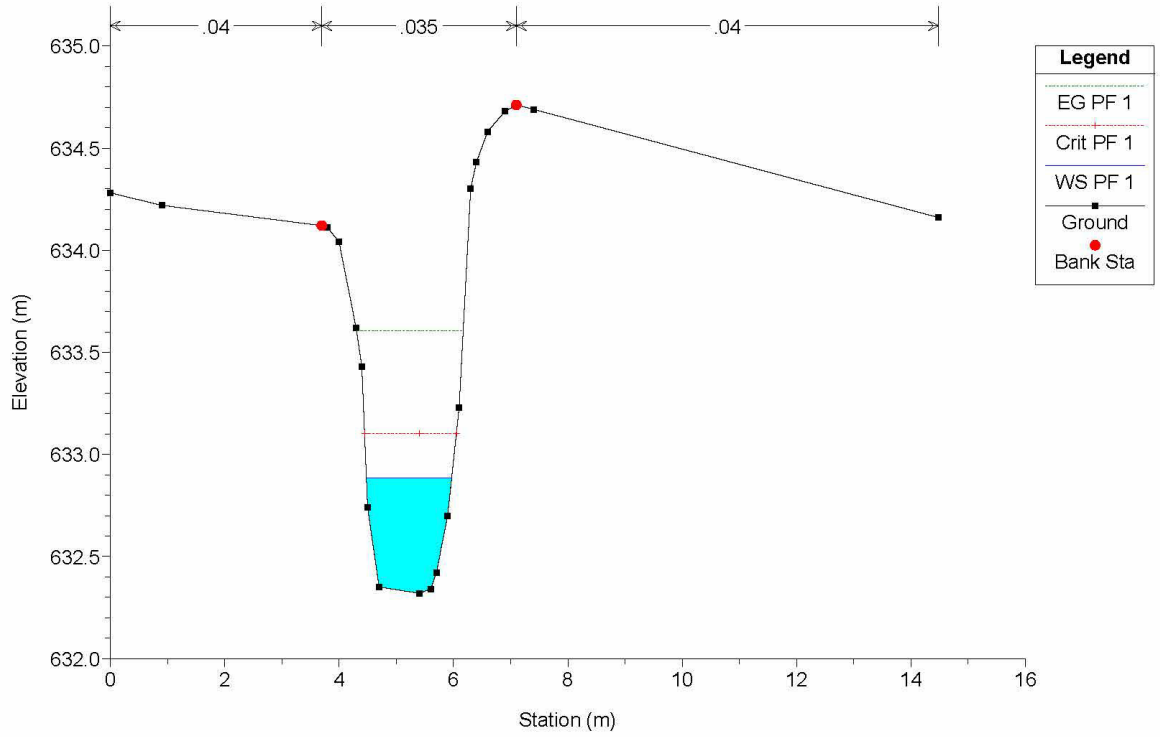
Legend	
EG PF 1	(Dashed green line)
Crit PF 1	(Red dashed line)
WS PF 1	(Blue solid line)
Ground	(Black square)
Bank Sta	(Red dot)

Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_PO\_istr  
 RS = 37



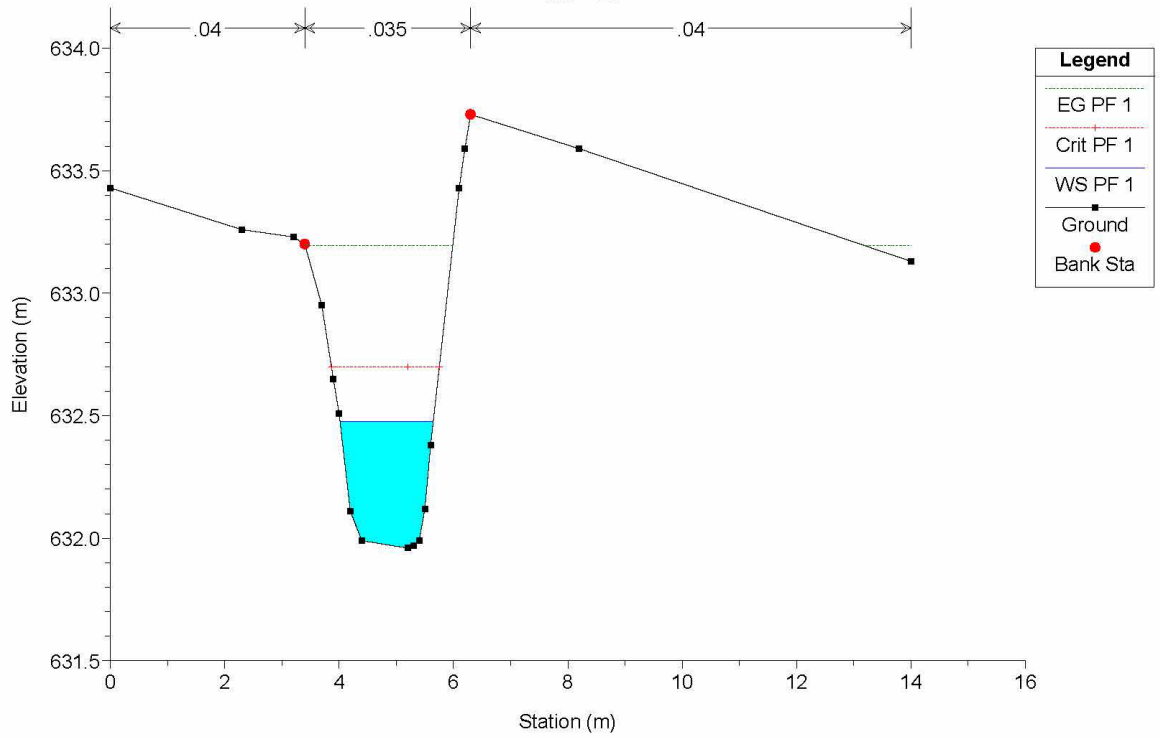
Legend	
EG PF 1	(Dashed green line)
Crit PF 1	(Red dashed line)
WS PF 1	(Blue solid line)
Ground	(Black square)
Bank Sta	(Red dot)

Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_PO\_istr  
RS = 30



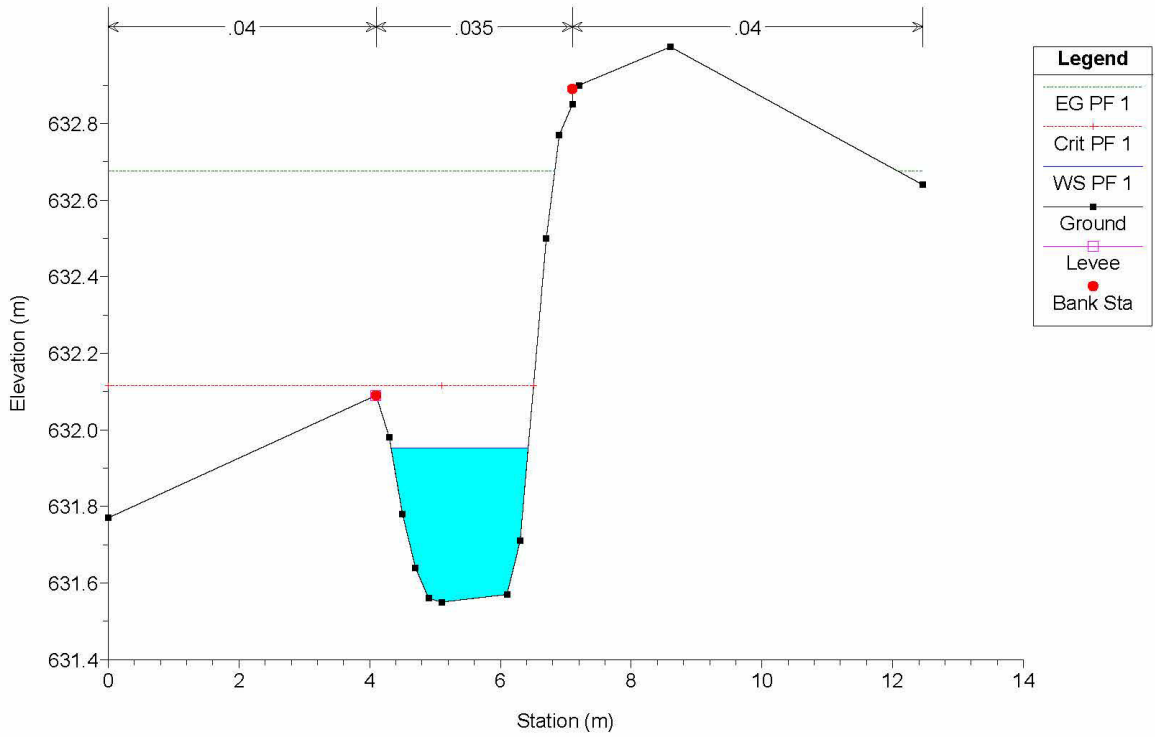
Legend	
EG PF 1	Green dashed line
Crit PF 1	Red dot with vertical line
WS PF 1	Blue horizontal line
Ground	Black line with square markers
Bank Sta	Red dot

Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
Geom: Casello\_PO\_istr  
RS = 25



Legend	
EG PF 1	Green dashed line
Crit PF 1	Red dot with vertical line
WS PF 1	Blue horizontal line
Ground	Black line with square markers
Bank Sta	Red dot

Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_PO\_istr  
 RS = 19



Casello Plan: PO\_istr 1/14/2021  
 Geom: Casello\_PO\_istr  
 RS = 11

