

Dott. Geol. PAOLO CECCARINI

VIA ALDO MORO n° 7/9 - 61049 URBANIA (PU) - Tel.: 0722318800 - Cell.: 3358059476  
e-mail: paolo.ceccarini.studio@gmail.com - C.F.: CCCPLA64B22L498B - P.IVA: 01197920414

Geom. DAVIDE FRATERNALI

VIA SANTA MARIA IN TRIARIA n° 15 - 61049 URBANIA (PU) - Cell.: 3289433415  
e-mail: fraternali.davide81@gmail.com - C.F.: FRTDVD81A13L500K - P.IVA: 02219550411



**COMUNE DI LUNANO**  
PROVINCIA DI PESARO E URBINO

**REGIONE MARCHE**



**LAVORI DI CONSOLIDAMENTO SPONDE FLUVIALI CON TECNICHE DI  
INGEGNERIA NATURALISTICA E RIPULITURA DELL'ALVEO FLUVIALE  
LUNGO IL FIUME FOGLIA IN COMUNE DI LUNANO (PU)**

COMMITTENTE:



**PROGETTO ESECUTIVO**



IL TECNICO INCARICATO



DATA: MAGGIO 2019

## INDICE

1. PREMESSA.....	1
2. UBICAZIONE DELL'AREA.....	1
3. ANALISI PLUVIOMETRICA .....	2
4. ANALISI DEL BACINO IDROGRAFICO .....	5
5. CALCOLO DELLE PORTATE DI PIENA .....	5
6. CARATTERISTICHE DEL TRATTO SOTTOPOSTO A VERIFICA .....	8
7. MODELLAZIONE IDRAULICA A MOTO PERMANENTE .....	9

## ALLEGATI

BACINO IDROGRAFICO	1:50000
TRACCE SEZIONI SIMULAZIONE IDRAULICA	1:6000
VERIFICHE IDRAULICHE IN REGIME DI MOTO PERMANENTE	

## **1. PREMESSA**

Lungo il Fiume Foglia e lungo i suoi affluenti si sono registrate nel corso del tempo delle situazioni di squilibrio territoriale ed ambientale che richiedono l'attuazione di provvedimenti risolutivi in grado di controllare lo sviluppo dei processi geodinamici connessi sia con l'evoluzione dell'ambiente fluviale sia con le attività antropiche presenti lungo i terrazzi alluvionali adiacenti. Per tale motivo il progetto delle opere di risanamento ambientale deve necessariamente prevedere un sistema complesso di interventi per la riduzione del rischio idrogeologico.

Sulla base di sopralluoghi effettuati e delle informazioni raccolte durante gli incontri avuti con i rappresentanti delle Amministrazioni interessate (Unione Montana Montefeltro e Comune di Lunano), è emerso che il tratto fluviale considerato nel presente studio è interessato da problemi di carattere locale quali erosione spondale, eccessivo accumulo di materiale ghiaioso all'interno dell'alveo, presenza di tronchi e alberi nell'alveo del fiume, discontinuità idrauliche e tratti fluviali poco diversificati. Questo tipo di problemi può essere risolto con interventi localizzati, limitati all'alveo e alla fascia perifluviale basati su tecniche di ingegneria naturalistica.

Il presente progetto, redatto dallo scrivente studio su incarico dell'Unione Montana Montefeltro (Determinazione n° 83 del 20.05.2019), prevede l'esecuzione di opere radenti, che quindi non influiscono sulla regolazione del deflusso delle acque, con ricorso a tecniche di ingegneria naturalistica atte alla sistemazione ed alla difesa delle sponde del fiume Foglia in corrispondenza dell'abitato di Lunano (PU), nonché alla protezione della fondazione di una pila del ponte sulla Strada Comunale dei Gessi. Sono inoltre previsti interventi di ripulitura dell'alveo da eseguire in modo discontinuo sullo stesso tratto fluviale.

Ciò premesso, nella presente relazione sono presi in esame gli aspetti idrologico-idraulici, focalizzando l'attenzione sugli eventi di piena. Le fasi in cui è stato articolato lo studio sono così sintetizzabili:

- a) Raccolta ed elaborazione statistica dei dati pluviometrici disponibili
- b) Analisi delle caratteristiche geometriche del bacino idrografico (superficie, sviluppo dell'asta principale, elevazione media, tempo di corrivazione, ecc.)
- c) Determinazione delle portate di massima piena con il metodo razionale
- d) Ricostruzione di un numero significativo di sezioni idrauliche
- e) Modellazione idraulica in regime di moto permanente con utilizzo del programma HEC-RAS (River Analysis System), sviluppato dall'Hydrologic Engineering Center dell'U.S. Army Corps of Engineers
- f) Analisi dei risultati.

## **2. UBICAZIONE DELL'AREA**

L'area d'intervento interessa in modo non continuo un tratto del Fiume Foglia di lunghezza pari a circa 3000 m, ubicato completamente all'interno del territorio comunale di Lunano (PU), in adiacenza ad aree urbanizzate o semi-urbanizzate.

Sulla Carta topografica d'Italia, in scala 1:25000, la zona ricade nel Foglio n° 279 sezione IV "Sassocorvaro" mentre nella Carta Tecnica Regionale in scala 1:10000 il riferimento è rappresentato dalla sezione 279060 "Lunano" del Foglio n° 279. A livello catastale, gli interventi ricadranno in aree demaniali e comunque in ambiti interessati dall'attuale alveo e dalle attuali sponde fluviali.

### 3. ANALISI PLUVIOMETRICA

La determinazione della portata di piena in un corso d'acqua può essere effettuata mediante una metodologia indiretta che prevede l'analisi del processo che, a partire dalle precipitazioni, porta al deflusso attraverso una sezione di bacino (trasformazione afflussi-deflussi).

Questa metodologia di analisi risulta, in generale, più laboriosa di quella diretta che parte dalla distribuzione probabilistica dei deflussi in una sezione di un bacino, ma risulta più indicata nei casi in cui non vi siano dei dati di portata osservati nella sezione, ovvero quando dati osservati in altri bacini non sono facilmente trasferibili a quello in oggetto.

Schematizzando, il processo afflussi-deflussi si articola nelle seguenti fasi:

- l'acqua precipita sul terreno con intensità elevata (afflusso o pioggia lorda);
- una parte di pioggia, nel quantitativo necessario a bagnare tutte le superfici (terreno, vegetazione, strade, ecc.) verrà trattenuta e tenderà col tempo ad evaporare (perdite iniziali);
- dell'acqua che si rende disponibile sul terreno, una parte si infiltra percolando all'interno del terreno (perdite per infiltrazione);
- tutta la pioggia che non viene trattenuta in superficie e non si infiltra, giungerà in tempi diversi alla sezione terminale del bacino (pioggia netta);
- la pioggia netta scorrerà lungo le superfici sotto forma di una lamina d'acqua e successivamente lungo l'alveo del corso d'acqua.

La quantificazione dei deflussi inizia quindi con la raccolta e l'analisi statistica dei dati di precipitazione. In tal senso rivestono fondamentale importanza i valori relativi alle piogge di massima intensità riferite ai tempi di 1, 3, 6, 12 e 24 ore, per le quali si dispone di dati statistici raccolti nella stazione di Sant'Angelo in Vado (PU). La Tabella 3.1, desunta dagli Annali del Servizio Idrografico Nazionale, comprende 51 anni di osservazioni (dal 1951 al 2003 esclusi il 2000 ed il 2001):

**Tabella 3.1 - Precipitazioni di massima intensità riferite a durate di 1, 3, 6, 12 e 24 ore**

Anno	1 ora	3 ore	6 ore	12 ore	24 ore
1951	35.6	49.8	58.8	67.0	75.2
1952	20.0	22.8	24.0	30.0	51.4
1953	22.6	32.6	32.6	39.2	56.0
1954	18.6	25.4	33.0	37.6	49.0
1955	20.3	47.2	47.4	47.4	55.2
1956	20.0	21.0	32.6	47.6	66.6
1957	14.4	14.8	16.0	28.4	44.0
1958	33.4	36.6	36.6	54.0	58.4
1959	30.6	35.8	43.4	45.2	52.6
1960	27.0	57.2	63.6	77.4	96.2
1961	23.2	42.0	43.6	58.6	71.0
1962	15.8	17.8	24.2	31.4	47.0

1963	28.4	35.8	39.8	43.2	67.8
1964	38.0	52.8	61.8	64.6	64.6
1965	23.4	26.4	38.4	42.2	52.4
1966	21.0	31.0	52.0	71.4	85.0
1967	14.6	18.4	29.2	35.0	45.8
1968	19.6	33.4	54.0	71.4	77.0
1969	11.8	26.8	44.6	70.8	78.8
1970	37.6	44.0	44.2	48.2	63.6
1971	17.2	19.6	20.8	32.2	50.2
1972	18.0	30.6	31.0	38.8	42.6
1973	32.0	36.4	43.4	46.4	50.0
1974	20.2	24.6	25.8	25.8	37.4
1975	24.4	27.0	39.4	48.0	70.0
1976	24.4	29.6	39.2	39.4	60.6
1977	26.2	30.0	40.6	48.8	50.6
1978	21.4	36.4	50.0	60.0	100.0
1979	15.6	23.8	32.0	46.2	55.0
1980	17.0	32.0	49.6	76.6	107.2
1981	23.6	28.0	28.0	29.0	54.0
1982	31.0	38.6	43.0	62.6	81.0
1983	49.4	69.0	71.2	94.4	94.6
1984	33.2	63.2	65.0	65.8	73.2
1985	25.2	26.4	36.0	43.0	51.8
1986	27.0	27.6	29.0	40.4	49.4
1987	17.8	21.8	29.6	43.4	67.8
1988	13.8	17.0	22.8	44.0	50.2
1989	31.6	35.4	35.8	41.4	52.8
1990	21.6	27.4	30.8	40.4	65.4
1991	36.4	36.4	52.0	73.2	86.6
1992	36.2	39.0	40.0	41.2	48.4
1993	25.0	46.2	50.2	50.2	51.4
1994	26.8	28.6	33.2	44.4	48.8
1995	28.0	34.8	37.2	50.0	63.2
1996	16.2	21.4	31.4	52.0	67.2
1997	38.8	39.8	45.4	46.8	67.6
1998	36.4	84.6	94.4	94.8	95.4
1999	16.4	36.2	45.0	67.0	69.2
2002	36.0	40.0	43.2	50.0	59.6
2003	11.4	18.6	23.6	37.2	39.0

I dati sopra tabulati vengono trattati statisticamente attraverso la legge di probabilità asintotica di Gumbel. La relazione seguente definisce, in particolare, la probabilità di non superamento di una determinata altezza di pioggia  $h$ :

$$P(h) = e^{(-e)^{h-u}}$$

dove:

$$a = \frac{1.283}{S(h)}$$

$$u = E(h) - 0.45S(h)$$

E(h) rappresenta la media aritmetica di una generica distribuzione di valori mentre S(h) rappresenta lo scarto quadratico medio. Sviluppando, la probabilità di non superamento di una determinata altezza di pioggia (per un determinato tempo di ritorno) risulta essere:

$$P(h(Tr)) = 1 - \frac{1}{Tr}$$

Di conseguenza l'altezza di pioggia relativa ad un determinato tempo di ritorno risulterà essere:

$$H(Tr) = u - a^{-1} \ln(-\ln(P(h(Tr))))$$

La Tabella 3.2 riporta, per diversi tempi di ritorno e per le diverse durate caratteristiche, le precipitazioni massime attese (in mm):

**Tabella 3.2 - Precipitazioni massime attese per durate di 1, 3, 6, 12 e 24 ore**

Tr in anni	Altezza di pioggia attesa H(tr) in mm				
	1 ora	3 ore	6 ore	12 ore	24 ore
<b>500</b>	61.94	94.14	103.40	121.04	136.11
<b>200</b>	55.92	84.37	93.20	109.58	124.22
<b>100</b>	51.36	76.97	85.47	100.90	115.21
<b>50</b>	46.78	69.53	77.71	92.18	106.16
<b>20</b>	40.67	59.62	67.35	80.54	94.09
<b>10</b>	35.95	51.96	59.35	71.56	84.77

Il passo successivo consiste nel determinare, per un determinato tempo di ritorno, la cosiddetta "legge di pioggia" che è generalmente espressa da una relazione di questo tipo:

$$h(t) = at^n$$

Operando una regressione con il metodo dei minimi quadrati si ricavano i valori dei parametri a ed n per ciascun tempo di ritorno (v. Tabella 3.3).

**Tabella 3.3 - Parametri "legge di pioggia"**

Tr in anni	a	n
<b>500</b>	66.147	0.2408
<b>200</b>	59.399	0.2445
<b>100</b>	54.285	0.2479
<b>50</b>	49.155	0.2518

<b>20</b>	42.312	0.2585
<b>10</b>	37.030	0.2651

#### 4. ANALISI DEL BACINO IDROGRAFICO

I parametri caratteristici del bacino idrografico sono:

- Superficie
- Lunghezza dell'asta principale
- Elevazione media rispetto alla sezione di chiusura
- Tempo di corrivazione

Il tempo di corrivazione corrisponde teoricamente al tempo necessario affinché una particella d'acqua caduta sui punti più distanti della superficie scolante, raggiunga la sezione di chiusura.

Le relazioni disponibili nella letteratura tecnica per il calcolo del tempo di corrivazione ( $T_c$ ) sono diverse.

Nel caso specifico viene utilizzata la formula di Giandotti:

$$T_c = \frac{4A^{0.5} + 1.5L}{0.8H_m^{0.5}}$$

dove A è espresso in km<sup>2</sup>, L in km e  $H_m$  in m.

La Tabella 4.1 riassume i dati relativi al bacino idrografico di riferimento.

**Tabella 4.1 - Dati bacino idrografico**

<b>Lunghezza asta principale</b>	m	28274
<b>Quota media</b>	m	638.581
<b>Quota minima</b>	m	255.000
<b>Elevazione media</b>	m	383.581
<b>Superficie</b>	mq	160701136
<b>Tempo di corrivazione</b>	ore	5.943

#### 5. CALCOLO DELLE PORTATE DI PIENA

Per il calcolo delle portate di piena si utilizza il Metodo Razionale, basato sui seguenti presupposti concettuali:

- si utilizza una pioggia di progetto uniforme, distribuita uniformemente su tutto il bacino, di durata pari a quella che provoca la massima piena nel bacino stesso;
- la pioggia netta si ottiene moltiplicando la pioggia di progetto per un coefficiente  $\Phi$  (metodo percentuale per la stima delle piogge nette);

- per la trasformazione delle piogge nette-deflusso si considera un modello cinematico, con diagramma tempi-aree di tipo lineare caratterizzato dal tempo di corrivazione  $T_c$ .

Trascurando la trattazione teorica, per cui si rimanda alla letteratura tecnica, si può dimostrare che utilizzando il modello di corrivazione con istogramma di pioggia netta uniforme, **la durata della precipitazione per cui si ha la massima portata è pari al tempo di corrivazione del bacino.**

Si ha, in pratica:

$$Q_{max} = \frac{A \Phi ARF a T_c^{n-1}}{3.6}$$

dove:

$Q_{max}$  portata in m<sup>3</sup>/sec  
A area bacino in km<sup>2</sup>  
 $T_c$  tempo di corrivazione in ore  
a, n parametri curva di precipitazione

$\Phi$  rappresenta il rapporto fra pioggia netta e pioggia precipitata e viene calcolato in funzione del Curve Number (CN), parametro ricavato dalle tabelle del *Soil Conservation Service (SCS)*.

Il valore del Curve Number dipende, fondamentalmente, da tre elementi:

- tipo di suolo in relazione alla impermeabilità e quindi alla capacità di deflusso (Tab. 5.1);
- tipo di copertura del bacino (Tab. 5.2);
- condizioni iniziali di imbibizione del terreno (Tab. 5.3).

**Tabella 5.1 - Tipo di suolo**

Gruppo	Descrizione
<b>A</b>	Scarsa potenzialità di deflusso. Comprende sabbie profonde con scarsissimo limo e argilla; anche ghiaie profonde, molto permeabili.
<b>B</b>	Potenzialità di deflusso moderatamente bassa. Comprende la maggior parte dei suoli sabbiosi meno profondi che nel gruppo A, ma il gruppo nel suo insieme mantiene alte capacità di infiltrazione anche a saturazione.
<b>C</b>	Potenzialità di deflusso moderatamente alta. Comprende suoli sottili e suoli contenenti considerevoli quantità di argilla e colloidali, anche se meno che nel gruppo D. Il gruppo ha scarsa capacità di infiltrazione a saturazione.
<b>D</b>	Potenzialità di deflusso molto alta. Comprende la maggior parte delle argille con alta capacità di rigonfiamento, ma anche suoli sottili con orizzonti pressoché impermeabili in vicinanza dalla superficie

Nel caso in oggetto il valore di CN dovrebbe essere definito facendo riferimento ad un suolo di tipo C con potenzialità di deflusso moderatamente alta e scarsa capacità di infiltrazione per la presenza di considerevoli quantità di argilla.

**Tabella 5.2 - Tipo di copertura del suolo per classe AMC II**

Tipo di copertura (uso del suolo):	Tipo di suolo			
	A	B	C	D



<b>Terreno coltivato:</b>				
senza trattamenti di conservazione	72	81	88	91
con interventi di conservazione	62	71	78	81
<b>Terreno da pascolo:</b>				
cattive condizioni	68	79	86	89
buone condizioni	39	61	74	80
<b>Praterie:</b>				
buone condizioni	30	58	71	78
<b>Terreni boscosi o forestati:</b>				
terreno sottile, sottobosco povero, senza foglie	45	66	77	83
sottobosco e copertura buoni	25	55	70	77
<b>Spazi aperti, prati rasati, parchi:</b>				
buone condizioni con almeno il 75% dell'area con copertura erbosa	39	61	74	80
condizioni normali, con copertura erbosa intorno al 50%	49	69	79	84
<b>Aree commerciali (impermeabilità 85%)</b>	89	92	94	95
<b>Distretti industriali (impermeabilità 72%)</b>	81	88	91	93
<b>Aree residenziali (impermeabilità media %):</b>				
65%	77	85	90	92
38%	61	75	83	87
30%	57	75	83	87
25%	54	70	80	85
20%	51	68	79	84
<b>Parcheggi impermeabili, tetti</b>	98	98	98	98
<b>Strade:</b>				
Pavimentate con cordoli – fognature	98	98	98	98
inghiaiate o selciate e con buche	76	85	89	91
in terra battuta (non asfaltate)	72	82	87	89

I valori riportati nella tabella 6.2 si riferiscono alla condizione di umidità precedente all'inizio dell'evento, di tipo standard (Antecedent Moisture Condition tipo 2). Per condizioni antecedenti all'evento molto umide (AMC tipo 3) o molto asciutte (AMC tipo 1) viene consigliata dallo stesso SCS la seguente tabella di conversione:

**Tabella 5.3 - Classi AMC (Antecedent Moisture Condition)**

Classe AMC			Classe AMC		
I	II	III	I	II	III
100	100	100	40	60	78
87	95	98	35	55	74
78	90	96	31	50	70
70	85	91	15	30	50
57	75	88	9	20	37
51	70	85	4	10	22
45	65	82	0	0	0

Sulla base di una serie di valutazioni si è giunti all'assunzione di un valore di CN pari a **85**.  
Il procedimento per la determinazione  $\Phi$  si sviluppa come segue:

$$S' = \frac{25400}{CN} - 254$$

$$\Phi = \frac{(p_{max} - 0.2S')^2}{p_{max}(p_{max} + 0.8S')}$$

Dove  $p_{max}$  è l'altezza di pioggia corrispondente al tempo di corrivazione, calcolata utilizzando la curva di precipitazione.

Il parametro ARF rappresenta invece il coefficiente di riduzione areale. Esso è un coefficiente riduttivo ( $< 1$ ) che decresce con il crescere della superficie del bacino. Nella fattispecie è stata utilizzata la relazione di Wallingford:

$$ARF = (1 - 0.0394A^{0.354})T_c^{-(0.4 - 0.003832(4.6 - \ln A)^2)}$$

$T_c$  è il tempo di corrivazione in ore mentre  $A$  è la superficie del bacino in  $Km^2$ .

Nella Tabella 5.4 sono riportati i risultati dei calcoli per 6 differenti tempi di ritorno:

**Tabella 5.4 - Portate di massima piena per differenti tempi di ritorno**

Tr		500	200	100	50	20	10
L	m	28274	28274	28274	28274	28274	28274
Qm	m	638.581	638.581	638.581	638.581	638.581	638.581
Qmin	m	255.000	255.000	255.000	255.000	255.000	255.000
Hm	m	383.581	383.581	383.581	383.581	383.581	383.581
A	m <sup>2</sup>	160701135	160701136	160701137	160701138	160701139	160701140
Tc	ore	5.943	5.943	5.943	5.943	5.943	5.943
a	mm	66.147	59.399	54.285	49.155	42.312	37.030
n		0.2408	0.2445	0.2479	0.2518	0.2585	0.2651
p	mm	101.600	91.839	84.442	76.995	67.073	59.394
ARF		0.883	0.883	0.883	0.883	0.883	0.883
CN		85.000	85.000	85.000	85.000	85.000	85.000
s'	mm	44.824	44.824	44.824	44.824	44.824	44.824
Φ		0.614	0.586	0.561	0.533	0.489	0.450
Qmax	m <sup>3</sup> /sec	414.125	356.785	314.134	272.047	217.609	177.111

Nella modellazione idraulica proposta nel seguito si farà direttamente riferimento alle portate di piena relative al tempo di ritorno di 200 anni.

## 6. CARATTERISTICHE DEL TRATTO SOTTOPOSTO A VERIFICA

Nello stralcio cartografico in scala 1:6000 riportato in allegato, è stato evidenziato il tratto di asta fluviale sottoposto a verifica, caratterizzato da una lunghezza di **3015.1 m**.

Per la ricostruzione delle caratteristiche geometrico-morfologiche del corso d'acqua sono stati utilizzati dati provenienti dai rilievi delle aste fluviali eseguiti dalla Regione Marche.

Lungo il tratto di riferimento sono state considerate n° 17 sezioni trasversali (HR1...HR17). La quota minima dell'alveo è pari a 254.88 m nella sezione HR1 e a 276.36 m nella sezione HR17. Il dislivello complessivo risulta quindi uguale a **21.48** m a cui corrisponde una pendenza longitudinale media pari a **0.71%**. In realtà circa un quarto del salto altimetrico si ha in corrispondenza della briglia (sezioni HR08-HR09) ubicata a valle del ponte sulla Strada Provinciale n° 147 di Paganica (sezioni HR10-HR11) e pertanto la pendenza media a valle e a monte di questo manufatto è pari allo 0.5% circa.

Oltre alla briglia e al ponte sopra menzionato, nel tratto sottoposto ad analisi idraulica sono inoltre presenti il ponte sulla Strada Comunale dei Gessi (Sezioni HR02-HR03) e il ponte sulla Strada Comunale di Camino (Sezioni HR14-HR15).

## 7. MODELLAZIONE IDRAULICA A MOTO PERMANENTE

Il moto permanente o stazionario nei corsi d'acqua e nei canali si ha quando in ogni punto della massa fluida le caratteristiche di moto non variano nel tempo ma solo da punto a punto.

A questo scopo è stato utilizzato il programma HEC-RAS (ver. 5.0.3) sviluppato dall' Hydrologic Engineering Center per la valutazione di fenomeni idraulici (River Analysis System).

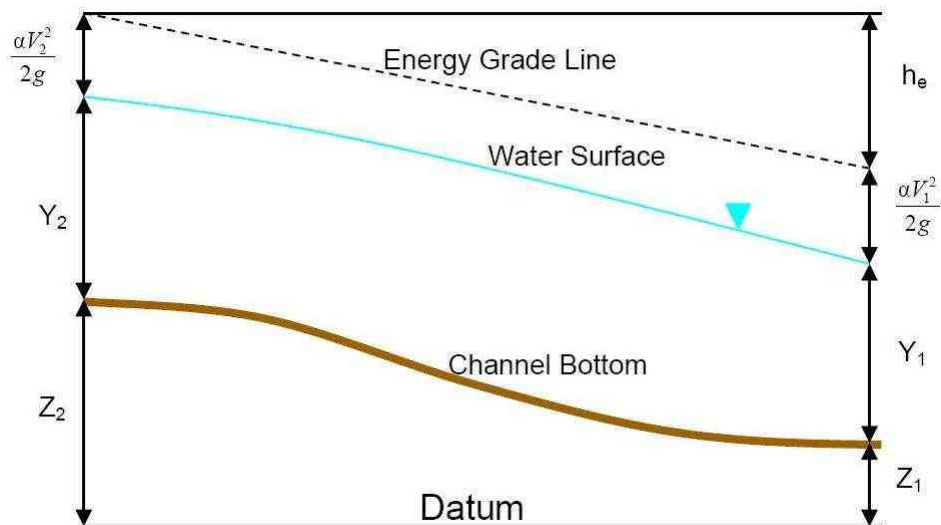
Il calcolo del profilo viene eseguito da una sezione a quella successiva con una procedura iterativa alle differenze finite (Standard Step Method), risolvendo la seguente equazione (equazione di energia):

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad [8.1]$$

in cui:

$Y_1, Y_2$	: altezza rispetto al fondo della sezione
$Z_1, Z_2$	: quota fondo sezione rispetto ad un livello di riferimento
$V_1, V_2$	: velocità media (Portata totale / Area totale)
$\alpha_1, \alpha_2$	: coefficiente di Coriolis
$g$	: accelerazione di gravità
$h_e$	: perdita di carico complessiva

Il diagramma seguente rende intuitivo il significato dell'equazione di energia:



La perdita di carico totale è il risultato di due contributi:

- perdite di carico per attrito;
- perdite di carico dovute a repentine variazioni di sezione (contrazione – espansione).

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha V_2^2}{2g} - \frac{\alpha V_1^2}{2g} \right| \quad [8.2]$$

dove:

- $L$  : distanza media tra le due sezioni  
 $\bar{S}_f$  : pendenza linea dei carichi per attrito tra le due sezioni  
 $C$  : coefficiente di perdita di carico per contrazione o espansione

La distanza  $L$  viene calcolata come media pesata delle distanze relative a tre tratti:

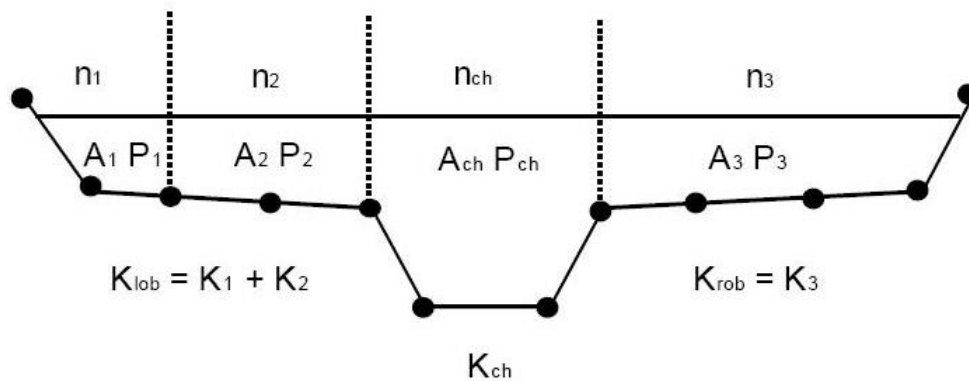
- area golenale sinistra (left overbank)
- canale centrale (channel)
- area golenale destra (right overbank)

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}}$$

Dove:

- $L_{lob}, L_{ch}, L_{rob}$  : distanze fra tratti corrispondenti di due sezioni successive  
 $\bar{Q}_{lob}, \bar{Q}_{ch}, \bar{Q}_{rob}$  : media aritmetica delle portate relative a tratti corrispondenti

La determinazione della capacità di trasporto e del coefficiente di velocità (coefficiente di Coriolis) di una data sezione richiede la suddivisione della sezione stessa in tratti caratterizzati dallo stesso valore del parametro di Manning.



La capacità di trasporto è calcolata distintamente per ogni tratto:

$$Q = KS_f^{1/2}$$

$$K = \left( \frac{1.486}{n} \right) AR^{1/2}$$

Le grandezze sotto elencate si riferiscono ad un singolo tratto di sezione:

- $K$  : capacità di trasporto
- $n$  : coefficiente di Manning
- $A$  : area di deflusso
- $R$  : raggio idraulico (area di deflusso / perimetro bagnato)

Il coefficiente di velocità  $\alpha$  velocità viene calcolato in funzione delle capacità di trasporto e delle aree di deflusso:

$$\alpha = \frac{A_t^2 \left( \frac{K_{lob}^3}{A_{lob}^2} + \frac{K_{ch}^3}{A_{ch}^2} + \frac{K_{rob}^3}{A_{rob}^2} \right)}{K_t^3}$$

dove:

- $A_t$  : area bagnata totale della sezione
- $A_{lob}, A_{ch}, A_{rob}$  : aree bagnate golena sinistra, canale, golena destra
- $K_t$  : capacità di trasporto totale della sezione
- $K_{lob}, K_{ch}, K_{rob}$  : capacità di trasporto golena sinistra, canale, golena destra

HEC-RAS calcola le perdite di carico per attrito come prodotto di  $S_f$  e  $L$ . Si ricorda che:

$$L = \frac{L_{lob} \bar{Q}_{lob} + L_{ch} \bar{Q}_{ch} + L_{rob} \bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}}$$

$S_f$  rappresenta la perdita di carico unitaria per attrito (friction slope) e può essere calcolata in ciascuna sezione dall'equazione di Manning:

$$\bar{S}_f = \left( \frac{Q}{K} \right)^2$$

a) Capacità di trasporto media

$$\bar{S}_f = \left( \frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2$$

b) Media aritmetica della pendenze

$$\bar{S}_f = \frac{S_{f1} + S_{f2}}{2}$$

c) Media geometrica della pendenze

$$\bar{S}_f = \sqrt{S_{f1} S_{f2}}$$

d) Media armonica della pendenze

$$\bar{S}_f = \frac{2S_{f1}S_{f2}}{S_{f1} + S_{f2}}$$

La quota del pelo libero dell'acqua in una generica sezione è calcolata attraverso una procedura iterativa che utilizza le equazioni 8.1 e 8.2. La struttura iterativa è composta dai seguenti passi:

- Assunzione della quota del pelo libero nella sezione di monte (corrente lenta), in quella di valle (corrente veloce) o in entrambe (corrente mista).
- In funzione delle condizioni assunte si determina la capacità di trasporto e la velocità.
- Con i valori ottenuti si calcola  $S_f$  e si applica la formula 8.2 per determinare  $h_e$ .
- Con i valori ottenuti nei passi b) e c) si determina  $WS_2$  dall'equazione 8.1.
- Il valore calcolato di  $WS_2$  viene confrontato con quello imposto nel punto a) e l'intera procedura viene ripetuta fino a quando la differenza non è inferiore a una tolleranza predefinita (tipicamente 0.003 m).

La quota del pelo libero di cui al punto a) può essere definita anche sulla base del valore dell'altezza critica, calcolato automaticamente dal programma. In alternativa possono essere anche fornite condizioni al contorno diverse.

Il carico totale per una determinata sezione è definito come segue:

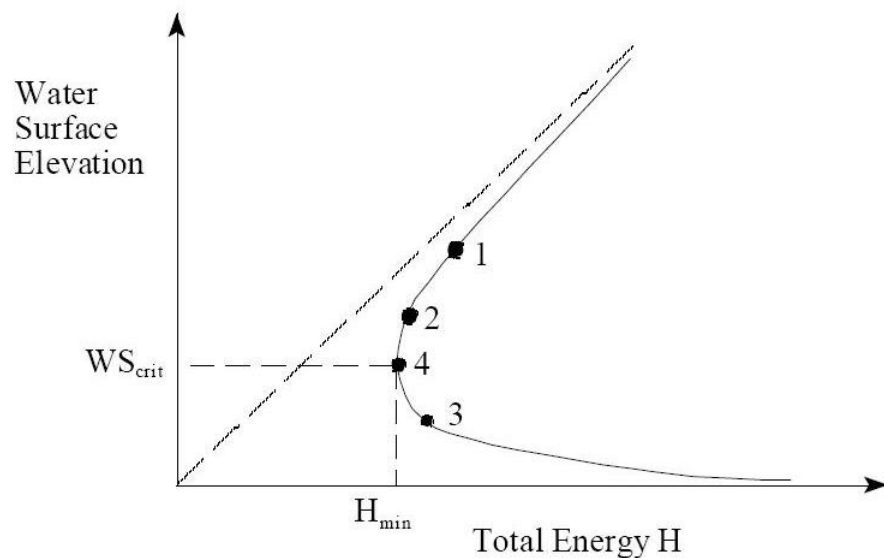
$$H = WS + \frac{\alpha V^2}{2g}$$

dove:

$H$  : carico totale

$WS$  : altezza pelo libero

L'altezza critica è la quota del pelo libero per cui il carico totale è minimo (energia specifica minima per quella sezione e per un dato flusso).



Per la determinazione di  $WS_{crit}$  si utilizza una procedura iterativa dove i valori di H sono calcolati in funzione della quota del pelo libero utilizzando l'equazione sopra riportata fino a che il valore minimo di H non è stato individuato.

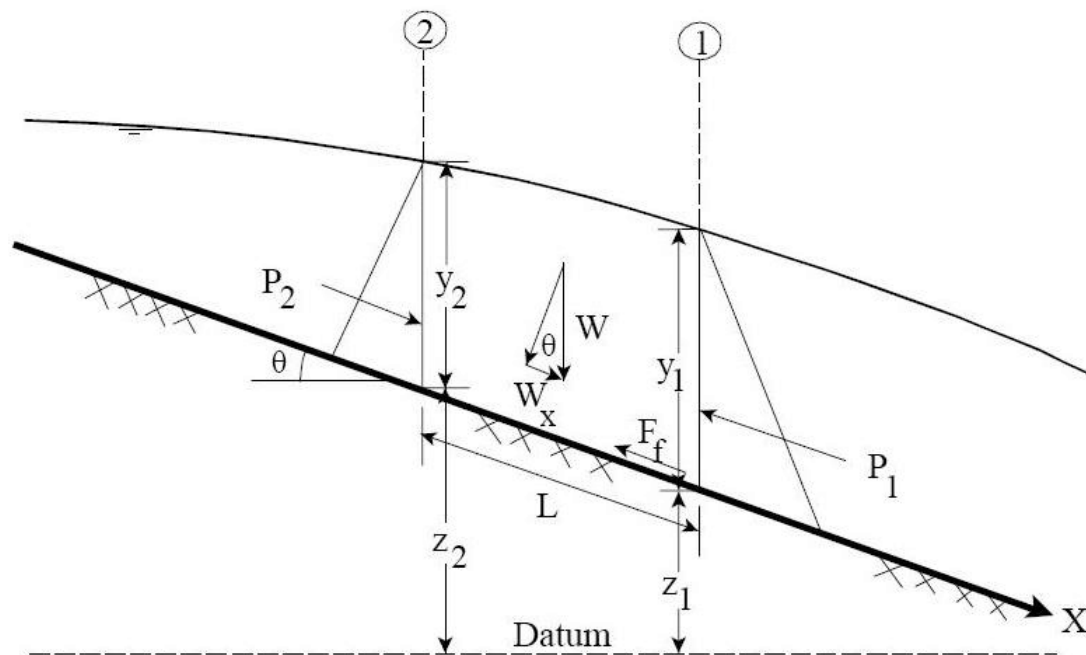
HEC-RAS utilizza due metodi per calcolare il valore di  $WS_{crit}$ : il metodo parabolico e il metodo secante. Il metodo parabolico è computazionalmente più veloce ma è in grado di individuare un solo minimo, situazione che comunque si verifica nella maggior parte delle sezioni. In ogni caso se il calcolo non converge, HEC-RAS automaticamente riesegue la ricerca con il metodo secante.

Nei punti in cui la quota del pelo libero interseca l'altezza critica l'equazione di energia 8.1 non è più utilizzabile in quanto valida solo per regimi di moto permanente gradualmente vario. Ci sono diverse situazioni in cui si verifica il passaggio da corrente lenta a corrente veloce e viceversa. Tali situazioni comprendono risalti idraulici, repentine variazioni di sezione, variazioni di pendenza significative, confluenze ovvero presenza di manufatti come ponti, trombini o briglie.

In questi casi HEC-RAS utilizza l'equazione della quantità di moto derivata dalla seconda legge di Newton:

$$\text{Forza} = \text{Massa} \times \text{Accelerazione}$$

$$\sum F_x = ma$$



Applicando la seconda legge di Newton al volume di acqua compreso tra le sezioni 1 e 2 si può scrivere:

$$P_2 - P_1 + W_x - F_f = Q\rho\Delta V_x$$

dove:

- $P$  : spinta idrostatica nei punti 1 e 2
- $W_x$  : componente lungo la direzione  $X$  del peso dell'acqua
- $F_f$  : risultante forze di attrito
- $Q$  : portata
- $\rho$  : densità acqua
- $\Delta V_x$  : differenza di velocità da 2 a 1 lungo la direzione  $X$

La forza lungo la direzione  $X$  dovuta alla spinta idrostatica è data da:

$$P = \gamma A \bar{Y} \cos\theta$$

Per pendenze longitudinali ordinarie ( $< 10\%$ ),  $\cos\theta$  è sostanzialmente pari a 1 ed i valori delle due componenti risulteranno:

$$P_1 = \gamma A_1 \bar{Y}_1, \quad P_2 = \gamma A_2 \bar{Y}_2$$

La componente longitudinale della forza peso può essere calcolata attraverso i seguenti passaggi:

$$P_1 = \gamma \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) L$$

$$W_x = W \sin\theta$$



$$P_1 = \gamma A_1 \bar{Y}_1$$

$$\sin\theta = \frac{z_2 - z_1}{L} = S_0$$

$$W_x = \gamma \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) L S_0$$

dove:

$L$  : distanza tra le sezioni 1 e 2 lungo l'asse  $X$

$S_0$  : pendenza media del canale

$z_i$  : elevazione media dell'alveo nei punti 1 e 2

La risultante delle forze di attrito è:

$$F_f = \tau \bar{P} L$$

dove:

$\tau$  : sforzo di taglio

$\bar{P}$  : perimetro bagnato medio sezioni 1 e 2

$$\tau = \gamma \bar{R} \bar{S}_f$$

dove:

$\bar{R}$  : raggio idraulico medio sezioni 1 e 2

$\bar{S}_f$  : pendenza linea dei carichi per attrito tra le due sezioni

$$F_f = \gamma \left( \frac{\bar{A}}{\bar{P}} \right) \bar{S}_f \bar{P} L$$

$$F_f = \gamma \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) \bar{S}_f \bar{P} L$$

La quantità di moto della massa fluida è:

$$ma = Q \rho \Delta V_x$$

dove:

$$\rho = \frac{\gamma}{g}$$

$$\Delta V_x = \beta_1 V_1 - \beta_2 V_2$$

Si ha quindi:

$$ma = Q \rho \Delta V_x = Q \frac{\gamma}{g} (\beta_1 V_1 - \beta_2 V_2)$$

dove:

$\beta$  : coefficiente che dipende dalla distribuzione delle velocità in sezioni irregolari

Dopo ulteriori sviluppi si ottiene la forma funzionale dell'equazione della quantità di moto usata in HEC-RAS:

$$\frac{Q_2 \beta_2}{g A_2} + A_2 \bar{Y}_2 + \frac{A_1 + A_2}{2} L S_0 - \frac{A_1 + A_2}{2} L \bar{S}_f = \frac{Q_1 \beta_1}{g A_1} + A_1 \bar{Y}_1$$

Per un esame più dettagliato delle basi teoriche su cui è stato sviluppato il software HEC-RAS, si rimanda comunque alla documentazione tecnica liberamente scaricabile dal sito <http://www.hec.usace.army.mil>.

Per i dettagli relativi all'analisi idraulica in oggetto si rimanda invece alle tabelle e ai grafici prodotti dal software e forniti in allegato.

Nel seguito si elencano alcune note relative alla simulazione:

- per tutte le sezioni è stata utilizzata la portata di piena duecentennale, pari a 356.785 mc/s;
- il suddetto valore di portata è da considerare cautelativo in quanto calcolato per un tipo di suolo, per un tipo di copertura superficiale e per condizioni di umidità del terreno molto impegnativi;
- sia per il canale principale che per le aree golenali è stato assunto un coefficiente di Manning pari a 0.05 s/m<sup>1/3</sup>;
- per le sezioni normali si è considerato un coefficiente di contrazione di 0.1 ed un coefficiente di espansione di 0.3, valori comunemente utilizzati nella pratica applicativa;
- per i ponti è invece considerato un coefficiente di contrazione di 0.3 e un coefficiente di espansione di 0.5.
- le simulazioni sono state eseguite in regime di corrente sub-critico e super-critico (v. Tabella 7.1).

**Tabella 7.1 - Risultati della modellazione idraulica**

SEZIONE	REGIME SUB-CRITICO			REGIME SUPER-CRITICO		
	Q <sub>alveo</sub> (m)	Q <sub>max</sub> (m)	Vel (m/s)	Q <sub>alveo</sub> (m)	Q <sub>max</sub> (m)	Vel (m/s)
HR17	276.36	280.15	1.89	276.36	279.53	3.26
HR16	274.27	277.91	2.94	274.27	277.55	3.86
HR15	272.34	275.92	2.34	272.34	274.91	3.92
HR14.5 Ponte						
HR14	272.34	275.82	2.44	272.34	274.68	4.59
HR13	271.25	273.91	3.75	271.25	273.91	3.75
HR12	269.17	273.87	0.99	269.17	271.73	3.25
HR11	267.77	273.3	2.82	267.77	271.59	4.88
HR10.5 Ponte						
HR10	267.77	273.16	2.93	267.77	271.06	6.25
HR09	269.89	272.47	4.40	269.89	272.46	4.42
HR08	263.26	269.45	1.92	263.26	264.93	12.24
HR07	263.98	268.16	3.50	263.98	267.76	4.33
HR06	261.87	265.27	3.24	261.87	264.96	3.90
HR05	259.99	263.27	2.24	259.99	262.66	3.50

<b>HR04</b>	257.8	260.7	3.01	257.80	260.55	3.40
<b>HR03</b>	256.24	259.24	1.94	256.24	258.28	3.49
<b>HR2.5 Ponte</b>						
<b>HR02</b>	256.24	259.18	1.99	256.24	258.09	4.10
<b>HR01</b>	254.88	257.08	3.36	254.88	257.08	3.35

Si evidenzia che le simulazioni sono state finalizzate a caratterizzare il comportamento idraulico di questo tratto del Fiume Foglia per avere dei riferimenti numerici generali sui tiranti idrici e sulle velocità della corrente.

Come già rilevato in premessa, le nuove opere (scogliere) saranno di tipo radente e quindi costituiranno delle strutture di consolidamento delle sponde (e della fondazione della pila del ponte) che non influiranno in maniera negativa sul deflusso delle acque.

Per contro gli interventi di ripulitura, contestualmente previsti, avranno lo scopo di regolarizzare il deflusso eliminando le situazioni dove gli accumuli di ghiaia e di materiale legnoso hanno ridotto l'efficienza delle sezioni.

In allegato è fornita una tabella riassuntiva delle verifiche in regime di moto permanente per lo stato attuale in condizioni sub-critiche, nella quale sono riportati ulteriori dati. Sono inoltre allegati il profilo longitudinale e le sezioni trasversali sviluppati dallo stesso software di calcolo. La Tabella 7.2 riporta i dislivelli fra la quota di massima piena e la quota minima dell'alveo, in condizioni sub-critiche e super-critiche, nelle sezioni a valle e a monte rispetto alla posizione delle tre difese spondali.

**Tabella 7.2 - Altezze di piena (TR=200 anni) nelle sezioni di riferimento**

<b>DIFESA SPONDALE</b>	<b>REGIME SUB-CRITICO</b>		<b>REGIME SUPER-CRITICO</b>	
	<b><math>\Delta_{monte}</math> (m)</b>	<b><math>\Delta_{valle}</math> (m)</b>	<b><math>\Delta_{monte}</math> (m)</b>	<b><math>\Delta_{valle}</math> (m)</b>
<b>DS1</b>	3.64 (HR16)	3.58 (HR15)	3.28 (HR16)	2.57 (HR15)
<b>DS2</b>	3.40 (HR06)	3.28 (HR05)	3.09 (HR06)	2.67 (HR05)
<b>DS3</b>	2.94 (HR02)	2.20 (HR01)	1.85 (HR02)	2.20 (HR01)

E' opportuno precisare, al riguardo, che l'altezza delle scogliere è stata fissata con lo scopo di proteggere la parte basale delle scarpate da processi erosivi che si attuano per valori di portate di piena inferiori a quelle duecentennali e quindi per livelli dell'acqua che si raggiungono con maggiore frequenza e con maggiore incidenza temporale.

Data: Maggio 2019






BACINO IDROGRAFICO scala 1:50000

DATI BACINO

SUPERFICIE	160.70	kmq
SVILUPPO ASTA PRINCIPALE	28.274	km
QUOTA MEDIA DEL BACINO	638.58	m
QUOTA SEZIONE DI CHIUSURA	255.00	m
ELEVAZIONE MEDIA DEL BACINO	383.58	m
TEMPO DI CORRIVAZIONE	5.943	ore
PORTATA DI MAX. PIENA	356.785	mc/sec

LEGENDA

-  LIMITE DEL BACINO AFFERENTE
-  PERCORSO DI MAGGIOR ESTENSIONE
-  UBICAZIONE SEZIONE DI CHIUSURA





**VERIFICHE IDRAULICHE A MOTO PERMANENTE**

**REGIME SUBCRITICO - TR = 200 anni**

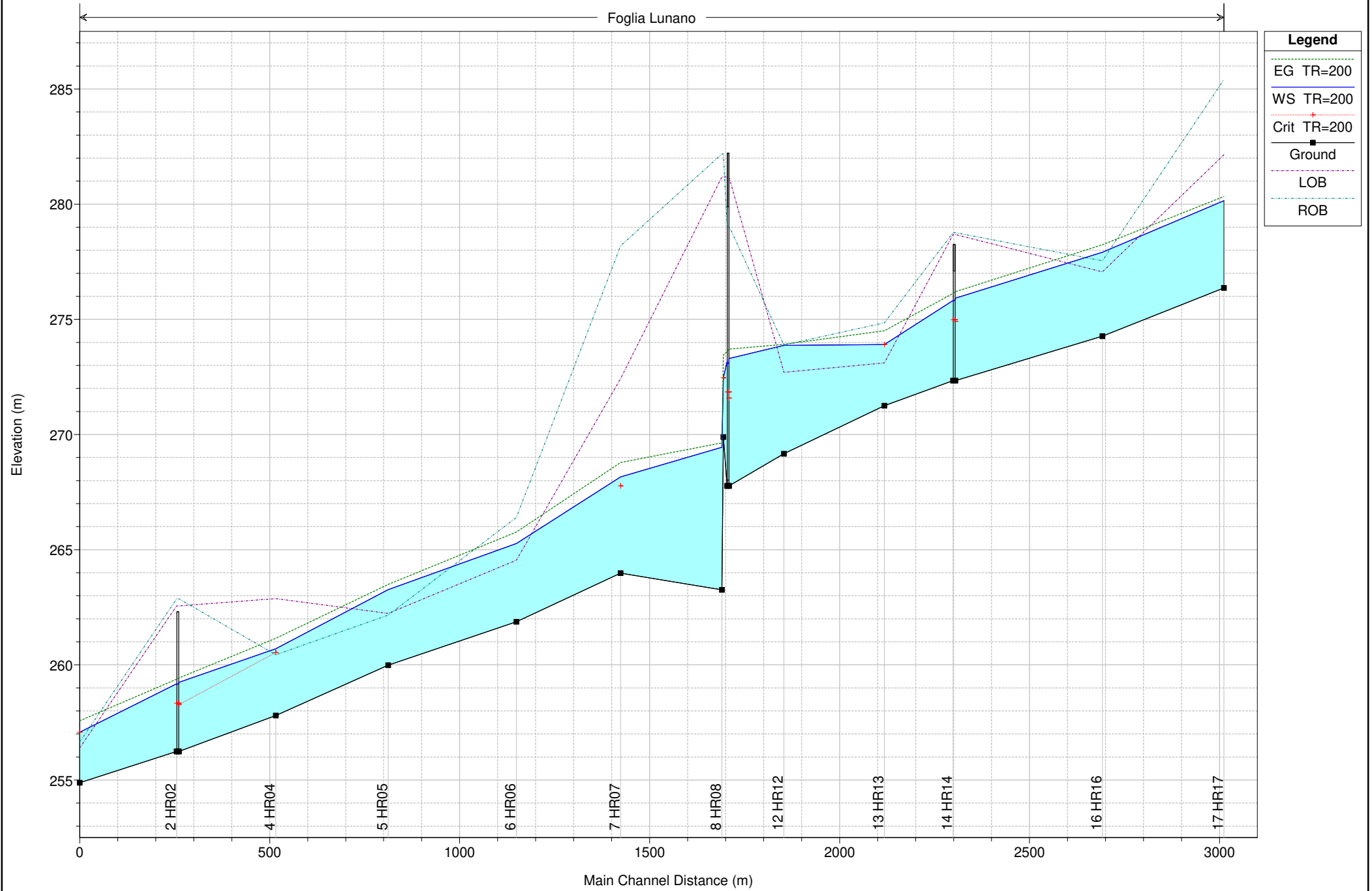
**STATO ATTUALE**

HEC-RAS Plan: Plan 01 River: Foglia Reach: Lunano Profile: PF 1

Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
Lunano	17	PF 1	356.78	276.36	280.15		280.33	0.006441	1.89	188.37	145.46	0.53
Lunano	16	PF 1	356.78	274.27	277.91		278.24	0.006549	2.94	157.37	110.71	0.58
Lunano	15	PF 1	356.78	272.34	275.92	274.91	276.20	0.004591	2.34	152.65	64.61	0.49
Lunano	14.5		Bridge									
Lunano	14	PF 1	356.78	272.34	275.82		276.12	0.005247	2.44	146.42	64.42	0.52
Lunano	13	PF 1	356.78	271.25	273.91	273.91	274.51	0.017609	3.75	111.72	94.03	0.91
Lunano	12	PF 1	356.78	269.17	273.87		273.91	0.000557	0.99	378.47	135.33	0.18
Lunano	11	PF 1	356.78	267.77	273.30	271.59	273.71	0.003952	2.82	126.31	31.59	0.45
Lunano	10.5		Bridge									
Lunano	10	PF 1	356.78	267.77	273.16		273.60	0.004414	2.93	121.80	31.49	0.48
Lunano	9	PF 1	356.78	269.89	272.47	272.47	273.46	0.021016	4.40	81.05	41.04	1.00
Lunano	8	PF 1	356.78	263.26	269.45		269.64	0.001320	1.92	185.76	37.74	0.28
Lunano	7	PF 1	356.78	263.98	268.16	267.77	268.79	0.013077	3.50	101.84	51.47	0.80
Lunano	6	PF 1	356.78	261.87	265.27		265.77	0.009160	3.24	121.35	74.32	0.68
Lunano	5	PF 1	356.78	259.99	263.27		263.49	0.004882	2.24	179.26	116.01	0.50
Lunano	4	PF 1	356.78	257.80	260.70	260.54	261.15	0.014438	3.01	122.83	111.57	0.81
Lunano	3	PF 1	356.78	256.24	259.24	258.28	259.43	0.003639	1.94	184.43	89.43	0.43
Lunano	2.5		Bridge									
Lunano	2	PF 1	356.78	256.24	259.18		259.38	0.003984	1.99	179.14	88.80	0.45
Lunano	1	PF 1	356.78	254.88	257.08	257.08	257.58	0.015041	3.36	127.36	132.79	0.84

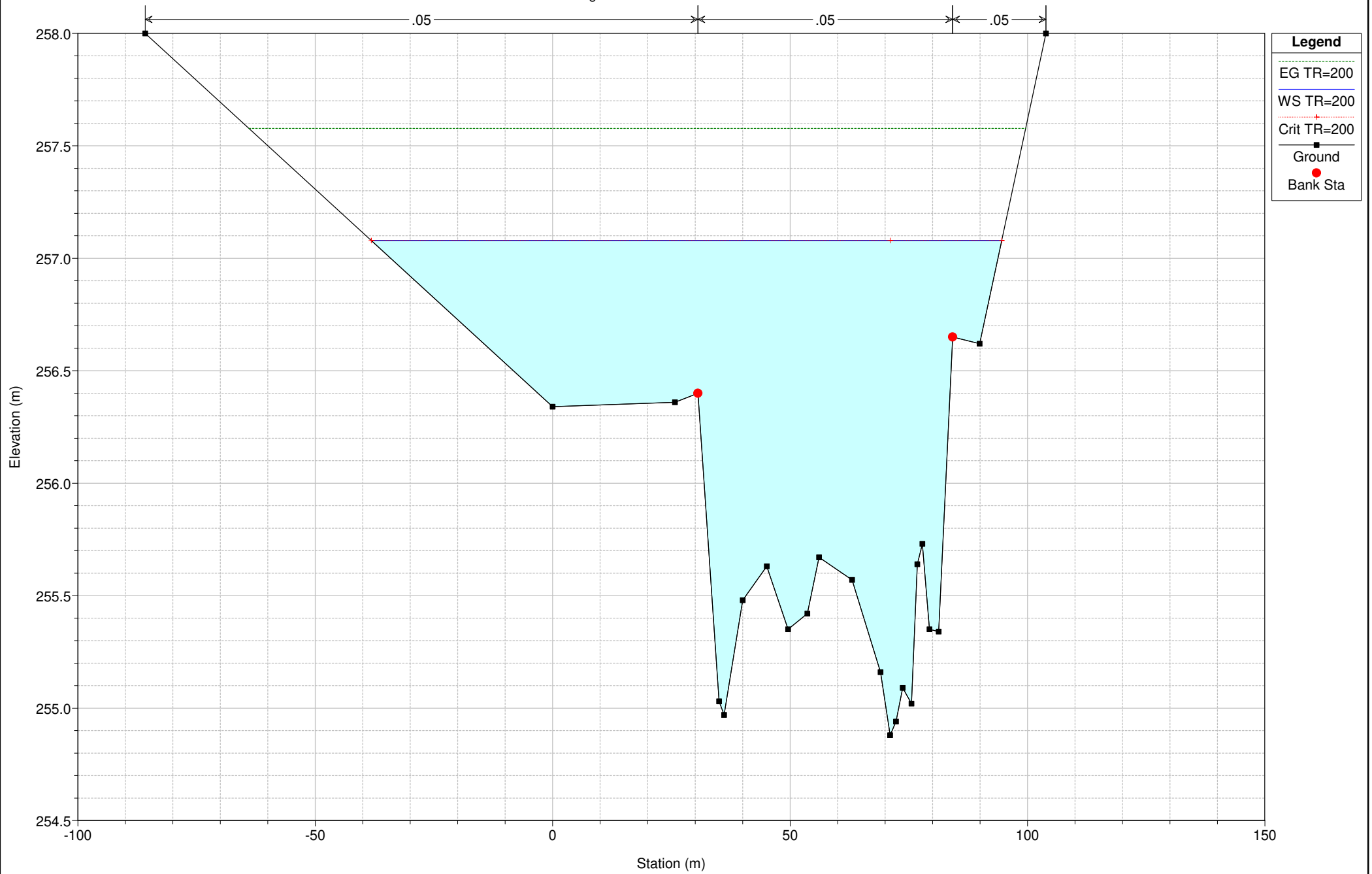
Lunano Plan: Plan 01

Geom: Lunano Flow: Flow 01

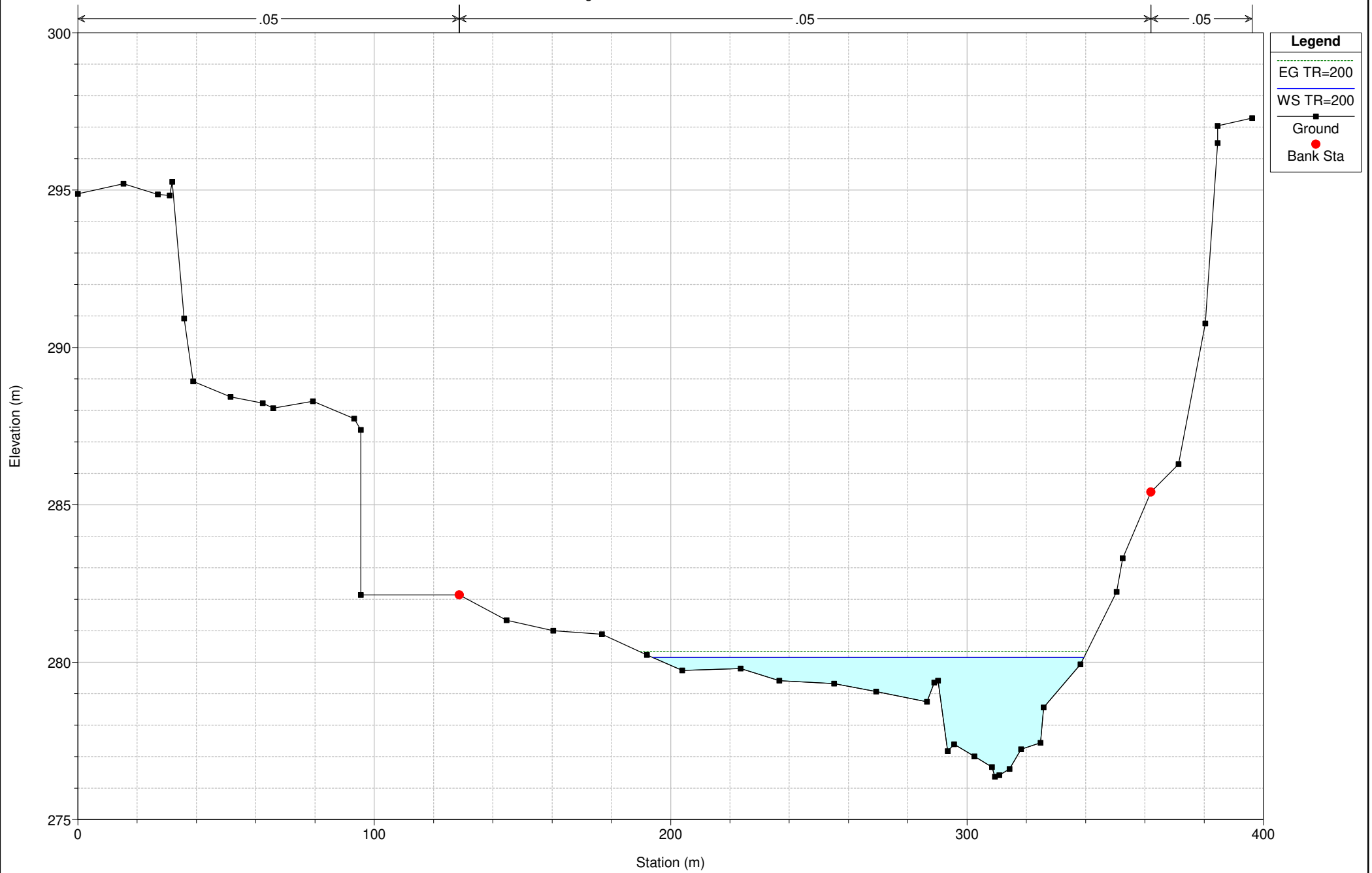




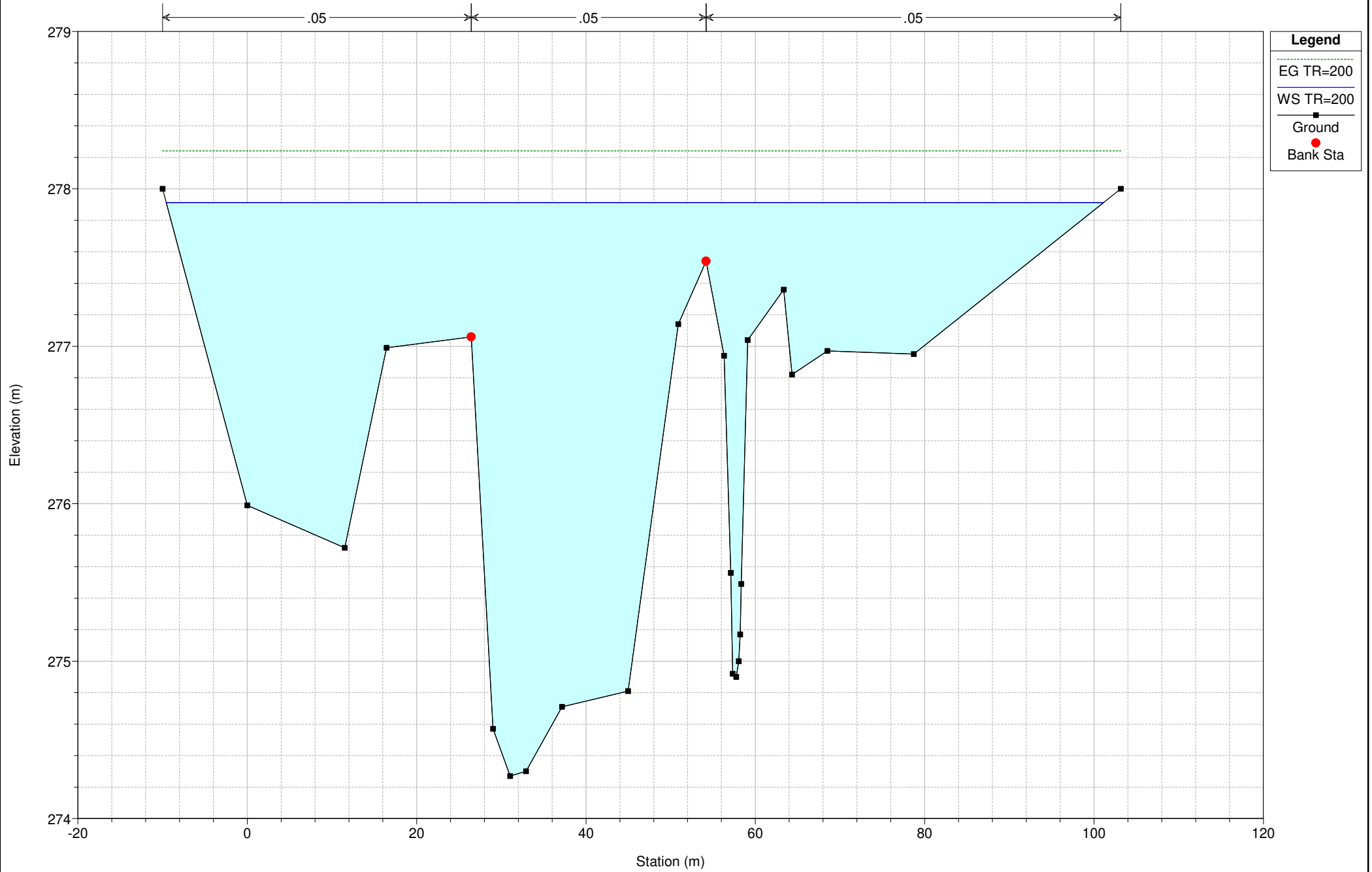
Lunano Plan: Plan 01  
Geom: Lunano Flow: Flow 01  
River = Foglia Reach = Lunano RS = 1 HR01



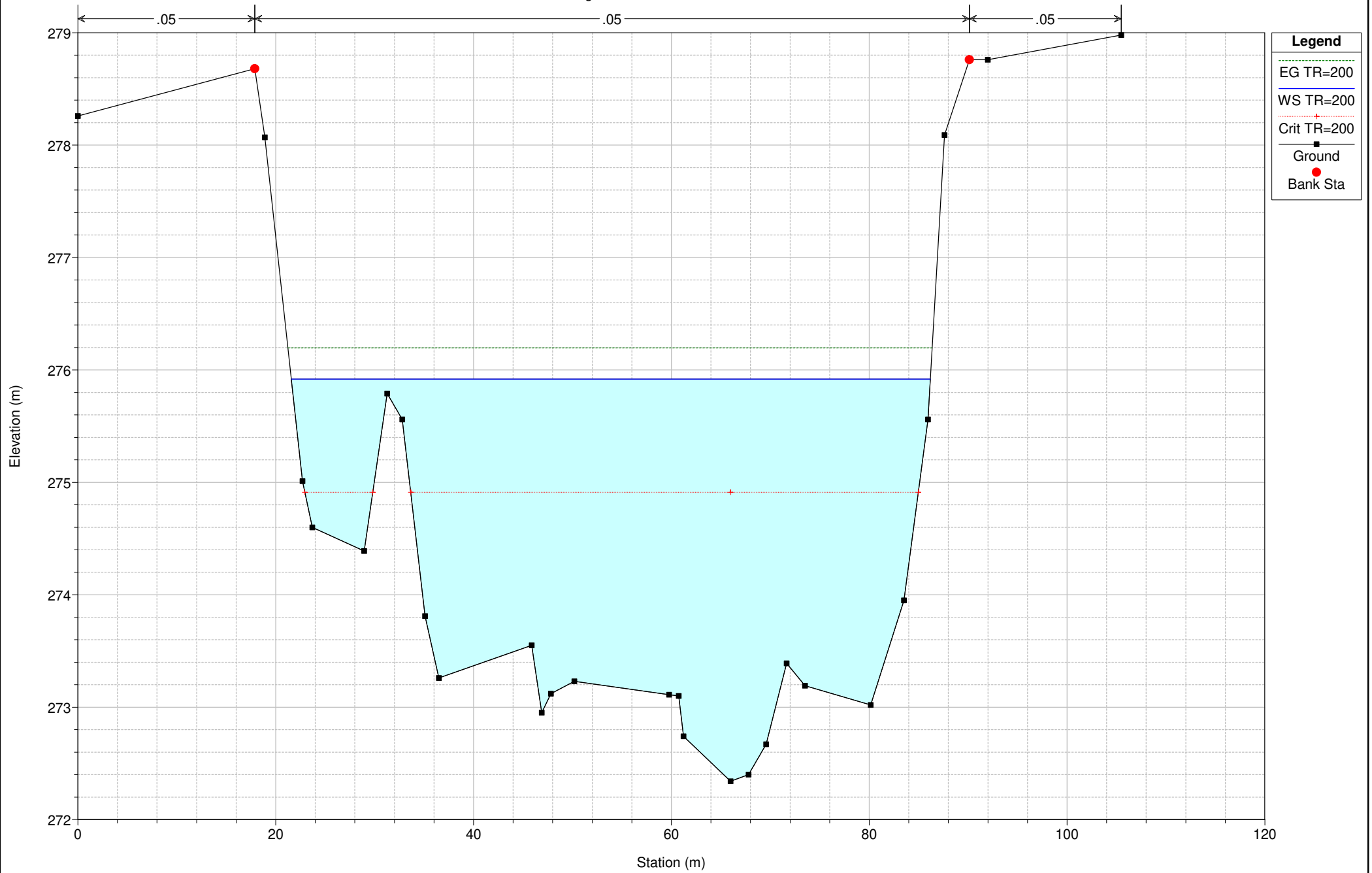
Lunano Plan: Plan 01  
Geom: Lunano Flow: Flow 01  
River = Foglia Reach = Lunano RS = 17 HR17



Lunano Plan: Plan 01  
Geom: Lunano Flow: Flow 01  
River = Foglia Reach = Lunano RS = 16 HR16



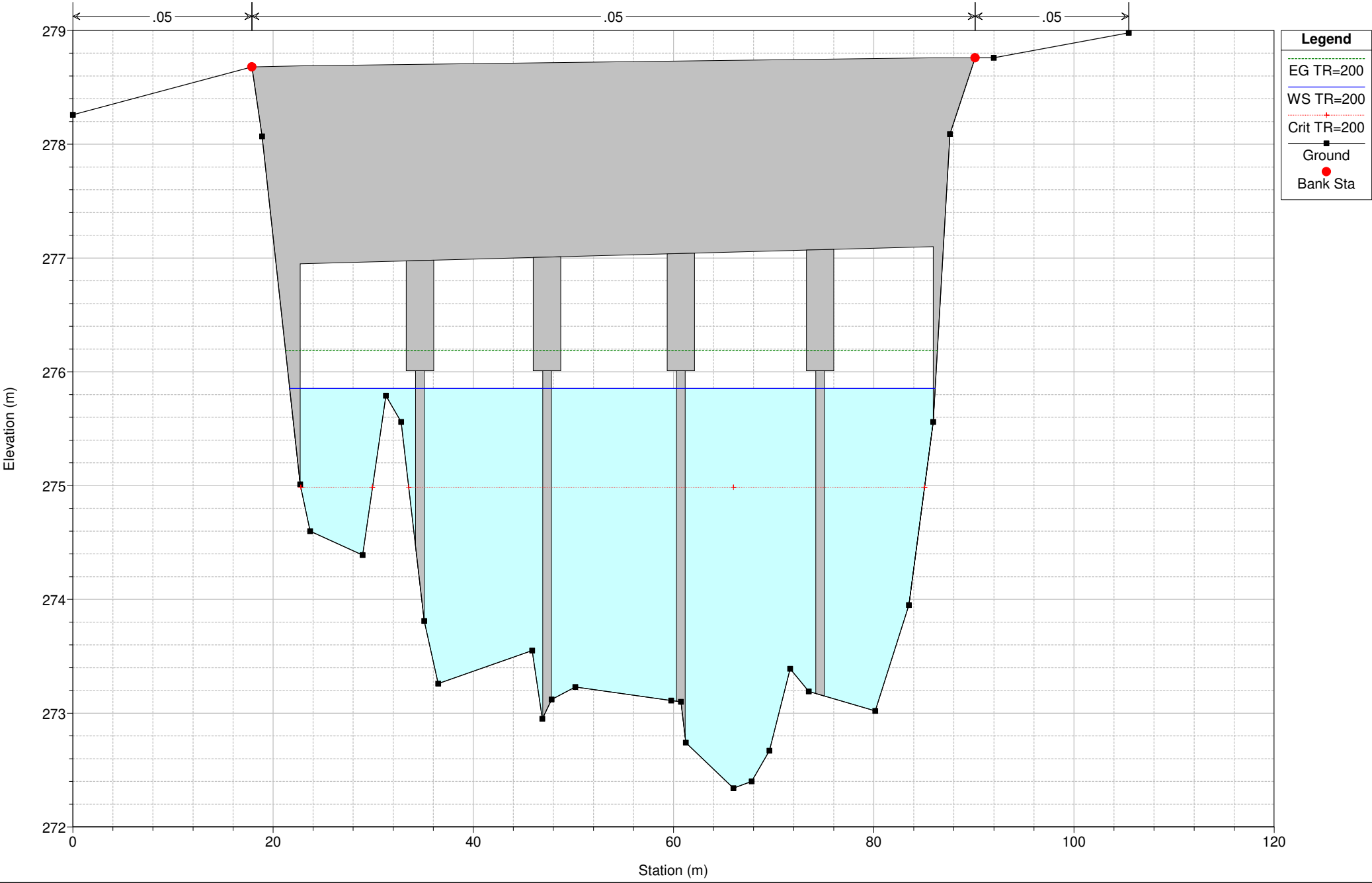
Lunano Plan: Plan 01  
Geom: Lunano Flow: Flow 01  
River = Foglia Reach = Lunano RS = 15 HR15

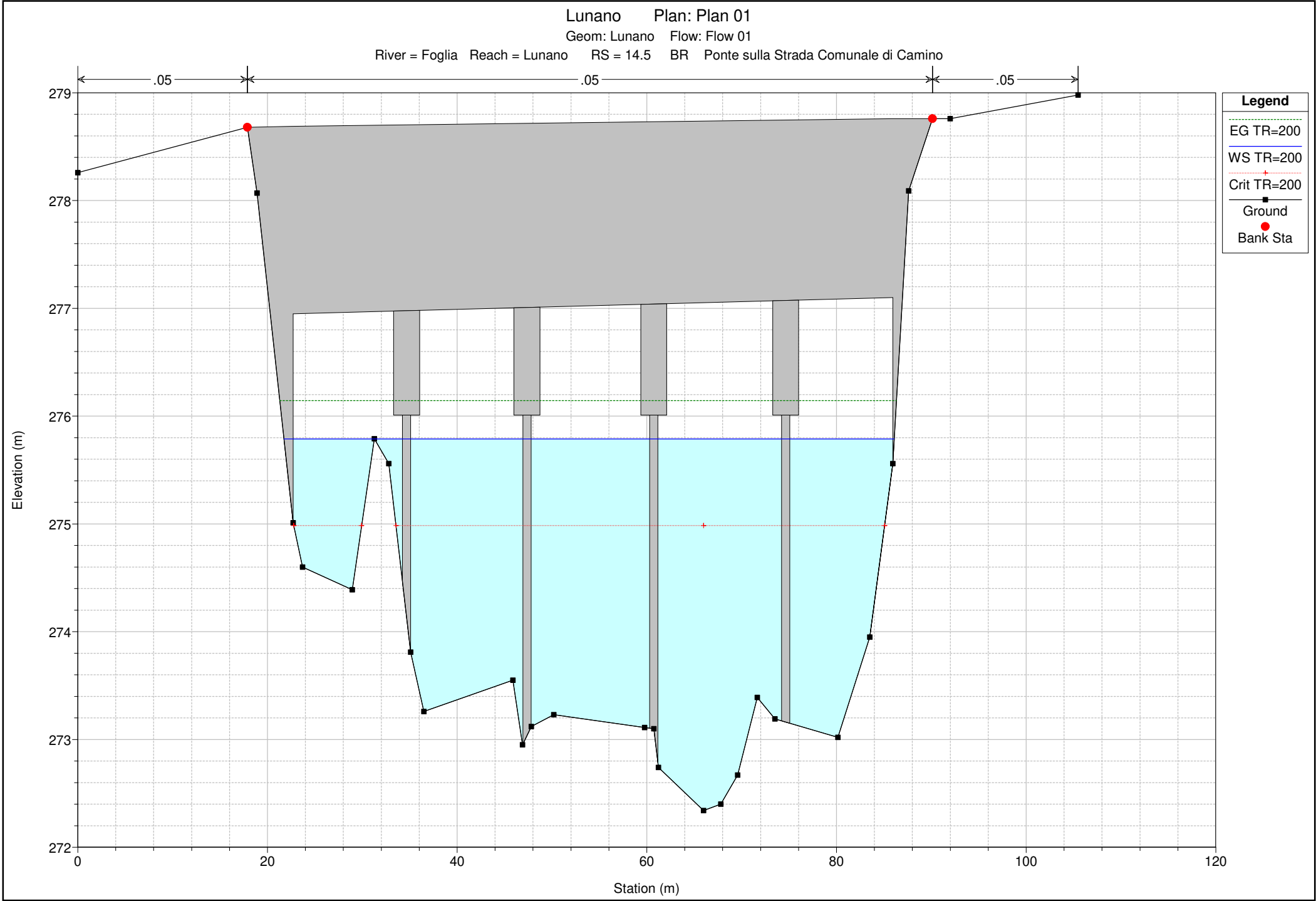


Lunano Plan: Plan 01

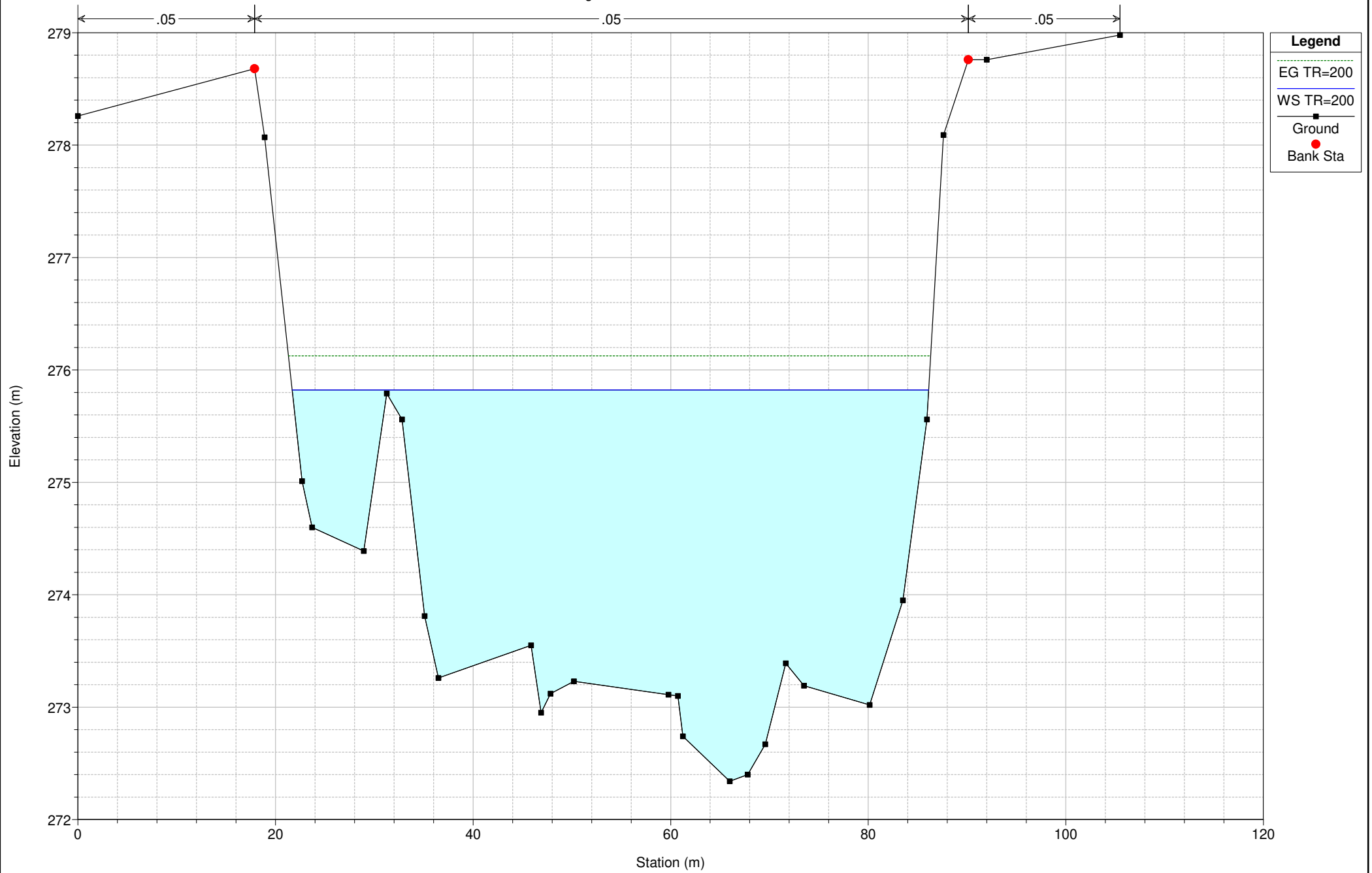
Geom: Lunano Flow: Flow 01

River = Foglia Reach = Lunano RS = 14.5 BR Ponte sulla Strada Comunale di Camino

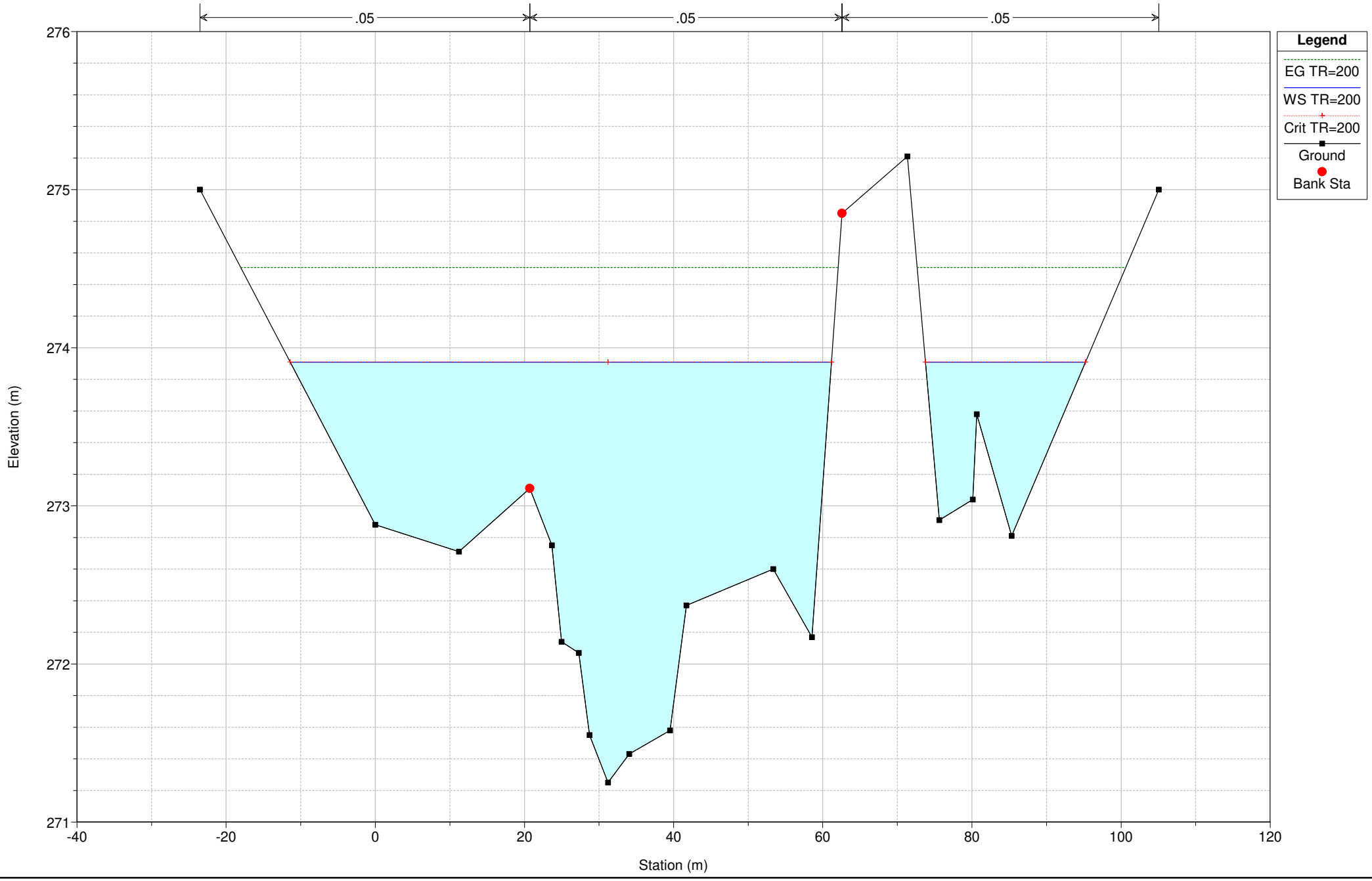




Lunano Plan: Plan 01  
Geom: Lunano Flow: Flow 01  
River = Foglia Reach = Lunano RS = 14 HR14

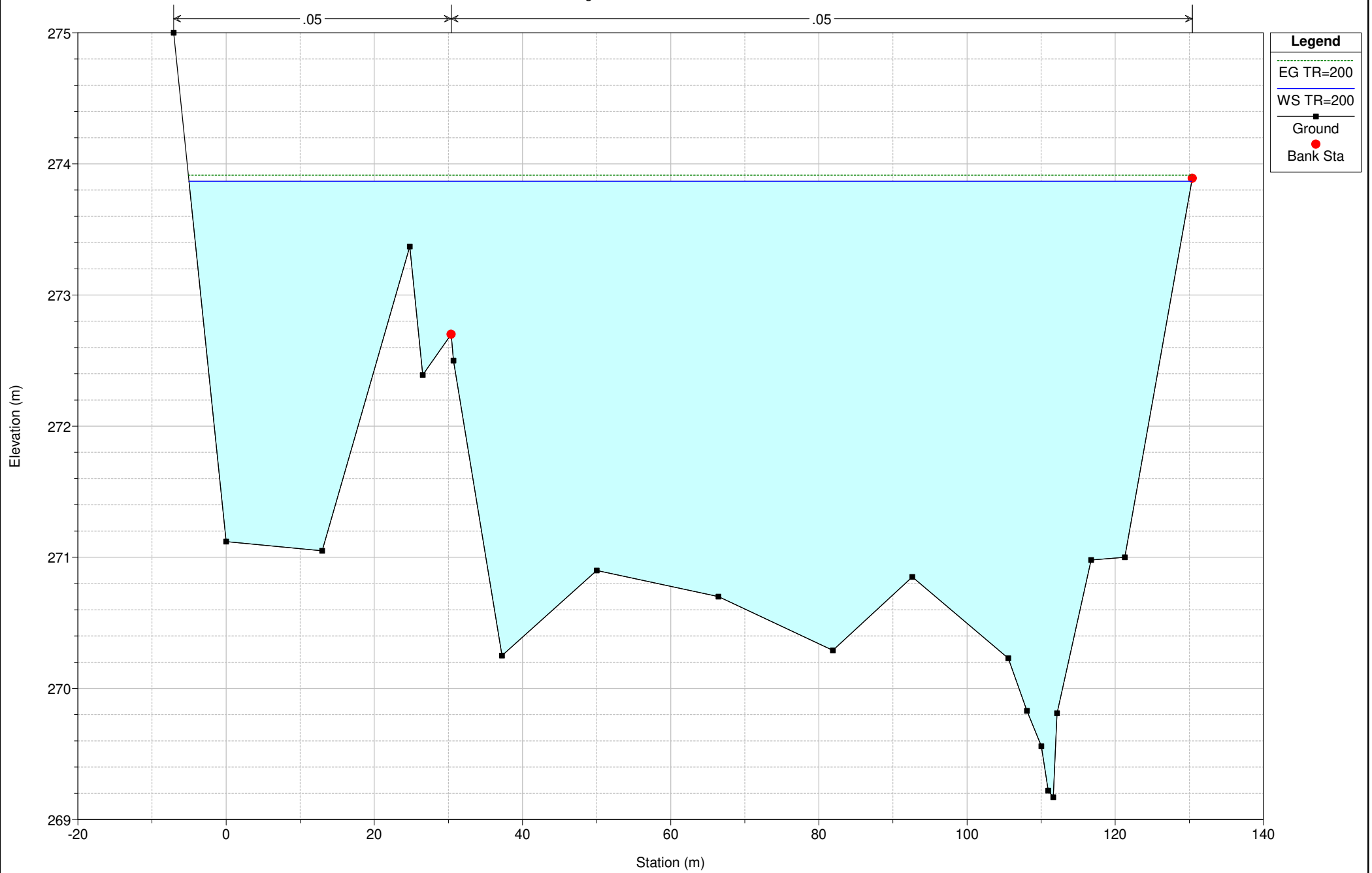


Lunano Plan: Plan 01  
Geom: Lunano Flow: Flow 01  
River = Foglia Reach = Lunano RS = 13 HR13

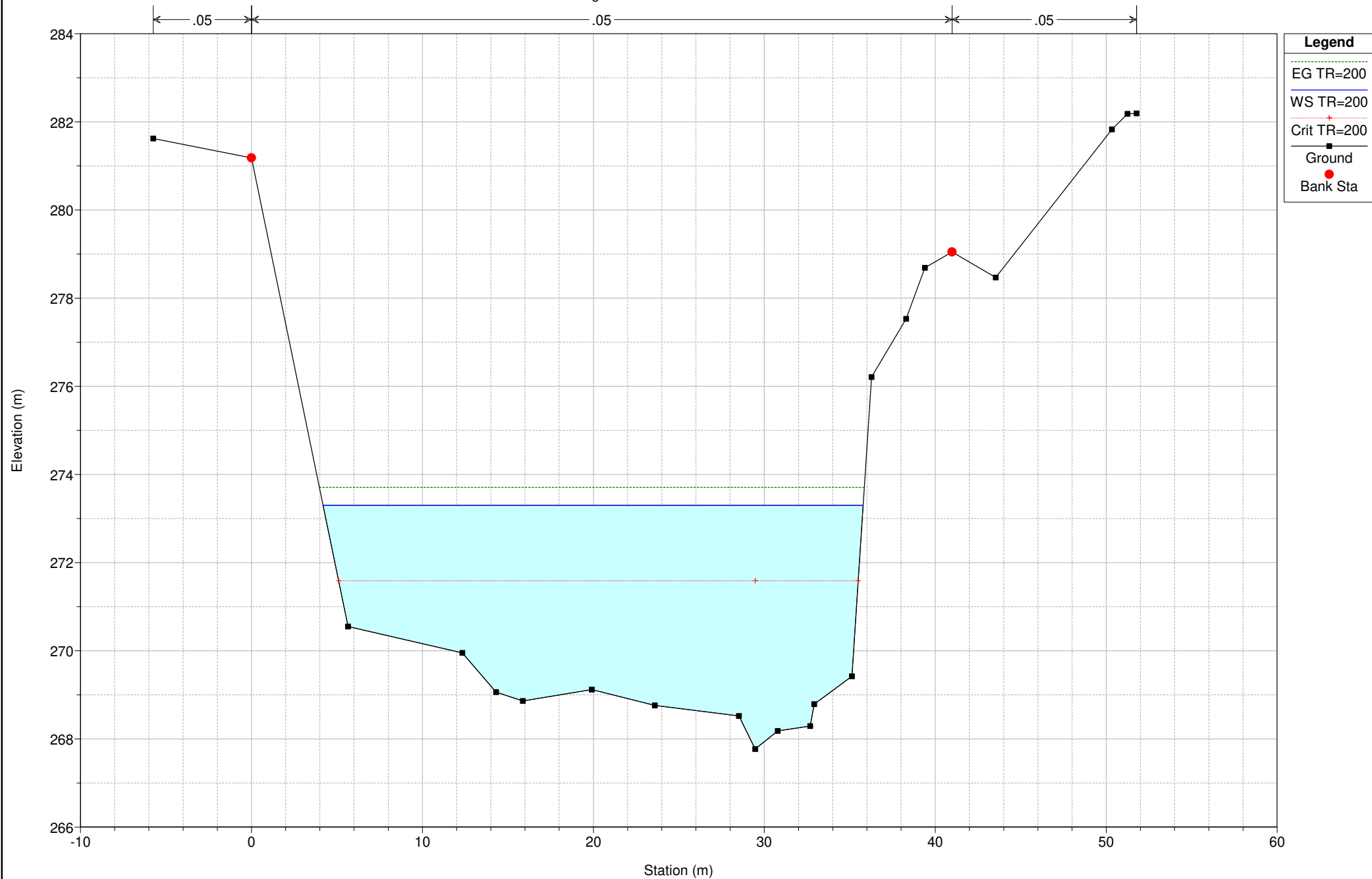


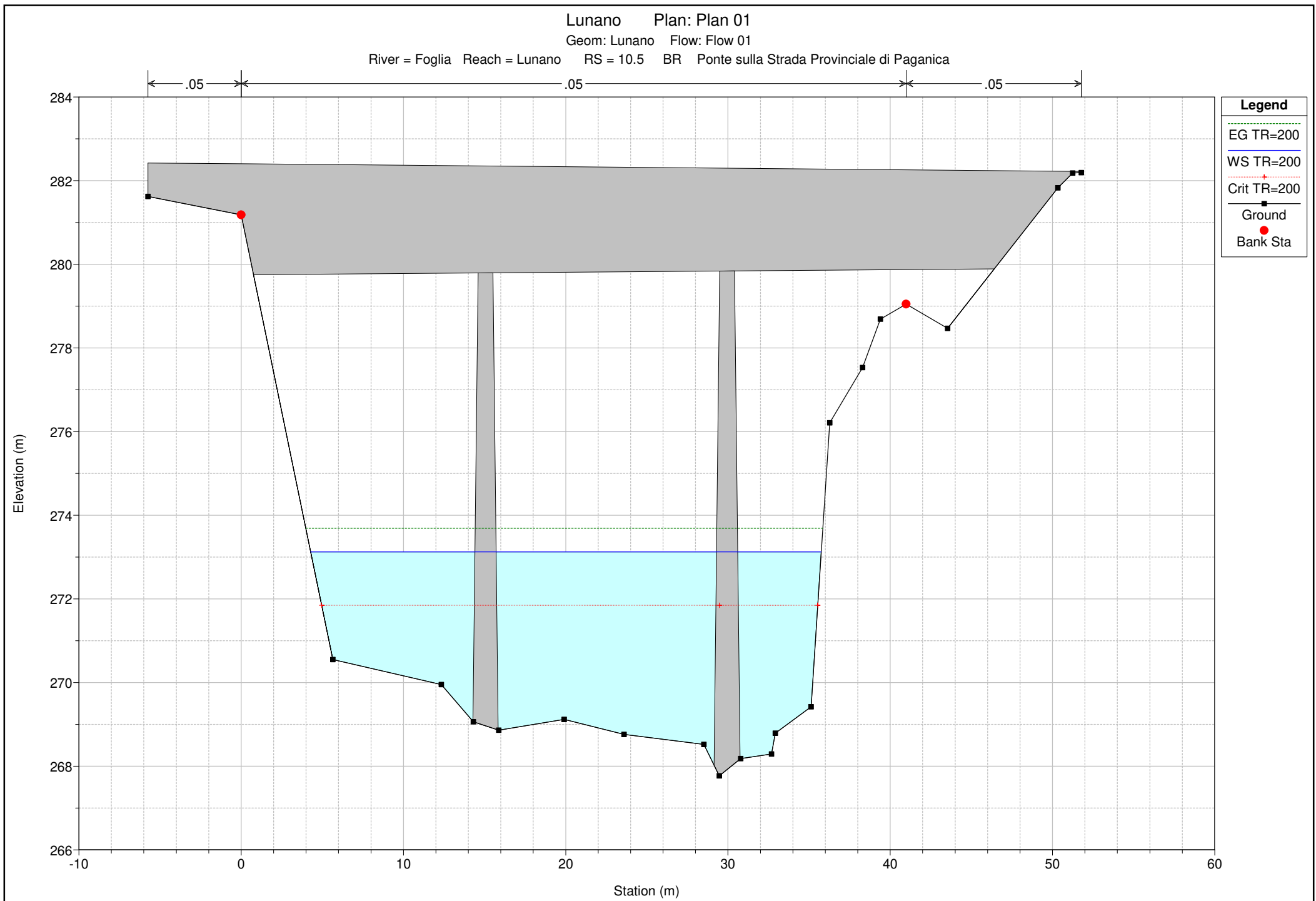


Lunano Plan: Plan 01  
Geom: Lunano Flow: Flow 01  
River = Foglia Reach = Lunano RS = 12 HR12



Lunano Plan: Plan 01  
Geom: Lunano Flow: Flow 01  
River = Foglia Reach = Lunano RS = 11 HR11

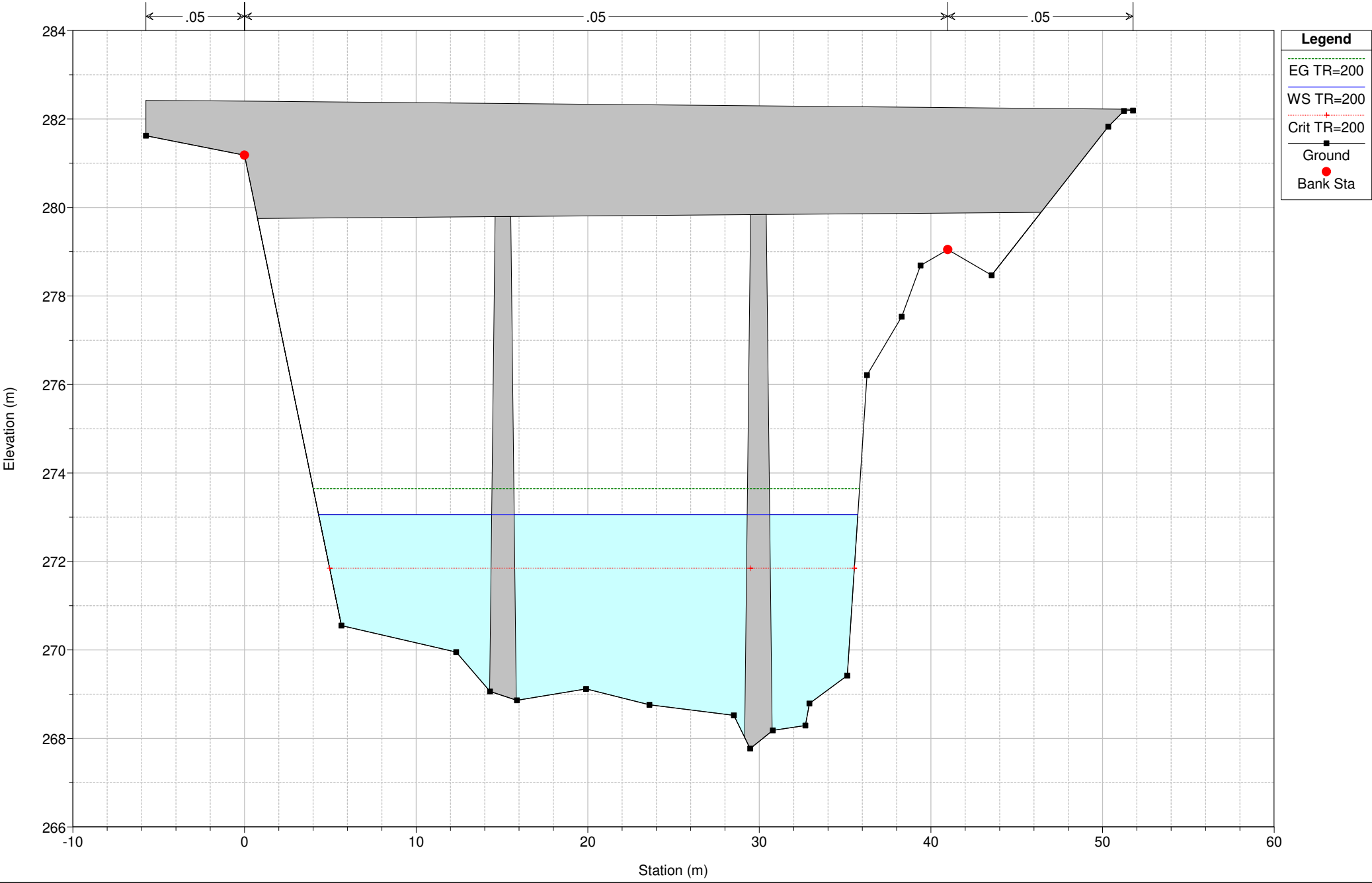




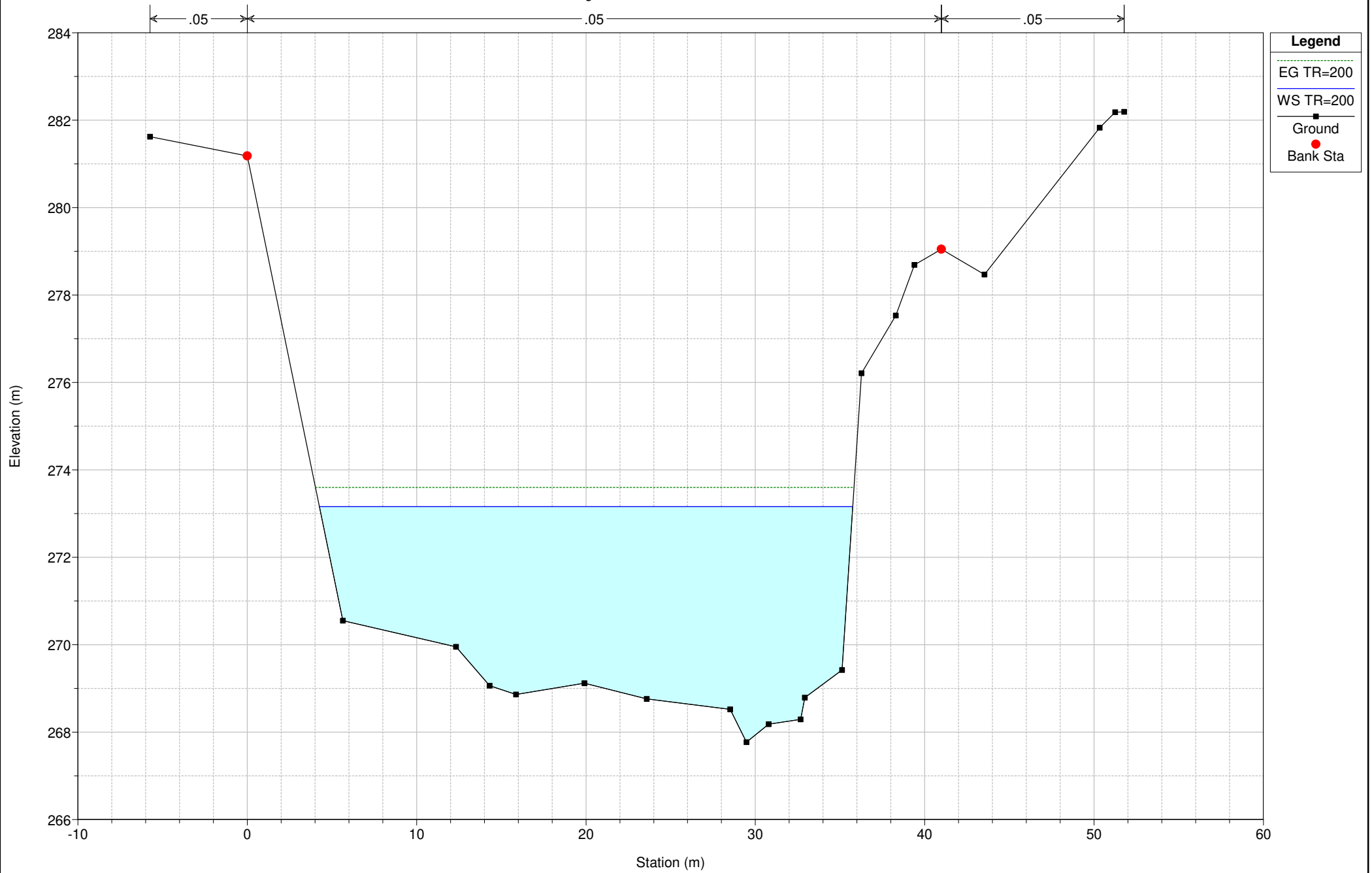
Lunano Plan: Plan 01

Geom: Lunano Flow: Flow 01

River = Foglia Reach = Lunano RS = 10.5 BR Ponte sulla Strada Provinciale di Paganica



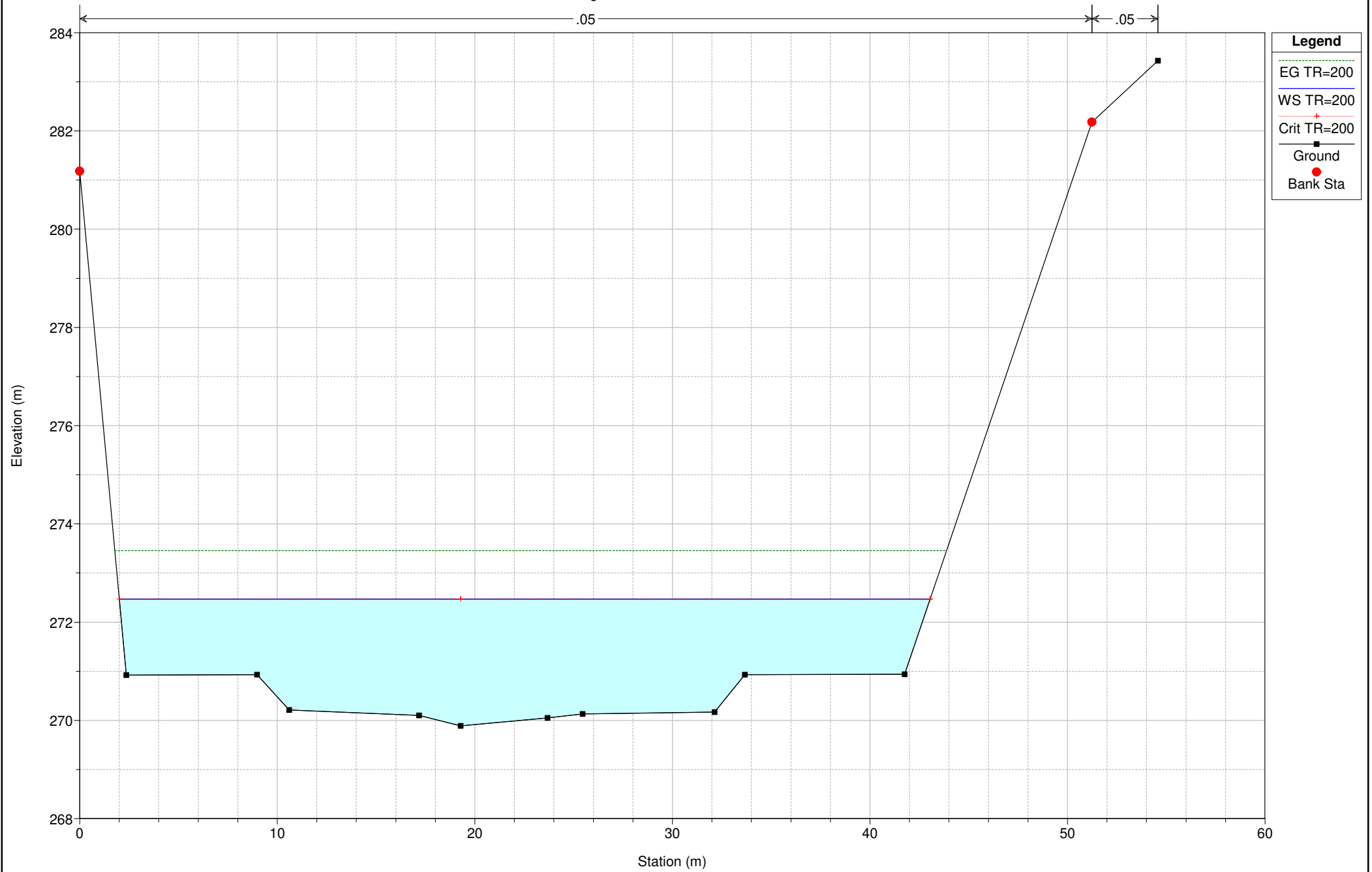
Lunano Plan: Plan 01  
Geom: Lunano Flow: Flow 01  
River = Foglia Reach = Lunano RS = 10 HR10



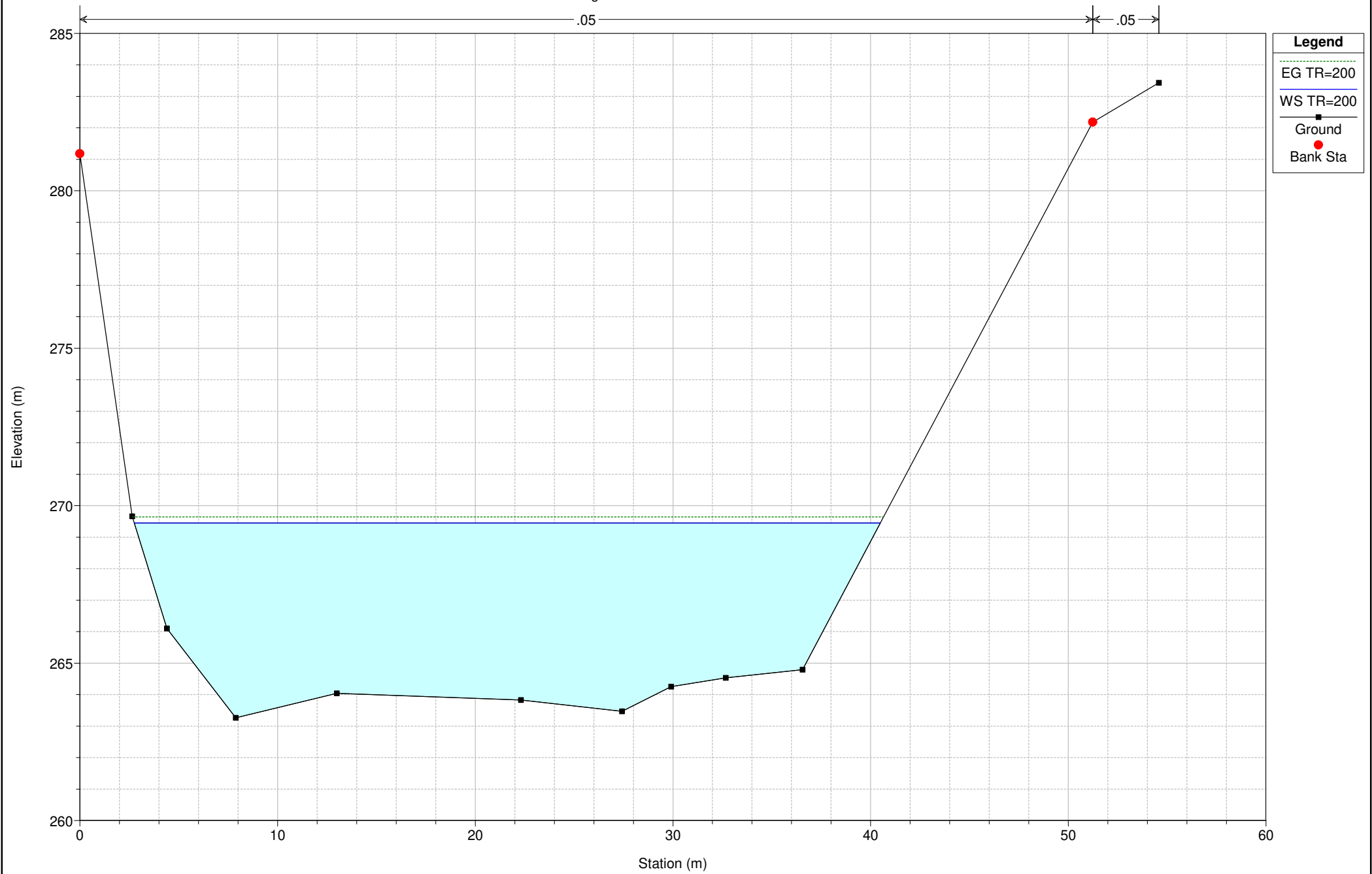
Lunano      Plan: Plan 01

Geom: Lunano      Flow: Flow 01

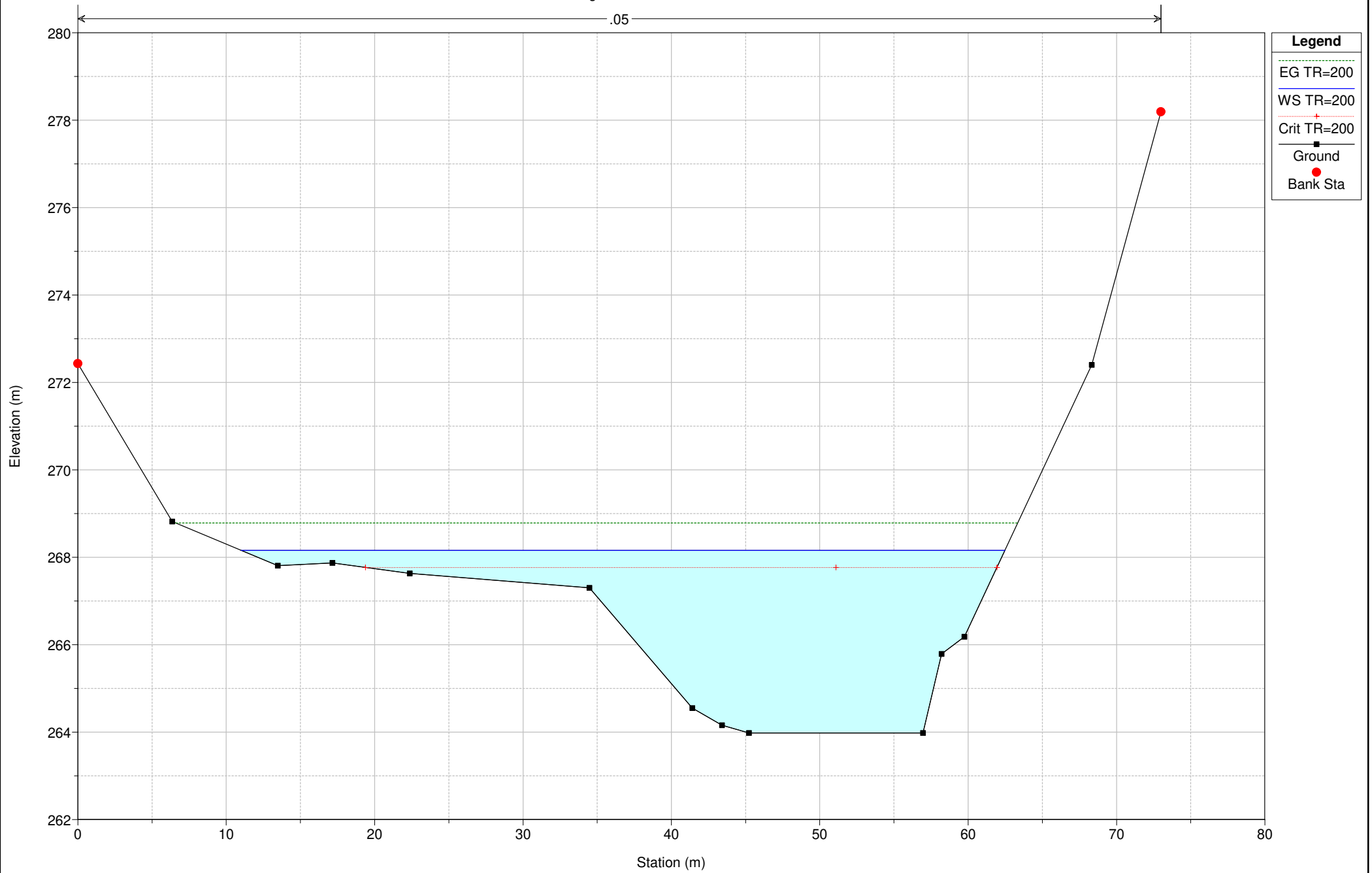
River = Foglia    Reach = Lunano    RS = 9    HR09



Lunano Plan: Plan 01  
Geom: Lunano Flow: Flow 01  
River = Foglia Reach = Lunano RS = 8 HR08

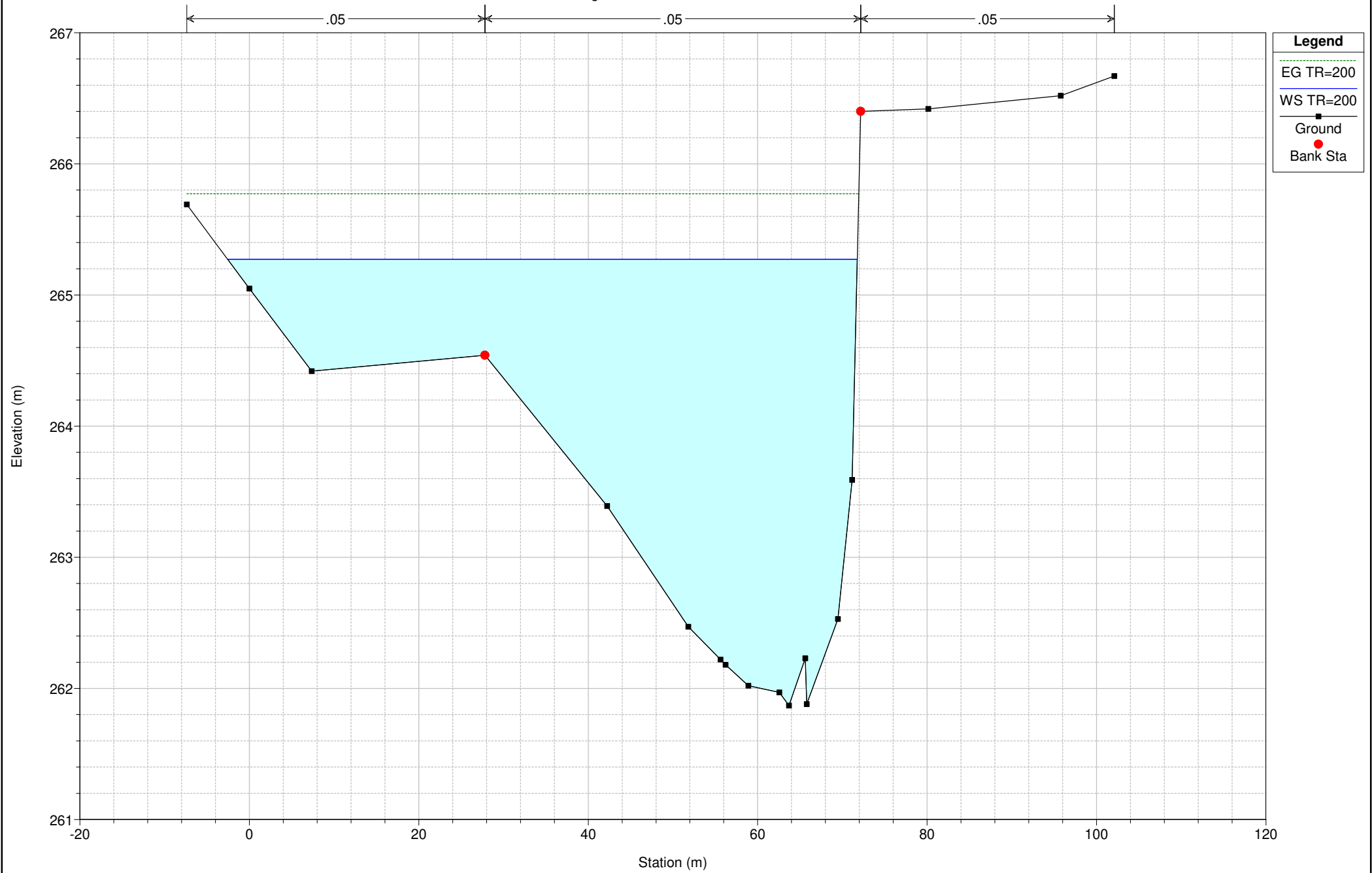


Lunano Plan: Plan 01  
Geom: Lunano Flow: Flow 01  
River = Foglia Reach = Lunano RS = 7 HR07

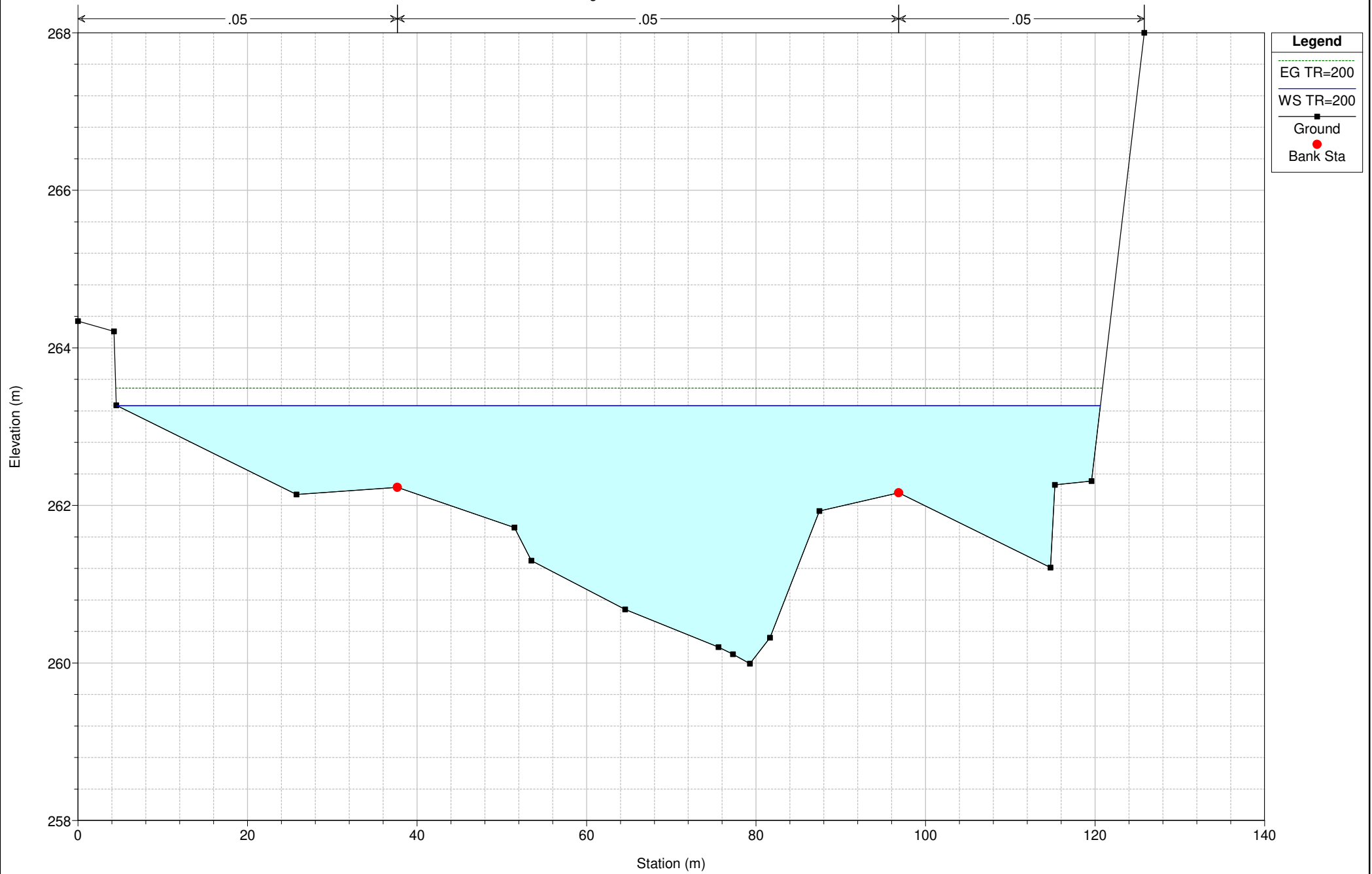




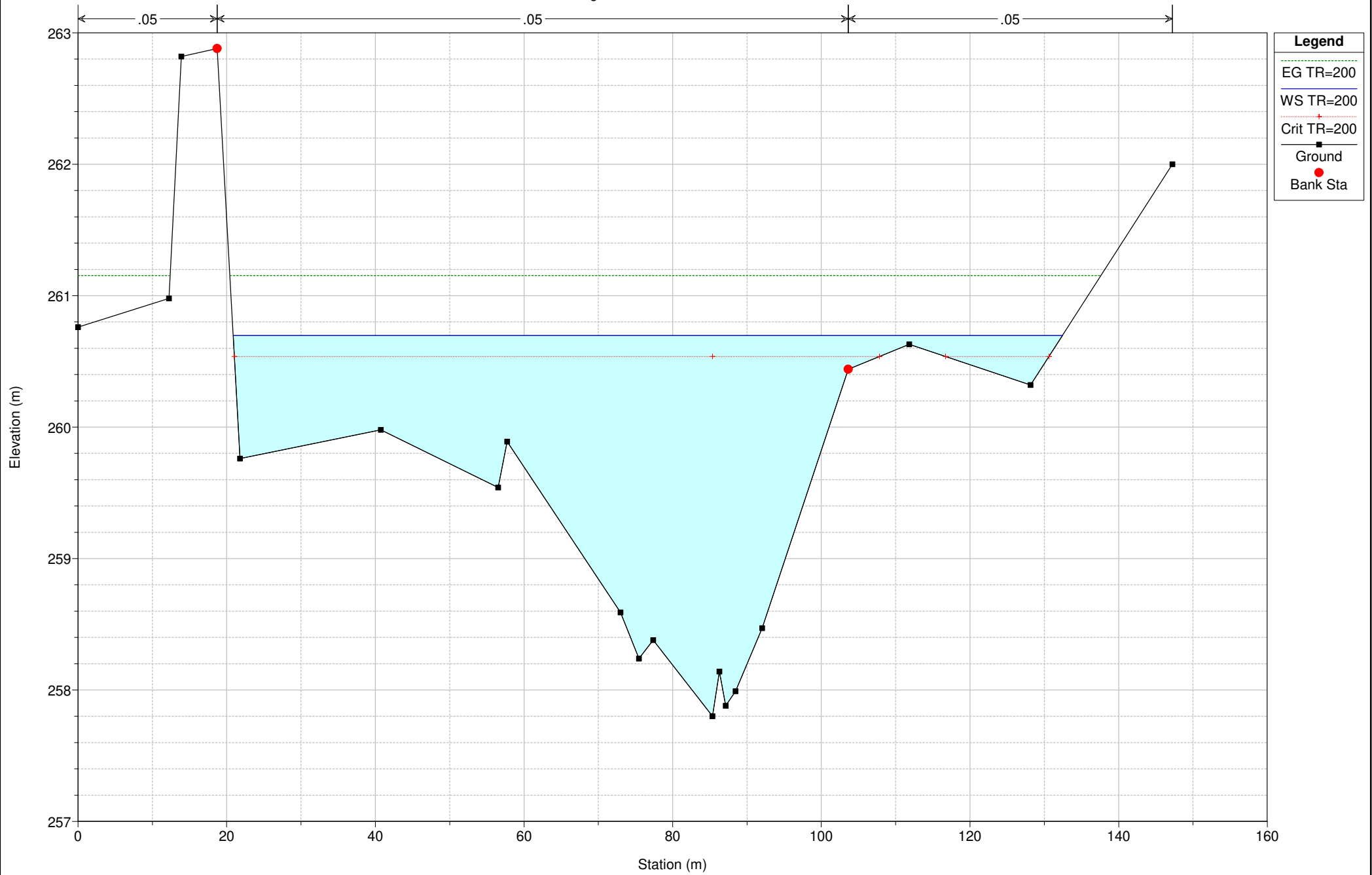
Lunano Plan: Plan 01  
Geom: Lunano Flow: Flow 01  
River = Foglia Reach = Lunano RS = 6 HR06



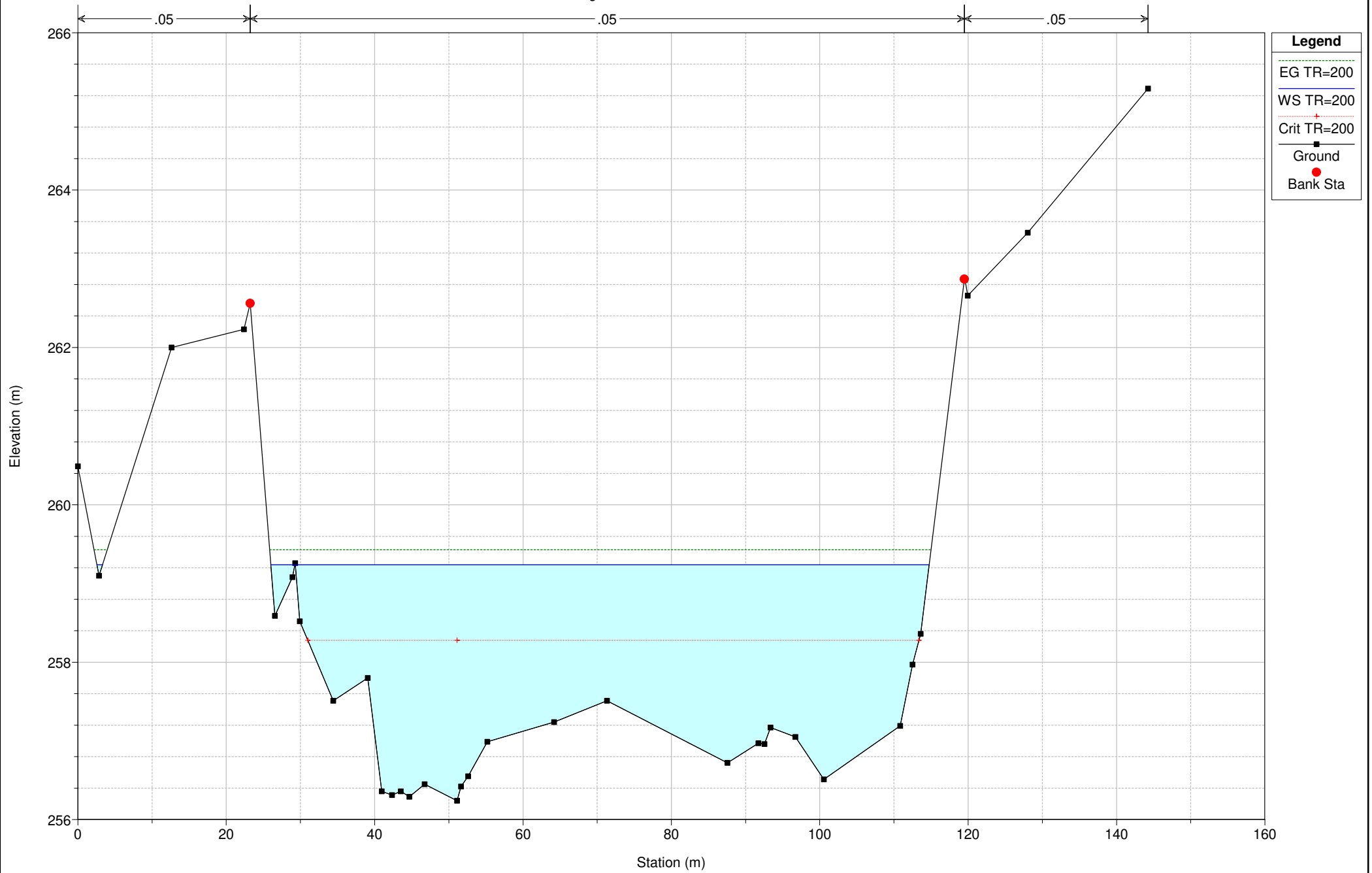
Lunano Plan: Plan 01  
Geom: Lunano Flow: Flow 01  
River = Foglia Reach = Lunano RS = 5 HR05

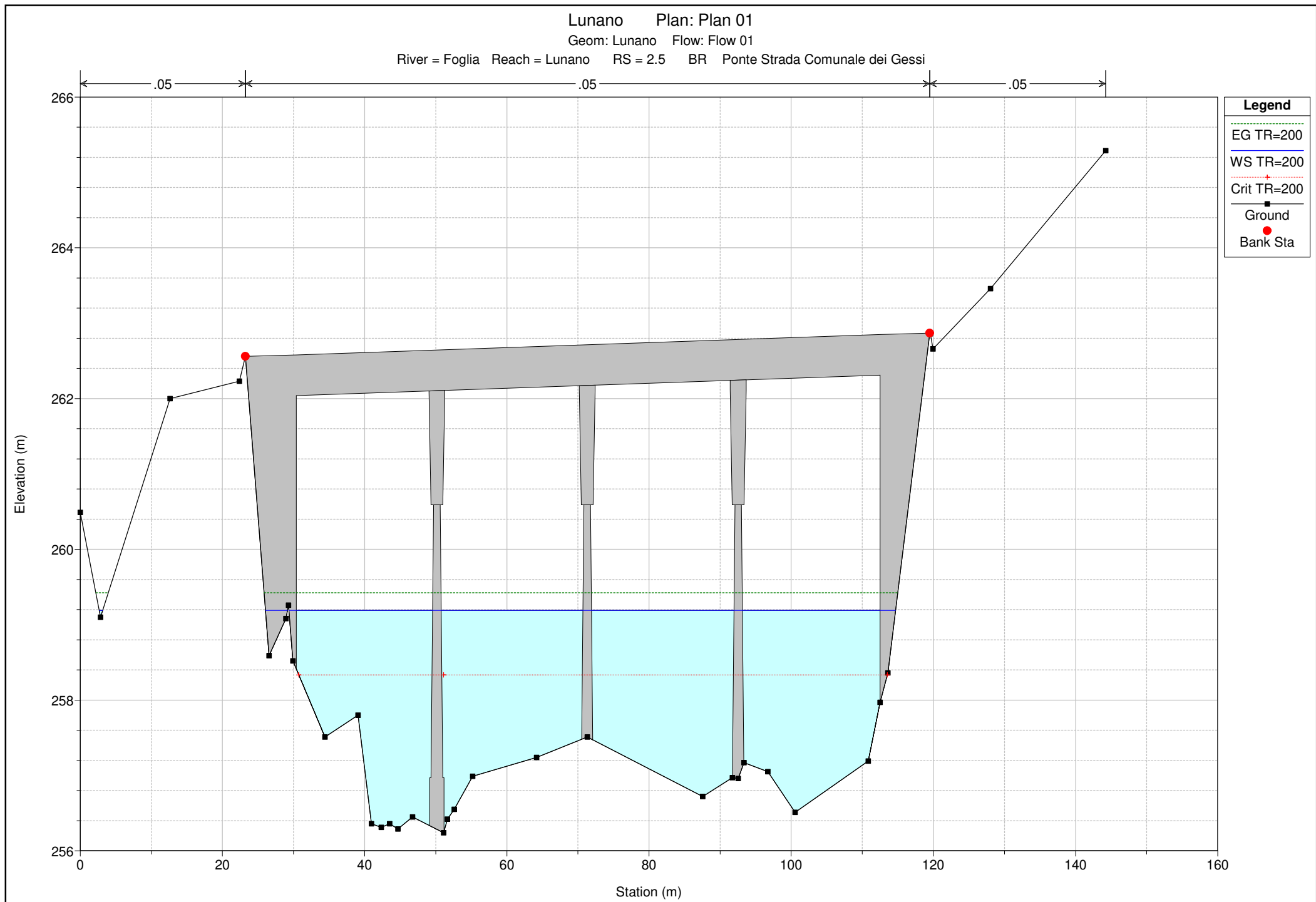


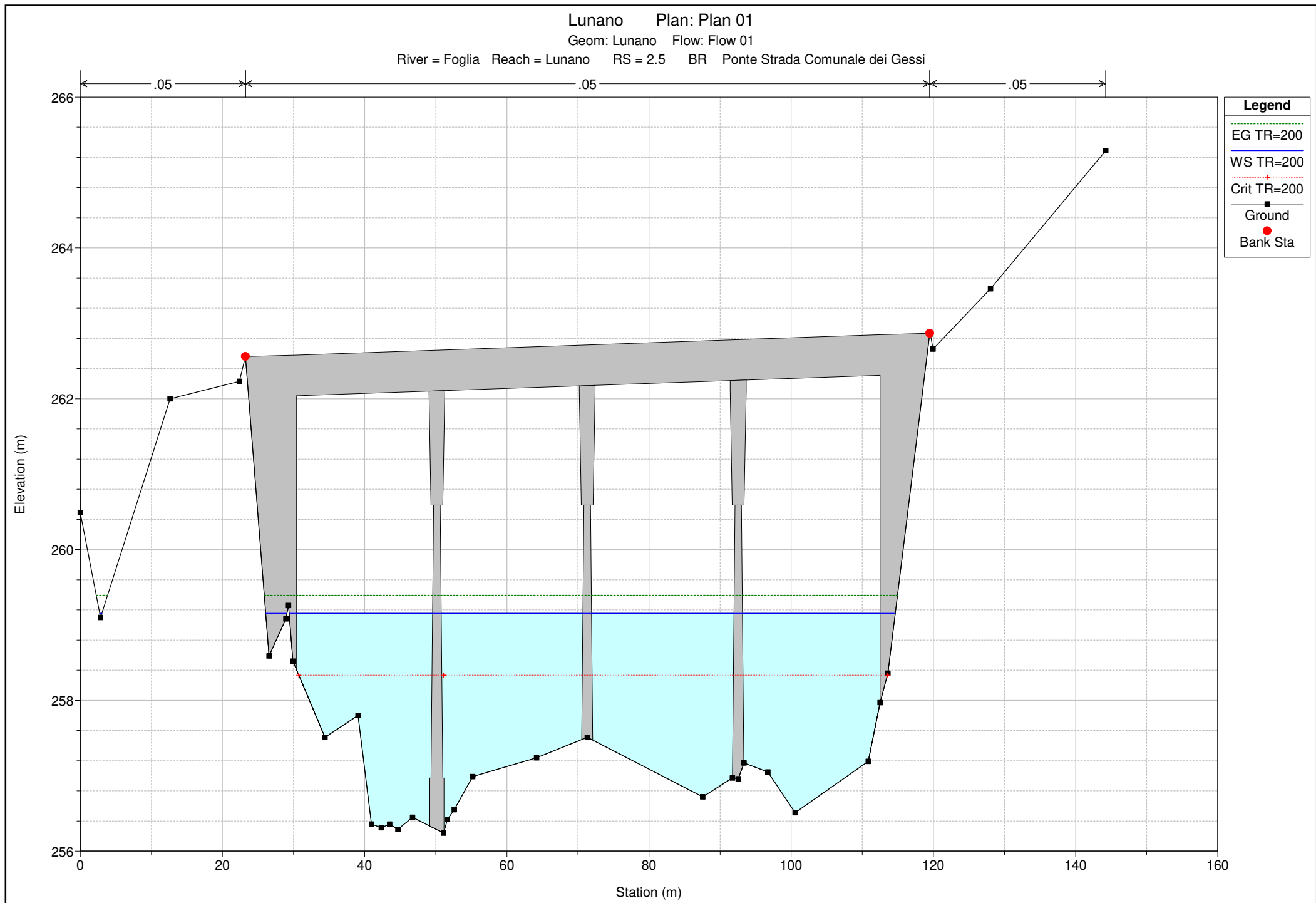
Lunano Plan: Plan 01  
Geom: Lunano Flow: Flow 01  
River = Foglia Reach = Lunano RS = 4 HR04



Lunano Plan: Plan 01  
Geom: Lunano Flow: Flow 01  
River = Foglia Reach = Lunano RS = 3 HR03







Lunano Plan: Plan 01  
Geom: Lunano Flow: Flow 01  
River = Foglia Reach = Lunano RS = 2 HR02

