

**E45 - SISTEMAZIONE STRADALE DEL NODO DI PERUGIA
Tratto Madonna del Piano - Collestrada**

PROGETTO DEFINITIVO

PG 372

ANAS - DIREZIONE TECNICA

<p>IL GEOLOGO</p> <p><i>Dott. Geol. Marco Leonardi</i> Ordine Geologi Regione Lazio n. 1541</p>	<p>I PROGETTISTI SPECIALISTICI</p> <p><i>Ing. Ambrogio Signorelli</i> Ordine Ingegneri Provincia di Roma n. A35111</p>	<p>PROGETTAZIONE ATI: (Mandataria)</p> <p>GP INGENGNERIA <i>GESTIONE PROGETTI INGEGNERIA srl</i></p> <p>(Mandante)</p>
<p>COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE</p> <p><i>Arch. Santo Salvatore Vermiglio</i> Ordine Architetti Provincia di Reggio Calabria n. 1270</p>	<p><i>Ing. Moreno Panfili</i> Sezione A Ordine Ingegneri N° A2657 Provincia di Perugia n. A2602</p> <p>MORENO PANFILI</p> <p><i>Ing. Giovanni C. Alfredo</i> Ordine Ingegneri Provincia di Roma n. 14069</p>	<p>(Mandante)</p> <p>cooprogetti</p> <p>engeko</p> <p>AIM <i>Studio di Architettura e Ingegneria Moderna</i></p> <p>(Mandante)</p>
<p>VISTO: IL RESP. DEL PROCEDIMENTO</p> <p><i>Ing. Alessandro Micheli</i></p>	<p><i>Ing. Giuseppe Resta</i> Ordine Ingegneri Provincia di Roma n. 20629</p>	<p>IL PROGETTISTA RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE. (DPR207/10 ART 15 COMMA 12) :</p> <p><i>Dott. Ing. GIORGIO GUIDUCCI</i> Ordine Ingegneri Provincia di Roma n. 14035</p>
<p>VISTO: IL RESP. DEL PROGETTO</p> <p><i>Arch. Pianif. Marco Colazza</i></p>		<p>Dott. Ing. GIORGIO GUIDUCCI ORDINE INGEGNERI ROMA N° 14035</p>

STUDI ED INDAGINI

Idrologia e idraulica

Relazione idraulica attraversamenti maggiori (viadotti)

CODICE PROGETTO			NOME FILE	REVISIONE	SCALA
PROGETTO	LIV.PROG.	ANNO	TO0ID00IDRRE03_B		
DTPG372	D	22	CODICE ELAB. T O O I D O O I D R R E O 3	B	-
D					
C					
B	Rev. a seguito istruttorie Prot. U.0834569 e U.0862037	Gennaio '23	Angeloni	Panfili	Guiducci
A	Emissione	Ottobre '22	Angeloni	Panfili	Guiducci
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

INDICE

1.	PREMESSA.....	2
2.	ANALISI IDRAULICA	3
2.1.	DATI IDROLOGICI.....	3
2.2.	MODELLO IDRAULICO IMPLEMENTATO.....	3
2.2.1.	<i>Geometria</i>	3
2.2.2.	<i>Scabrezze</i>	6
2.2.3.	<i>Condizioni al contorno.....</i>	6
2.2.4.	<i>Risultati delle analisi nella configurazione di stato attuale</i>	7
2.2.5.	<i>Risultati delle analisi nella configurazione di progetto.....</i>	8
2.2.6.	<i>Verifica del non incremento di rischio in altre aree</i>	15
3.	ANALISI DELL'EROSIONE ALLA BASE DELLE PILE DEI VIADOTTI SUL FIUME TEVERE17	

1. PREMESSA

Si descrivono di seguito le analisi idrauliche del Fiume Tevere svolte implementando un modello numerico in moto vario di tipo accoppiato 1D in alveo e puramente 2D extra alveo per gli scenari idrologici TR = 200 e 500 anni nelle configurazioni ante e post operam.

Nei successivi paragrafi si descrivono le analisi e i risultati ottenuti relativamente a:

- perimetrazione delle aree allagabili e verifica di non incremento del rischio idraulico nelle aree contermini;
- calcolo della massima quota della superficie idrica duecentennale per la verifica del franco idraulico in corrispondenza degli impalcati dei viadotti;
- calcolo delle principali grandezze idrodinamiche locali quali battenti, velocità e azioni di trascinamento presso le pile dei viadotti e i rilevati di approccio ai viadotti stessi a contatto con le correnti di piena extra-alveo;
- valutazioni inerenti alla possibile erosione in corrispondenza delle pile e degli eventuali presidi da porre in opera a difesa delle opere.

2. ANALISI IDRAULICA

2.1. DATI IDROLOGICI

I dati idrologici sono stati ricavati dal PAI, che costituisce il quadro conoscitivo di riferimento vigente, relativamente agli scenari TR = 200 e 500 anni.

In particolare, quali dati in ingresso del modello numerico di propagazione delle portate sono stati considerati gli idrogrammi di portata assunti cautelativamente costanti e pari alla portata di picco nella sezione di chiusura del tratto investigato (TV_719): **1889 m³/s per TR500 e 1430 m³/s per TR200.**

2.2. MODELLO IDRAULICO IMPLEMENTATO

La modellazione numerica è stata implementata in moto vario mediante l'utilizzo del codice di calcolo HEC-RAS (River Analysis System) ver.6.2, sviluppato presso l'Hydrologic Engineering Center dall'United States Army Corps of Engineers. Per l'esauritiva trattazione dei principi teorici sui quali si basa la soluzione numerica delle equazioni di moto e di continuità che regolano il processo di moto si rimanda all'indirizzo internet <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/> (in particolare alle pubblicazioni "*Hydraulic Reference Manual*", "*User's Manual*" e "*2D User's Manual*").

2.2.1. Geometria

Il modello numerico allestito per simulare la propagazione delle correnti di piena duecentennali e cinquecentennali è relativo al tratto di Fiume Tevere compreso tra le sezioni di PAI (Lotto B) TV_731 e TV_719 e presenta una lunghezza complessiva pari a circa 3300 m (da circa 1440 m a monte dei viadotti di progetto fino a circa 1860 m a valle).

La realizzazione dei nuovi viadotti è prevista in corrispondenza della sezione TV_726.

La geometria dell'alveo inciso è stata desunta direttamente dalle sezioni trasversali di rilievo di PAI, mentre nelle aree golenali sono stati impiegati i dati LIDAR con risoluzione spaziale 1m x 1m forniti, previa apposita richiesta, dalla Regione Umbria.

Nelle aree 2D è stata impiegata una *mesh di calcolo* delle dimensioni medie di 10mx10m, opportunamente raffinata in corrispondenza delle pile dei viadotti di progetto fino a raggiungere le dimensioni di 1m.

Di seguito si riporta un estratto planimetrico del modello geometrico implementato per la configurazione di stato attuale.

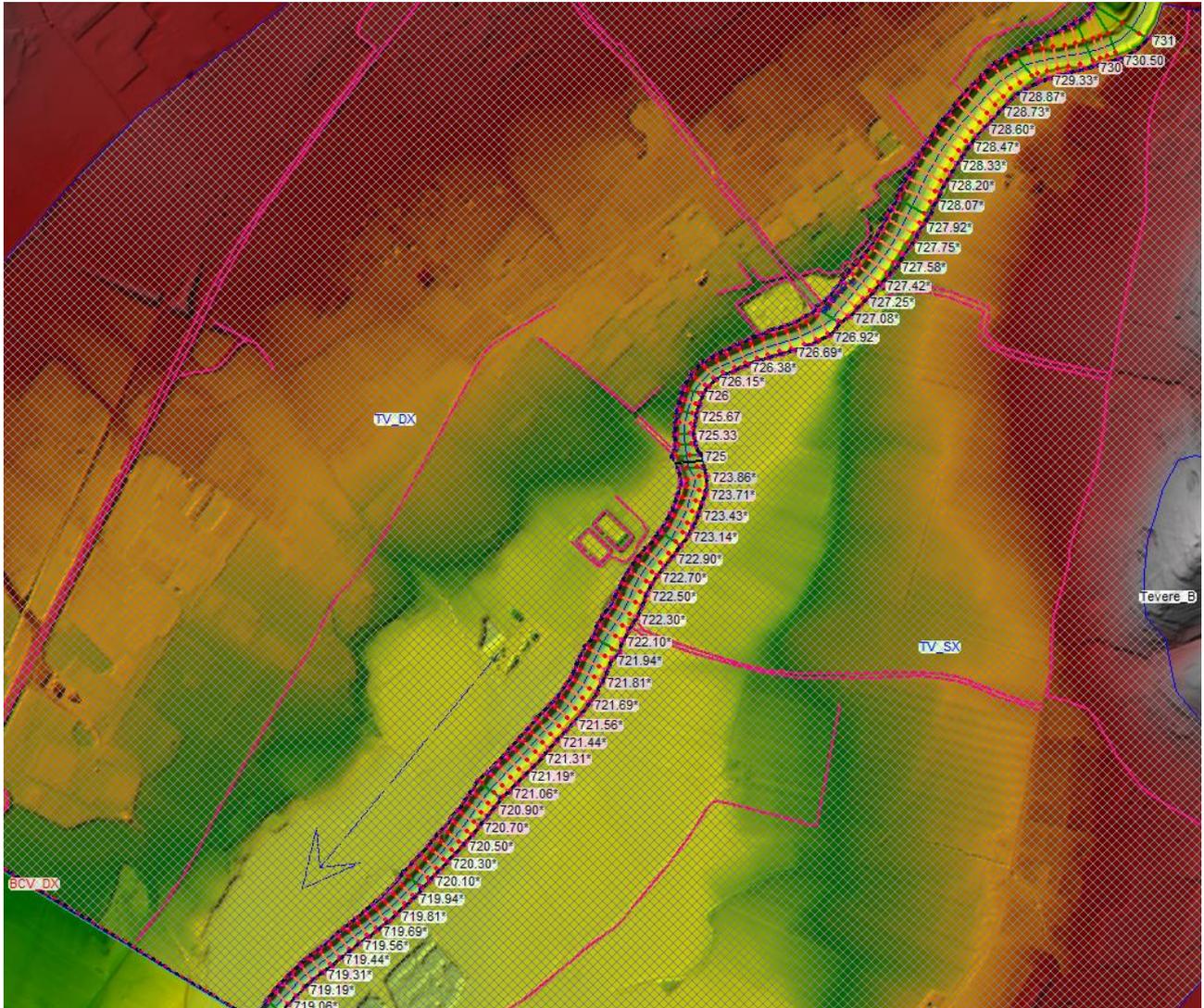


Figura 2-1: Estratto planimetrico del modello geometrico implementato per la configurazione di stato attuale

La simulazione dello **stato di progetto**, svolta a partire dalla configurazione di stato attuale, ha richiesto l'inserimento delle opere previste, costituite da rilevati stradali e pile dei viadotti all'interno delle aree 2D sotto forma di modifiche locali al modello digitale del terreno DTM, come visibile nell'estratto planimetrico del modello geometrico Figura 2-2.

Nel dettaglio di Figura 2-3 è mostrata la schematizzazione delle pile, tra loro identiche e di forma ellittica, modellate sopraelevando il DTM in corrispondenza di ciascuna impronta fino al valore di 184.50 m s.l.m e raffittendo opportunamente la risoluzione della *mesh di calcolo* lungo il perimetro.

PROGETTAZIONE ATI:

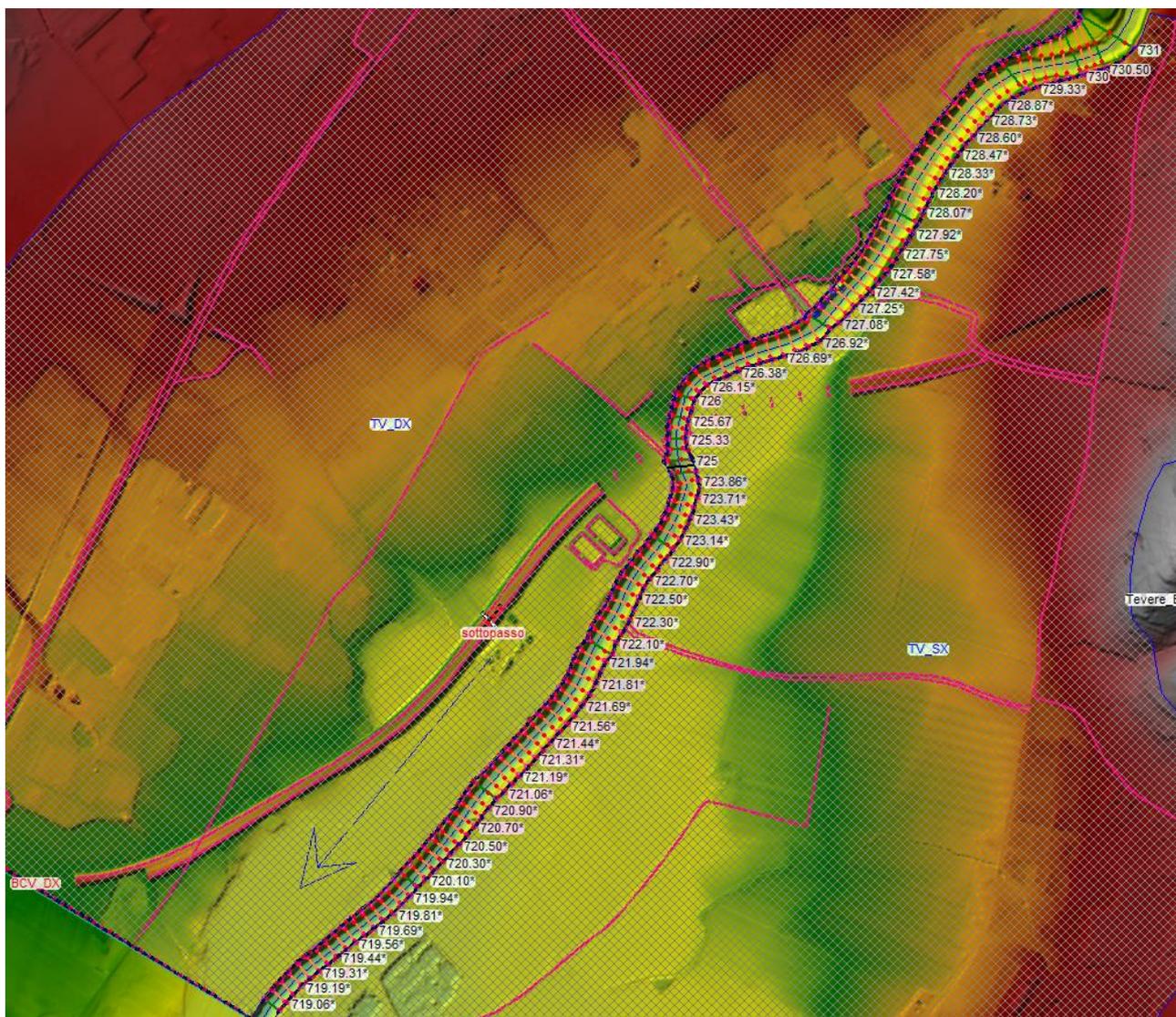


Figura 2-2: Estratto planimetrico del modello geometrico implementato per la configurazione di progetto

PROGETTAZIONE ATI:



Figura 2-3: Dettaglio planimetrico della zona interessata dai viadotti affiancati di progetto, con un particolare della modellazione delle pile

2.2.2. Scabrezze

Le scabrezze in alveo, identiche a quelle assunte nel PAI, espresse secondo la formulazione di Manning, risultano comprese tra 0.035 e $0.095 \text{ s/m}^{1/3}$.

Per quanto riguarda invece le aree golenali extra-alveo, è stata assunta una scabrezza omogenea di Manning pari a $0.1 \text{ s/m}^{1/3}$.

2.2.3. Condizioni al contorno

Condizione al contorno di monte: nella sezione iniziale, TV_731, sono stati inseriti cautelativamente, come dati di input, gli idrogrammi di portata costanti e pari alla portata di picco desunte dal PAI relative alla sezione di chiusura del tratto investigato (TV_719): **$1889 \text{ m}^3/\text{s}$ per TR500 e $1430 \text{ m}^3/\text{s}$ per TR200.**

Condizione al contorno di valle: nella sezione di valle (TV_719) è stata imposta la locale pendenza della linea dei carichi desunta dalle modellazioni PAI, pari a 0.0003 m/m . Anche nelle aree golenali 2D è stata imposta la “*normal depth*” come condizione al contorno di valle (necessaria per non far accumulare all'interno del dominio di calcolo le portate di esondazione extra-alveo): la pendenza della linea dei carichi, posta pari alla pendenza media locale delle aree golenali, è pari a 0.003 m/m in sinistra idrografica e 0.002 m/m in destra.

PROGETTAZIONE ATI:

2.2.4. Risultati delle analisi nella configurazione di stato attuale

Di seguito si riporta la perimetrazione delle aree allagabili risultanti dal modello numerico 1D+2D implementato nei due scenari TR200 e TR500 nella configurazione di stato attuale.

Le nuove perimetrazioni evidenziano un ottimo accordo con il PAI nella quasi totalità dei 3.3 km investigati, ad eccezione del modesto tratto, di lunghezza pari a circa 300 m, compreso tra le sezioni 723 e 722, in cui i risultati di PAI sembrano condizionati dalle limitazioni insite nel ridotto dettaglio geometrico di una modellazione 1D a sezioni estese.

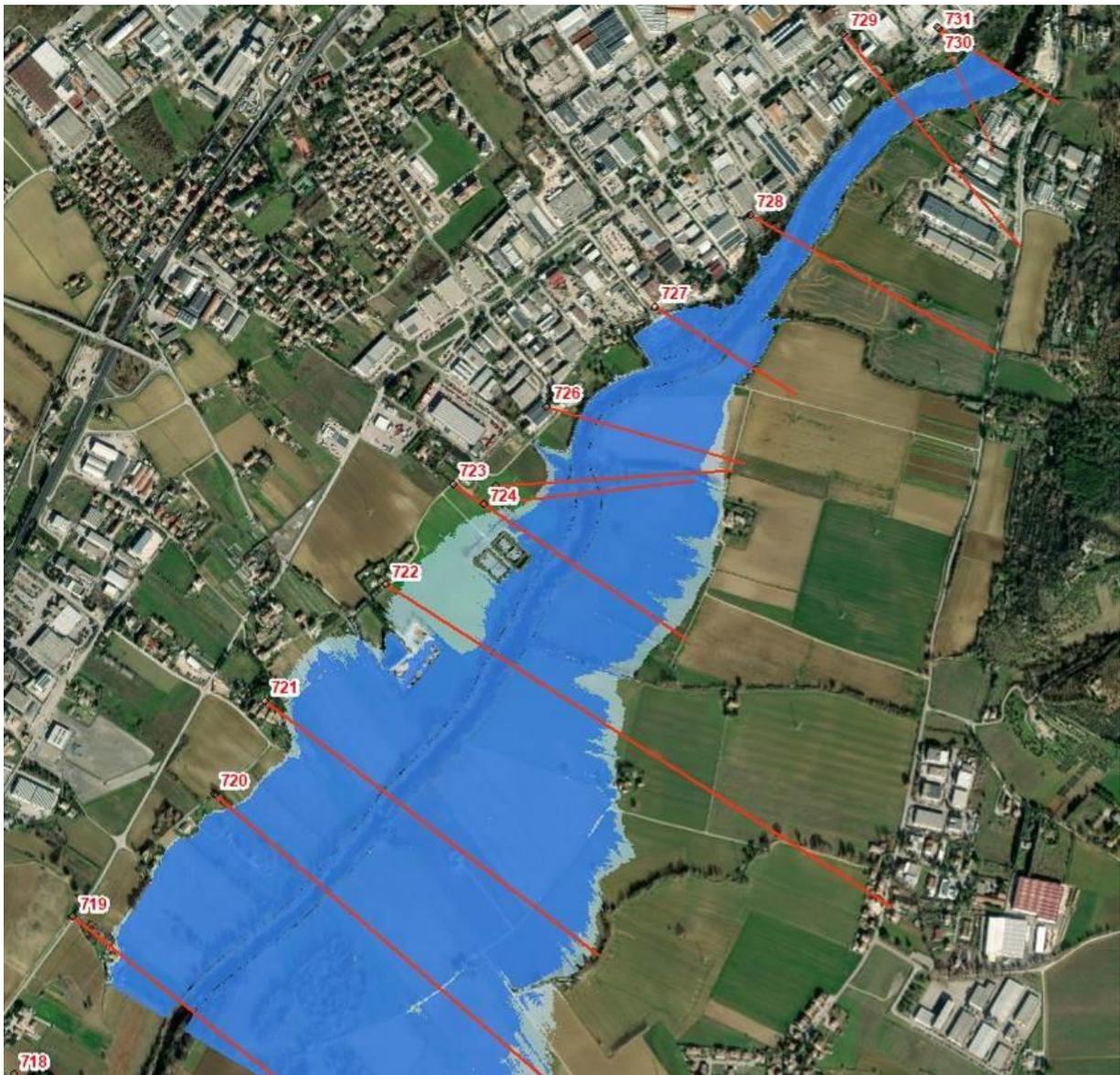


Figura 2-4: perimetrazione delle aree allagabili per TR = 200 e 500 anni nella configurazione di stato attuale desunta dal modello 1D+2D implementato

PROGETTAZIONE ATI:

2.2.5. Risultati delle analisi nella configurazione di progetto

Si evidenziano di seguito i risultati di maggior interesse ottenuti mediante le simulazioni numeriche nella configurazione di progetto.

In Figura 2-5 è mostrata una vista generale delle condizioni di allagabilità dell'area di interesse per TR = 200 anni, con rappresentazione dei battenti massimi e delle direzioni di flusso.

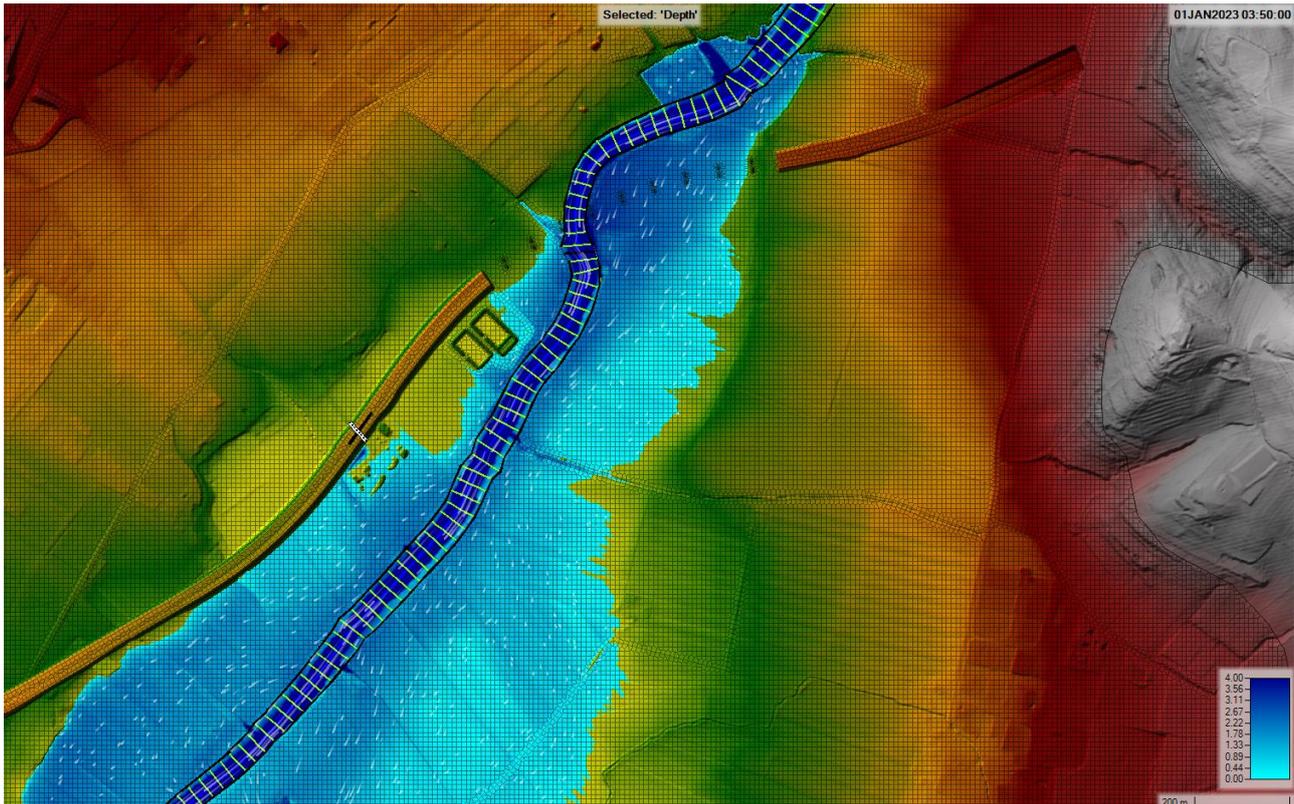


Figura 2-5: battenti massimi duecentennali (espressi in m) nella configurazione di progetto, con indicazione delle direzioni di flusso locali

In Figura 2-6 è mostrato un dettaglio nella zona dei viadotti affiancati, che mostra come 12 pile siano complessivamente interessate dalla propagazione extra-alveo delle correnti di piena duecentennali (6 per ciascun viadotto).

La direzione di flusso delle correnti di piena extra-alveo è da Nord-Est a Sud-Ovest, formando un angolo di circa 45° con le pile poste in sinistra idrografica del fiume.

PROGETTAZIONE ATI:

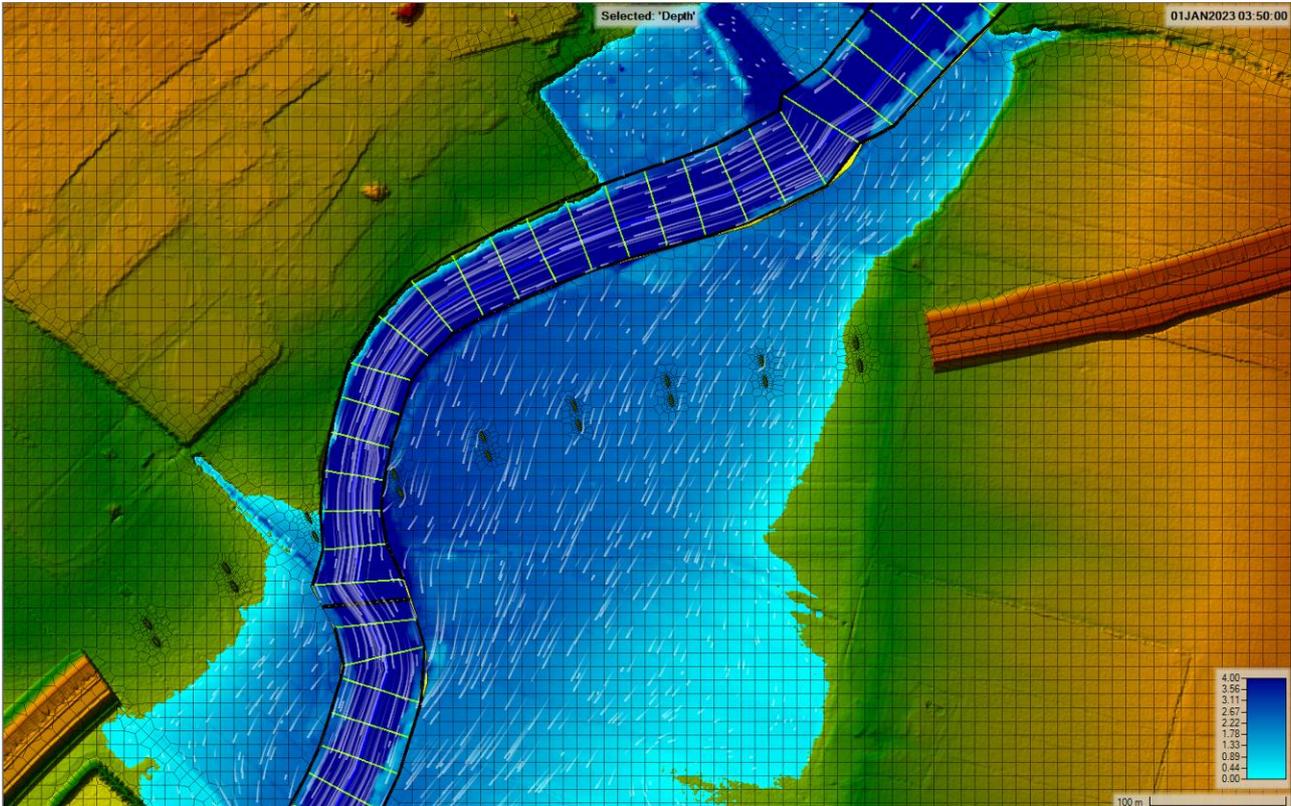


Figura 2-6: battenti massimi duecentennali (espressi in m) nella configurazione di progetto, con indicazione delle direzioni di flusso locali. Dettaglio presso le pile dei viadotti affiancati sul F. Tevere.

Nella figura seguente si riporta il profilo in asse ai viadotti affiancati di progetto, con indicazione del DTM, della quota massima della superficie libera TR200 e del valore numerico massimo, pari a **181.25 m slm**.

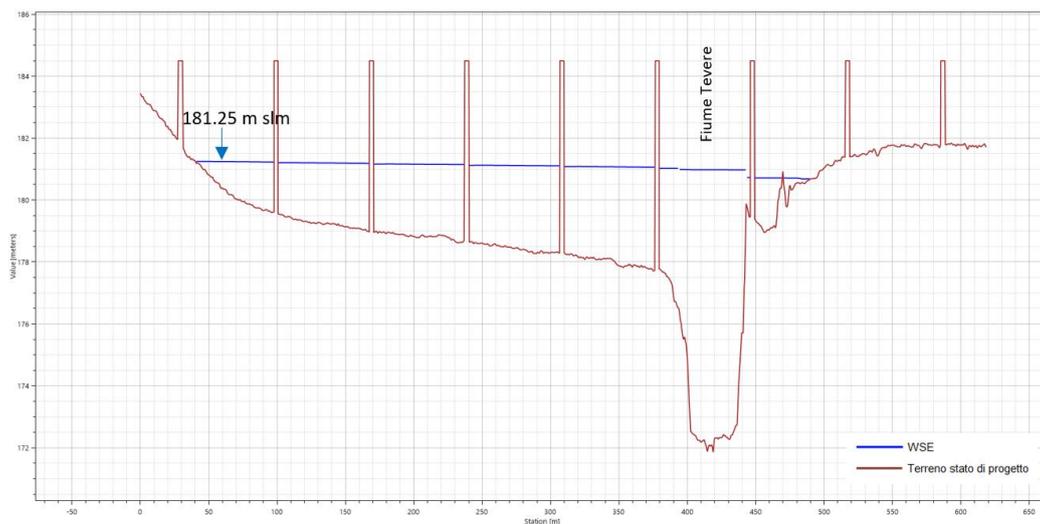


Figura 2-7: profilo in asse ai viadotti affiancati di progetto con indicazione del DTM (linea marrone), della quota massima della superficie libera TR = 200 anni (linea blu) e del valore numerico massimo espresso in m s.l.m.

PROGETTAZIONE ATI:

Nella seguente Figura 2-8 si riporta un estratto delle condizioni di allagabilità duecentennale dell'area relativo al rilevato stradale a diretto contatto con le correnti di piena, con indicazione delle quote massime locali raggiunte dal pelo libero.

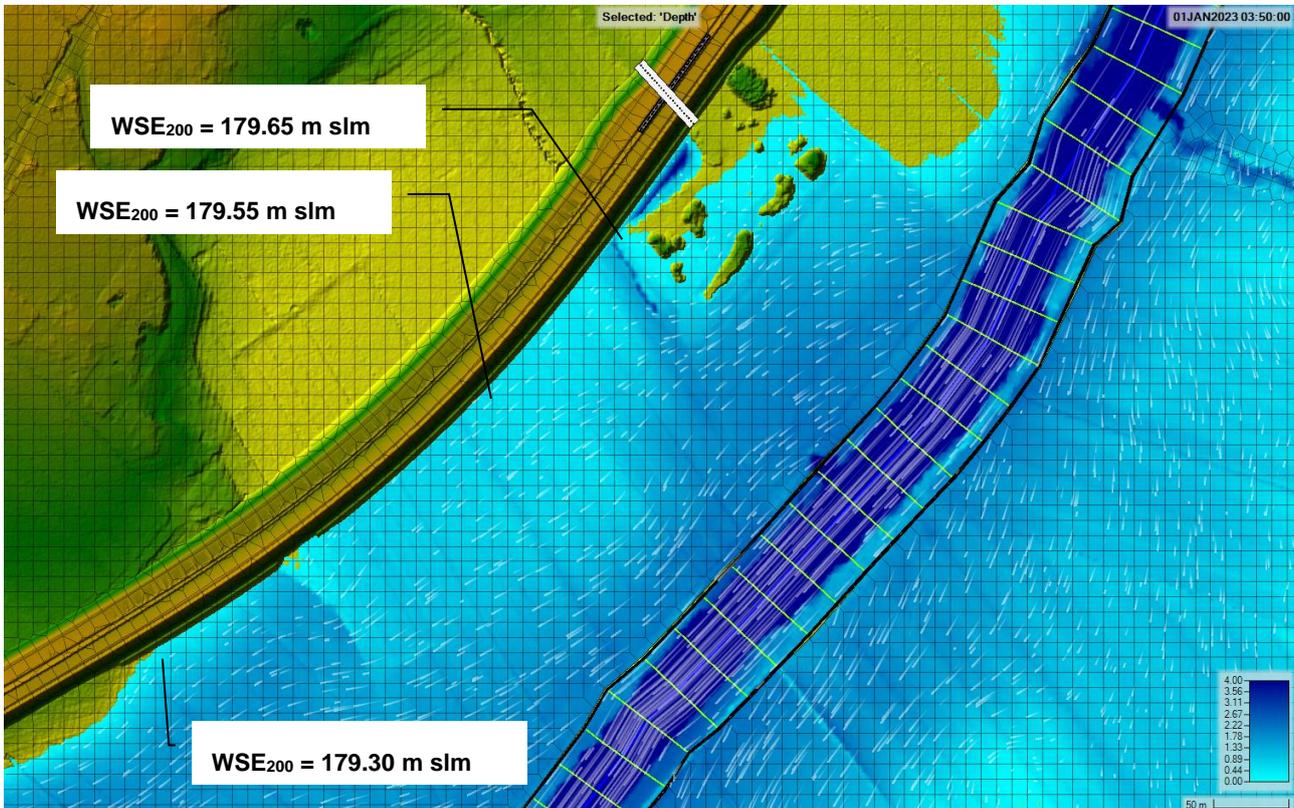


Figura 2-8: battenti massimi duecentennali (espressi in m) nella configurazione di progetto, con indicazione delle direzioni di flusso locali. Dettaglio presso il rilevato stradale a sud dei viadotti.

Nelle figure seguenti sono rappresentati i risultati per l'evento TR = 500 anni.

In Figura 2-10 è mostrato un dettaglio nella zona dei viadotti affiancati, che mostra come 15 pile siano complessivamente interessate dalla propagazione extra-alveo delle correnti di piena cinquecentennali (7 per il viadotto sx e 8 per il viadotto dx).

PROGETTAZIONE ATI:

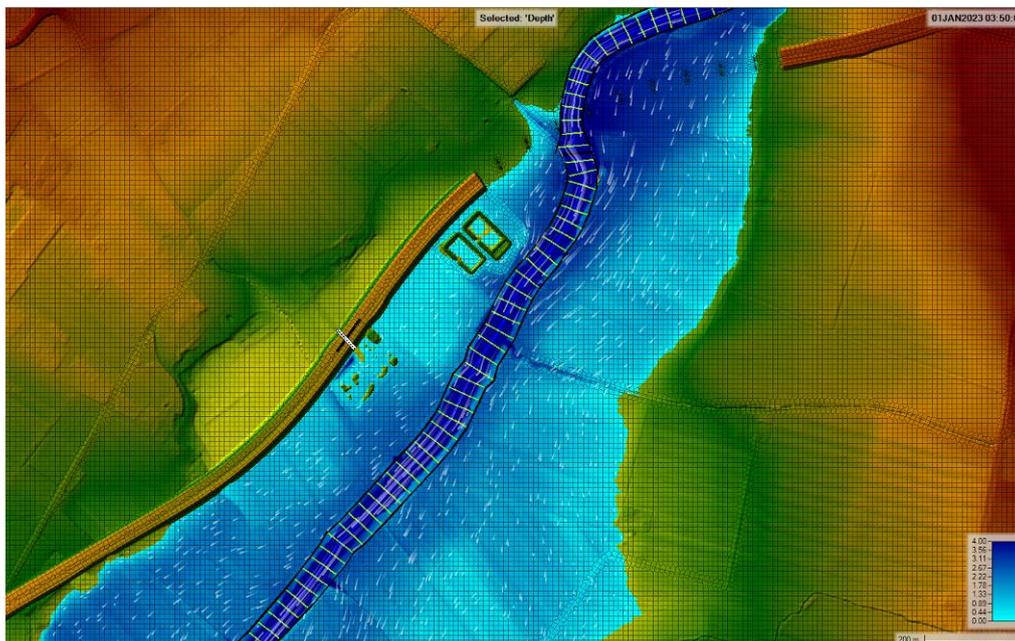


Figura 2-9: battenti massimi cinquecentennali (espressi in m) nella configurazione di progetto, con indicazione delle direzioni di flusso locali

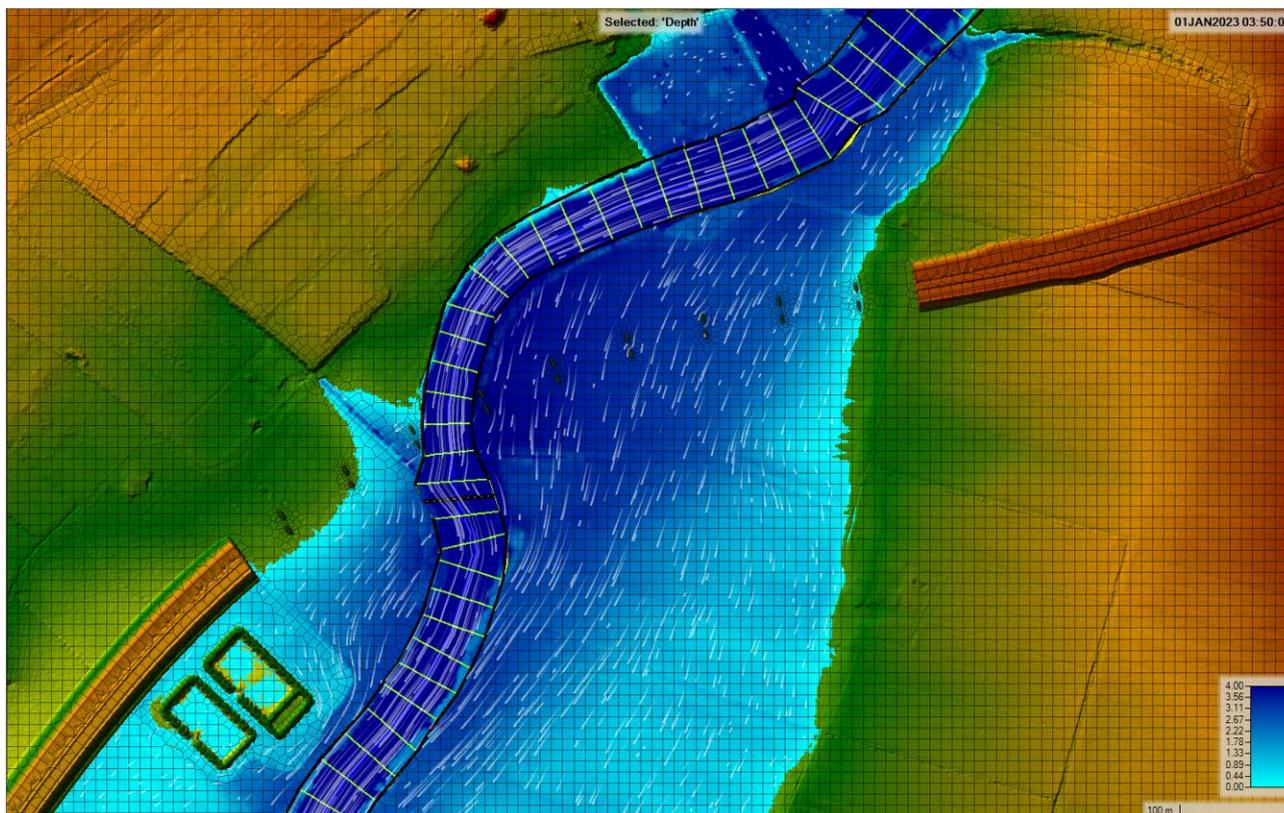


Figura 2-10: battenti massimi cinquecentennali (espressi in m) nella configurazione di progetto, con indicazione delle direzioni di flusso locali. Dettaglio presso le pile dei viadotti affiancati sul F. Tevere.

PROGETTAZIONE ATI:

Tornando all'evento duecentennale, in Figura 2-11 e nel dettaglio di Figura 2-12 sono rappresentate le velocità locali simulate presso le pile dei viadotti, dalle quali si evince come la presenza delle pile dei due viadotti affiancati determini il tipico verificarsi di un "effetto scia" immediatamente a tergo delle stesse. È inoltre visibile il flusso che instaura tra le pile stesse.

La velocità locale massima calcolata in prossimità delle pile è pari a 0.7 m/s.

In Figura 2-13 si riporta un estratto dell'andamento delle velocità locali presso il rilevato stradale a diretto contatto con le correnti di piena. In questo caso, la velocità locale massima calcolata in prossimità dell'opera è pari a circa 0.2 m/s.

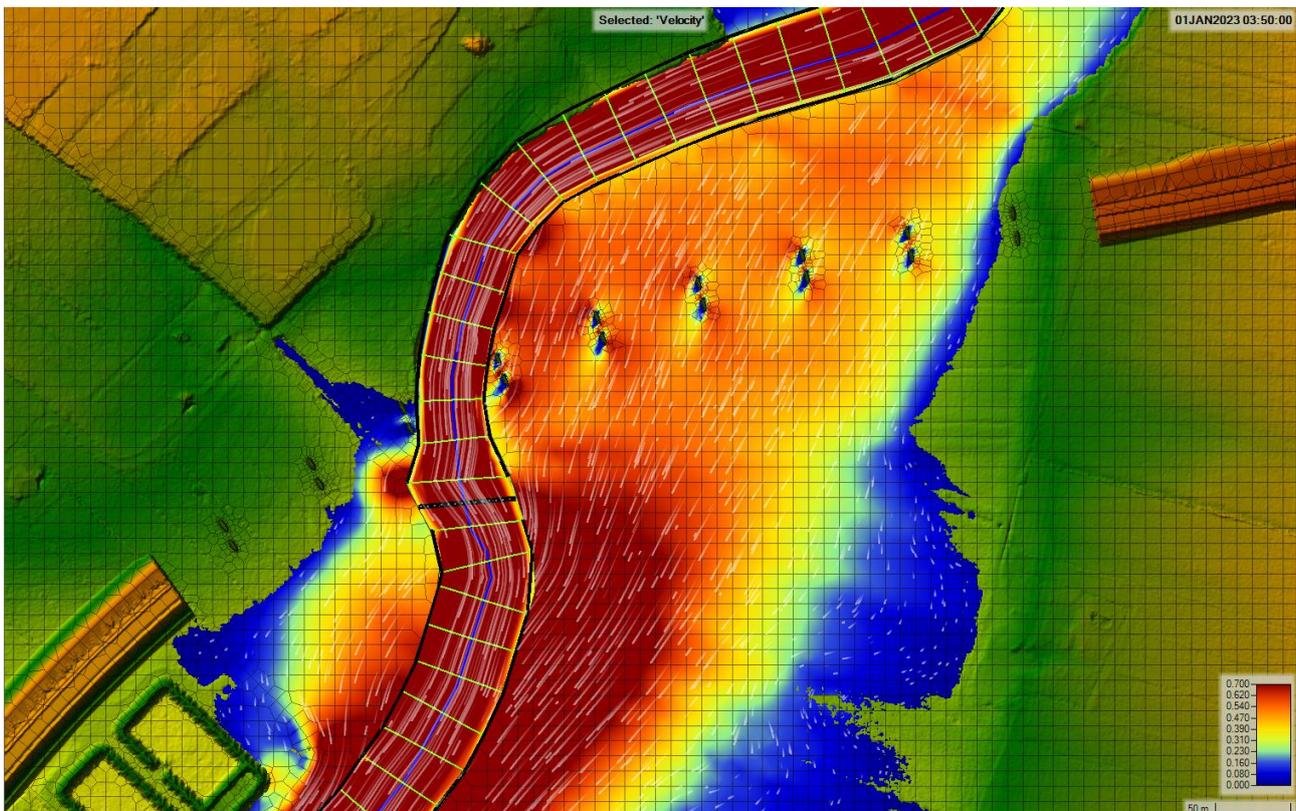


Figura 2-11: velocità massime duecentennali (espresse in m/s) nella configurazione di progetto, con indicazione delle direzioni di flusso locali. Dettaglio presso le pile dei viadotti affiancati sul F. Tevere.

PROGETTAZIONE ATI:

RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI MAGGIORI (VIADOTTI)

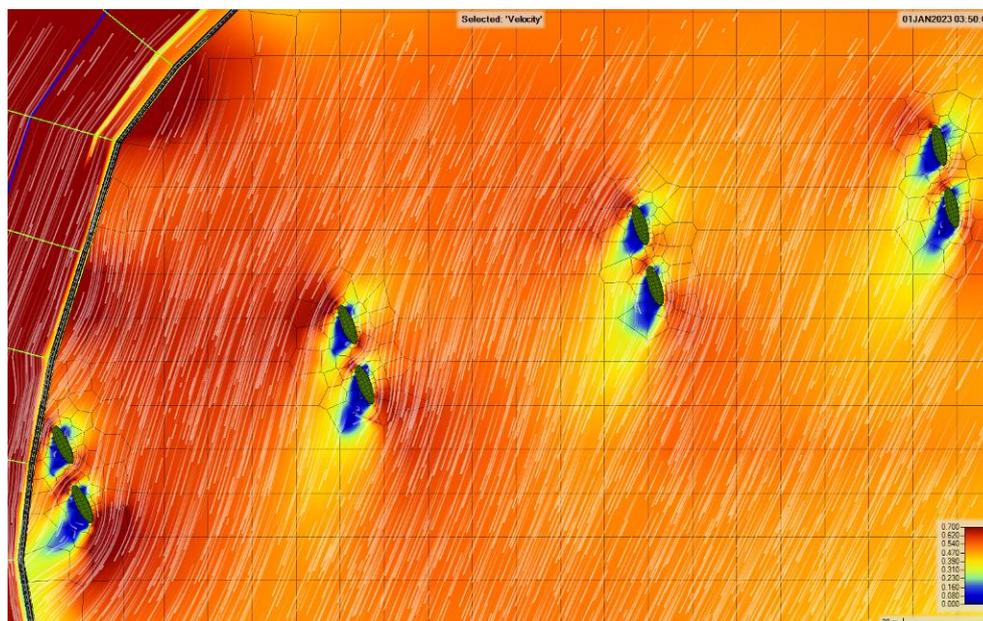


Figura 2-12: velocità massime duecentennali (espresse in m/s) nella configurazione di progetto, con indicazione delle direzioni di flusso locali. Dettaglio presso le pile in sinistra idrografica del F. Tevere.

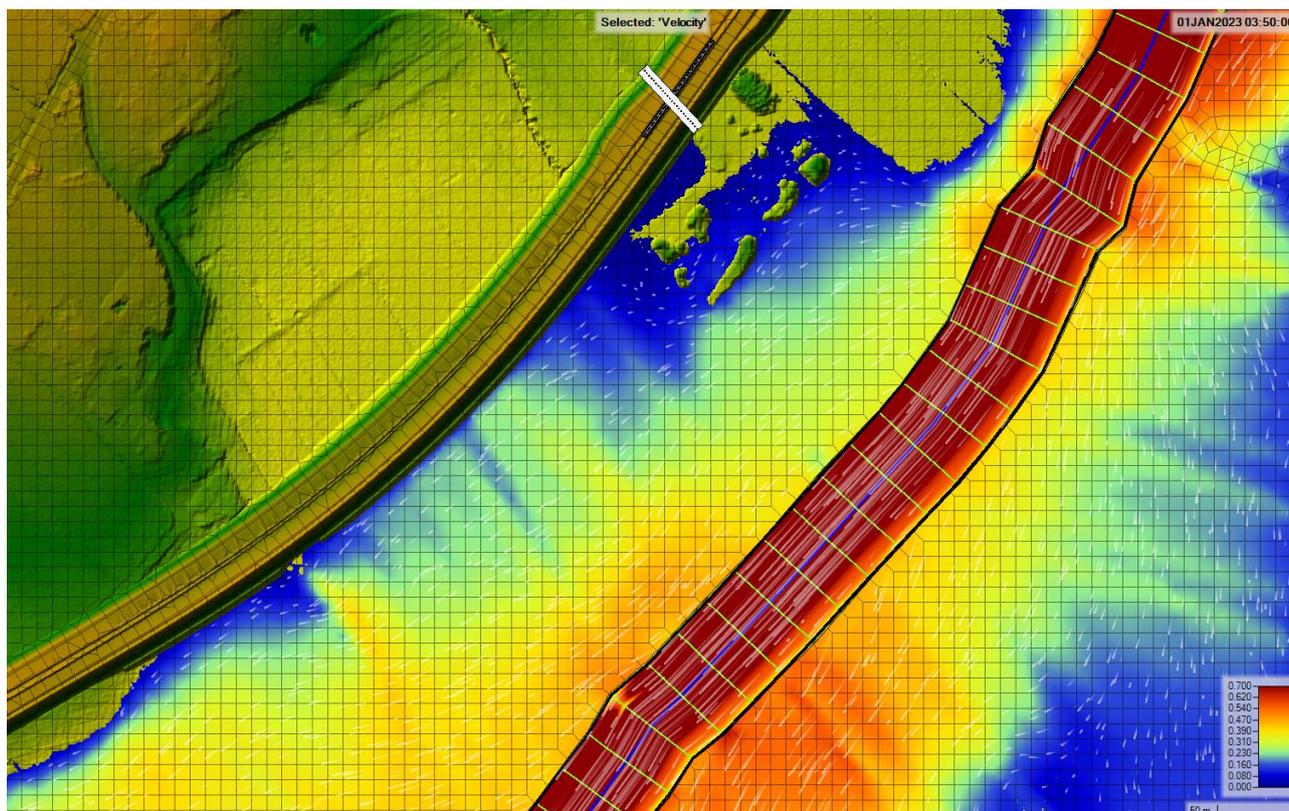


Figura 2-13: velocità massime duecentennali (espresse in m/s) nella configurazione di progetto, con indicazione delle direzioni di flusso locali. Dettaglio presso il rilevato stradale a sud dei viadotti.

PROGETTAZIONE ATI:

RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI MAGGIORI (VIADOTTI)

Hec – Ras, attraverso l'interfaccia di RAS Mapper, oltre a mostrare mappe statiche o dinamiche delle principali grandezze idrauliche (velocità, quota della superficie idrica/pelo libero, battenti), consente di generarne altre a partire da ciò che è noto per ciascuna cella della maglia di calcolo. La mappa rappresentativa dello “*shear stress*”, ad esempio, viene generata in base alla conoscenza di densità dell'acqua, raggio idraulico e pendenza del pelo libero:

$$\tau = \gamma * R * J$$

Nel caso di celle 2D, il software calcola τ mediandolo prima su ciascuna faccia della cella, poi interpolando tra le varie facce.

Sempre con riferimento all'evento duecentennale, in Figura 2-14 è rappresentato l'andamento spaziale delle azioni tangenziali presso le pile dei viadotti, con valori massimi calcolati pari a 30÷40 N/m².

Presso il rilevato stradale a diretto contatto con le correnti di piena (Figura 2-15), le azioni tangenziali calcolate risultano ovunque inferiori a 5 N/m².

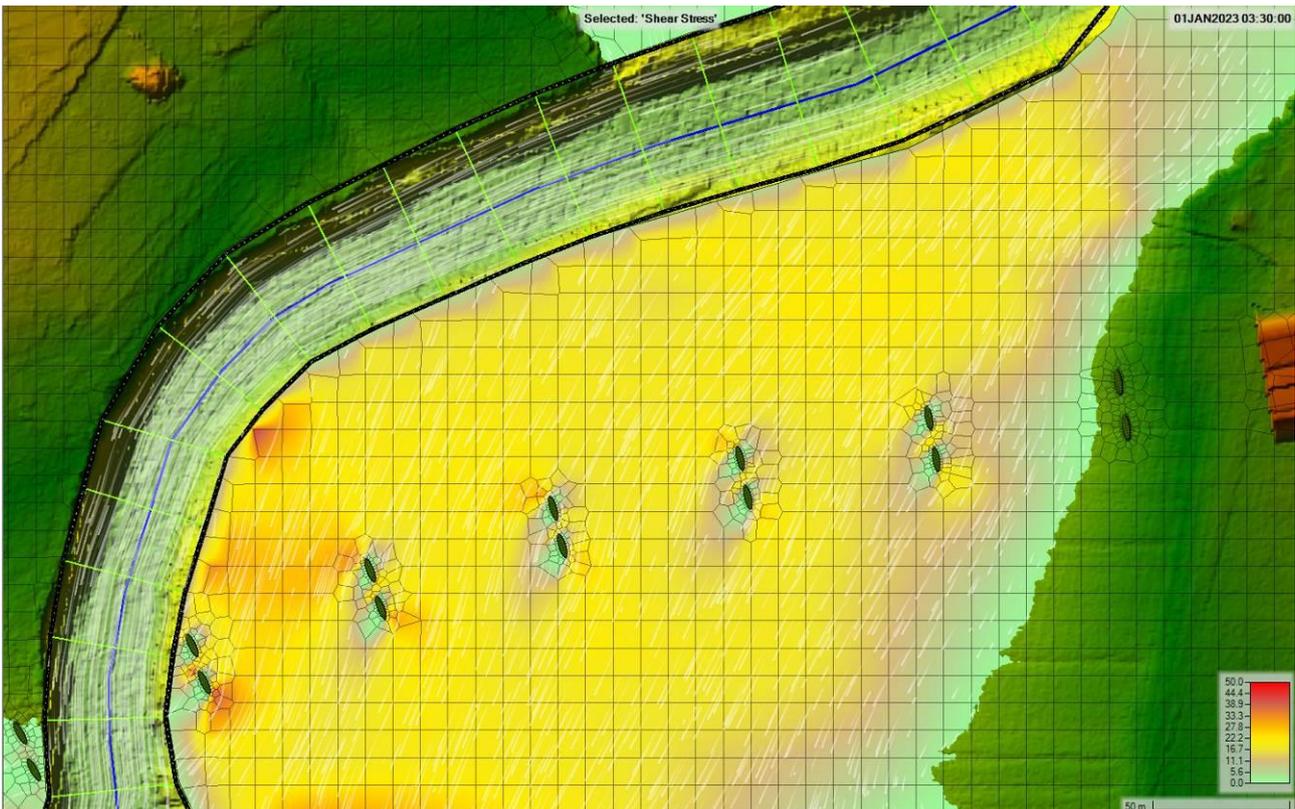


Figura 2-14: azioni tangenziali massime duecentennali (“*shear stress*”, espresse in N/m²) nella configurazione di progetto. Dettaglio presso le pile dei viadotti affiancati sul F. Tevere.

PROGETTAZIONE ATI:

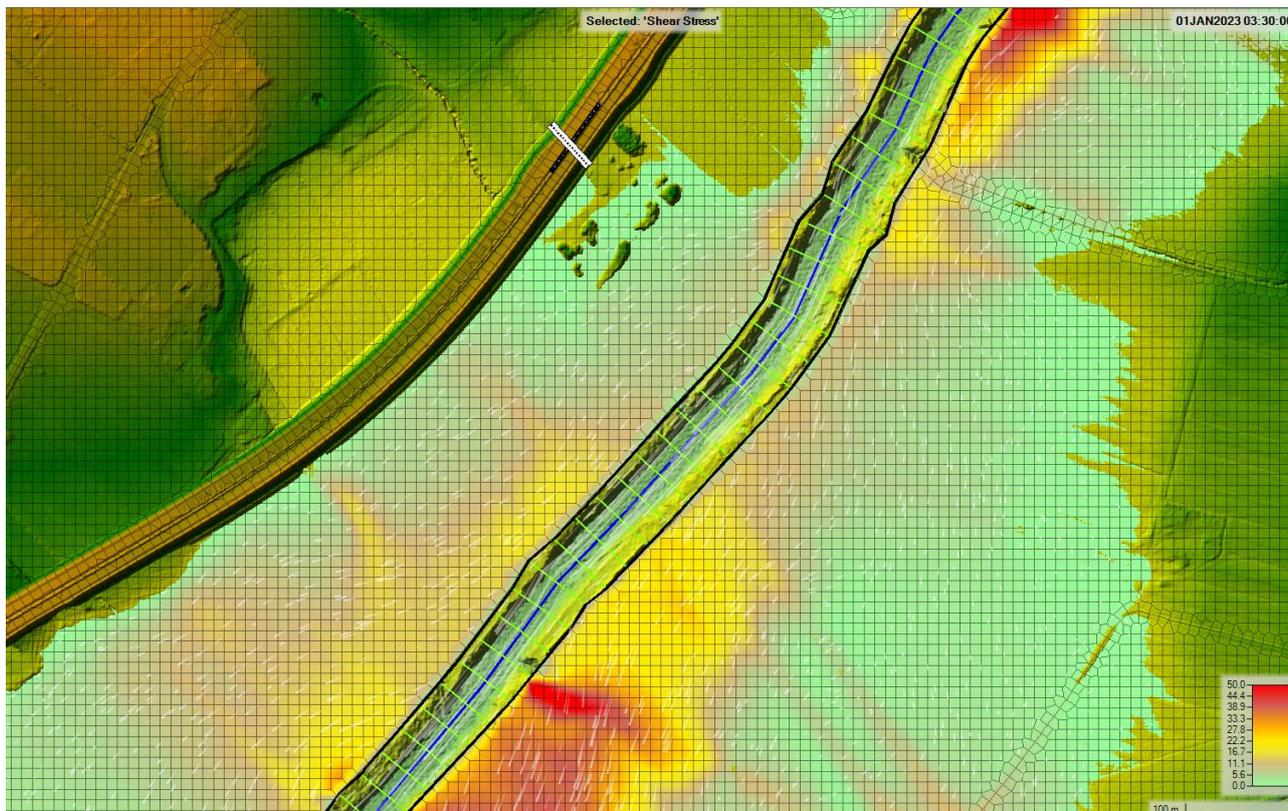


Figura 2-15: azioni tangenziali massime duecentennali (“shear stress”, espresse in N/m^2) nella configurazione di progetto. Dettaglio presso il rilevato stradale a sud dei viadotti.

2.2.6. Verifica del non incremento di rischio in altre aree

La figura seguente mostra, per lo scenario TR = 200 anni, la differenza tra i battenti calcolati nella configurazione di progetto e quelli di stato attuale, al fine di rappresentare graficamente le aree in cui la pericolosità idraulica rimane inalterata, si riduce o aumenta.

La figura mostra che nella quasi totalità del dominio di studio le differenze di quota della superficie idrica duecentennale, nel passaggio tra stato attuale e di progetto, si mantengono inferiori a circa 3 cm, quindi inferiori a quelle che potrebbero essere assunte come tolleranze di calcolo. L’unica area in cui si osserva una modificazione di pericolosità è nell’area golenale in destra idrografica, a sud dei nuovi viadotti, in cui si osserva una riduzione della pericolosità idraulica a causa della presenza del rilevato.

Quanto appena descritto dimostra che l’opera, nel tratto analizzato, non determina incrementi di rischio idraulico nelle aree contermini.

PROGETTAZIONE ATI:



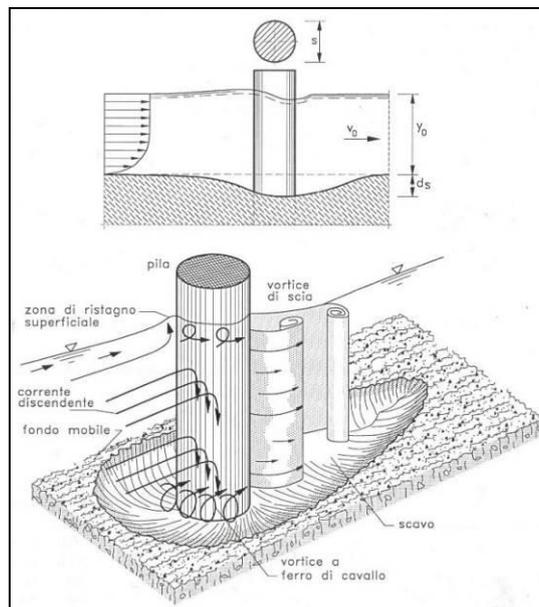
Figura 2-16: Differenze tra i battenti locali duecentennali di progetto e attuali. Il colore grigio indica differenze contenute entro 3 cm (ricomprese nelle tolleranze di calcolo), il colore verde indica una riduzione di pericolosità idraulica.

PROGETTAZIONE ATI:

3. ANALISI DELL'EROSIONE ALLA BASE DELLE PILE DEI VIADOTTI SUL FIUME TEVERE

La causa principale dell'erosione localizzata in corrispondenza della base delle pile in alveo a fondo mobile è la formazione di vortici alla loro base, che sono comunemente detti "vortici a ferro di cavallo".

Tale fenomeno viene ad interessare planimetricamente tutta l'area circostante la pila fino alla linea di separazione del vortice dal flusso circostante (vedi figura seguente).



Erosione localizzata provocata dalla pila di un ponte

(Da Deppo/Datei "Le opere idrauliche nelle costruzioni stradali" – maggio 1999)

La metodologia sviluppata da Breusers, descritta in dettaglio ad esempio in Da Deppo e Datei (1994)¹, è una delle formule più utilizzate per la stima dello scalzamento. Secondo tale approccio i principali fattori che influenzano il processo di erosione alla base delle pile sono la velocità media e la profondità della corrente, la larghezza, la lunghezza e la forma della pila, l'angolo di attacco della corrente, la natura e le dimensioni del materiale d'alveo e l'eventuale presenza di detriti trasportati. Data una pila di forma generica, la profondità dello scavo d_s può essere dunque descritta così:

$$\frac{d_s}{s} = f_1\left(\frac{v}{v_{cr}}\right) f_2(forma) f_3\left(\alpha, \frac{l}{s}\right) \left[2 \tanh\left(\frac{y}{s}\right)\right]$$

¹ Luigi Da Deppo, Claudio Datei, *Le opere idrauliche nelle costruzioni stradali*. Editoriale Bios. (1994)

nelle quali le funzioni f_1 , f_2 e f_3 hanno le seguenti espressioni:

$$f_1\left(\frac{v}{v_{cr}}\right) = 0 \quad \text{per } \frac{v}{v_{cr}} \leq 0.5$$

$$f_1\left(\frac{v}{v_{cr}}\right) = 2\frac{v}{v_{cr}} - 1 \quad \text{per } 0.5 < \frac{v}{v_{cr}} \leq 1$$

$$f_1\left(\frac{v}{v_{cr}}\right) = 1 \quad \text{per } \frac{v}{v_{cr}} > 1$$

$$f_2(\text{forma}) = 1.00 \quad \text{per pile circolari o con fronti arrotondati;}$$

$$f_2(\text{forma}) = 0.75 \quad \text{per pile sagomate in modo da accompagnare la corrente;}$$

$$f_2(\text{forma}) = 1.30 \quad \text{per pile rettangolari;}$$

$$f_3\left(\alpha, \frac{l}{s}\right) \text{ ricavabile dal grafico seguente;}$$

essendo:

d_s la profondità dello scavo misurata a partire dal fondo del terreno indisturbato;

s la larghezza della pila di lunghezza l ;

v la velocità media della corrente indisturbata;

v_{cr} la velocità critica di trascinamento, intesa come velocità media alla quale inizia il movimento del materiale del fondo di assegnato diametro d e ricavata con la seguente formula di Hincu (1965):

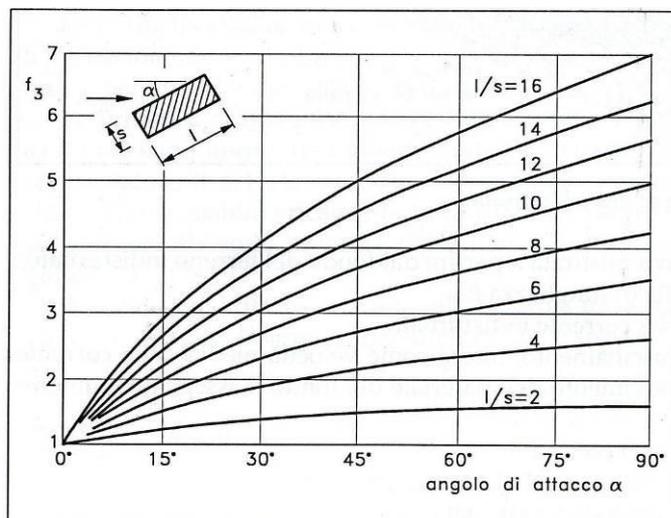
$$v_{cr} = 1.2 \sqrt{gd \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) \left(\frac{y}{d} \right)^{0.2}}$$

d la dimensione del materiale; per i miscugli si adotta normalmente come riferimento granulometrico d_{50} ;

α l'angolo che la corrente indisturbata forma con la pila;

y la profondità della corrente indisturbata.

RELAZIONE IDRAULICA ATTRAVERSAMENTI MAGGIORI (VIADOTTI)



Andamento della funzione f_3 al variare di α e di l/s .

Allo scopo di stimare l'entità dello scavo indotto dall'erosione localizzata intorno alla base delle pile dei viadotti nel corso di una piena duecentennale del F. Tevere, dal modello numerico allestito sono stati desunti i dati caratteristici della corrente di piena nelle aree 2D.

Nella pila più sollecitata $y = 3.30$ m e $v = 0.7$ m/s.

Le immagini seguenti riportano le analisi granulometriche ritenute rappresentative dei materiali in alveo, da cui si ricavano valori di $d_{50} = 0.013 \div 0.1$ mm.

Le pile hanno larghezza pari a 3 m, lunghezza 9.7 m e presentano un angolo di 45° rispetto alla corrente.

L'applicazione del metodo fornisce, per la pila più sollecitata, uno scavo alla base pari a circa 8.4 m.

PROGETTAZIONE ATI:

Curva granulometrica
(UNICEN ISO/TS 17892-4) - Cod prova MOLAB IO630

PASSANTE AI SETACCI	N ₁₀ (2 mm)	99 %	N ₄₀ (0,425 mm)	85 %	N ₂₃₀ (0,083 mm)	74 %	
GHIAIA	1 %	SABBIA	26 %	LIMO	47 %	ARGILLA	26 %

Curva Granulometrica

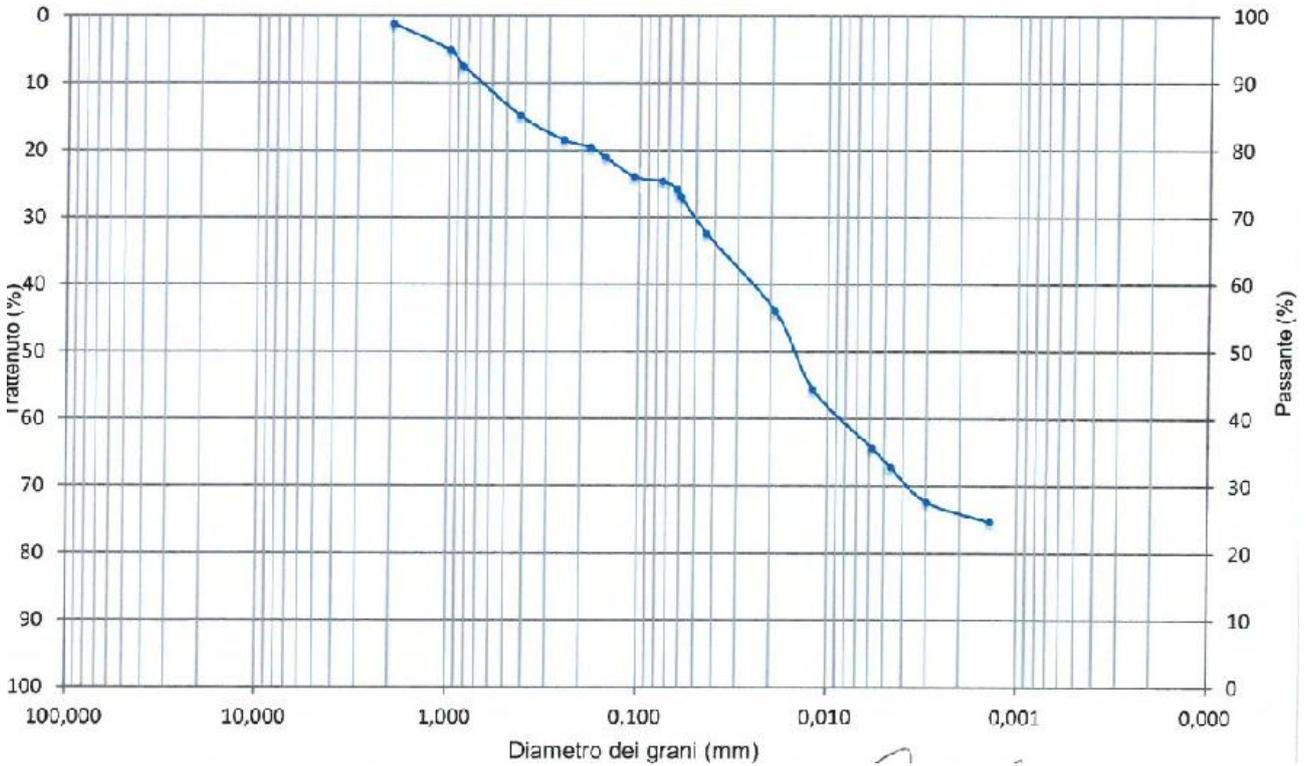


Figura: Curva granulometrica sondaggio S07_4 m

PROGETTAZIONE ATI:

Curva granulometrica
(UNICEN ISO/TS 17892-4) - Cod prova MOLAB IO630

PASSANTE AI SETACCI	N ₁₀ (2 mm)	100 %	N ₄₀ (0,425 mm)	99 %	N ₂₅₀ (0,063 mm)	30 %	
GHIAIA	0 %	SABBIA	70 %	LIMO	23 %	ARGILLA	7 %

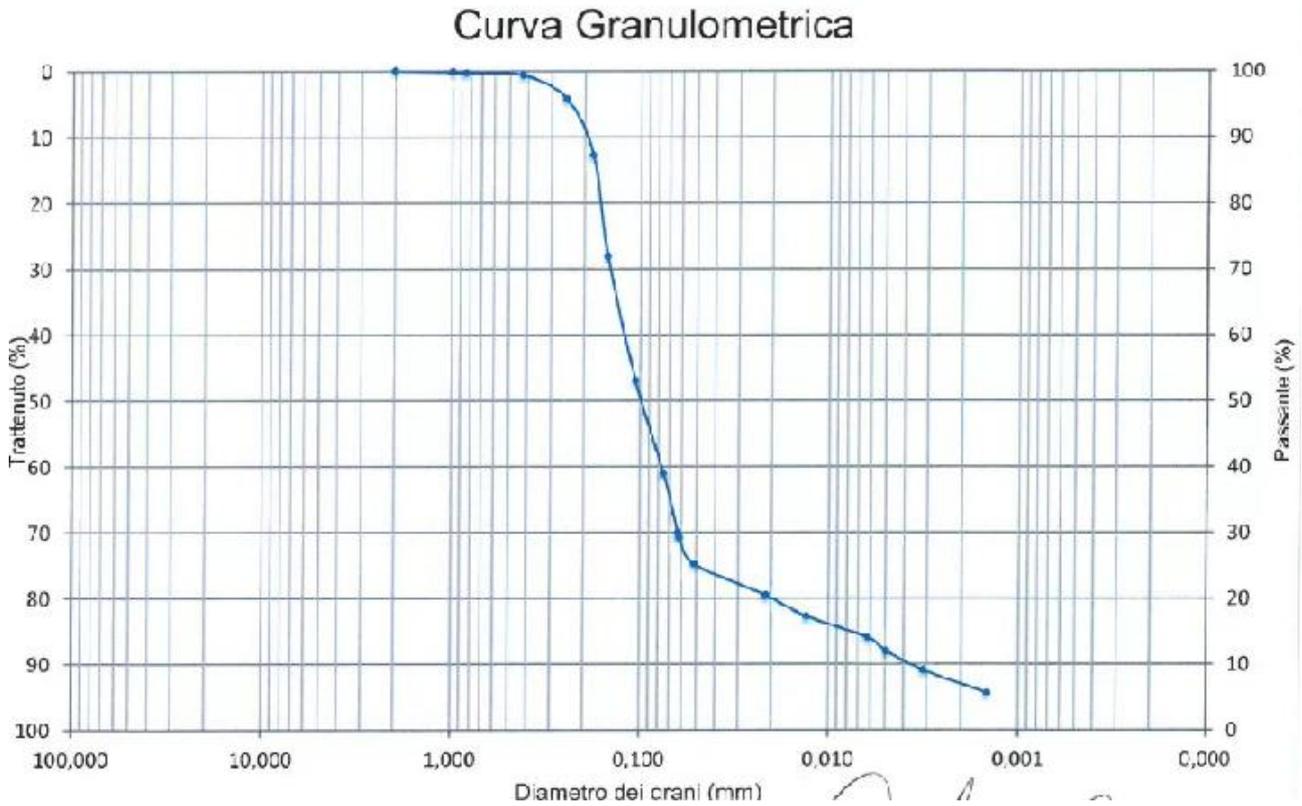


Figura: Curva granulometrica sondaggio S09_3.7 m

PROGETTAZIONE ATI:

Dati caratteristici della sezione, della pila e del materiale di fondo		
Pile Tevere		
y [m] =	3.30	Profondità della corrente indisturbata a monte
v [m/s] =	0.70	velocità media moto uniforme
s [m] =	3.00	larghezza iniziale della pila
d_{50} [m] =	0.0001	dimensione mediana del materiale di fondo
γ_s [N/mc] =	26000	peso specifico materiale
γ [N/mc] =	9810	peso specifico acqua
α =	45.00	angolo tra corrente e pila
Calcolo dello scavo in corrispondenza della pila		
v_{cr} [m/s] =	0.39	velocità critica di trascinamento
v/v_{cr} =	1.80963	
f_1 =	1.00	
f_2 =	1	fattore forma pile con fronti arrotondati
f_3 =	1.75	
ds/s =	2.80	
ds_1 [m] =	8.41	scavo alla base della pila

L'applicazione della procedura sopra descritta, nonché l'applicazione della teoria di Shields basata sul massimo valore calcolato con il modello 2D di "shear stress" pari a 37 N/m², a cui corrisponde una velocità di attrito $u^* = 0.19$ m/s, mostra che un materiale di dimensione $d > 4$ cm risulterebbe stabile.

Dati caratteristici della sezione, della pila e del materiale di fondo		
Pile Tevere		
y [m] =	3.30	Profondità della corrente indisturbata a monte
v [m/s] =	0.70	velocità media moto uniforme
s [m] =	3.00	larghezza iniziale della pila
d_{50} [m] =	0.0400	dimensione mediana del materiale di fondo
γ_s [N/mc] =	26000	peso specifico materiale
γ [N/mc] =	9810	peso specifico acqua
α =	45.00	angolo tra corrente e pila
Calcolo dello scavo in corrispondenza della pila		
v_{cr} [m/s] =	2.33	velocità critica di trascinamento
v/v_{cr} =	0.29990	
f_1 =	0.00	
f_2 =	1	fattore forma pile con fronti arrotondati
f_3 =	1.75	
ds/s =	0.00	
ds_1 [m] =	0.00	scavo alla base della pila
fondo scavo [m s.l.m.] =	0.00	

Alla luce di tali considerazioni, è necessario adottare una protezione alla base delle pile, che risultano bagnate da eventi di piena con tempi di ritorno $T_r = 200$ anni, in grado di garantire una resistenza superiore a 40 n/mq, quale la sistemazione con ciottoli e ghiaia:

PRODOTTI MACCAFERRI	n (s/m ^{1/3})	τ_c (N/m ²)
Gabbioni 50 cm	0.07-0.4 (d)	392.4
Materassi Reno 15-17 cm	0.07-0.4 (d)	392.4
Materassi Reno 23-25 cm	0.07-0.4 (d)	392.4
Materassi Reno 30 cm	0.07-0.4 (d)	392.4
Materassi Reno bitunati 23-25 cm	0.07-0.4 (d)	392.4
Macmat-R	0.07-0.4 (d)	294.3
TECNICHE DI L.N.		
Sabbia fine (< 0.2 mm)	0.02 (d)	> 2
Ghiaietto (< 2 cm)	0.02 (d)	> 14.7 (d)
Sabbia e ciottoli	0.03 (d)	> 29.4 (d)
Ciottoli e ghiaia	0.035 (d)	> 49(d)
Cotici erbosi	0.05 (d)	29.4
Talee - Arbusti	0.07-0.4 (d)	58.9
Copertura diffusa	0.07-0.4 (d)	294.3
Vimate-Graticciate spondali	0.07-0.4 (d)	49
Ribalta viva	0.07-0.4 (d)	98.1
Massi con talee	0.07-0.4 (d)	343.4 (e)

Tabella: Valori di scabrezza e tensioni tangenziali ammissibili su opere spondali A REGIME (dopo il 3° periodo vegetativo). Note: d) dipende dalla forma e dalle dimensioni del pietrame utilizzato; d) dipende dalle dimensioni del pietrame utilizzato (fonte Maccaferri S.p.a.).

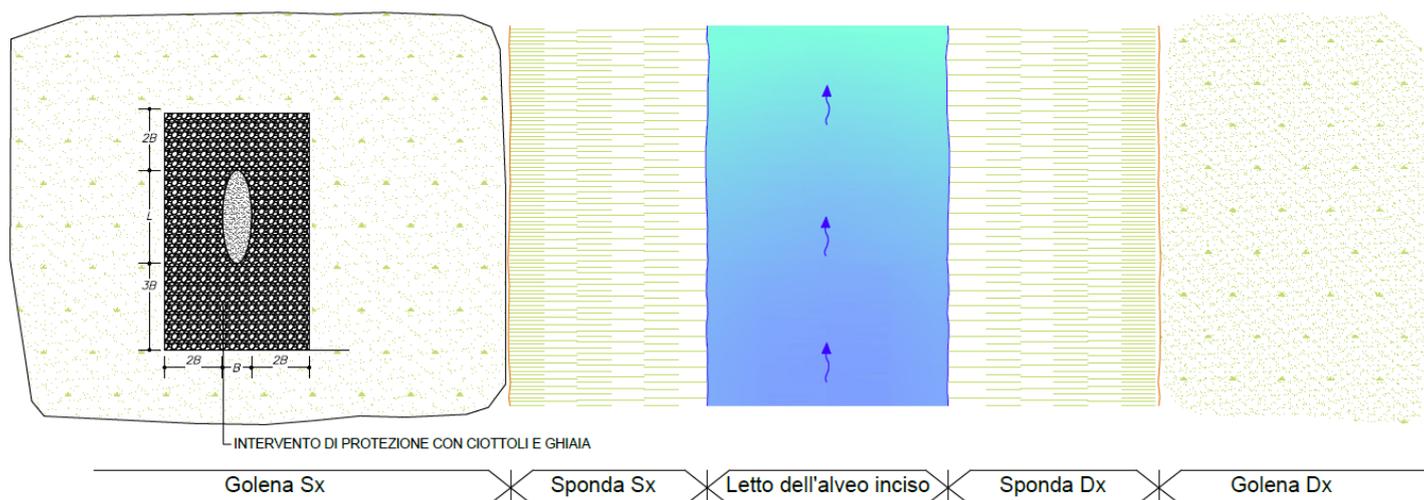


Figura: tipologico di intervento di protezione alla base con copertura in ciottoli e ghiaia

PROGETTAZIONE ATI:

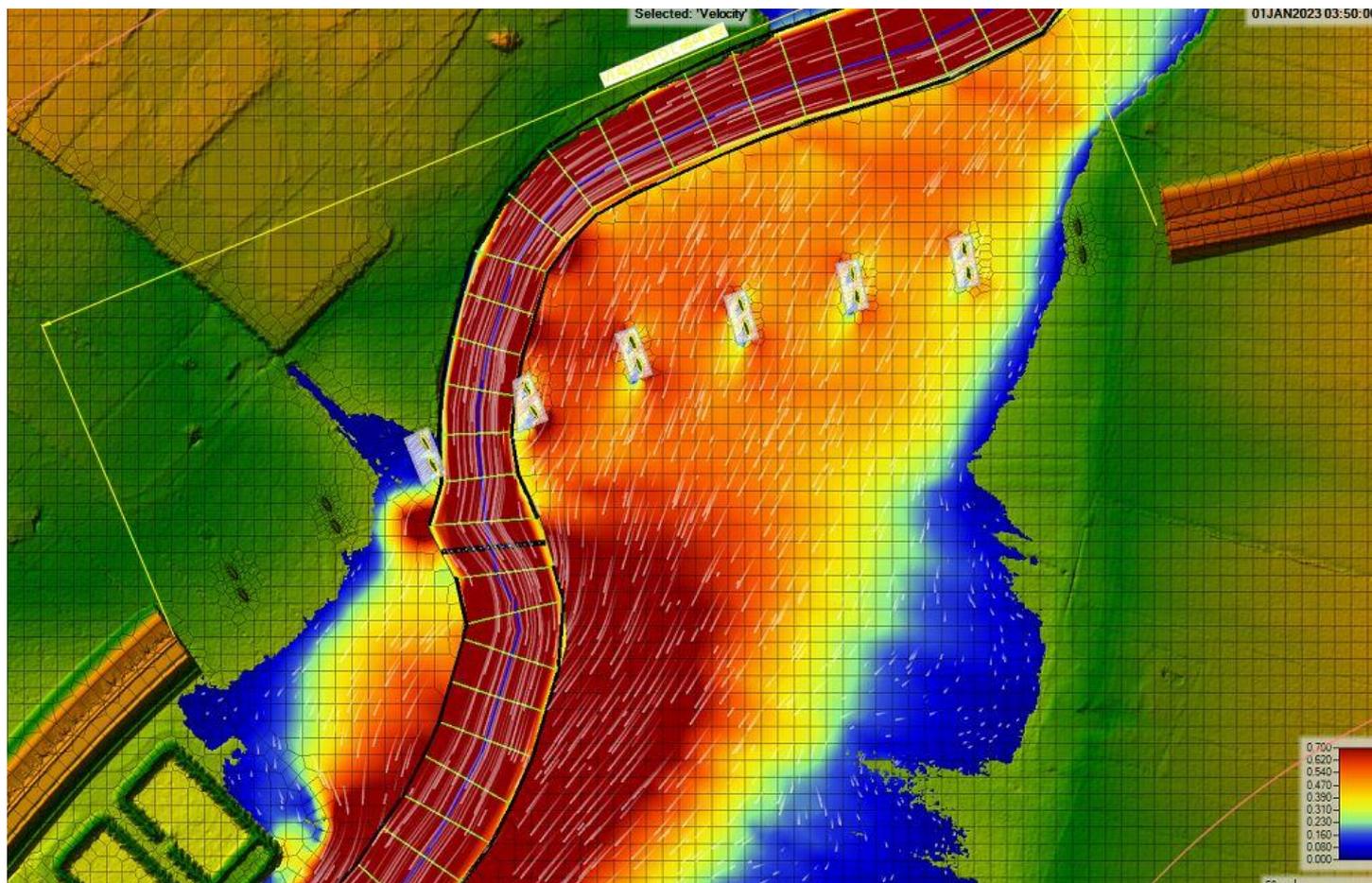


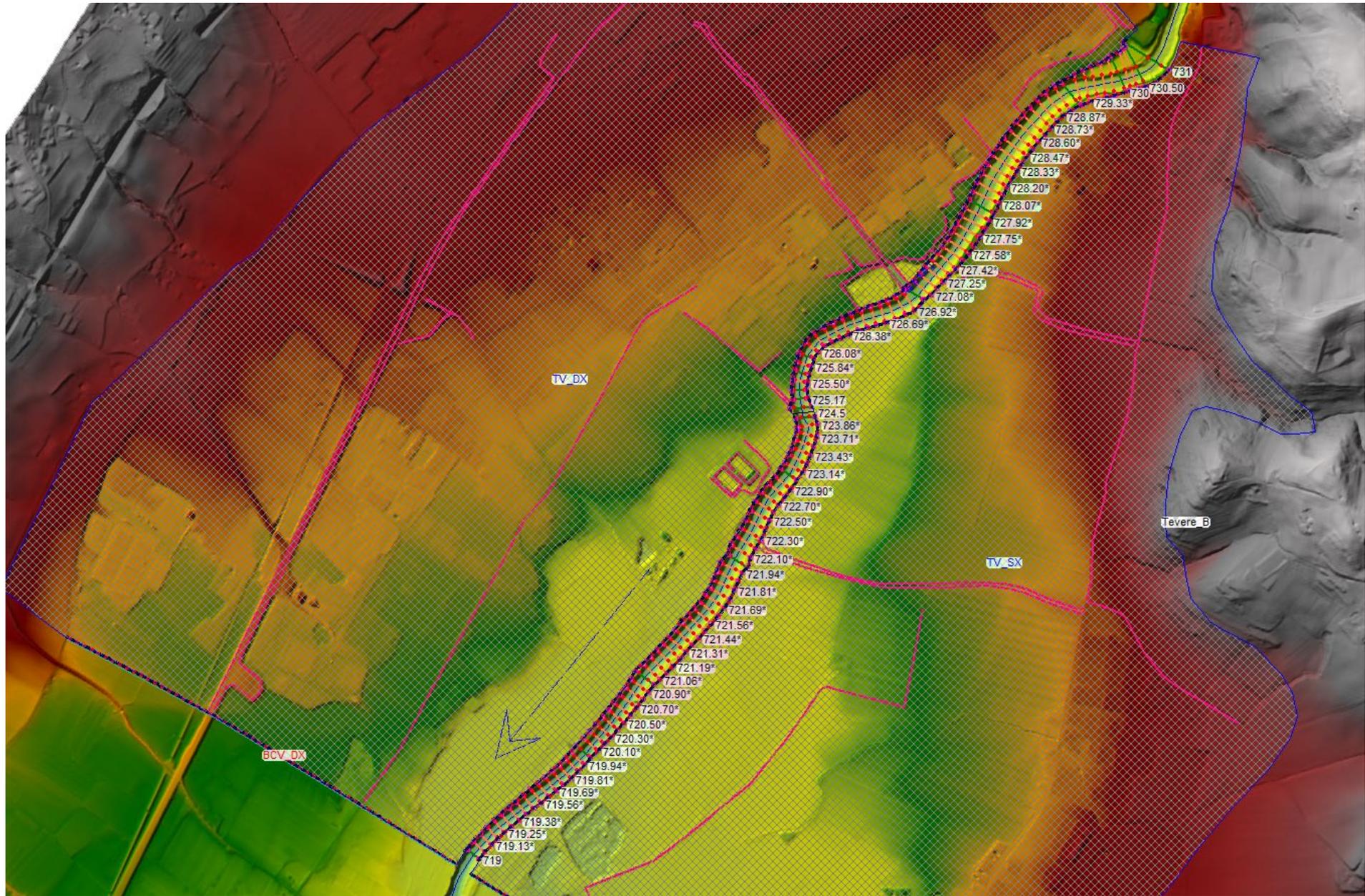
Figura: planimetria intervento di protezione alla base delle pile

PROGETTAZIONE ATI:

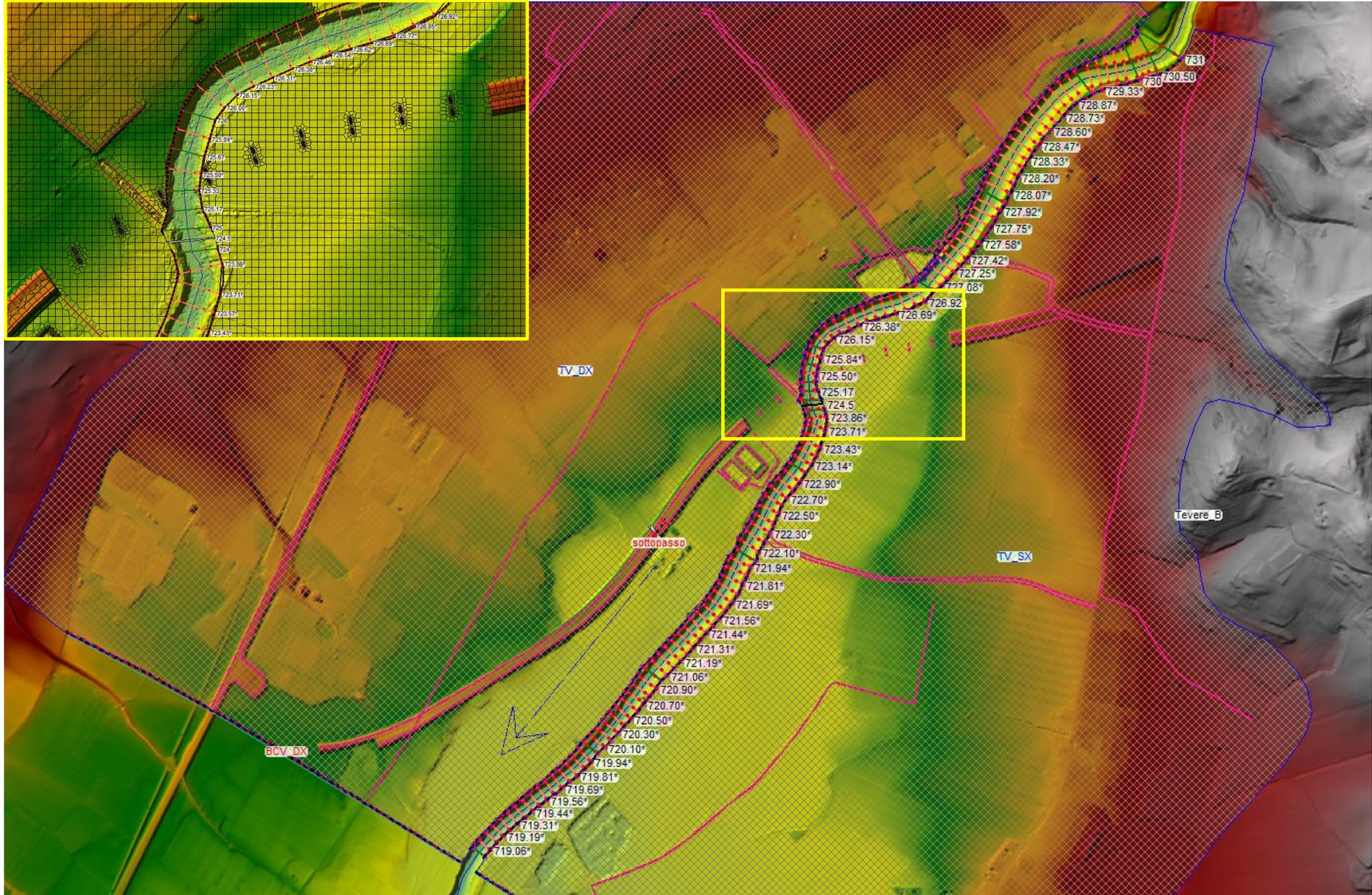
APPENDICE 1

Outputs grafici e numerici
delle simulazioni 1D+2D
effettuate in regime di moto vario
con il software Hec-Ras v6.2

Planimetria Stato Attuale



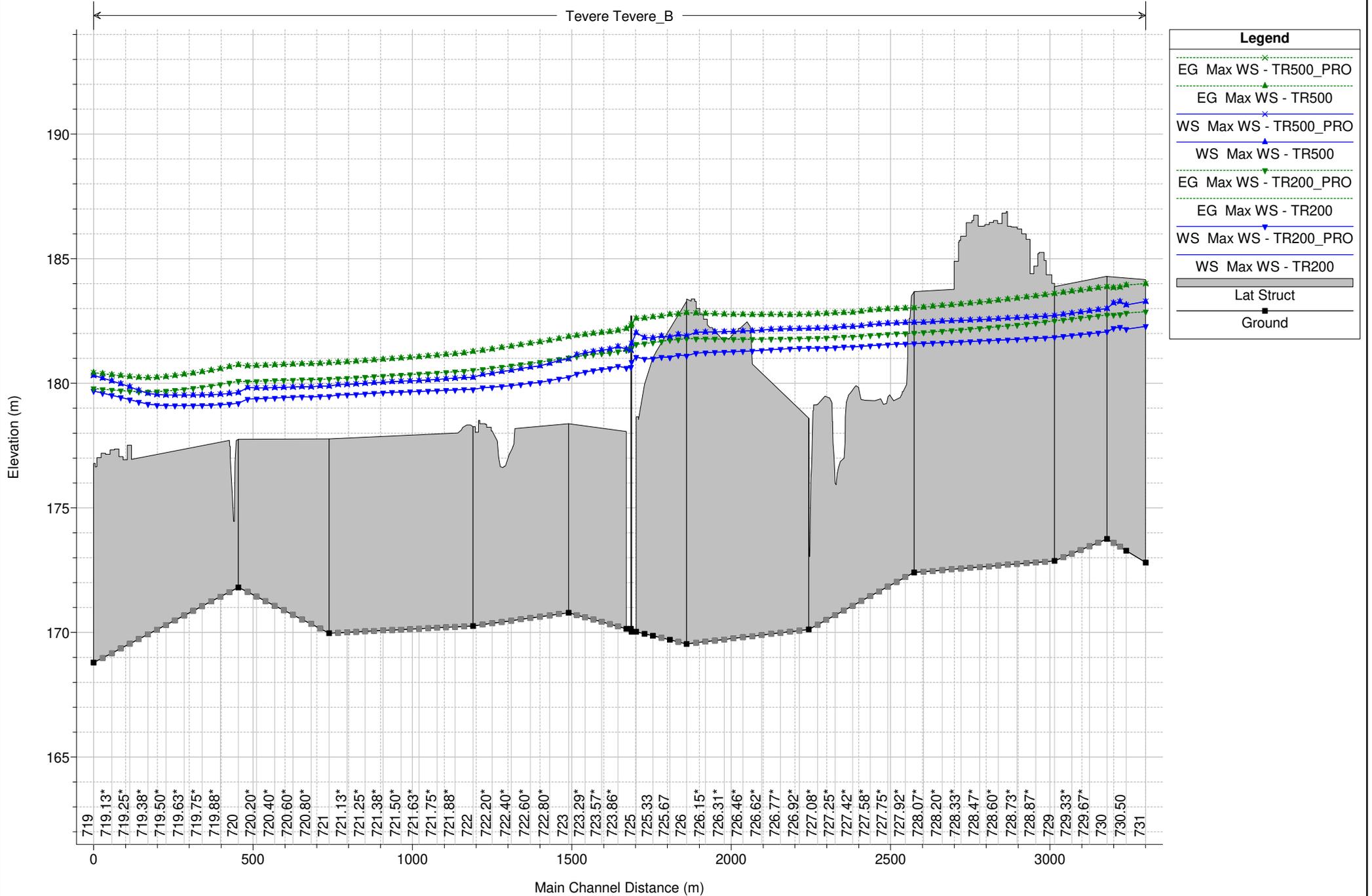
Planimetria Stato di Progetto



Tevere Plan: 1) TR200 2) TR500 3) TR200_PRO 4) TR500_PRO

Strutture Lateralali Destra Idraulica

Tevere Tevere_B

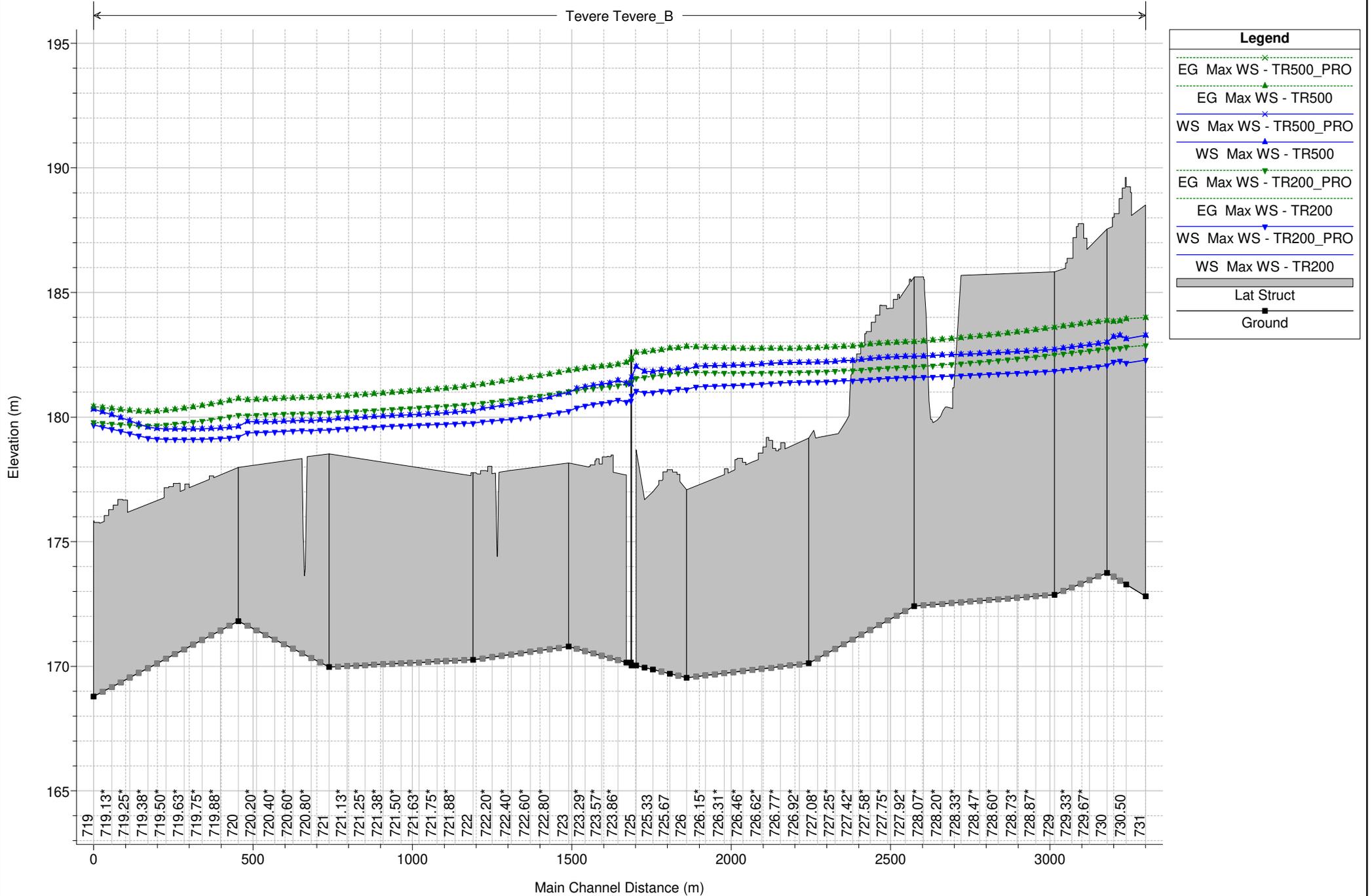


1 cm Horiz. = 155 m 1 cm Vert. = 2 m

Tevere Plan: 1) TR200 2) TR500 3) TR200_PRO 4) TR500_PRO

Strutture Lateral Sinistra Idraulica

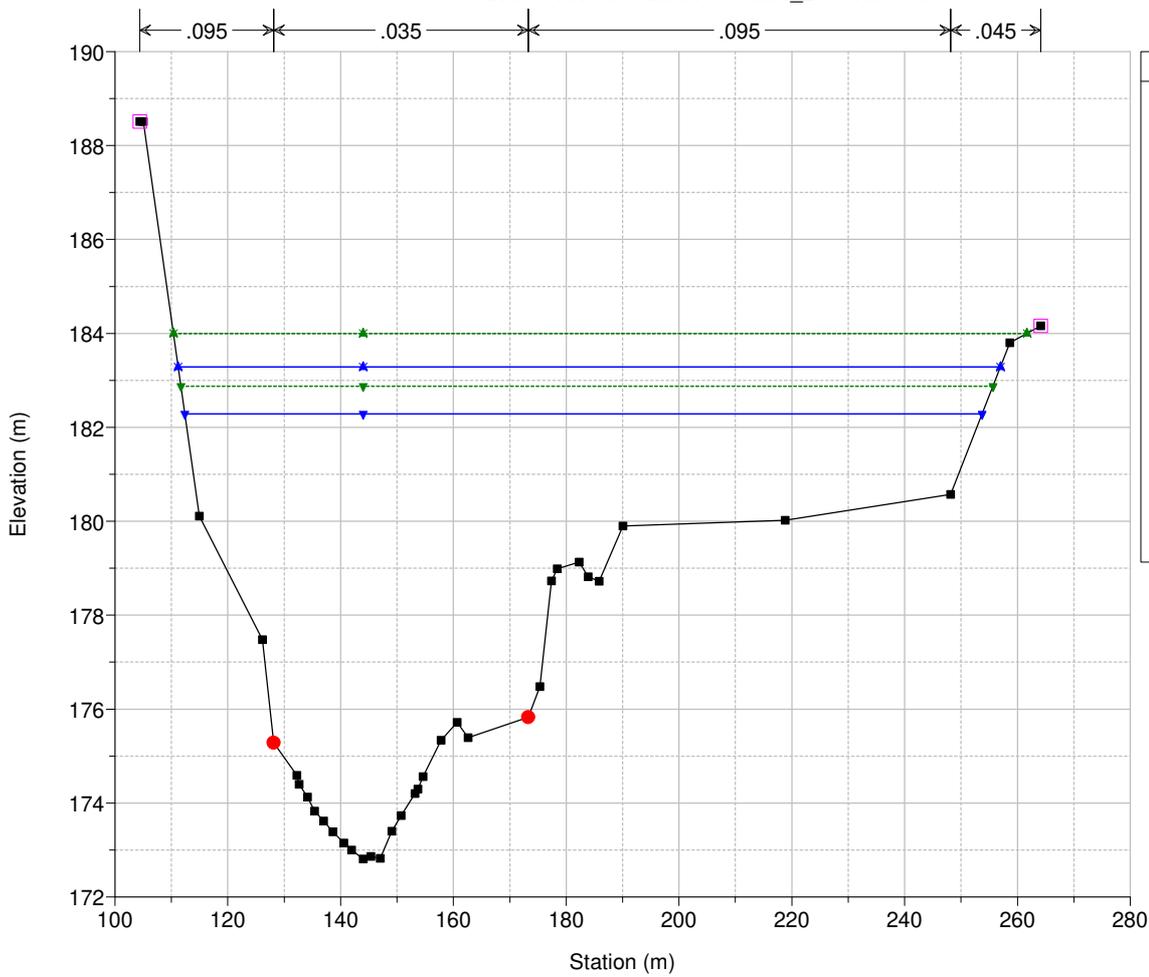
Tevere Tevere_B



1 cm Horiz. = 155 m 1 cm Vert. = 2 m

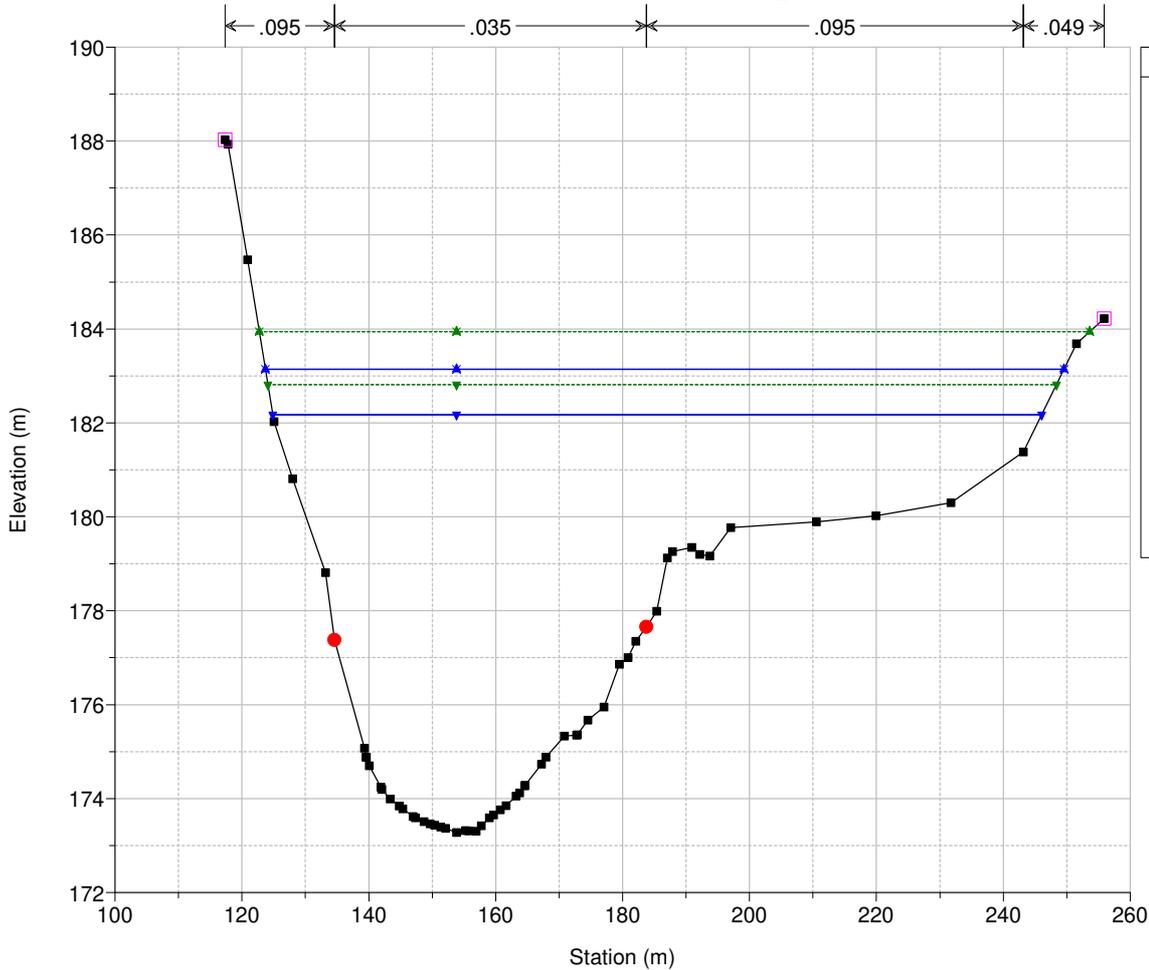
Tevere Plan: 1) TR200 2) TR500 3) TR200_PRO 4) TR500_PRO

River = Tevere Reach = Tevere_B RS = 731



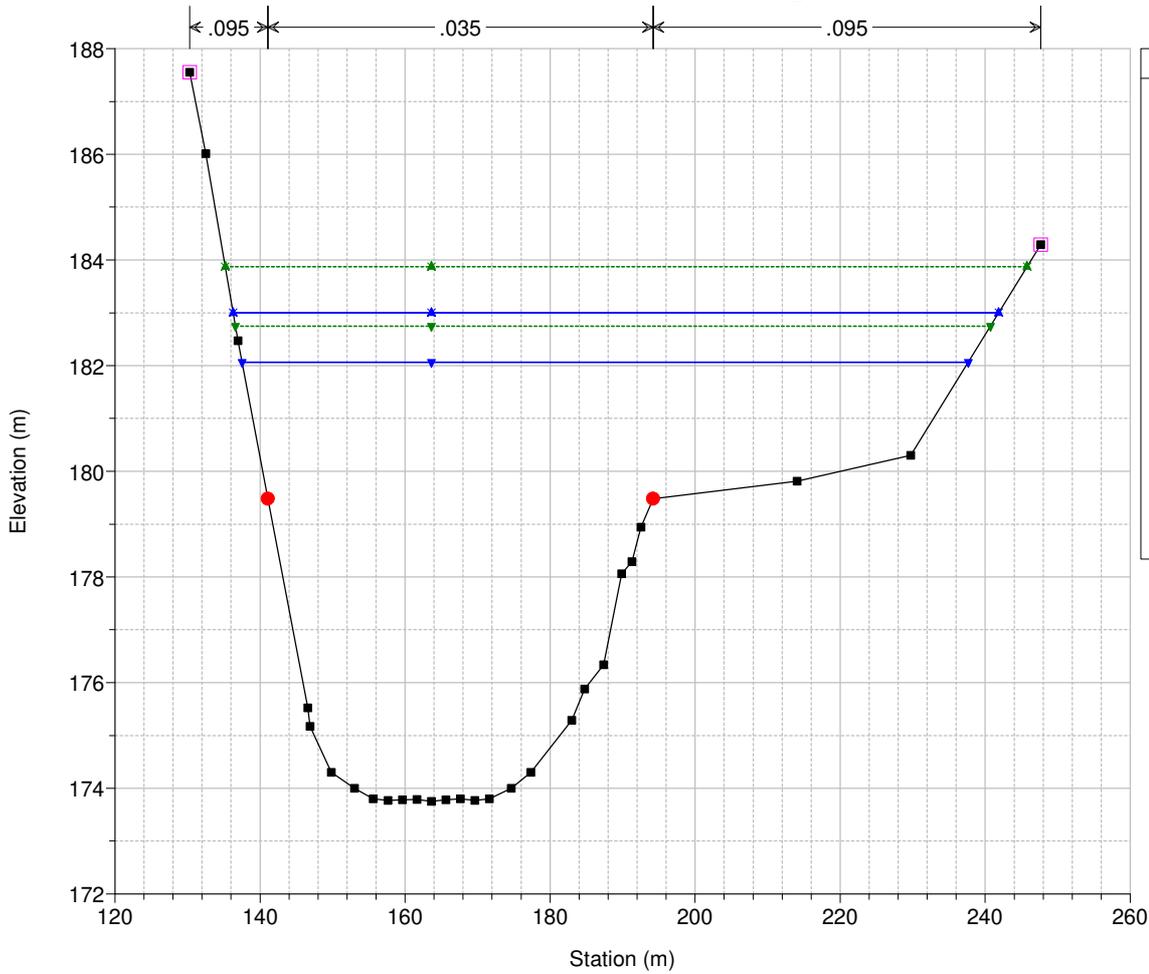
Tevere Plan: 1) TR200 2) TR500 3) TR200_PRO 4) TR500_PRO

River = Tevere Reach = Tevere_B RS = 730.50



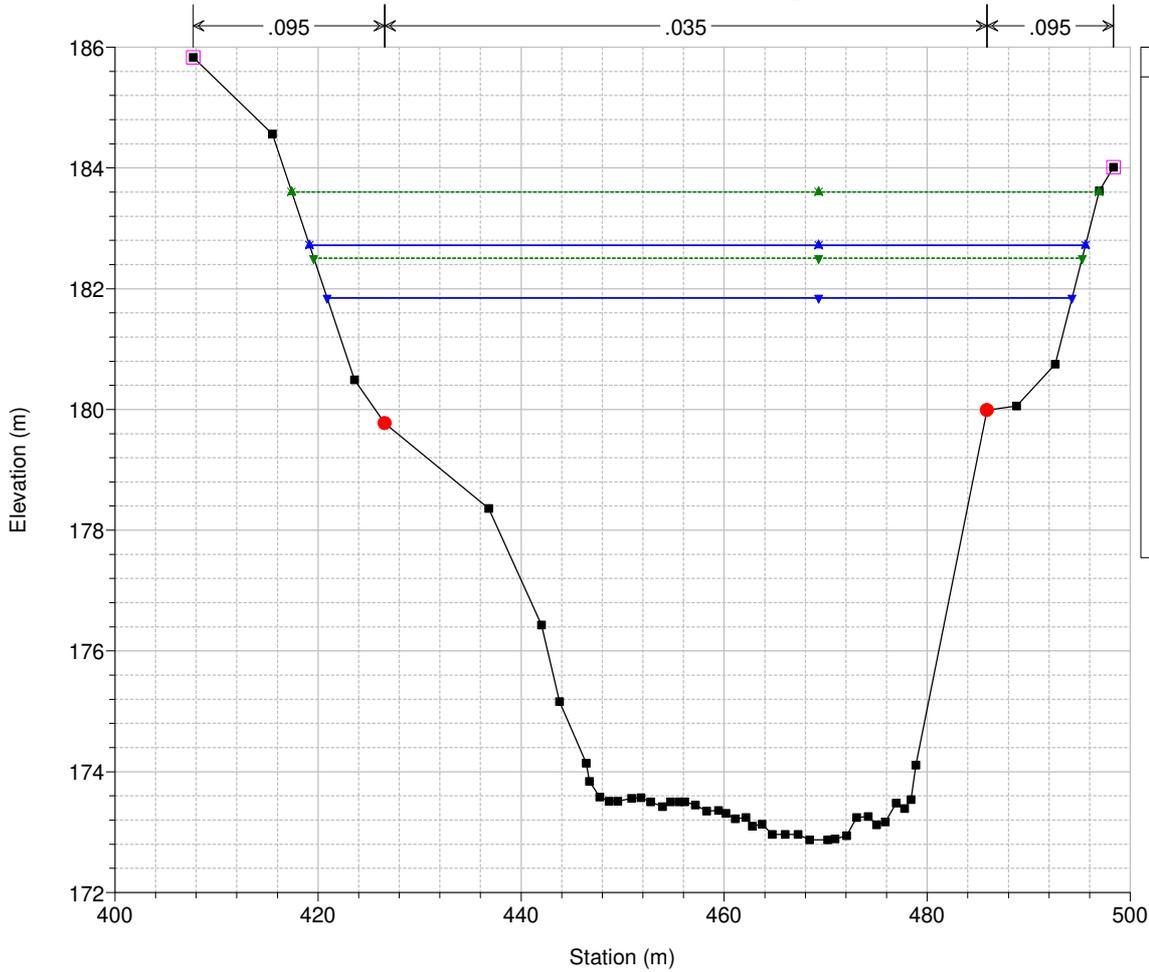
Tevere Plan: 1) TR200 2) TR500 3) TR200_PRO 4) TR500_PRO

River = Tevere Reach = Tevere_B RS = 730



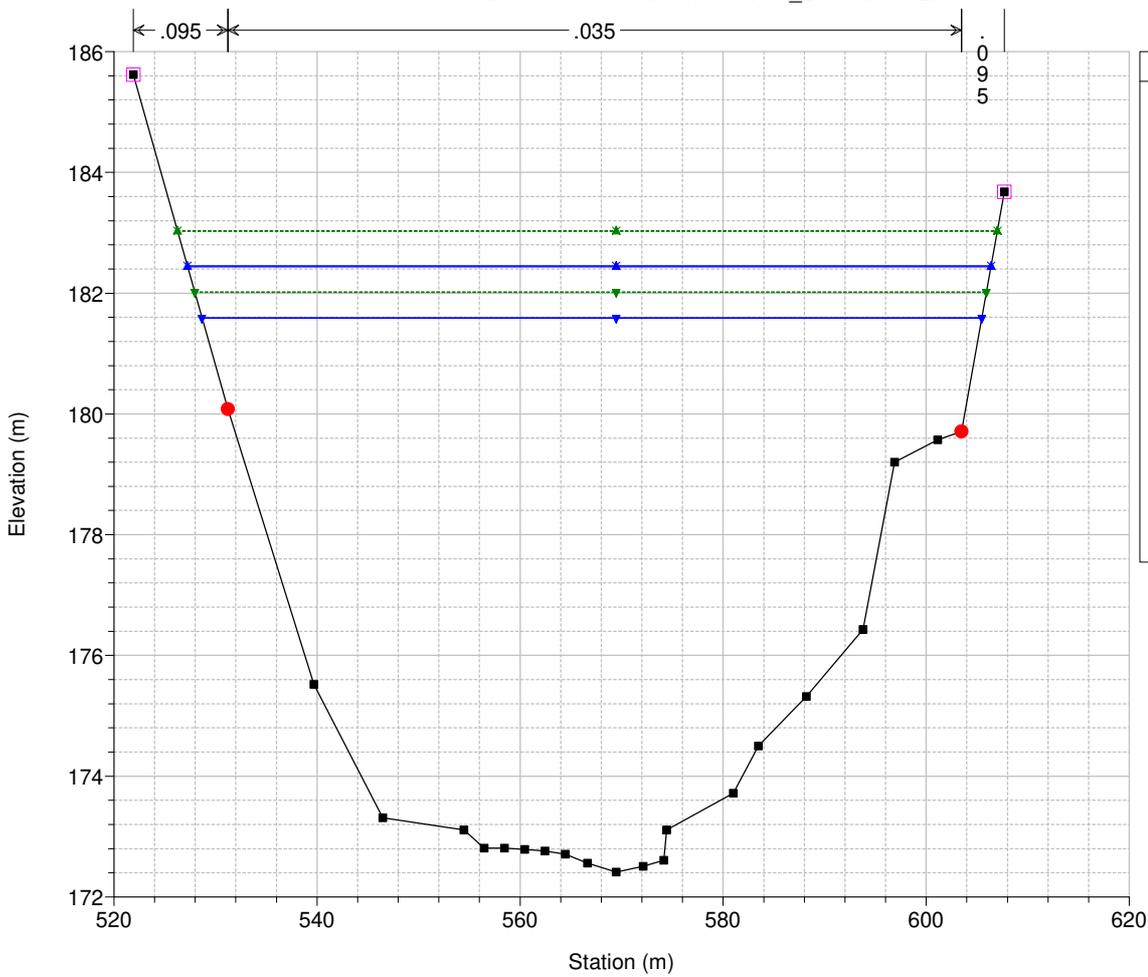
Tevere Plan: 1) TR200 2) TR500 3) TR200_PRO 4) TR500_PRO

River = Tevere Reach = Tevere_B RS = 729



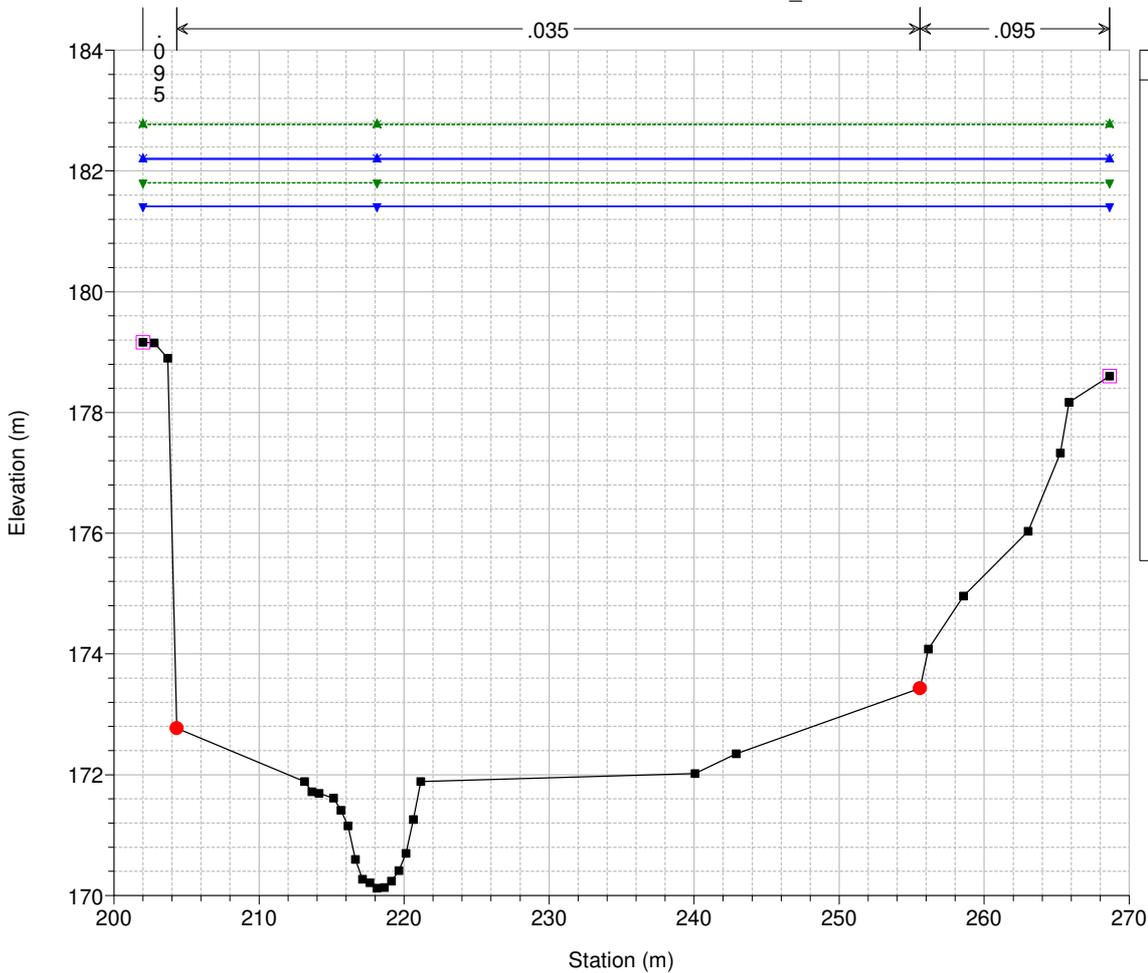
Tevere Plan: 1) TR200 2) TR500 3) TR200_PRO 4) TR500_PRO

River = Tevere Reach = Tevere_B RS = 728

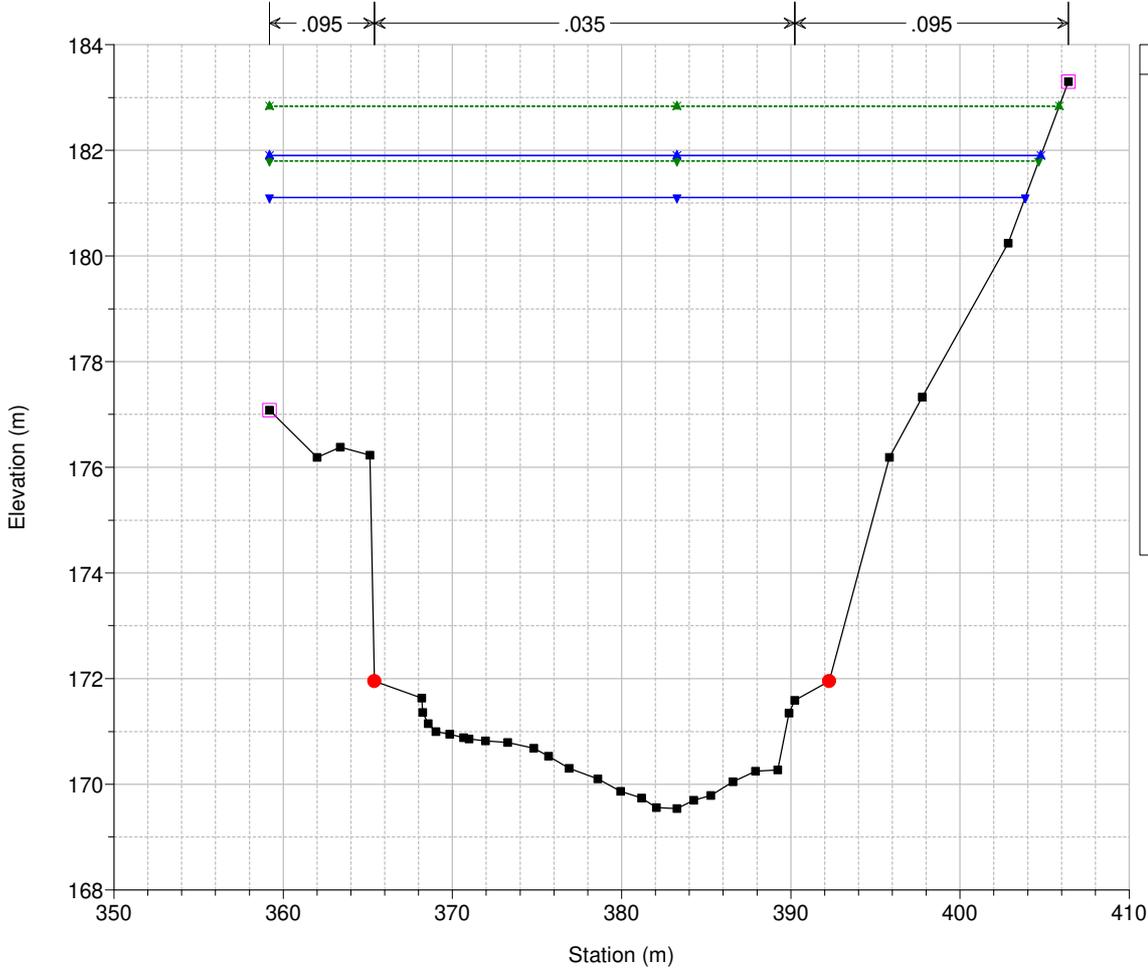


Tevere Plan: 1) TR200 2) TR500 3) TR200_PRO 4) TR500_PRO

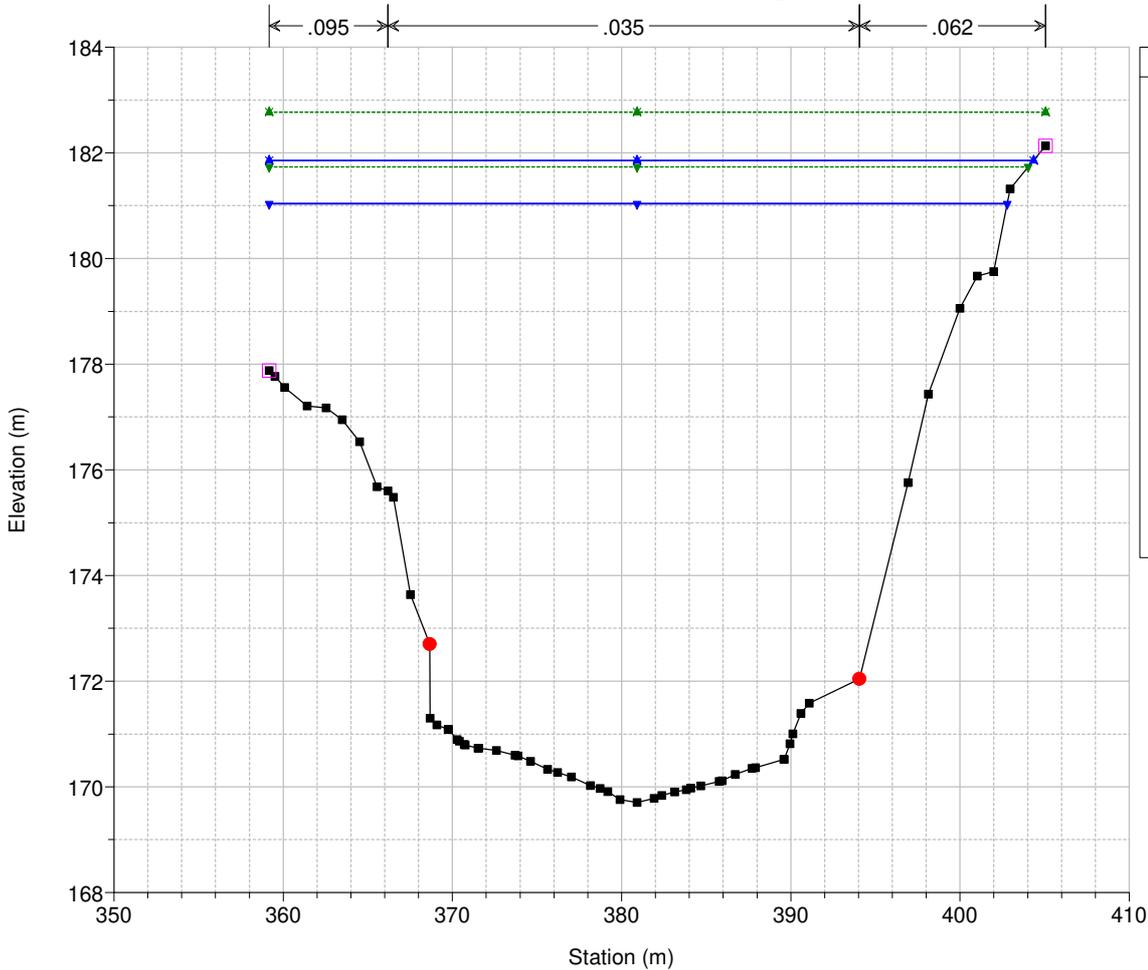
River = Tevere Reach = Tevere_B RS = 727

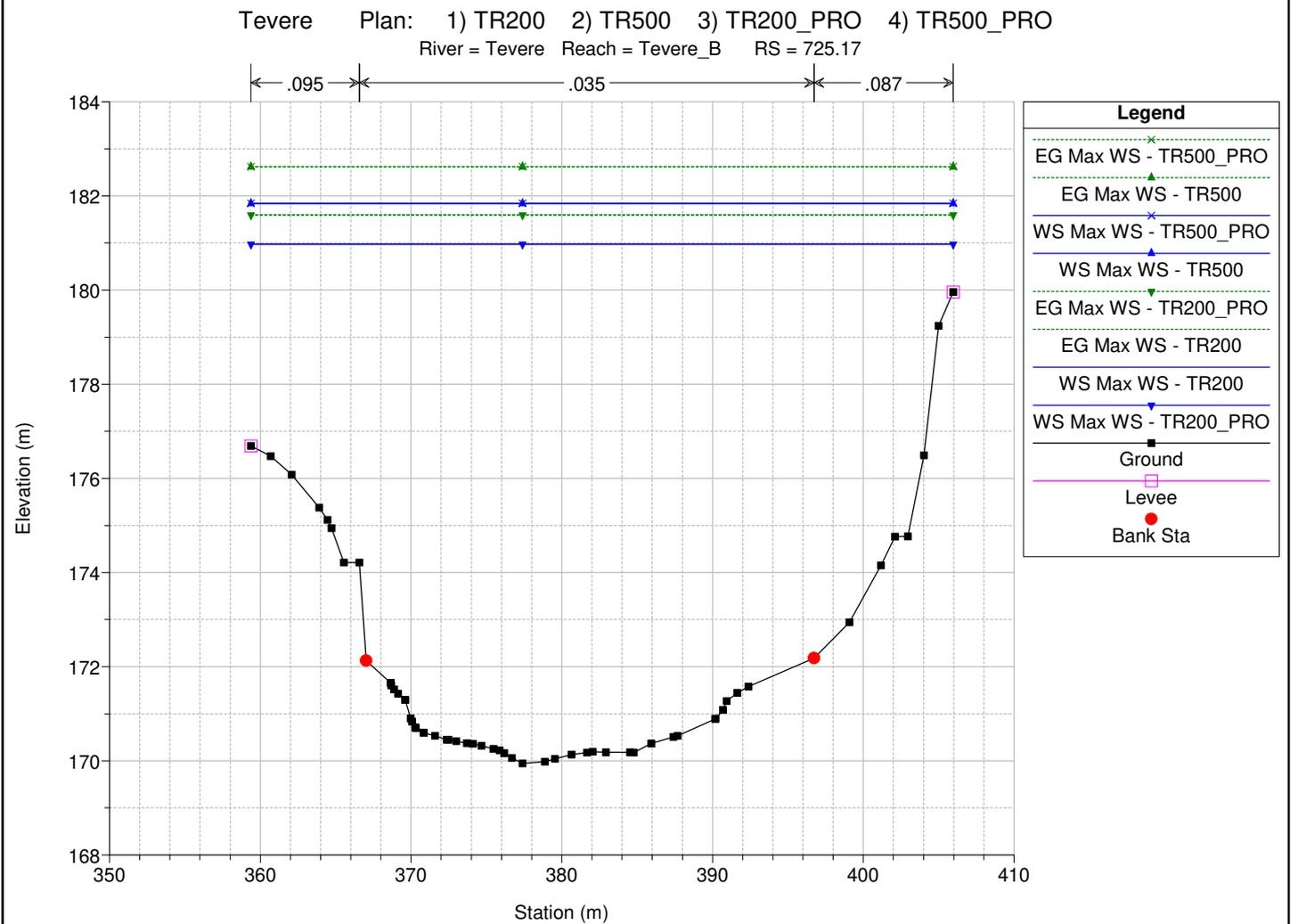
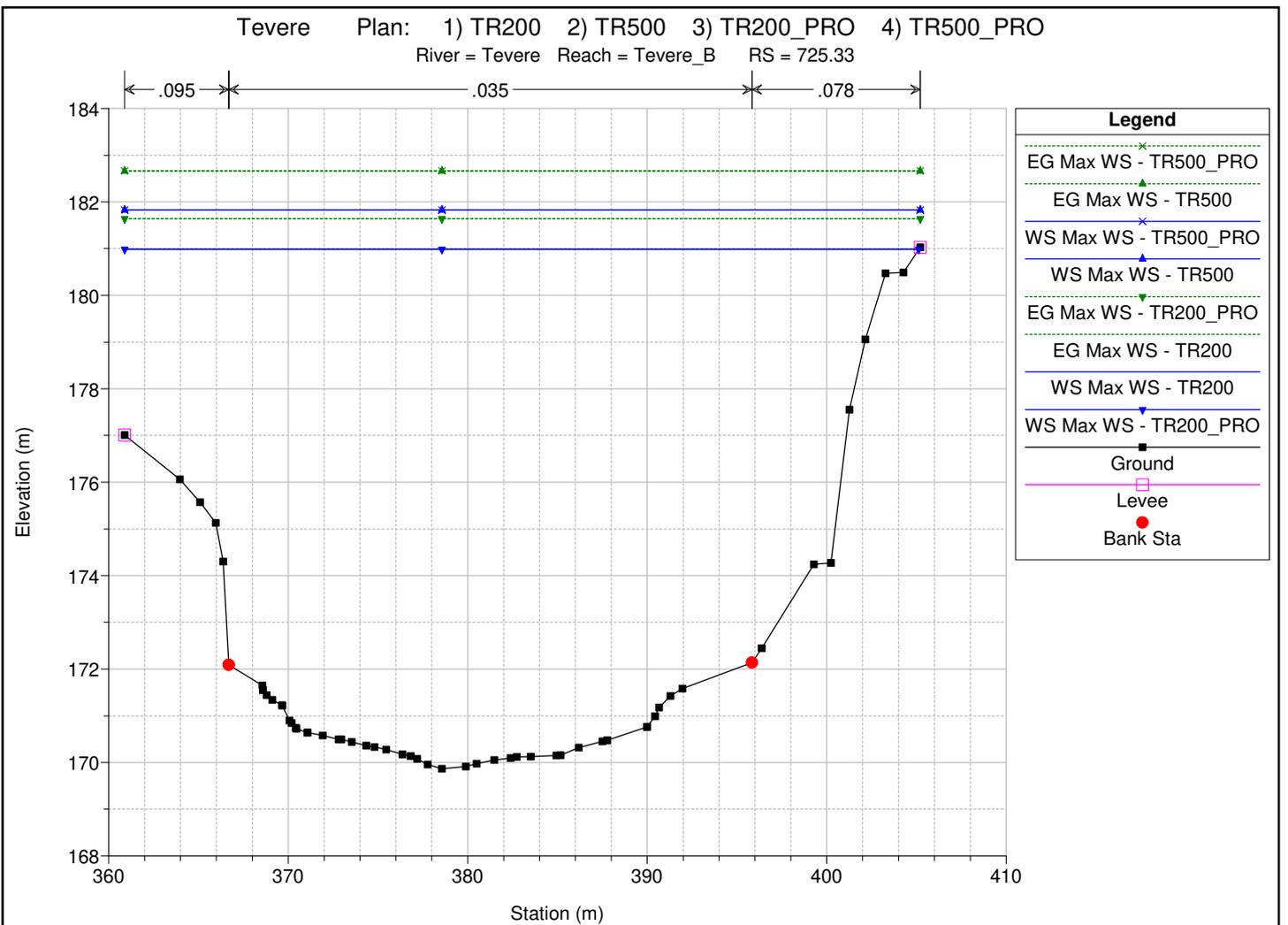


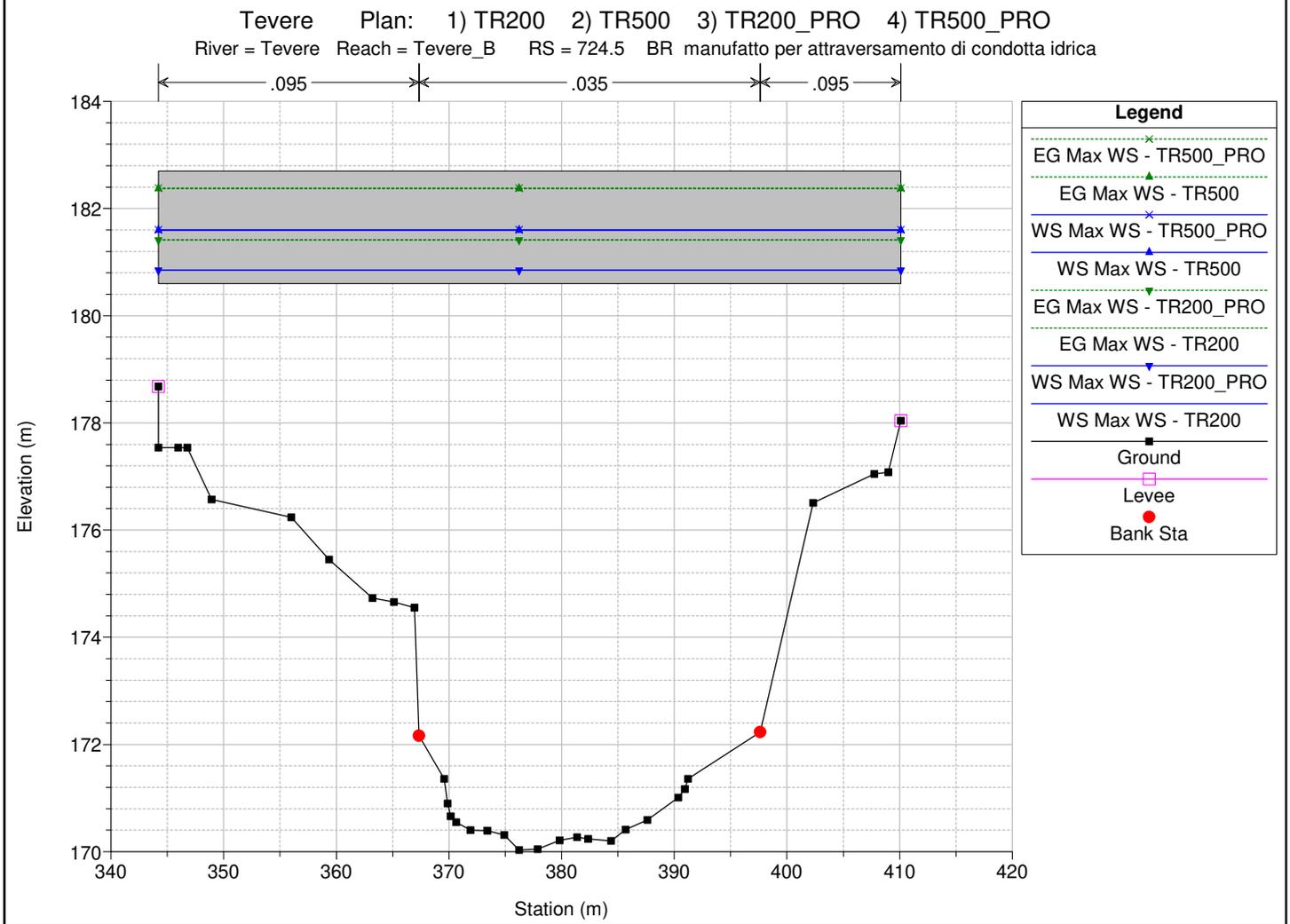
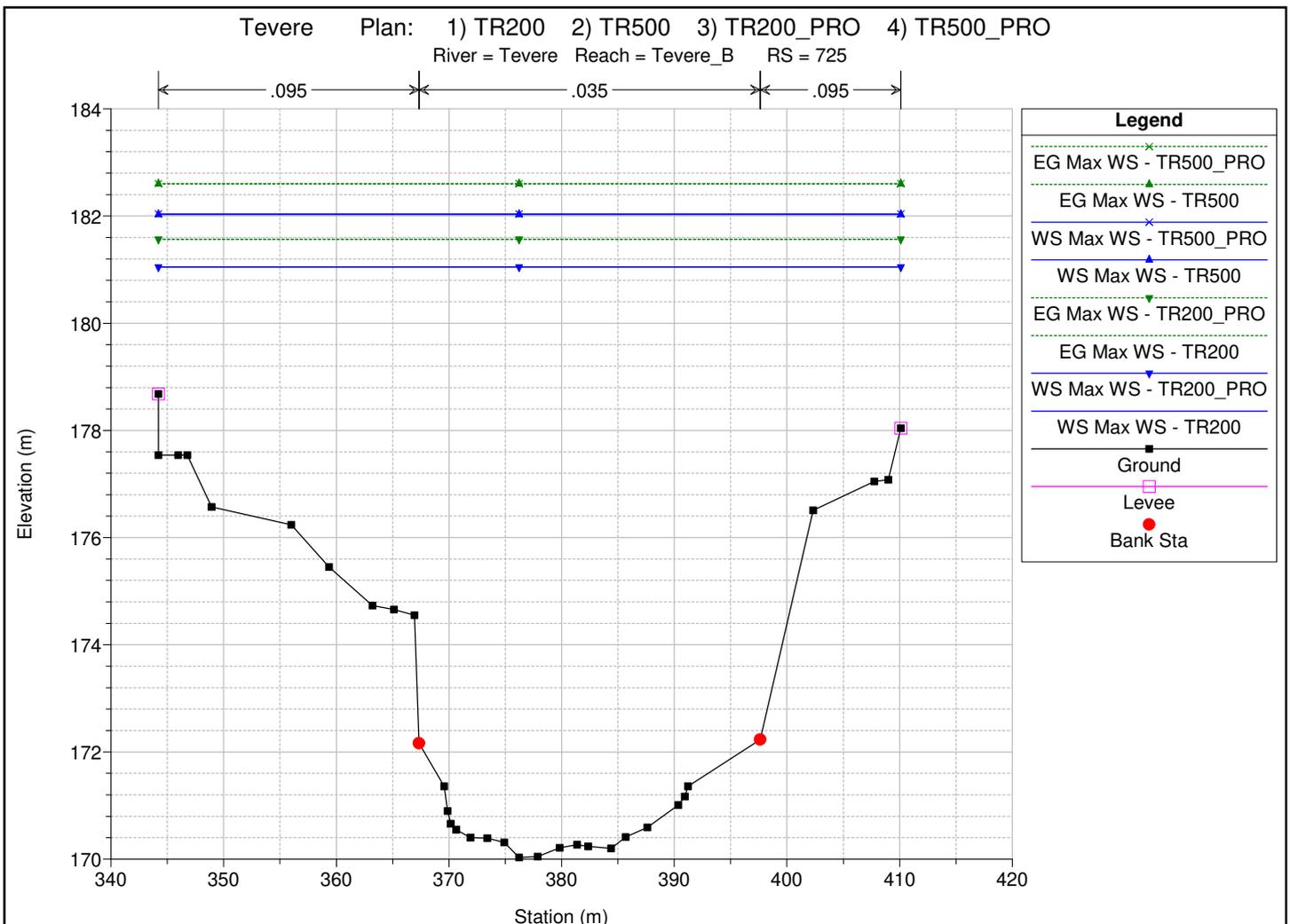
Tevere Plan: 1) TR200 2) TR500 3) TR200_PRO 4) TR500_PRO
 River = Tevere Reach = Tevere_B RS = 726



Tevere Plan: 1) TR200 2) TR500 3) TR200_PRO 4) TR500_PRO
 River = Tevere Reach = Tevere_B RS = 725.67

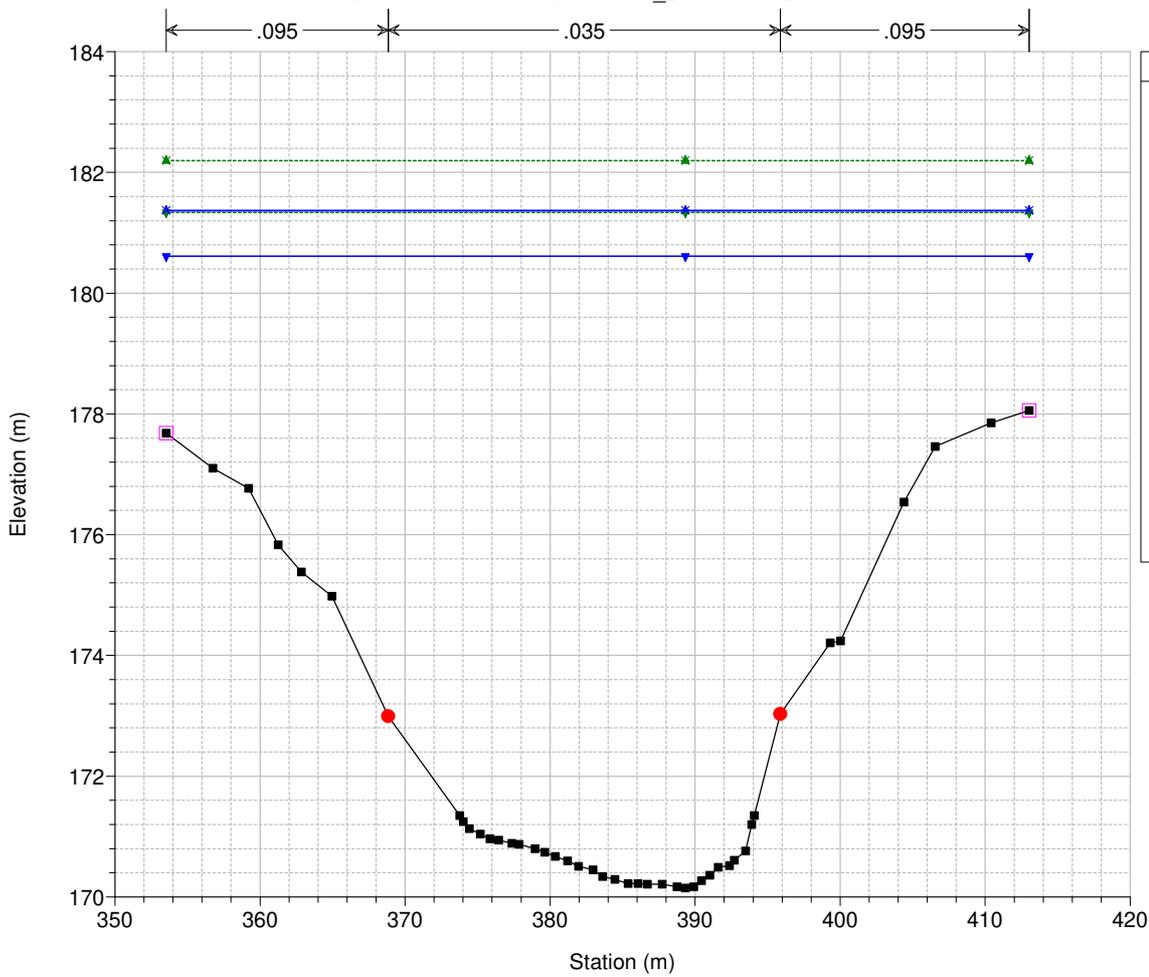






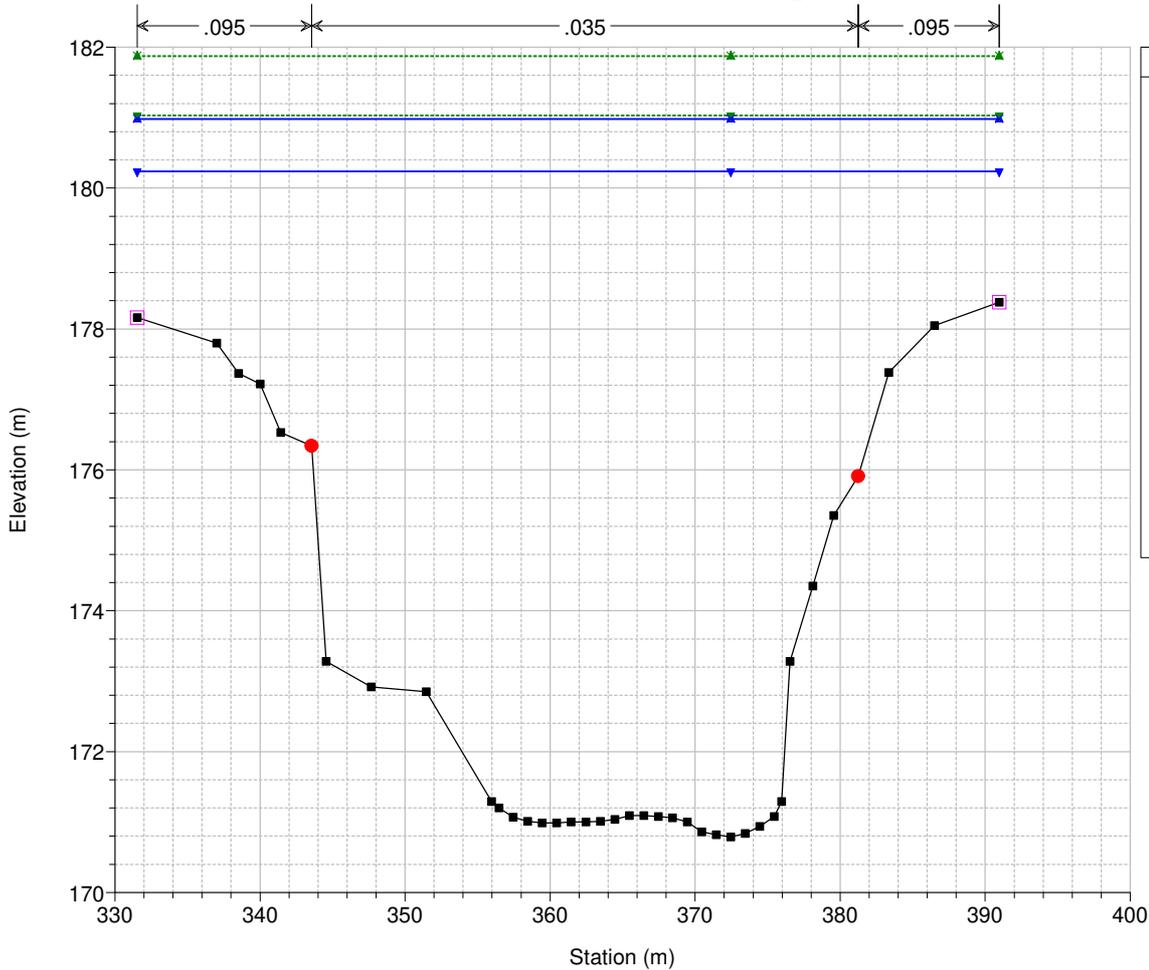
Tevere Plan: 1) TR200 2) TR500 3) TR200_PRO 4) TR500_PRO

River = Tevere Reach = Tevere_B RS = 724 traslata a destra di 111.67 m



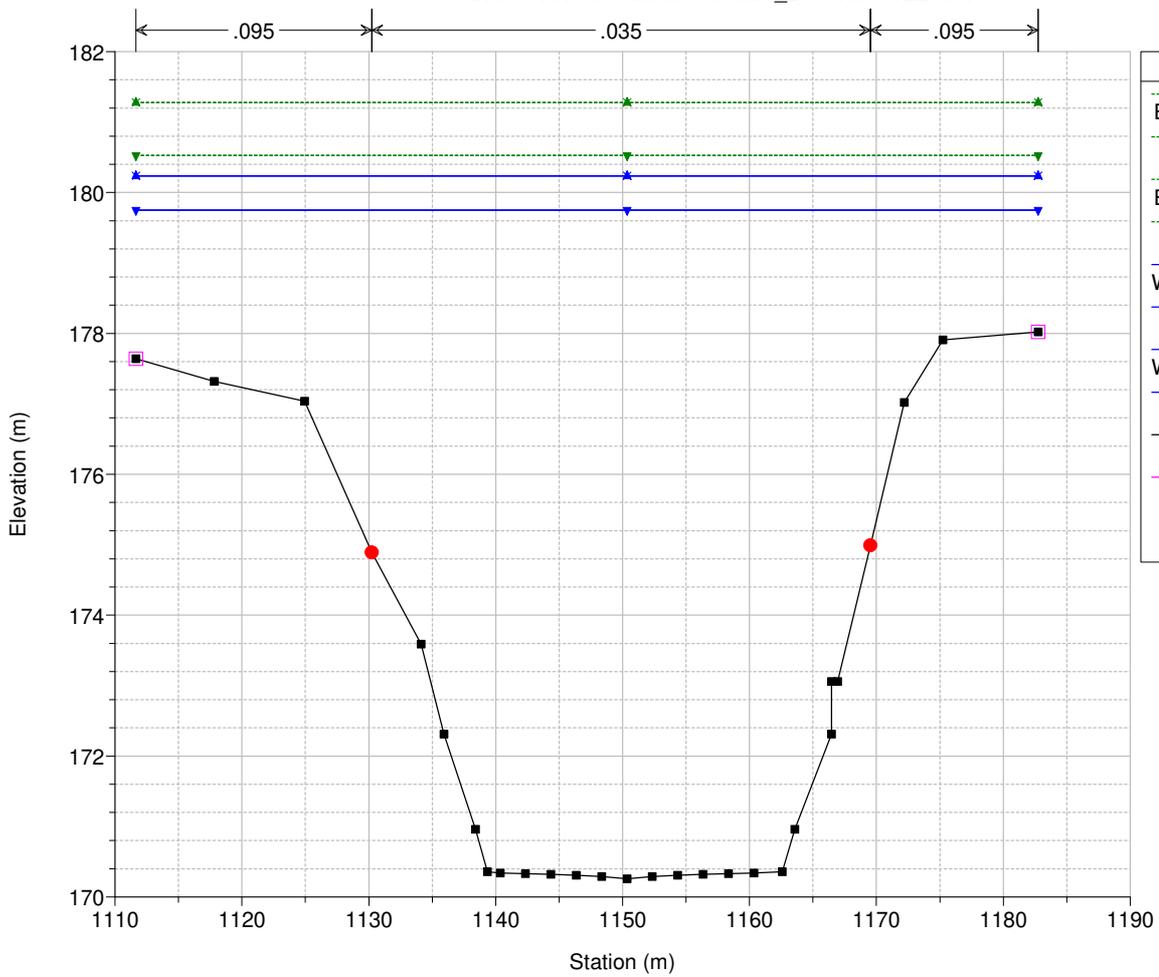
Tevere Plan: 1) TR200 2) TR500 3) TR200_PRO 4) TR500_PRO

River = Tevere Reach = Tevere_B RS = 723



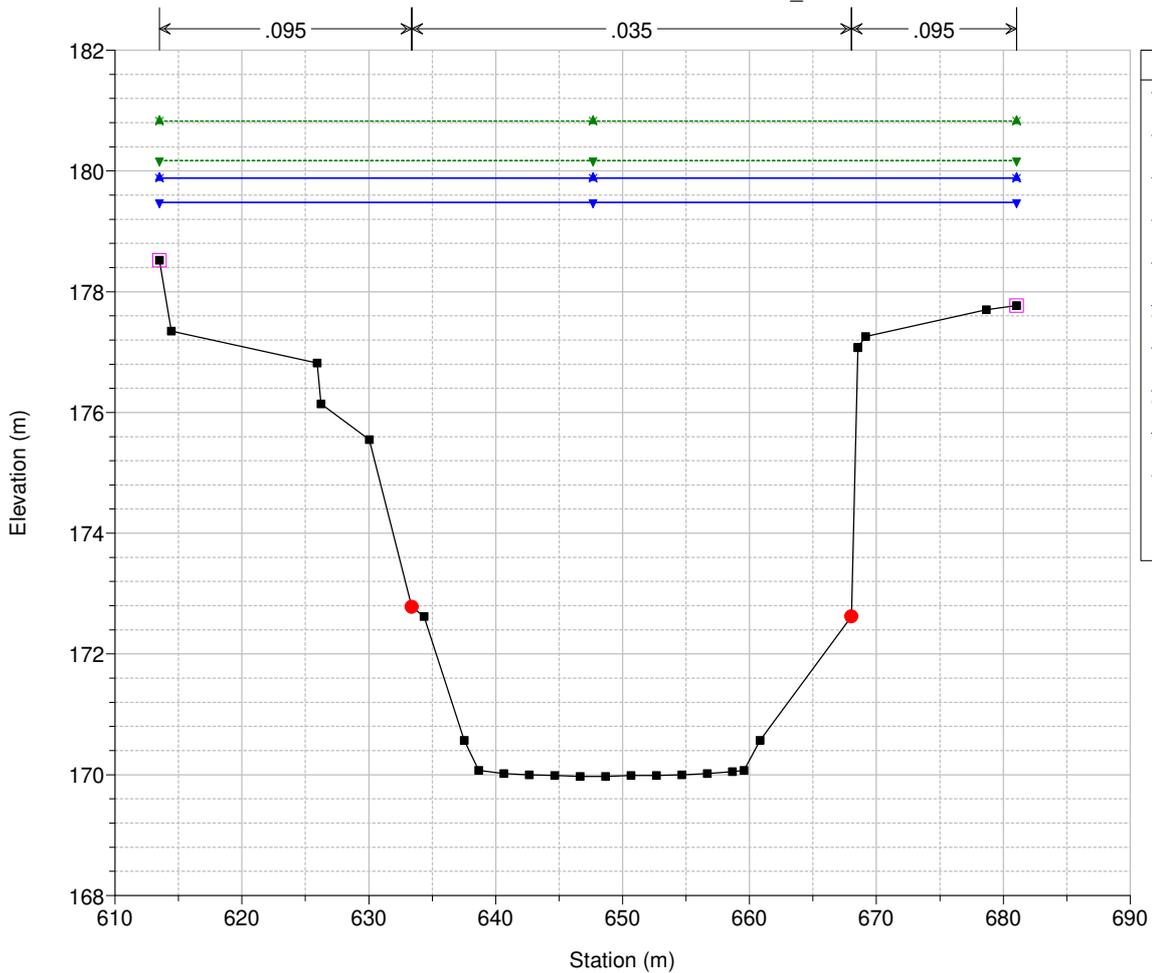
Tevere Plan: 1) TR200 2) TR500 3) TR200_PRO 4) TR500_PRO

River = Tevere Reach = Tevere_B RS = 722 OK



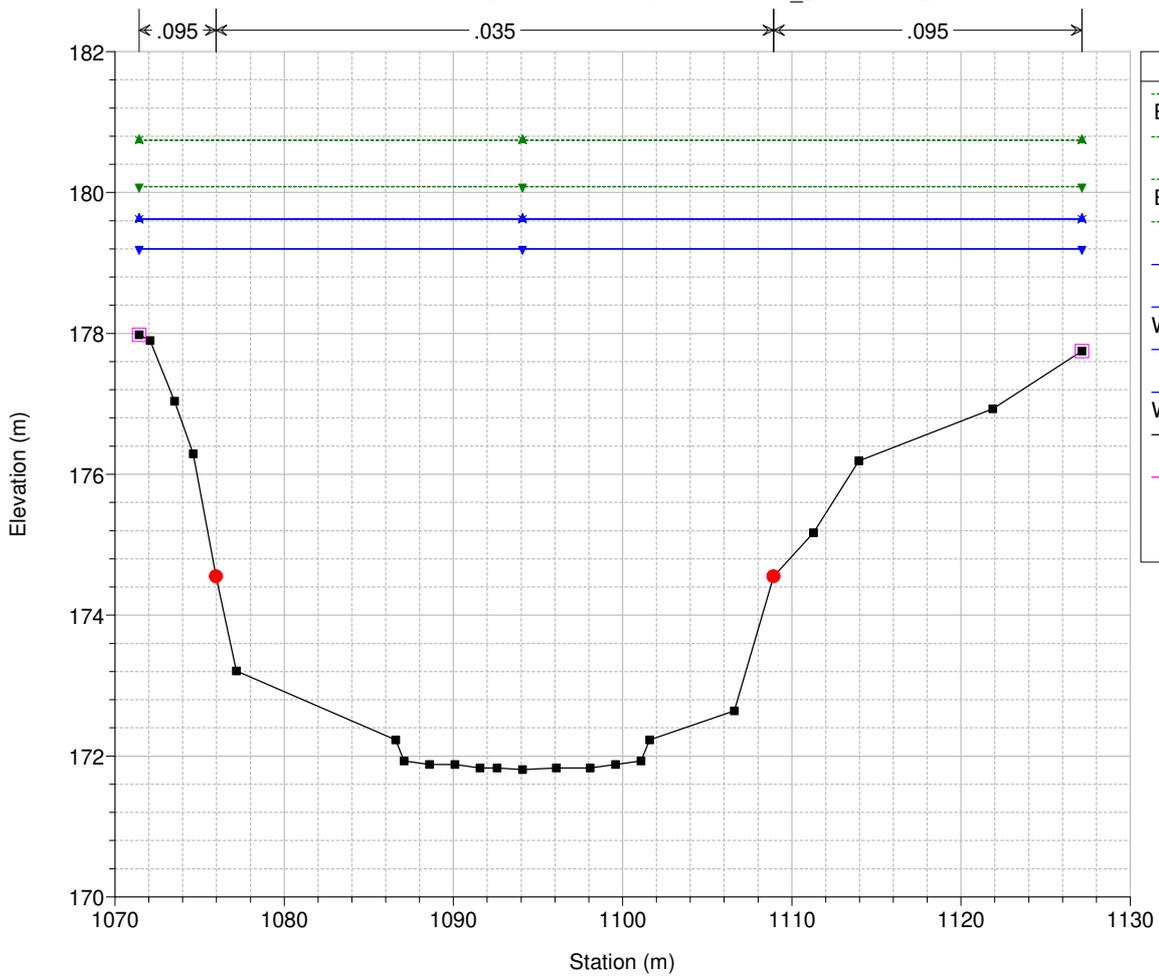
Tevere Plan: 1) TR200 2) TR500 3) TR200_PRO 4) TR500_PRO

River = Tevere Reach = Tevere_B RS = 721



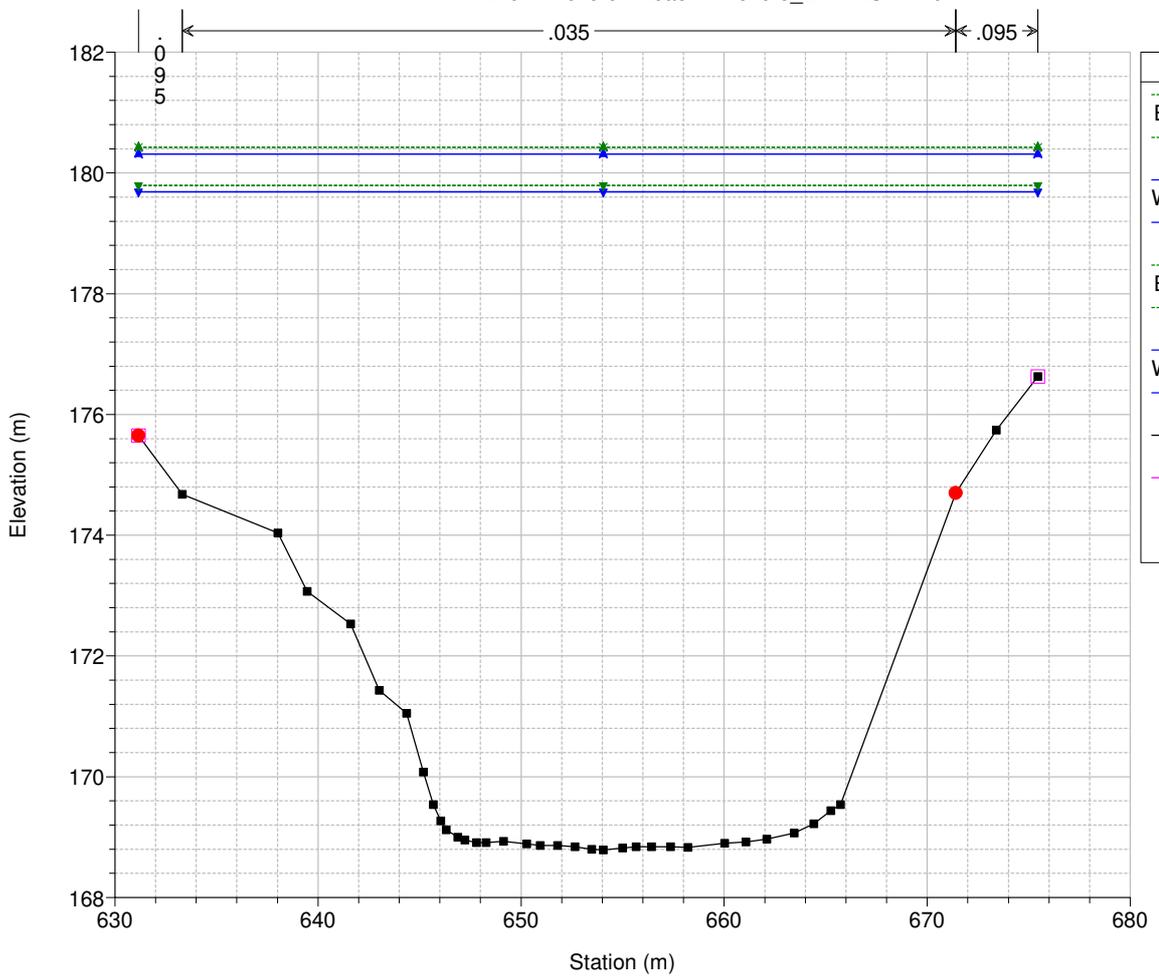
Tevere Plan: 1) TR200 2) TR500 3) TR200_PRO 4) TR500_PRO

River = Tevere Reach = Tevere_B RS = 720



Tevere Plan: 1) TR200 2) TR500 3) TR200_PRO 4) TR500_PRO

River = Tevere Reach = Tevere_B RS = 719



HEC-RAS River: Tevere Reach: Tevere_B Profile: Max WS (Continued)

Reach	River Sta	Profile	Plan	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
Tevere_B	723	Max WS	TR200	1267.67	170.79	180.24	176.99	181.03	0.001403	4.00	365.40	59.44	0.45
Tevere_B	723	Max WS	TR500	1485.52	170.79	180.98	177.54	181.87	0.001420	4.26	409.35	59.44	0.46
Tevere_B	723	Max WS	TR200_PRO	1268.09	170.79	180.24	176.99	181.03	0.001403	4.00	365.49	59.44	0.45
Tevere_B	723	Max WS	TR500_PRO	1485.82	170.79	180.99	177.55	181.88	0.001416	4.26	409.88	59.44	0.46
Tevere_B	722.99			Lat Struct									
Tevere_B	722.98			Lat Struct									
Tevere_B	722	Max WS	TR200	1374.75	170.26	179.75	176.33	180.53	0.001245	3.98	414.56	71.09	0.44
Tevere_B	722	Max WS	TR500	1699.18	170.26	180.23	177.04	181.27	0.001557	4.62	448.99	71.09	0.49
Tevere_B	722	Max WS	TR200_PRO	1375.56	170.26	179.75	176.33	180.53	0.001245	3.98	414.73	71.09	0.44
Tevere_B	722	Max WS	TR500_PRO	1702.48	170.26	180.24	177.04	181.28	0.001560	4.63	449.32	71.09	0.49
Tevere_B	721.99			Lat Struct									
Tevere_B	721.98			Lat Struct									
Tevere_B	721	Max WS	TR200	1210.78	169.97	179.48	175.55	180.17	0.000979	3.76	396.87	67.53	0.40
Tevere_B	721	Max WS	TR500	1487.06	169.97	179.89	176.36	180.82	0.001257	4.39	424.39	67.53	0.46
Tevere_B	721	Max WS	TR200_PRO	1212.70	169.97	179.48	175.55	180.17	0.000983	3.77	396.78	67.53	0.40
Tevere_B	721	Max WS	TR500_PRO	1493.93	169.97	179.88	176.38	180.83	0.001271	4.41	423.95	67.53	0.46
Tevere_B	720.99			Lat Struct									
Tevere_B	720.98			Lat Struct									
Tevere_B	720	Max WS	TR200	1004.50	171.81	179.20	177.04	180.08	0.001832	4.26	285.84	55.72	0.52
Tevere_B	720	Max WS	TR500	1210.31	171.81	179.63	177.65	180.74	0.002144	4.80	309.63	55.72	0.57
Tevere_B	720	Max WS	TR200_PRO	1005.62	171.81	179.20	177.04	180.08	0.001837	4.27	285.80	55.72	0.52
Tevere_B	720	Max WS	TR500_PRO	1213.47	171.81	179.62	177.66	180.74	0.002159	4.82	309.41	55.72	0.57
Tevere_B	719.99			Lat Struct									
Tevere_B	719.98			Lat Struct									
Tevere_B	719	Max WS	TR200	512.55	168.79	179.69	172.88	179.79	0.000300	1.44	367.43	44.29	0.16
Tevere_B	719	Max WS	TR500	561.24	168.79	180.31	173.11	180.42	0.000300	1.47	395.26	44.29	0.15
Tevere_B	719	Max WS	TR200_PRO	512.61	168.79	179.69	172.88	179.79	0.000300	1.44	367.46	44.29	0.16
Tevere_B	719	Max WS	TR500_PRO	561.35	168.79	180.32	173.12	180.43	0.000300	1.47	395.31	44.29	0.15

Reach	River Sta	Profile	Plan	Q US (m3/s)	Q Leaving Total (m3/s)	Q DS (m3/s)	Q Weir (m3/s)	Q Gates (m3/s)	Wr Top Wdth (m)	Weir Max Depth (m)	Weir Avg Depth (m)	Min El Weir Flow (m)	E.G. US. (m)	W.S. US. (m)	E.G. DS (m)	W.S. DS (m)
Tevere_B	730.99	Max WS	TR200	1430.00	0.00	1427.86	0.00					184.16	182.87	182.28	182.74	182.06
Tevere_B	730.99	Max WS	TR500	1889.00	0.00	1885.92	0.00					184.16	184.00	182.28	183.87	183.00
Tevere_B	730.99	Max WS	TR200_PRO	1430.00	0.00	1428.84	0.00					184.16	182.88	182.29	182.75	182.07
Tevere_B	730.99	Max WS	TR500_PRO	1889.00	0.00	1887.04	0.00					184.16	184.00	183.29	183.88	183.00
Tevere_B	730.98	Max WS	TR200	1430.00	0.00	1427.86	0.00					187.55	182.87	182.28	182.74	182.06
Tevere_B	730.98	Max WS	TR500	1889.00	0.00	1885.92	0.00					187.55	184.00	183.28	183.87	183.00
Tevere_B	730.98	Max WS	TR200_PRO	1430.00	0.00	1428.84	0.00					187.55	182.88	182.29	182.75	182.07
Tevere_B	730.98	Max WS	TR500_PRO	1889.00	0.00	1887.04	0.00					187.55	184.00	183.29	183.88	183.00
Tevere_B	729.99	Max WS	TR200	1427.86	0.00	1425.79	0.00					183.88	182.74	182.06	182.50	181.84
Tevere_B	729.99	Max WS	TR500	1885.92	0.00	1881.23	0.00					183.88	183.87	183.00	183.60	182.72
Tevere_B	729.99	Max WS	TR200_PRO	1428.84	0.00	1425.83	0.00					183.88	182.75	182.07	182.51	181.85
Tevere_B	729.99	Max WS	TR500_PRO	1887.04	0.00	1883.34	0.00					183.88	183.88	183.00	183.61	182.72
Tevere_B	729.98	Max WS	TR200	1427.86	0.00	1425.79	0.00					185.83	182.74	182.06	182.50	181.84
Tevere_B	729.98	Max WS	TR500	1885.92	0.00	1881.23	0.00					185.83	183.87	183.00	183.60	182.72
Tevere_B	729.98	Max WS	TR200_PRO	1428.84	0.00	1425.83	0.00					185.83	182.75	182.07	182.51	181.85
Tevere_B	729.98	Max WS	TR500_PRO	1887.04	0.00	1883.34	0.00					185.83	183.88	183.00	183.61	182.72
Tevere_B	728.99	Max WS	TR200	1425.79	0.00	1412.95	0.00					183.68	182.50	181.84	182.01	181.58
Tevere_B	728.99	Max WS	TR500	1881.23	0.00	1859.96	0.00					183.68	183.60	182.72	183.02	182.44
Tevere_B	728.99	Max WS	TR200_PRO	1425.83	0.00	1412.42	0.00					183.68	182.51	181.85	182.02	181.59
Tevere_B	728.99	Max WS	TR500_PRO	1883.34	0.00	1863.78	0.00					183.68	183.61	182.72	183.03	182.45
Tevere_B	728.98	Max WS	TR200	1425.79	-44.32	1412.95	-44.32	81.17	2.06	1.56	179.78	182.50	181.84	182.01	181.58	
Tevere_B	728.98	Max WS	TR500	1881.23	-81.44	1859.96	-81.44	87.05	2.95	2.30	179.78	183.60	182.72	183.02	182.44	
Tevere_B	728.98	Max WS	TR200_PRO	1425.83	-42.63	1412.42	-42.63	80.97	2.02	1.55	179.78	182.51	181.85	182.02	181.59	
Tevere_B	728.98	Max WS	TR500_PRO	1883.34	-96.29	1863.78	-96.29	88.06	3.15	2.44	179.78	183.61	182.72	183.03	182.45	
Tevere_B	727.99	Max WS	TR200	1412.95	-319.83	1382.23	-319.83	313.88	8.37	2.87	173.04	182.01	181.58	181.80	181.41	
Tevere_B	727.99	Max WS	TR500	1859.96	-343.35	1825.20	-343.35	320.28	9.16	3.64	173.04	183.02	182.44	182.77	182.19	
Tevere_B	727.99	Max WS	TR200_PRO	1412.42	-294.59	1382.94	-294.59	313.88	8.37	2.87	173.04	182.02	181.59	181.80	181.41	
Tevere_B	727.99	Max WS	TR500_PRO	1863.78	-438.40	1806.18	-438.40	320.11	9.17	3.63	173.04	183.03	182.45	182.77	182.21	
Tevere_B	727.98	Max WS	TR200	1412.95	6.95	1382.23	6.95	129.89	2.25	2.00	179.16	182.01	181.58	181.80	181.41	
Tevere_B	727.98	Max WS	TR500	1859.96	31.64	1825.20	31.64	150.04	3.05	2.45	179.16	183.02	182.44	182.77	182.19	
Tevere_B	727.98	Max WS	TR200_PRO	1412.42	-13.47	1382.94	-13.47	129.90	2.28	2.01	179.16	182.02	181.59	181.80	181.41	
Tevere_B	727.98	Max WS	TR500_PRO	1863.78	43.41	1806.18	43.41	150.04	3.05	2.46	179.16	183.03	182.45	182.77	182.21	
Tevere_B	726.99	Max WS	TR200	1382.23	-11.24	1106.96	-11.24	152.57	2.81	1.58	178.60	181.80	181.41	181.79	181.10	
Tevere_B	726.99	Max WS	TR500	1825.20	17.19	1396.04	17.19	228.30	3.59	1.65	178.60	182.77	182.19	182.83	181.89	
Tevere_B	726.99	Max WS	TR200_PRO	1382.94	-0.59	1109.65	-0.59	152.57	2.81	1.58	178.60	181.80	181.41	181.80	181.10	
Tevere_B	726.99	Max WS	TR500_PRO	1806.18	-21.41	1398.35	-21.41	229.33	3.61	1.66	178.60	182.77	182.21	182.84	181.90	
Tevere_B	726.98	Max WS	TR200	1382.23	297.47	1106.96	297.47	378.79	4.04	3.03	177.08	181.80	181.41	181.79	181.10	
Tevere_B	726.98	Max WS	TR500	1825.20	441.60	1396.04	441.60	378.79	4.84	3.84	177.08	182.77	182.19	182.83	181.90	
Tevere_B	726.98	Max WS	TR200_PRO	1382.94	301.83	1109.65	301.83	378.79	4.04	3.04	177.08	181.80	181.41	181.80	181.10	
Tevere_B	726.98	Max WS	TR500_PRO	1806.18	444.83	1398.35	444.83	378.79	4.85	3.85	177.08	182.77	182.21	182.84	181.90	
Tevere_B	725.99	Max WS	TR200	1106.96	23.42	1159.92	23.42	54.88	2.48	1.20	178.55	181.79	181.10	181.56	181.05	
Tevere_B	725.99	Max WS	TR500	1396.04	52.04	1360.63	52.04	97.12	3.43	1.35	178.55	182.83	181.89	182.60	182.03	
Tevere_B	725.99	Max WS	TR200_PRO	1109.65	23.40	1161.07	23.40	53.86	2.48	1.22	178.55	181.80	181.10	181.57	181.05	
Tevere_B	725.99	Max WS	TR500_PRO	1398.35	52.38	1359.76	52.38	96.95	3.44	1.36	178.55	182.84	181.90	182.61	182.04	
Tevere_B	725.98	Max WS	TR200	1106.96	-71.26	1159.92	-71.26	151.85	4.35	3.61	176.69	181.79	181.10	181.56	181.05	
Tevere_B	725.98	Max WS	TR500	1396.04	-12.50	1360.63	-12.50	151.85	5.18	4.44	176.69	182.83	181.89	182.60	182.03	
Tevere_B	725.98	Max WS	TR200_PRO	1109.65	-69.17	1161.07	-69.17	151.85	4.35	3.58	176.69	181.80	181.10	181.57	181.05	
Tevere_B	725.98	Max WS	TR500_PRO	1398.35	-7.80	1359.76	-7.80	151.85	5.18	4.42	176.69	182.84	181.90	182.61	182.04	
Tevere_B	723.99	Max WS	TR200	1159.29	30.27	1267.67	30.27	160.81	2.58	2.30	178.06	181.33	180.61	181.03	180.24	
Tevere_B	723.99	Max WS	TR500	1360.30	67.33	1485.52	67.33	160.81	3.35	3.06	178.06	182.19	181.36	181.87	180.98	
Tevere_B	723.99	Max WS	TR200_PRO	1160.47	31.20	1268.09	31.20	160.81	2.58	2.30	178.06	181.34	180.61	181.03	180.24	
Tevere_B	723.99	Max WS	TR500_PRO	1358.10	60.28	1485.82	60.28	160.81	3.36	3.07	178.06	182.20	181.37	181.88	180.99	
Tevere_B	723.98	Max WS	TR200	1159.29	-138.02	1267.67	-138.02	203.24	3.26	2.52	177.68	181.33	180.61	181.03	180.24	
Tevere_B	723.98	Max WS	TR500	1360.30	-189.06	1485.52	-189.06	203.24	4.03	3.28	177.68	182.19	181.36	181.87	180.98	
Tevere_B	723.98	Max WS	TR200_PRO	1160.47	-136.38	1268.09	-136.38	203.24	3.25	2.51	177.68	181.34	180.61	181.03	180.24	
Tevere_B	723.98	Max WS	TR500_PRO	1358.10	-187.66	1485.82	-187.66	203.24	4.03	3.29	177.68	182.20	181.37	181.88	180.99	
Tevere_B	722.99	Max WS	TR200	1267.67	-47.32	1374.75	-47.32	301.87	3.26	1.94	176.62	181.03	180.24	180.53	179.75	
Tevere_B	722.99	Max WS	TR500	1485.52	-75.22	1699.18	-75.22	301.87	3.86	2.58	176.62	181.87	180.98	181.27	180.23	
Tevere_B	722.99	Max WS	TR200_PRO	1268.09	-48.62	1375.56	-48.62	301.87	3.26	1.94	176.62	181.03	180.24	180.53	179.75	
Tevere_B	722.99	Max WS	TR500_PRO	1485.82	-75.30	1702.48	-75.30	301.87	3.86	2.58	176.62	181.88	180.99	181.28	180.24	
Tevere_B	722.98	Max WS	TR200	1267.67	-52.23	1374.75	-52.23	301.22	5.45	2.12	174.41	181.03	180.24	180.53	179.75	
Tevere_B	722.98	Max WS	TR500	1485.52	-130.19	1699.18	-130.19	301.22	6.04	2.76	174.41	181.87	180.98	181.27	180.23	
Tevere_B	722.98	Max WS	TR200_PRO	1268.09	-62.60	1375.56	-62.60	301.22	5.45	2.12	174.41	181.03	180.24	180.53	179.75	
Tevere_B	722.98	Max WS	TR500_PRO	1485.82	-133.13	1702.48	-133.13	301.22	6.04	2.77	174.41	181.88	180.99	181.28	180.24	
Tevere_B	721.99	Max WS	TR200	1374.75	68.61	1210.78	68.61	446.63	1.75	1.71	177.77	180.53	179.75	180.17	179.48	
Tevere_B	721.99	Max WS	TR500	1699.18	92.37	1487.06	92.37	446.63	2.21	2.15	177.77	181.27	180.23	180.82	179.89	
Tevere_B	721.99	Max WS	TR200_PRO	1375.56	65.71	1212.70	65.71	446.63	1.75	1.71	177.77	180.53	179.75	180.17	179.48	
Tevere_B	721.99	Max WS	TR500_PRO	1702.48	89.84	1493.93	89.84	446.63	2.21	2.15	177.77	181.28	180.24	180.83	179.88	
Tevere_B	721.98	Max WS	TR200	1374.75	93.89	1210.78	93.89	453.26	2.10	1.56	177.65	180.53	179.75	180.17	179.48	
Tevere_B	721.98	Max WS	TR500	1699.18	117.01	1487.06	117.01	453.26	2.58	2.00	177.65	181.27	180.23	180.82	179.89	
Tevere_B	721.98	Max WS	TR200_PRO	1375.56	94.25	1212.70	94.25	453.26	2.10	1.56	177.65	180.53	179.75	180.17	179.48	
Tevere_B	721.98	Max WS	TR500_PRO	1702.48	123.07	1493.93	123.07	453.26	2.59	2.00	177.65	181.28	180.24	180.83	179.88	
Tevere_B	720.99	Max WS	TR200	1210.78	90.13	1004.50	90.13	283.39	1.72	1.65	177.75	180.17	179.48	180.08	179.20	
Tevere_B	720.99	Max WS	TR500	1487.06	103.99	1210.31	103.99	283.39	2.13	2.08	177.75					