Firmato digitalmente da:
DE FERRARI ROLLERI ARIANNA
Firmato il 17/12/2024 16:53
Seriale Certificato: 2250457
Valido dal 03/03/2023 al 03/03/2026
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

Comune di Savona – Provincia di Savona

Intervento di messa in sicurezza e riempimento della valletta del rio Erxo

Studio idraulico

art. 8, comma 2, lett. b) delle Normativa di Piano del Piano di Bacino del Torrente Letimbro,
art. 7, comma 2, lett. a) del R.R. 14 luglio 2011, n. 3 e D.G.R. n. 213 del 21 febbraio 2014

Progettazione

progettazione generale
TecGeo – Ingegneria e Geotecnica
geol. Massimo BOCHIOLO
ing. Enrico MASSA
via Nazario Sauro 4/5A – 17100 Savona
mob. +39 349 65 93 775
e-mail info@tecgeo.net
PEC massimo.bochiolo@pec.epap.it

collaboratori
dr. for. Andrea SAMBADO
via Nazario Sauro 4/5A – 17100 Savona

studi geotecnici
geol. Massimo BOCHIOLO
ing. Enrico MASSA

studi idraulici
geol. Massimo BOCHIOLO
ing. Enrico MASSA

Firmato digitalmente da Massimo Bochiolo
Data: 2024.06.26 01:54:50 +02'00'

Firmato digitalmente da Massa Enrico
Data: 2024.06.26 01:53:55 +02'00'

Committente

VALECO S.r.l.
località Sansobbia, 59/2 – 17044 Stella (SV)
C.F. e P.IVA 01487460097
e-mail comet@vislink.it
PEC valeco-srl@prontopec.com

amministratore unico
sig. Massimo SCOCCA
via Pero, 122/1 – 17019 Varazze (SV)
C.F. SCC MSM 73E20 I480J

codice elaborato								***scala***
commessa	*lotto*	*sogg.*	*fase*	*categoria*	*tipo*	*numero*	*rev.*	
2309	01	S	PE	IDR	TX	02	00	–

rev.	***descrizione***	***data***	***redatto***	***verificato***	***approvato***
4					
3					
2					
1					
0	*emesso ex novo per incarico*	*aprile 2024*	*E.M. – M.B.*	*E.M. – M.B.*	*M. Scocca*

titolo elaborato	***sigla elaborato***
relazione idraulica	*R02*
nome file *R02 – relazione idraulica (rev00).pdf*	

STRUTTURA DEL DOCUMENTO

1 OGGETTO E FINALITÀ 1
1.1 Oggetto 1
1.2 Finalità 1
1.3 Rapporto con gli strumenti di pianificazione in materia idrica e idraulica 1
2 ELEMENTI DI IDROGRAFIA, STATO DEI LUOGHI E OPERA OGGETTO DI STUDIO 2
2.1 Descrizione del bacino idrografico e dello stato attuale del corso d'acqua 2
2.2 Opere in progetto 3
3 DETERMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA 4
4 VERIFICHE IDRAULICHE 5
4.1 Ipotesi di moto, metodo di analisi e modello matematico 5
4.1.1 Profili idraulici di moto permanente 5
4.1.2 Schematizzazione idraulica delle sezioni trasversali dell'alveo 6
4.1.3 Perdite di carico distribuite e concentrate 7
4.1.4 Profondità di stato critico 8
4.2 Dati di input 8
4.2.1 Geometria delle sezioni e tratti di studio 8
4.2.2 Parametri di scabrezza 9
4.2.3 Coefficienti di espansione e di contrazione 10
4.2.4 Condizioni al contorno 11
4.2.5 Considerazioni sul trasporto solido 11
4.3 Risultati 12
4.3.1 Esportazione grafica dal codice di calcolo dei livelli idrici del rio Erxo 12
4.3.2 Sezioni idrauliche per l'evento di piena con T_R = 200 anni 13
4.3.3 Dati geometrici e idraulici derivati dalla modellazione 23
5 CONCLUSIONI 25
6 ALLEGATI 25

1 OGGETTO E FINALITÀ

1.1 Oggetto

A seguito dell'incarico conferito dal sig. Massimo SCOCCA, amministratore unico della società VALECO S.r.l. con sede a Stella (SV), in località Sansobbia civ. 59 int. 2, i sottoscritti:

- geologo Massimo BOCHIOLO, nato a Finale Ligure (SV) il 26 luglio 1974, C.F. BCH MSM 74L26 D600M, P.IVA 01564020095, residente a Savona in via Nicola Bartoli civ. 9 int. 3, con studio professionale a Savona, in via Nazario Sauro civ. 5 int. 4A, iscritto all'Albo Professionale dell'Ordine Regionale dei Geologi della Liguria con matricola n. 603, tel. +39 (0)19 94 81 165, mob. +39 349 65 93 775, e-mail info@tecgeo.net, PEC massimo.bochiolo@pec.epap.it;
- ingegnere Enrico MASSA, nato a Genova il 9 maggio 1973, C.F. MSS NRC 73E09 D969Q, P.IVA 02832290049, residente a Savona in via Paolo Cappa civ. 6 int. 1, con studio professionale a Savona in via Nazario Sauro civ. 4 int. 5A, iscritto all'Albo Professionale dell'Ordine degli Ingegneri della provincia di Savona con matricola n. 1313, tel. +39 (0)19 83 87 201, mob. +39 349 71 77 856, e-mail info@tecgeo.net, PEC enrico.massa@ingpec.eu;

hanno redatto la presente relazione idraulica a corredo del progetto denominato "*Intervento di messa in sicurezza e riempimento della valletta del rio Erxo*", da realizzarsi in località Maschio, in Comune di Savona (SV), su aree del demanio idrico del rio Erxo e sulle unità immobiliari identificate al N.C.T. al foglio 38, mappali 99, 100, 102, 103, 104, 117 e 118 e al N.C.E.U. al foglio 38, mappale 101 (cfr. P01 – planimetria stato attuale).

1.2 Finalità

Lo studio idraulico illustrato nella presente relazione è finalizzato a fornire una ricostruzione degli scenari di piena del rio Erxo nella configurazione di progetto, in termini di livelli idrici e velocità di scorrimento, per l'evento di piena con tempo di ritorno di 200 anni, accertando:

- per il tratto di alveo interessato dalle opere, il contenimento delle portate con i franchi di sicurezza previsti dalla vigente normativa;
- l'invarianza delle condizioni di sicurezza del bacino idrico sotteso a valle delle opere previste rispetto alla configurazione attuale.

Sebbene collocata al di fuori dell'area di intervento, lo studio indaga anche le capacità di deflusso della tombinatura di sottopasso alla S.P. n. 29 del Colle di Cadibona individuando, in prima approssimazione, un'ipotesi progettuale di aumento della sezione di deflusso volta a ridurre il pericolo di esondazione sulla viabilità pubblica per rigurgito in corrente lenta alla sezione di imbocco.

1.3 Rapporto con gli strumenti di pianificazione in materia idrica e idraulica

Considerato che le opere interessano il demanio idrico e le relative pertinenze, ai fini dell'esecuzione dell'intervento si rende necessario l'ottenimento dell'autorizzazione idraulica prescritta dal r.d. 25 luglio 1904, n. 25 e di titolo concessorio atto a consentire l'utilizzo e l'occupazione temporanea (riferita al periodo connesso con l'esecuzione dei lavori) delle aree e delle pertinenze demaniali.

In relazione all'ammissibilità delle opere, tenuto conto che la volumetria dell'abbancamento eccede i 300.000 m³ e che l'area e l'intervento sono idonei ad essere inseriti tra i siti di deposito degli inerti compresi nel Piano di Utilizzo delle Terre (PUT) di un'opera pubblica, l'opera rientra tra la fattispecie degli interventi consentiti negli alvei dei corsi d'acqua in quanto rispetta i requisiti prescritti dalle disposizioni stabilite dall'art. 7, comma 2, lett. a) del R.R. 14 luglio 2011, n. 3 e dalla D.G.R. n. 213 del 21 febbraio 2014.

Sotto il profilo progettuale e autorizzativo, ai fini idraulici l'intervento dovrà rispettare le prescrizioni riportate al comma 3 dell'art. 7 del R.R. n. 3/2011, con particolare riferimento alle caratteristiche minime dello

studio (come stabilite all'allegato 1 al R.R. n. 3/2011 e all'allegato 3 alle Norme del Piano di Bacino del Torrente Letimbro) e al rispetto dei franchi di sicurezza (allegato 2 al R.R. n. 3/2011 e allegato 3 alle Norme del Piano di Bacino del Torrente Letimbro) per la portata con tempo di ritorno duecentennale.

2 ELEMENTI DI IDROGRAFIA E OPERE IN PROGETTO

2.1 Caratteristiche del bacino idrografico e del corso d'acqua

Il rio Erxo è un affluente sinistro del Torrente Lavanestro (a sua volta confluente nel Torrente Letimbro), che confluisce nel recettore in corrispondenza della località Maschio, immediatamente a monte della S.P. n. 29 del Colle di Cadibona, presso la progressiva chilometrica 9+500 della suddetta viabilità.
Il bacino presenta una forma allungata e risulta disposto lungo una direttrice nord-sud. La superficie del bacino imbrifero (valutata alla sezione di chiusura) è pari a circa 0.29 km² (cfr. P06 – bacino idrografico su carta tecnica regionale); conseguentemente, il tratto di asta fluviale oggetto di studio appartiene al reticolo idrografico di secondo livello (ovvero ai bacini di superficie compresa tra 0.25 e 1.0 km²).
Il bacino è caratterizzato dalla quasi completa assenza di insediamenti abitativi (ad esclusione di una antica casa colonica, da tempo abbandonata, posta a quota 265 m s.l.m.) ed è attraversato, in direzione est-ovest, da 3 direttrici di comunicazione: (i) la linea funiviaria Savona Miramare – san Giuseppe (presso il crinale superiore a quota circa 400 m s.l.m.); (ii) la linea ferroviaria Savona – Altare via Maschio (a quota 200 m s.l.m.); (iii) la S.P. n. 29 del Colle di Cadibona (immediatamente ad ovest della confluenza nel Torrente Lavanestro, ad una quota di circa 140 m s.l.m.) (cfr. A01 – documentazione fotografica).
Il corso d'acqua si sviluppa in un contesto collinare, senza apprezzabili antropizzazioni lungo tutto il percorso, ad esclusione del tratto terminale (per una lunghezza di circa 150 m), ove perde la morfologia naturale, essendo prima arginato e poi tombinato, in corrispondenza del sottopasso al piano viario della S.P. 29, con opere di antropizzazione tali da presentare sezioni di deflusso potenzialmente critiche.
In Tabella 2.1 si elencano le principali caratteristiche morfometriche del bacino idrografico.

Tabella 2.1 – Principali caratteristiche morfometriche del bacino idrografico e dell'asta principale.

grandezza	valore
superficie del bacino di dominio, A	0.29 km²
quota massima del bacino, q_{max}	420 m
quota della sezione di chiusura, q_{min}	140 m
lunghezza dell'asta principale, L_p	1.20 km
perimetro del bacino, P	2.65 km

Dal punto di vista geolitologico il bacino è impostato interamente in rocce metamorfiche rappresentate da metagranitoidi, paragneiss e micascisti quarzitici, tutti con sovraimpronta metamorfica in facies anfibolitica prealpina, strutturalmente ascritti all'Unità di Calizzano Savona e formazionalmente attribuiti agli Gneiss di Albisola. Tenuto conto della composizione mineralogica, delle caratteristiche e dell'elevata frequenza di distribuzione delle discontinuità, l'ammasso roccioso presenta caratteristiche geomeccaniche generalmente scadenti che favoriscono la formazione e l'accumulo di depositi detritici di spessore plurimetrico, non di rado soggetti a fenomeni di instabilità gravitativa caratterizzati da movimento complesso a prevalente componente rotazionale e traslazionale. Soprattutto in corrispondenza dei margini del bacino si osservano coltri di copertura di tipo colluviale, a granulometria eterogenea, con una significativa componente fine, derivanti dall'alterazione e dalla detrizione delle metamorfiti, arealmente discontinue e con spessore superiore a 3 m. In corrispondenza del solco vallivo principale si rinvengono inoltre depositi alluvionali plurimetrici caratterizzati da clasti di forma irregolare, poco o per nulla arrotondati, di dimensioni variabili (talvolta sono presenti

blocchi di dimensioni superiori a 0.5 m), generalmente riconducibili a colate detritiche o a fenomeni di erosione spondale e di fondo, a loro volta in grado di favorire l'innesco di instabilità di versante e di accelerare i processi erosivi.
Il reticolo idrografico, controllato da fattori litologici (substrato metamorfico permeabile per fratturazione), è impostato lungo allineamenti strutturali originatisi in occasione di fasi geodinamiche differenti (riferibili alla strutturazione generale sin-orogena e a deformazioni fragili post-orogene). L'andamento dell'asta principale è lineare nei settori medio e alto del bacino e debolmente più articolato nel tratto terminale, dove risulta fortemente antropizzato. Altimetricamente, il profilo longitudinale del corso d'acqua evidenzia contenute variazioni di pendenza (comprese mediamente tra il 6 e il 23 %) con un'importante singolarità idraulica rappresentata dal rilevato a sostegno della linea ferroviaria Torino-Savona, che opera come uno sbarramento trasversale ai deflussi. Dal punto di vista vegetazionale il bacino è caratterizzato da ridotta copertura erbacea per la presenza di bosco fitto nella tipica associazione della macchia mediterranea (dominata dal leccio con arbusti quali ginestra, corbezzolo e lentisco) e sporadica presenza di castagneto ceduo. L'orizzonte arboreo risulta generalmente degradato, con frequenti evidenze di schianti ed eradicazioni, mentre il soprassuolo mostra erosione diffusa per ruscellamento areale con sviluppo di una frangia detritica eterogenea che si unisce e alimenta i depositi alluvionali di fondovalle, talvolta sospesi o ubicati in tratti d'alveo caratterizzati da fenomeni di erosione regressiva sia sul letto che sulle scarpate spondali.

2.2 Opere in progetto

Il progetto prevede la realizzazione di un rilevato con volumetria pari a circa 637.000 m³, da realizzarsi nel tratto inferiore della valle del rio Erxo, affluente di sinistra del Torrente Lavanestro, tra la quota di fondo alveo, posta a circa 142 m s.l.m., alla quota massima del riempimento, ubicata a 230 m s.l.m.
Per la realizzazione dell'abbancamento è previsto l'impiego di terre e rocce da scavo gestite in regime di sottoprodotto ai sensi del d.P.R. 13 giugno 2017, n. 120 e di materie prime seconde (nel seguito "MPS") derivanti da attività di recupero (operazione R5) di rifiuti materiali inerti provenienti da operazioni di costruzione e demolizione.
L'ipotesi progettuale comporta la modifica plano-altimetrica dell'asta fluviale nel tratto che intercetta l'abbancamento, tra la quota di sbocco della tombinatura di sottopasso alla linea ferroviaria Torino-Savona (201 m s.l.m.) e il piede del rilevato (141.7 m s.l.m.). Al fine di mantenere i deflussi in sezione aperta, il corso d'acqua viene reinalveato mediante sopraelevazione e traslazione per una lunghezza di circa 370 m.
Nel segmento d'alveo defluente sul rilevato il canale avrà le seguenti caratteristiche:

- nel tratto superiore (tra quota 201 e 195.2 m s.l.m., lunghezza 260 m, pendenza media di 2.2°, fondo e sponde rivestite in terra adeguatamente protetta da copertura erbacea), scorrimento su materiali sciolti e, in minima parte, su fondo e sponda destra derivanti da escavazione del versante, andamento da curvilineo a rettilineo, sezione trapezoidale con larghezza di base pari a 3 m, altezza spondale compresa tra 2.6 e 5 m (pendenza delle sponde 3:5, corrispondente a un'inclinazione di 31°);
- nel tratto inferiore (tra quota 195.2 e 141.7 m s.l.m., lunghezza pari a 95.6 m circa, pendenza media di circa 29.2°, fondo in pietrame collocato entro materassi metallici al fine di ridurre gli effetti erosivi della corrente), deflusso all'interno di un canale di sezione trapezoidale con larghezza di base pari a 3 m, profilo longitudinale caratterizzato da 16 briglie in massi con salto di quota costante (2 m), separate da tratti con fondo su pietrame (pendenza 1:5), sponde con altezza minima pari a 2 m e pendenza 2:1 (coincidente con un'inclinazione di circa 63°) anch'esse realizzate in massi da scogliera.

Al fine di migliore la capacità di deflusso del corso d'acqua, al piede del rilevato, nel tratto di raccordo tra la base dell'abbancamento e il segmento d'alveo esistente, si prevede l'esecuzione delle seguenti attività:

- demolizione di una soletta con spalle in c.a. ed eliminazione della vegetazione arborea in grado di costituire potenziale ostacolo al deflusso;

- realizzazione di una vasca in massi da scogliera atta ad aumentare la sezione di deflusso e a favorire la tendenza al deposito dei materiali alluvionali;
- realizzazione di una briglia selettiva con elementi di trattenuta costituiti da tubolari in acciaio avente la funzione di arrestare il flottante e prevenire il deposito di sedimenti e materiale vegetale in grado di ridurre la sezione di deflusso nel tratto compreso tra la briglia e la tombinatura di sottopasso alla S.P. n. 29 del Colle di Cadibona.

3 DETERMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA

In accordo con le indicazioni e le considerazioni riportate all'allegato 2 Portate di Piena della Normativa di Piano e al Capitolo 2.7.4.2.2 della Relazione Tecnica di Piano del Piano di Bacino del Torrente Letimbro, si applica la metodologia proposta dall'Università degli Studi di Genova-CIMA (1999) [R1] per bacini aventi area minore di 2 km², in base alla quale la portata di piena Q_T [m³/s], con tempo di ritorno T_R [anni], è espressa da:

$$Q_T = K_T \, A \, U_{A=2} \qquad [3.1]$$

dove:
K_T = fattore di frequenza delle portate per il tempo di ritorno di interesse;
A = superficie drenata [km²];
$U_{A=2}$ = contributo unitario per area pari a 2 km² [m³/(s km²)] in funzione del tipo di bacino e della sua longitudine in coordinate relative al sistema U.T.M..
Tenuto conto dei fattori di frequenza riportati in Tabella 3.1, che il bacino idrografico ha una superficie A, determinata al primo nodo di confluenza a valle dell'opera in progetto (ovvero a monte della confluenza col Torrente Lavanestro), corrispondente a circa 0.29 km², una longitudine del baricentro pari a 8° 25' 35.4" e che è caratterizzato da estesa copertura arborea con estensione delle aree impermeabili inferiore al 5%, (tipo D nella classificazione dei bacini regionali per la stima di CN, Tabella 3.2), inserendo nella [3.1] un valore $U_{A=2}$ di 5.10 m³/(s km²), ricavato per interpolazione lineare dai dati di Tabella 3.3, si ottengono i valori di portata elencati in Tabella 3.4.

Tabella 3.1 – Fattore di frequenza delle portate per diversi tempi di ritorno.

T_R [anni]	5	10	30	50	100	200	500
K_T	1.29	1.79	2.90	3.47	4.25	5.02	6.04

Tabella 3.2 – Classificazione dei bacini regionali per la stima dei valori di CN.

tipo	descrizione	CN
A	Bacini di tipo residenziale, industriale o commerciale, caratterizzati da un elevato grado di urbanizzazione. Estensione delle aree impermeabili superiore al 60%	92
B	Bacini caratterizzati da un medio grado di urbanizzazione. Estensione delle aree impermeabili compresa fra 30% e 60%	87
C	Bacini caratterizzati da un basso grado di urbanizzazione. Estensione delle aree impermeabili compresa fra 5% e 30%	75
D	Bacini caratterizzati da estesa copertura arborea. Estensione delle aree impermeabili inferiore al 5%	67

[R1] Centro Internazionale di Monitoraggio Ambientale (1999). *Caratterizzazione delle precipitazioni intense e delle portate di piena per i bacini liguri: valori di portata al colmo di piena, con assegnato periodo di ritorno, per i bacini idrografici con foce al mar Tirreno*. Savona, marzo 1999.

Tabella 3.3 – Contributo unitario $U_{A=2}$, espresso in m³/(s km²), in funzione del tipo di bacino e della longitudine del suo baricentro.

longitudine	bacino tipo			
[° primi]	A	B	C	D
8° 25.0’	8.85	7.39	5.66	4.97
8° 27.5’	8.96	7.48	5.73	5.03
8° 25.0’	9.07	7.57	5.79	5.09
8° 27.5’	9.17	7.66	5.86	5.15
8° 30.0’	9.28	7.74	5.93	5.20

Tabella 3.4 – Valori della portata di piena Q_T [m³/s] per eventi con tempo di ritorno decennale, trentennale, cinquantennale, centennale, duecentennale e cinquecentennale.

T_R [anni]	5	10	30	50	100	200	500
Q_T	1.91	2.65	4.29	5.13	6.29	7.43	8.94

4 VERIFICHE IDRAULICHE

4.1 Ipotesi di moto, metodo di analisi e modello matematico

La determinazione del profilo di moto è stata eseguita con schema monodimensionale e in regime permanente mediante il codice di calcolo HEC-RAS versione 6.3.1. La procedura utilizzata dal *software* è in grado di simulare l’andamento idraulico monodimensionale del tirante in sezioni aperte, interessate da ponti o soggette a bruschi restringimenti, in regime di flusso subcritico, supercritico o vario. Nel caso di flusso in sezioni aperte il codice integra per differenze finite, tra due sezioni successive, l’equazione differenziale del profilo di pelo libero (conservazione dell’energia):

$$\frac{dH}{ds} = i - J \qquad [4.1]$$

in cui:
dH = variazione di carico energetico;
ds = distanza tra le sezioni;
i = pendenza media del fondo alveo;
J = perdita di carico per effetto delle resistenze.
Nel caso di singolarità, quali ponti, tombini, stramazzi, risalti idraulici, ecc., il codice risolve l’equazione integrale dell’equilibrio dinamico tra le sezioni fittizie a monte e a valle dell’opera.

4.1.1 Profili idraulici di moto permanente

L’equazione impiegata per determinare il profilo di moto permanente è ottenuta per differenze finite a partire dalla [4.1] applicando il principio di conservazione dell’energia ad un tratto d’alveo di lunghezza Δs, compreso tra le sezioni 1, a valle, e 2, a monte. In tal caso, con riferimento alle notazioni riportate in Figura 4.1, la [4.1] assume la forma (*equazione di Bernoulli*):

$$z_2 + h_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} = z_1 + h_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + E_d + E_c \qquad [4.2]$$

dove:
z = quota di fondo alveo rispetto ad un riferimento prefissato [m];
h = tirante idrico [m];
α = coefficiente di Coriolis o di ragguaglio delle potenze cinetiche;
v = velocità media nella sezione [m/s];

g = accelerazione di gravità [9.81 m/s^2];
E_d = variazione di carico dovuta alle perdite distribuite [m];
E_c = variazione di carico dovuta alle perdite concentrate [m].

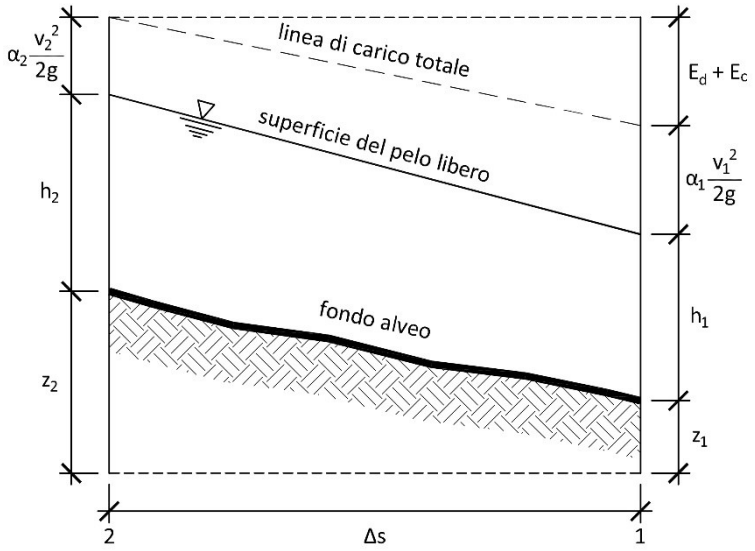


Figura 4.1 – Applicazione del principio di conservazione dell'energia e indicazione dei carichi idraulici in due sezioni consecutive per un fluido in moto gradualmente variato.

Mediante la [4.2], noti:

- la geometria idraulica dell'alveo, tramite rappresentazione delle sezioni trasversali al corso d'acqua e del relativo posizionamento plano-altimetrico;
- i parametri di scabrezza e i coefficienti di contrazione e di espansione;
- il tipo di corrente e le condizioni al contorno di valle o di monte;
- la geometria e le caratteristiche idrauliche di eventuali singolarità presenti in alveo,

è possibile determinare il profilo di moto permanente associato alla portata di piena da esaminare.

4.1.2 Schematizzazione idraulica delle sezioni trasversali dell'alveo

In presenza di sezioni d'alveo caratterizzate da geometria irregolare e variabile, il calcolo dei parametri idraulici richiede l'applicazione di tecniche di parzializzazione della sezione, sia per il calcolo dell'area bagnata sia per il calcolo del perimetro bagnato per ogni tirante idrico ammissibile. A partire da queste grandezze vengono quantificate l'area della sezione bagnata, il perimetro bagnato, il raggio idraulico e il baricentro della sezione, mediante le seguenti espressioni:

$$A_i = 0.5\ (y_i + y_{i+1})\ dx_i \qquad [4.3]$$

$$p_i = \sqrt{dx_i^2 + (y_i - y_{i+1})^2} \qquad [4.4]$$

$$R_i = \frac{A_i}{p_i} \qquad [4.5]$$

$$\overline{y_i} = 0.25\ (y_i + y_{i+1}) \text{ (se non adiacente alla parete del canale)} \qquad [4.6]$$

$$\overline{y} = \frac{1}{3}\ y_i \text{ (se adiacente alla parete del canale)} \qquad [4.7]$$

$$A_t = \sum_{i=1}^{m} A_i \quad [4.8]$$

$$p_t = \sum_{i=1}^{m} p_i \quad [4.9]$$

$$R_t = \frac{A_t}{p_t} \quad [4.10]$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{m} A_i \cdot \bar{y}_i}{A_t} \quad [4.11]$$

dove:

A_i, p_i, R_i e $\bar{y}_i$ = area [m²], perimetro bagnato [m], raggio idraulico [m] e profondità del baricentro [m] delle sottosezioni, rispettivamente;

A_t, p_t, R_t e $\bar{y}$ = area [m²], perimetro bagnato [m], raggio idraulico [m] e profondità del baricentro [m] della sezione, rispettivamente;

m = numero di sottosezioni.

4.1.3 Perdite di carico distribuite e concentrate

Le perdite di carico distribuite vengono calcolate come valore medio delle cadenti del carico energetico totale E, quantificato in ciascuna delle due sezioni che lo delimitano ed espresso da:

$$E = \left(z + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \right) \quad [4.12]$$

in cui:

z = quota del fondo alveo [m];

P = pressione al fondo alveo [Pa];

γ = peso specifico dell'acqua [N/m³];

v = velocità media della corrente [m/s²];

g = accelerazione di gravità [9.81 m/s²].

Nota la geometria della sezione bagnata, per ogni valore della cadente I dell'energia specifica nel tratto compreso tra le due sezioni, la perdita di carico distribuita risulta:

$$E_d = I\,\Delta s = \sqrt{i_1\, i_2}\,\Delta s \quad [4.13]$$

essendo:

Δs = distanza tra le sezioni [m];

i_1 e i_2 = pendenze motrici delle due sezioni, che soddisfano l'equazione di moto uniforme e il cui coefficiente di resistenza è esplicitato dalla formula di Gauckler-Strickler:

$$Q = A\, K_s\, R^{2/3}\, i_i^{1/2} \quad [4.14]$$

dove:

Q = portata assegnata [m³/s];

A = area della sezione bagnata [m²];

K_s = coefficiente di scabrezza secondo Gauckler-Strickler [m$^{1/3}$/s];

R = raggio idraulico [m];

I = cadente (espressa come media geometrica delle pendenze motrici).

Le perdite di carico concentrate sono dovute a contrazione o espansione della corrente in seguito a variazioni dell'area bagnata tra sezioni successive. Sono proporzionali alla differenza assoluta tra le altezze cinetiche e quantificate mediante la relazione:

$$E_r = C \left| \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \right| \qquad [4.15]$$

in cui:
v_1 e v_2 = velocità medie nelle due sezioni [m/s];
C = coefficiente, adimensionale, di contrazione o di espansione.

4.1.4 Profondità di stato critico

Al tirante idrico in condizioni di stato critico corrisponde la massima portata teoricamente smaltibile dalla sezione, indipendentemente dalla natura del fondo e delle pareti. Esso è stato valutato imponendo che il numero di Froude, indicato con Fr, assuma valore unitario. In termini di portata e per le sezioni in esame si ha:

$$Fr = 1 = \frac{v}{\sqrt{g\, h_m}} \qquad [4.16]$$

dove:
v = velocità media della corrente nella sezione [m/s];
g = accelerazione di gravità [9.81 m/s²];
h_m = tirante idrico medio [m], dato dal rapporto A/B, dove A è l'area della sezione bagnata [m²] e B è la larghezza al pelo libero della sezione bagnata [m].
L'equazione [4.16] permette di determinare l'altezza di stato critico tramite il valore di h_m che soddisfa la relazione tra l'altezza di piene rive e il fondo.

4.2 Dati di input

Nel seguito vengono descritti gli elementi che concorrono alla messa a punto del modello. In particolare, sono illustrate le modalità di ricostruzione della geometria e la scelta del tratto di studio, la selezione e quantificazione dei parametri di scabrezza, i coefficienti di espansione e di contrazione e le condizioni al contorno. Vengono inoltre esposte considerazioni relative al trasporto solido, con una stima di massima del contributo di portata dovuto alla presenza del carico di fondo, del materiale in sospensione e di quello in galleggiamento.

4.2.1 Geometria delle sezioni e tratti di studio

La modellazione idraulica è basata su 82 sezioni, con numerazione progressiva da 60 (a monte) a 1 (a valle). In corrispondenza delle singolarità idrauliche (imbocco e sbocco delle tombinature, salti di fondo lungo il tratto che attraversa la scarpata principale, briglia selettiva e salto di fondo situato nel tratto già esistente) la geometria è dettagliata mediante l'inserimento di sezioni ravvicinate volte a consentire la quantificazione delle grandezze idraulica in presenza di salti di quota o brusche variazioni della geometria della sezione (cfr. P02 – planimetria stato di progetto e P05 – planimetria del tratto terminale del rio Erxo).
La geometria delle sezioni situate in corrispondenza del rilevato è stata ottenuta mediante ricostruzione tridimensionale dell'abbancamento e delle relative opere idrauliche, mentre nel tratto di corso d'acqua compreso tra il piede del rilevato e la tombinatura di sottopasso alla S.P. n. 29 si è proceduto all'effettuazione di un rilievo topografico di dettaglio. Ferme restando le difficoltà di carattere operativo, nell'acquisizione e restituzione delle sezioni si sono seguite, per quanto possibile, le direttive della FEMA.
Per quanto concerne la modellazione delle tombinature, nel codice di calcolo si è proceduto a simulare la presenza delle coperture mediante l'inserimento di elementi "*lid*", operanti, ai fini computazionali, come aree di sezione non disponibili al deflusso.
Il tratto indagato ha una lunghezza di oltre 490 m, inizia circa 24 m a monte del rilevato (in corrispondenza dell'imbocco della tombinatura di sottopasso alla ferrovia Torino-Savona) e termina poco prima della confluenza del rio Erxo nel Torrente Lavanestro (immediatamente a valle della sezione di sbocco della

tombinatura di attraversamento della S.P. n. 29 del Colle di Cadibona). La presenza di singolarità idrauliche (sezioni chiuse) permette di considerare il segmento d'alveo investigato idraulicamente "sconnesso" dal tratto superiore del rio Erxo e dal Torrente Lavanestro.

4.2.2 Parametri di scabrezza

Il coefficiente di Gauckler-Strickler, indicato con K_s [$m^{1/3}/s$], rappresenta un parametro di conduttanza che, a parità di geometria della sezione, è direttamente proporzionale alla portata idrica smaltibile, come si deduce dalla [4.14]. Considerate le finalità dello studio e il livello di sofisticazione e le approssimazioni del modello, ai fini della definizione dei coefficienti di scabrezza si è fatto riferimento alle tabulazioni proposte da Chow [R2], Fasken [R3] e Coon [R4]. Allo scopo di modellare con maggiore dettaglio le variazioni di scabrezza si è proceduto ad assegnare coefficienti di rugosità variabili orizzontalmente rispetto alla sezione.
Considerate le caratteristiche dell'alveo e delle aree di potenziale esondazione si sono adottati i coefficienti di scabrezza di Manning (n), corrispondenti all'inverso di K_s, elencati in Tabella 4.1.

Tabella 4.1 – Coefficienti di scabrezza di Manning (n, $s/m^{1/3}$) utilizzati nella modellazione. Tra parentesi è riportato il corrispondente valore del coefficiente di Gauckler-Strickler.

caratteristiche del tratto di alveo	n (K_s)
aree esondabili – prato senza cespugli, erba alta	0.035 (29)
canali artificiali – canali rivestiti in calcestruzzo grezzo	0.017 (58)
canali artificiali costruiti – canali con sponde rivestite in pietrame con giunti stilati	0.025 (40)
canali artificiali escavati – canali in terra non rivestiti, rettilinei, non vegetati, con ghiaia	0.020 (50)
alvei di pianura – non vegetati, tortuosi, con pietre e alghe	0.045 (22)
alvei di montagna – sponde con alberi e cespugli e fondo con ghiaia, ciottoli e massi radi	0.040 (25)
alvei regolarizzati – con sponde ben inerbite	0.035 (29)
canali – con fondo in ghiaia e sponde in massi da scogliera	0.033 (30)

In Tabella 4.2, sono elencati i valori dei coefficienti di scabrezza utilizzati nelle verifiche per ciascuna sezione, in funzione della variazione orizzontale delle caratteristiche del tratto di alveo.
In generale, i valori impiegati rispettano le prescrizioni indicate agli allegati 1 e 3 "*Indirizzi tecnici*" per la redazione di studi idraulici di cui al R.R. n. 3/2011 e alla Normativa di Piano del Piano di Bacino del Torrente Letimbro, rispettivamente.

Tabella 4.2 – Valori dei coefficienti di Gauckler-Strickler impiegati nelle verifiche.

sezione	$n_{\#1}$	$n_{\#2}$	$n_{\#3}$	$n_{\#4}$	$n_{\#5}$	sezione	$n_{\#1}$	$n_{\#2}$	$n_{\#3}$	$n_{\#4}$	$n_{\#5}$
60	0.03	0.03	0.03	–	–	32.1	0.025	0.035	0.025	–	–
59.5	0.03	0.017	0.03	–	–	31.2	0.025	0.025	0.025	–	–
59.4	0.03	0.017	0.03	–	–	31.1	0.025	0.035	0.025	–	–
59.3	0.03	0.017	0.03	–	–	30.2	0.025	0.025	0.025	–	–
59.2	0.03	0.017	0.03	–	–	30.1	0.025	0.035	0.025	–	–
59.1	0.035	0.04	0.035	–	–	29.2	0.025	0.025	0.025	–	–
58	0.035	0.04	0.035	–	–	29.1	0.025	0.035	0.025	–	–
57	0.035	0.04	0.035	–	–	28.2	0.025	0.025	0.025	–	–
56	0.035	0.04	0.035	–	–	28.1	0.025	0.035	0.025	–	–
55	0.035	0.04	0.035	–	–	27.2	0.025	0.025	0.025	–	–

[R2] Chow, V.T. (1959). Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill, New York, 680 p.
[R3] Fasken G.B. (1963). Guide for selecting roughness coefficient "n" values for channels. U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Lincoln, Neb., 24 p. plus appendixes.
[R4] Coon, W.F. (1998). Estimation of roughness coefficients for natural stream channels with vegetated banks. U.S. Geological Survey, Water Supply Paper 2441, 133 p.

sezione	$n_{\#1}$	$n_{\#2}$	$n_{\#3}$	$n_{\#4}$	$n_{\#5}$	sezione	$n_{\#1}$	$n_{\#2}$	$n_{\#3}$	$n_{\#4}$	$n_{\#5}$
54	0.035	0.04	0.035	–	–	27.1	0.025	0.035	0.025	–	–
53	0.035	0.04	0.035	–	–	26.2	0.025	0.025	0.025	–	–
52	0.035	0.04	0.035	–	–	26.1	0.025	0.035	0.025	–	–
51	0.035	0.04	0.035	–	–	25	0.025	0.035	–	–	–
50	0.035	0.04	0.035	–	–	24	0.035	0.025	0.035	0.025	0.035
49	0.035	0.04	0.035	–	–	23	0.035	0.025	0.035	0.025	0.035
48	0.035	0.04	0.035	–	–	22.2	0.035	0.025	0.035	0.025	0.035
47	0.035	0.035	0.035	–	–	22.1	0.035	0.025	0.035	–	–
46	0.035	0.035	0.035	–	–	21	0.035	0.045	0.025	0.035	–
45	0.035	0.035	0.035	–	–	20	0.035	0.045	0.035	–	–
44	0.035	0.035	0.035	–	–	19	0.035	0.045	0.035	–	–
43	0.035	0.035	0.035	–	–	18	0.035	0.045	0.035	–	–
42	0.035	0.035	0.035	–	–	17.2	0.035	0.045	0.025	0.02	–
41	0.035	0.035	0.035	–	–	17.1	0.035	0.025	0.035	0.017	0.02
40.2	0.035	0.035	0.035	–	–	16	0.035	0.025	0.017	0.02	–
40.1	0.025	0.035	0.025	–	–	15	0.035	0.025	0.017	0.02	–
39.2	0.025	0.025	0.025	–	–	14	0.035	0.025	0.017	0.02	–
39.1	0.025	0.035	0.025	–	–	13	0.035	0.025	0.017	0.02	–
38.2	0.025	0.025	0.025	–	–	12	0.035	0.025	0.017	0.02	–
38.1	0.025	0.035	0.025	–	–	11	0.035	0.025	0.017	0.02	–
37.2	0.025	0.025	0.025	–	–	10	0.035	0.025	0.017	0.02	–
37.1	0.025	0.035	0.025	–	–	9	0.035	0.025	0.017	0.02	–
36.2	0.025	0.025	0.025	–	–	8	0.035	0.017	0.02	–	–
36.1	0.025	0.035	0.025	–	–	7	0.035	0.017	0.02	–	–
35.2	0.025	0.025	0.025	–	–	6	0.035	0.017	0.02	–	–
35.1	0.025	0.035	0.025	–	–	5	0.035	0.025	0.045	0.025	0.035
34.2	0.025	0.025	0.025	–	–	4	0.035	0.025	0.045	0.025	0.035
34.1	0.025	0.035	0.025	–	–	3	0.035	0.025	0.045	0.025	0.035
33.2	0.025	0.025	0.025	–	–	2.2	0.015	0.017	0.015	–	–
33.1	0.025	0.035	0.025	–	–	2.1	0.015	0.017	0.015	–	–
32.2	0.025	0.025	0.025	–	–	1	0.015	0.017	0.015	–	–

4.2.3 Coefficienti di espansione e di contrazione

La scelta dei coefficienti di espansione e di contrazione è derivata da considerazioni sul profilo longitudinale del corso d'acqua e sul regime di corrente che caratterizza il tratto d'alveo investigato.

Tabella 4.3 – Valori dei coefficienti di contrazione e di espansione utilizzati nello studio idraulico (HEC RAS Reference Manual, Version 6.3.1).

tipo di variazione	coefficiente di contrazione	coefficiente di espansione	sezioni
nessuna (tratti senza variazione di forma)	0.00	0.00	da 58 a 41 da 16 a 9
trascurabile (tratti sul fronte del rilevato)	0.005	0.01 o 0.015	da 40.2 a 26.1 e da 59.4 a 59.2
graduale (vasca di sedimentazione)	0.01	0.03	da 24 a 17.1, da 6 a 3 e da 2.1 a 1
brusca (imbocco delle tombinature)	0.05	0.2	da 60 a 59.5, 59.1 e 2.2

Tenuto conto che il fondo alveo è caratterizzato da pendenza variabile, si ammette che il transito idrico

avvenga in condizioni di moto misto. Conseguentemente, al fine di evitare una sovrastima delle perdite di carico che si verificano in seguito a brusche variazioni della sezione bagnata, si è fatto riferimento a due coppie di valori del coefficiente di contrazione ed espansione, come elencato in Tabella 4.3.

4.2.4 Condizioni al contorno

Tenuto conto che il profilo longitudinale del corso d'acqua presenza significative variazioni di pendenza (comprese mediamente tra il 2 e il 58%) si è scelto di eseguire una modellazione in regime misto, assumendo le seguenti condizioni al contorno:

- a monte (sezione 60) assegnando il passaggio del profilo per l'altezza critica;
- a valle (sezione 1) attribuendo alla quota del pelo libero il valore di 136.90 m s.l.m., corrispondente al livello delle acque del Torrente Lavanestro, ottenuto per interpolazione lineare del profilo idrico tra le sezioni 4 e 5 dell'elaborato "*Verifiche idrauliche*" del Piano di Bacino del Torrente Letimbro.

4.2.5 Considerazioni sul trasporto solido

I quantitativi di materiale solido mobilitato da un corso d'acqua sono correlati alla tendenza evolutiva dell'alveo e del bacino idrografico, intesi come un sistema dinamico unitario nel quale le interazioni tra atmosfera, geosfera e biosfera producono variazioni di energia potenziale gravitazionale (tendenza alla peneplanazione) e di energia cinetica (azione morfogenetica della gravità e dell'acqua) che si esplicano in congruità con la conservazione della massa e della quantità di moto. Tale tendenza evolutiva si manifesta nell'individuazione di tratti corsi d'acqua nei quali il bilancio di massa derivante dall'interazione tra gli apporti solidi provenienti dai versanti (ad es. movimenti franosi) e le azioni cinetiche legate ai deflussi idrici (ad es. erosione spondale, ruscellamento areale o concentrato, capacità di trasporto solido, ecc.) fa sì che il profilo di un corso d'acqua possa essere soggetto ad erosione, equilibrio o accumulo.

Tabella 4.4 – Valori delle portate di progetto alle diverse sezioni e contributo dovuto al trasporto solido e al flottante.

T_R [anni]	sezioni	Q_T [m³/s]	Q_S [% di Q_T]	Q_R [m³/s]
200	da 60 a 22.1	7.43	20%	8.92
200	da 21 a 1	7.43	10%	8.17

Come gran parte delle aste fluviali che sfociano nel mar Ligure, il rio Erxo (anche in conseguenza del sollevamento neotettonico e delle oscillazioni glacio-eustatiche – evidenziate da almeno due ordini di terrazzi, a quota 200-210, sul crinale destro, e a quota 420, in corrispondenza del Monte Erxo – che hanno comportato l'abbassamento del livello di base del versante ligure con conseguente ringiovanimento della rete idrografica) è lontano dalla condizione di equilibrio dinamico. La parte superiore del profilo, più prossima alla testata, è caratterizzata da moderata acclività con tendenza all'erosione del fondo e al trasporto dei sedimenti fluviali e dei detriti provenienti dagli affluenti e dai versanti. La parte inferiore del profilo presenta pendenza leggermente inferiore e modesta tendenza al deposito, con rapporti di sovrapposizione e interdigitazione coi sedimenti del Torrente Lavanestro in corrispondenza della ristretta conoide situata allo sbocco del rio Erxo, nei pressi della radice dei depositi terrazzati che orlano il corpo idrico recettore.
Considerate le incertezze insite nel modello adottato e l'antieconomicità di analisi di tipo sedimentologico finalizzate alla quantificazione e alla caratterizzazione del trasporto solido, ai fini dell'individuazione dei livelli idrici della portata di calcolo (Q_R) si è seguito un approccio semplificato, simulando la portata solida (Q_S) (che nella configurazione in esame sarà formato, soprattutto, da sabbie, ghiaie, ciottoli e blocchi, con trasporto per saltazione, rotolamento e strisciamento, e per la parte residua da limi in sospensione e da materiale vegetale in galleggiamento) mediante un aumento del 20% della portata liquida (Q_T). Tale incremento è applicato per intero solamente tra le sezioni 60 e 22, in quanto dalla sezione 21 si ammette che le opere di deposito e trattenuta sottraggano ai deflussi la metà della portata solida.

Inoltre, prudenzialmente, al fine di tenere conto degli effetti di deposito dovuti alla sedimentazione dei materiali detritici che costituiranno l'orizzonte superficiale del rilevato, tra le sezioni 60 e 41 si è ipotizzato un innalzamento del fondo alveo di 30 cm dovuto all'accumulo del carico di fondo e dei materiali in sospensione. Per lo stesso motivo, in corrispondenza della vasca di sedimentazione si è ammesso il progressivo intasamento dell'opera di deposito fino alla formazione di un accumulo detritico con superficie superiore inclinata verso valle, tra le quote 143.70 e 142.69 m s.l.m. corrispondenti rispettivamente al livello di fondo del rio Erxo alla sezione 25 e alla quota della gaveta della briglia selettiva. Infine, allo scopo di modellare la completa perdita di funzionalità degli elementi metallici di trattenuta della briglia a pettine, si è ammesso che l'opera (sezione 22.1) risulti interamente ostruita da materiale vegetale e permetta i deflussi solamente a partire dalla sommità (quota 143.70 m s.l.m.) del sistema di trattenuta.

4.3 Risultati

Di seguito si riportano, estratti dal codice di calcolo, le vedute assonometriche tridimensionali dei tratti d'alveo indagati (Figura 4.2), le sezioni idrauliche e il riepilogo delle grandezze rappresentative di ogni sezione (Tabella 4.5) per la portata di progetto.
In particolare, per tutte le sezioni idrauliche sono indicati il livello idrico e il carico energetico (cfr. S02 – sezioni idrauliche da 60 a 43, S03 – sezioni idrauliche da 42 a 28.2 e S04 – sezioni idrauliche da 28.1 a 1).

4.3.1 Esportazione grafica dal codice di calcolo dei livelli idrici del rio Erxo

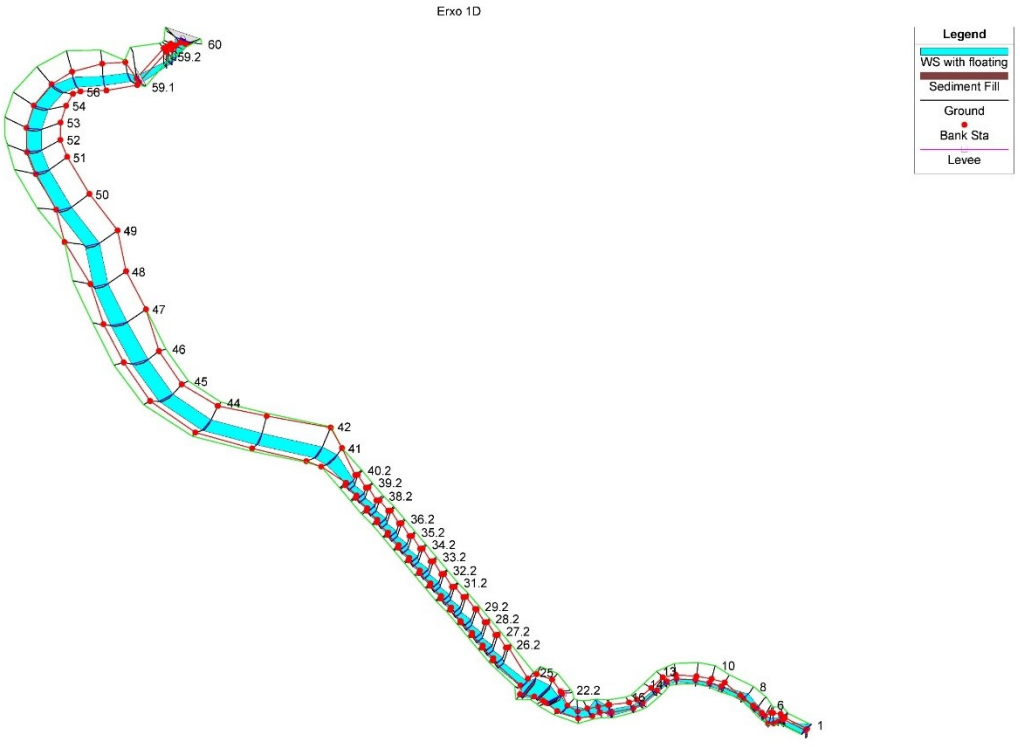
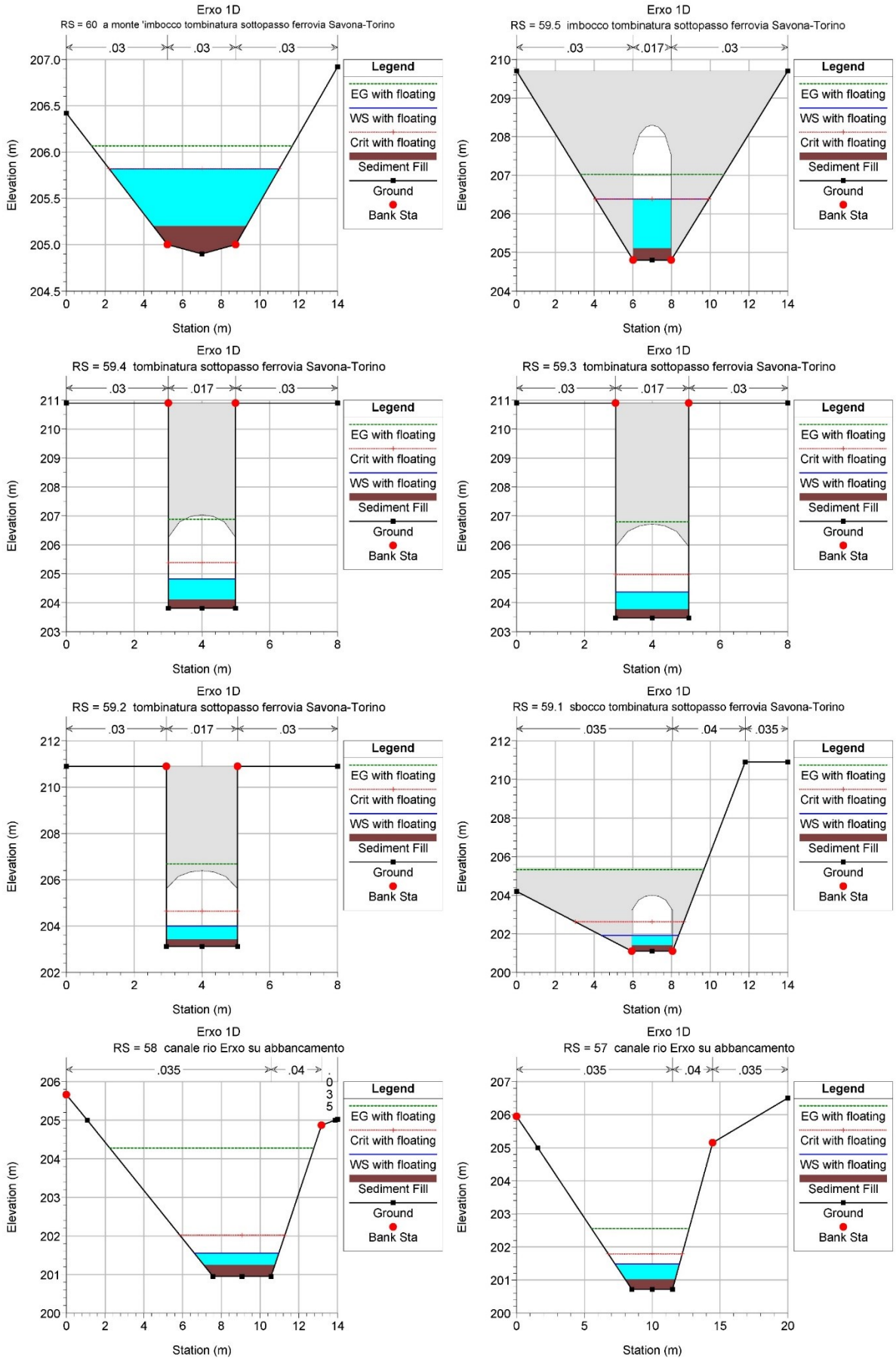
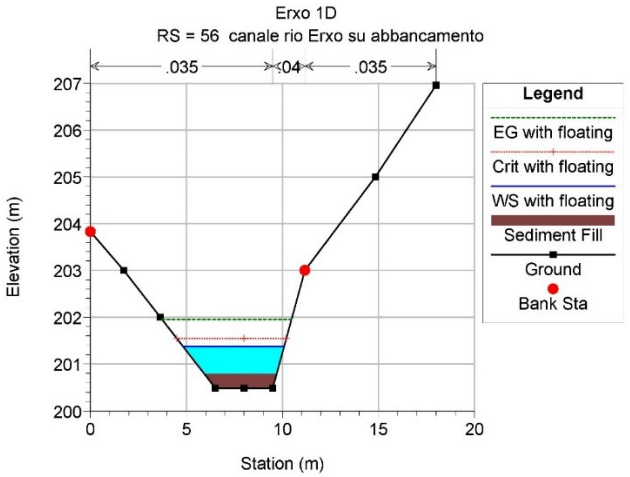
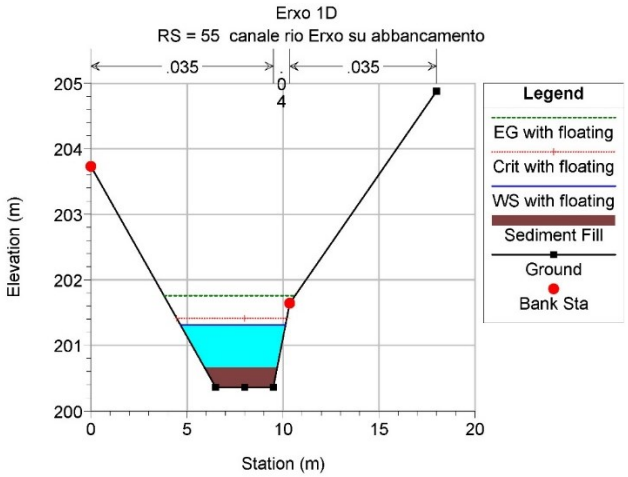


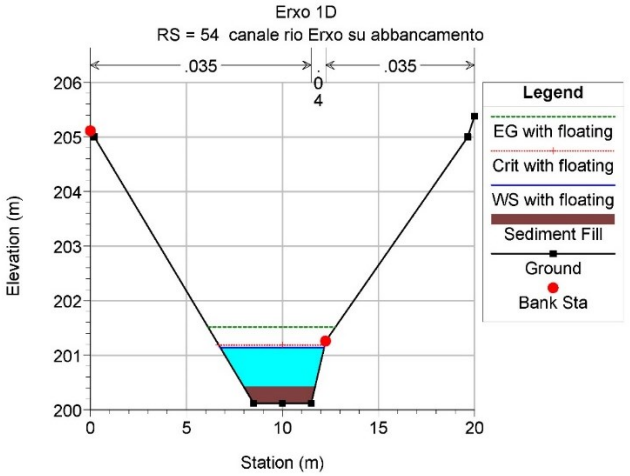
Figura 4.2 – Visione assonometrica tridimensionale dei livelli idrici del rio Erxo per l'evento di piena con tempo di ritorno duecentennale.

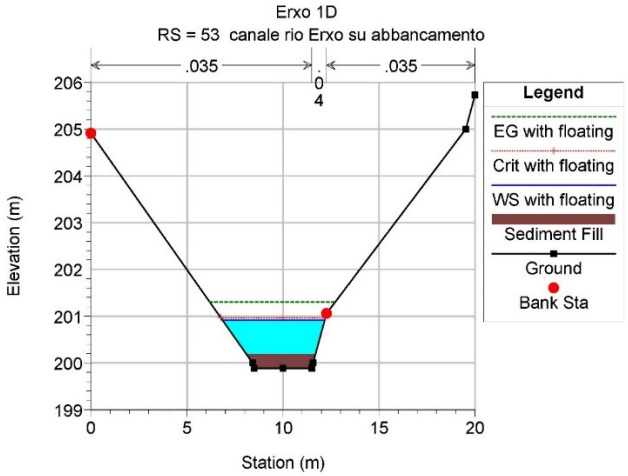
4.3.2 Sezioni idrauliche per l'evento di piena con T_R = 200 anni

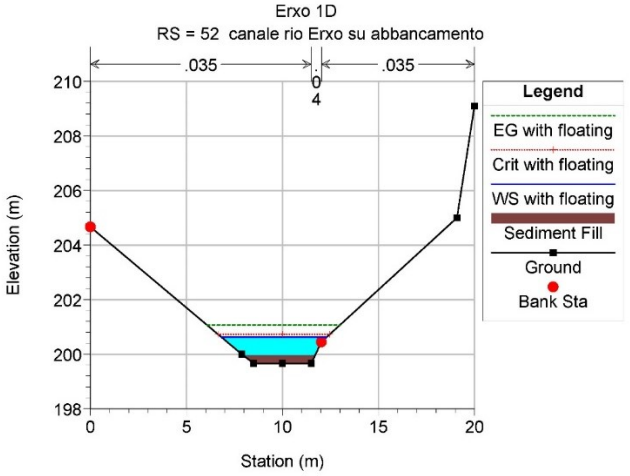


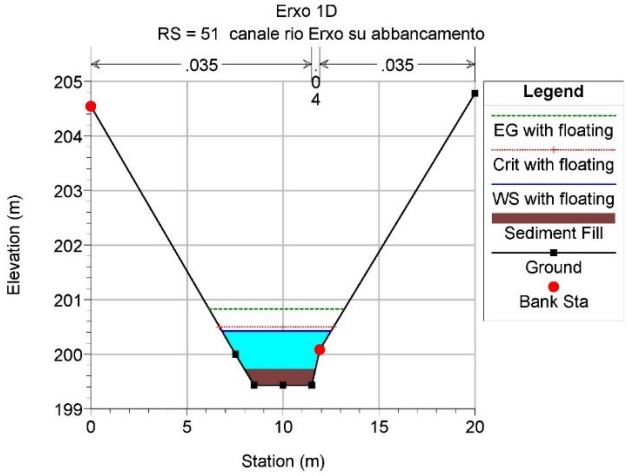

Erxo 1D
RS = 56 canale rio Erxo su abbancamento
.035
.04
.035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Bank Sta

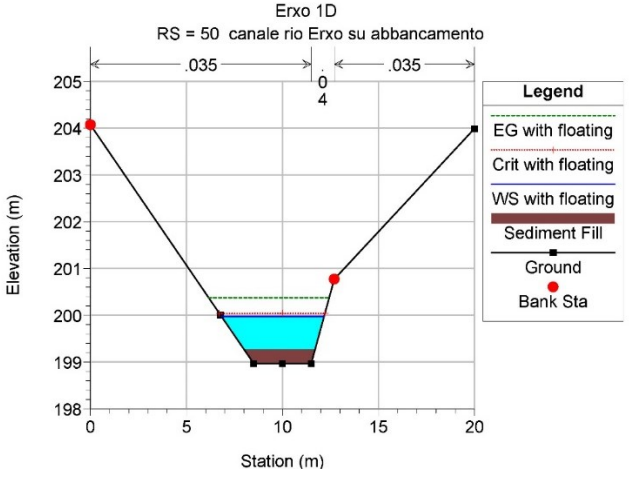

Erxo 1D
RS = 55 canale rio Erxo su abbancamento
.035
.035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Bank Sta

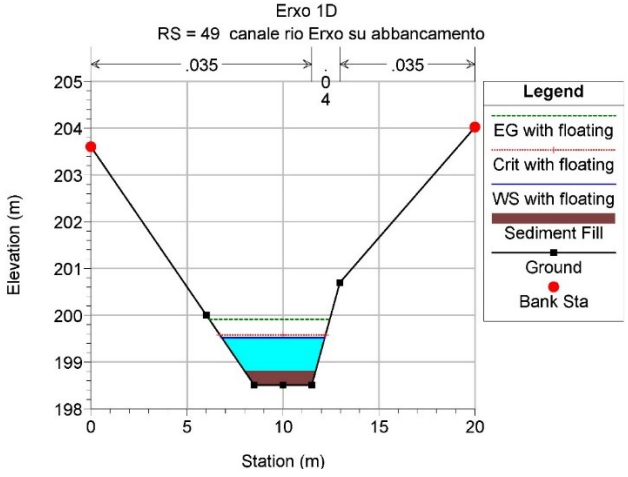

Erxo 1D
RS = 54 canale rio Erxo su abbancamento
.035
.035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Bank Sta

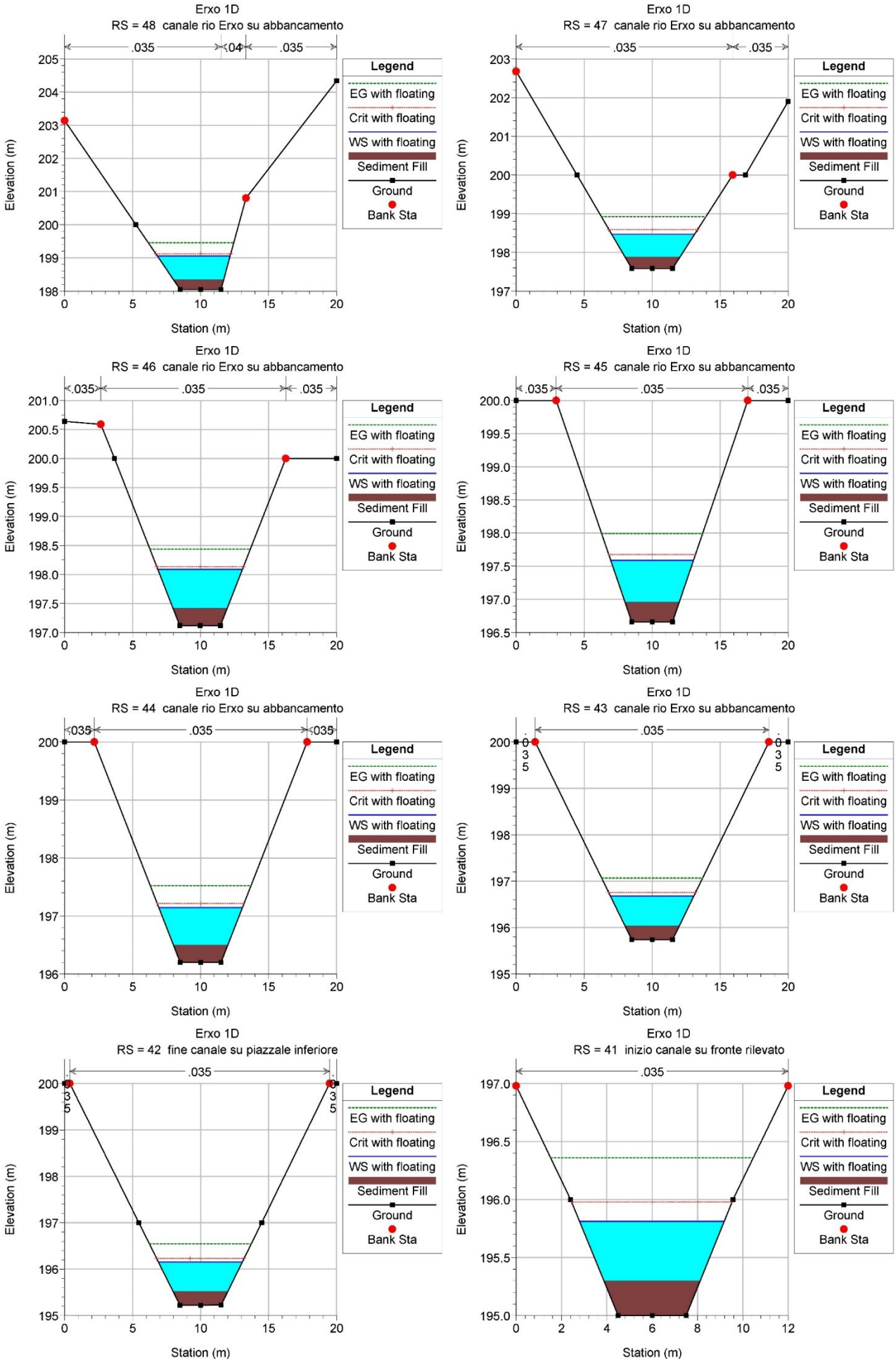

Erxo 1D
RS = 53 canale rio Erxo su abbancamento
.035
.035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Bank Sta

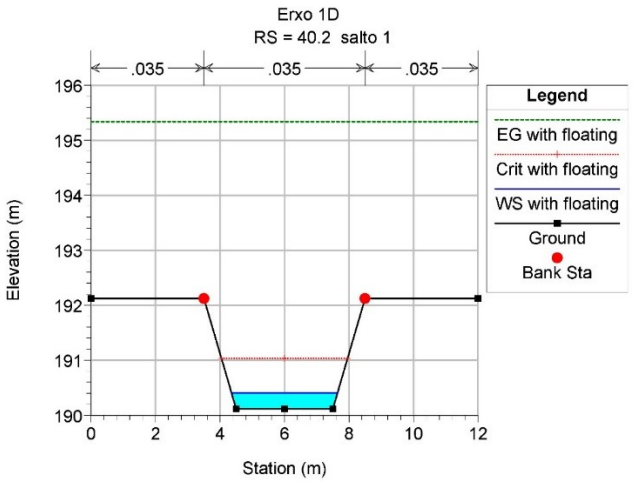

Erxo 1D
RS = 52 canale rio Erxo su abbancamento
.035
.035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Bank Sta

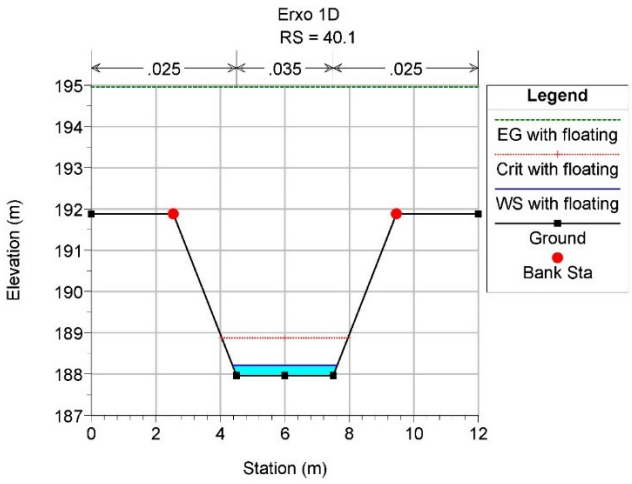

Erxo 1D
RS = 51 canale rio Erxo su abbancamento
.035
.035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Bank Sta

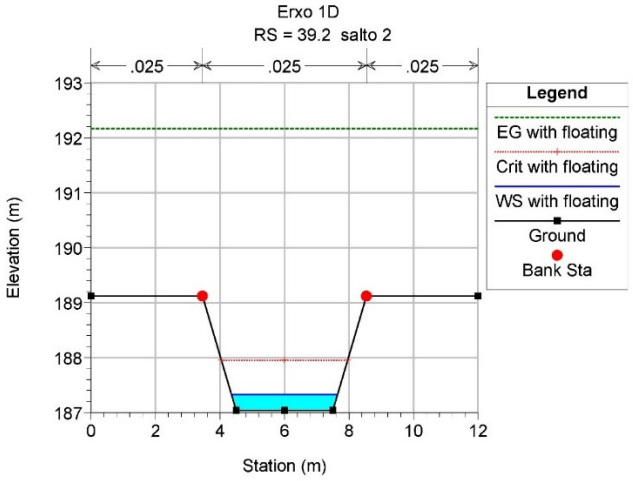

Erxo 1D
RS = 50 canale rio Erxo su abbancamento
.035
.035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Bank Sta

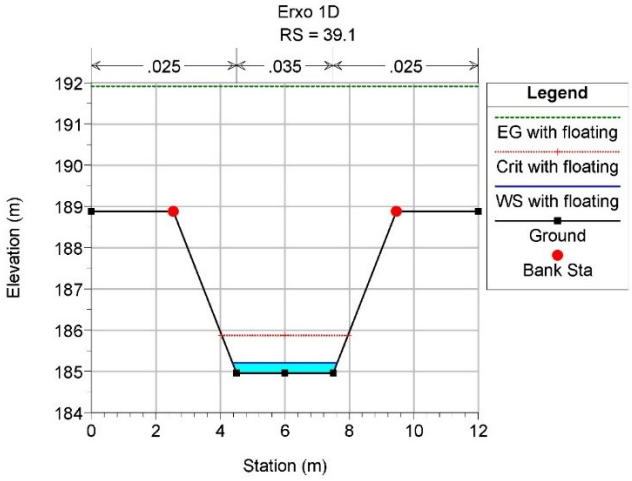

Erxo 1D
RS = 49 canale rio Erxo su abbancamento
.035
.035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Bank Sta

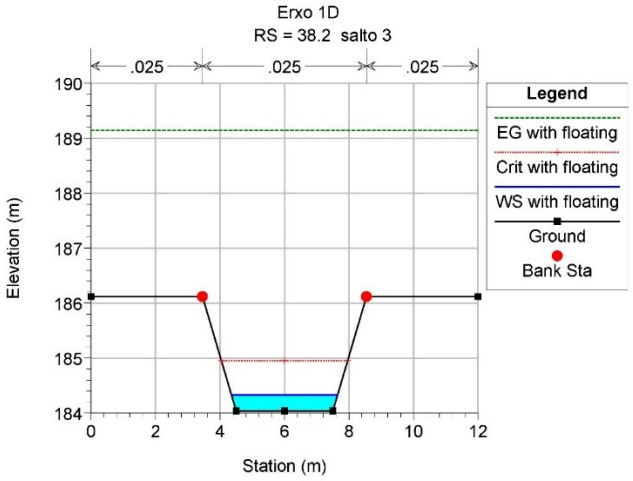

Erxo 1D
RS = 48 canale rio Erxo su abbancamento
.035
.04
.035
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Erxo 1D
RS = 47 canale rio Erxo su abbancamento
.035
.035
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Erxo 1D
RS = 46 canale rio Erxo su abbancamento
.035
.035
.035
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Erxo 1D
RS = 45 canale rio Erxo su abbancamento
.035
.035
.035
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Erxo 1D
RS = 44 canale rio Erxo su abbancamento
.035
.035
.035
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Erxo 1D
RS = 43 canale rio Erxo su abbancamento
.035
.035
.035
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Erxo 1D
RS = 42 fine canale su piazzale inferiore
.035
.035
.035
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Erxo 1D
RS = 41 inizio canale su fronte rilevato
.035
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

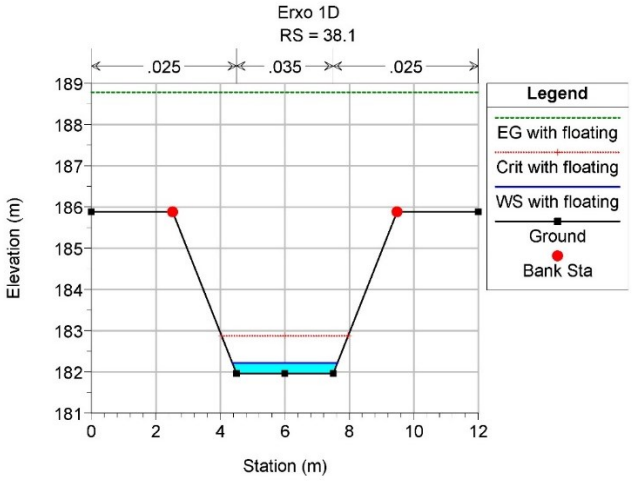

Erxo 1D
RS = 40.2 salto 1
.035
.035
.035
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

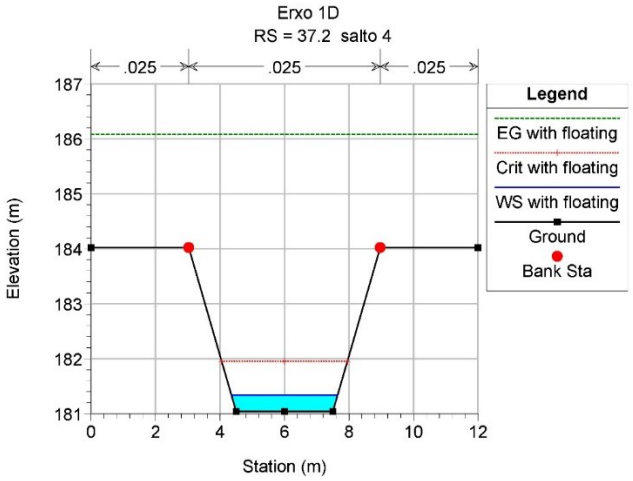

Erxo 1D
RS = 40.1
.025
.035
.025
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

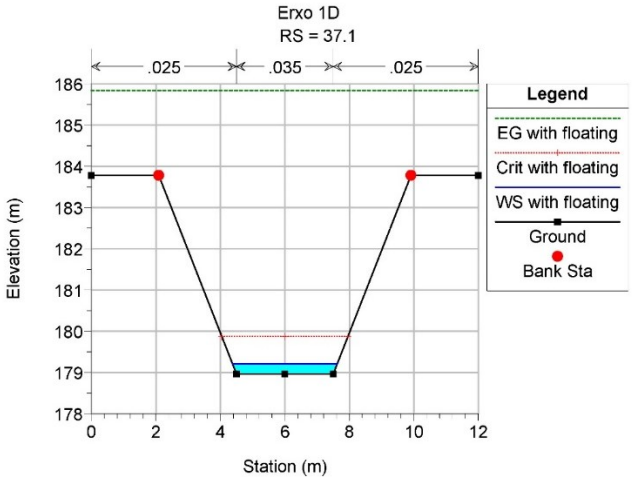

Erxo 1D
RS = 39.2 salto 2
.025
.025
.025
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

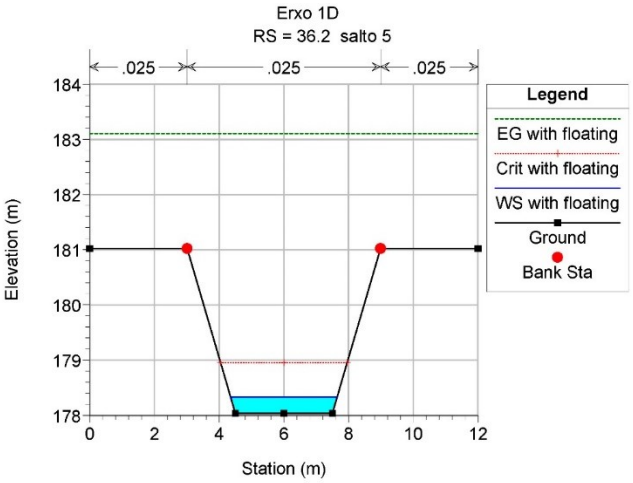

Erxo 1D
RS = 39.1
.025
.035
.025
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

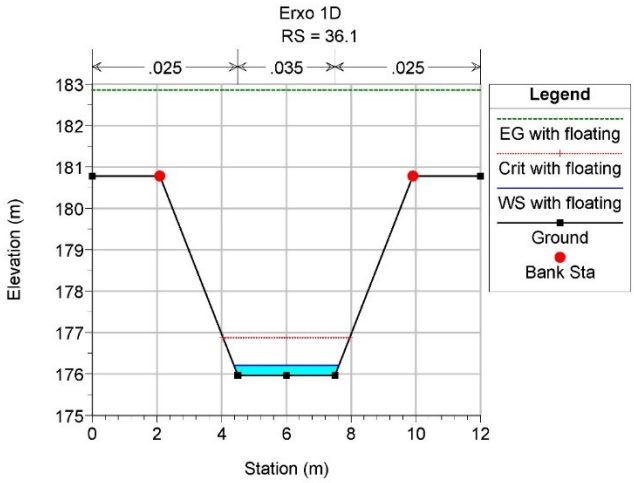

Erxo 1D
RS = 38.2 salto 3
.025
.025
.025
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

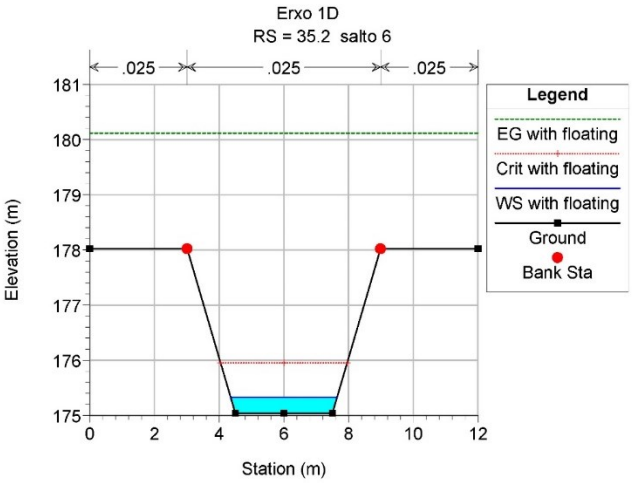

Erxo 1D
RS = 38.1
.025
.035
.025
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

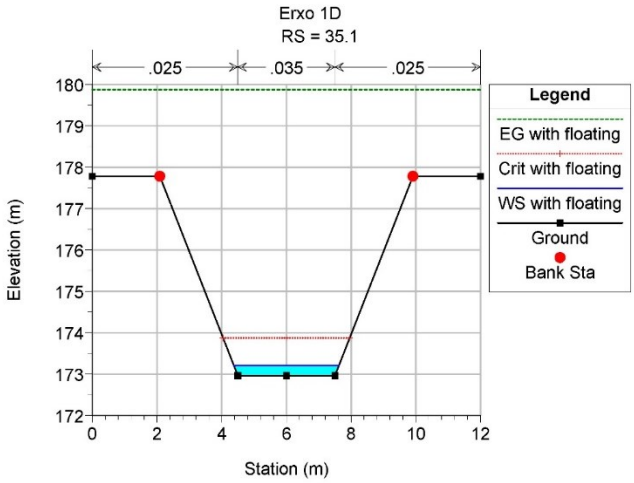

Erxo 1D
RS = 37.2 salto 4
.025
.025
.025
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

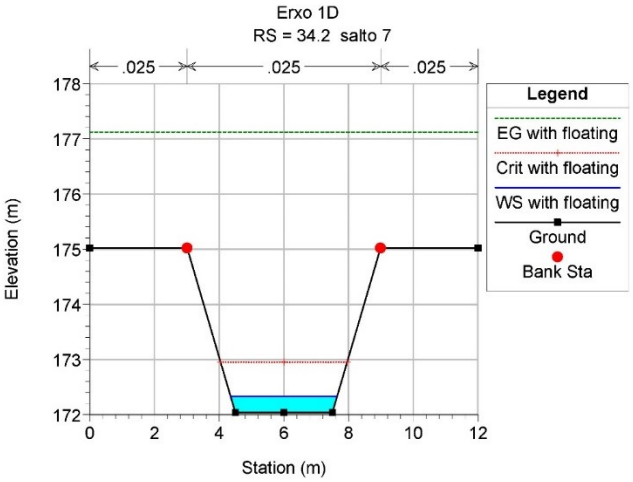

Erxo 1D
RS = 37.1
.025
.035
.025
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

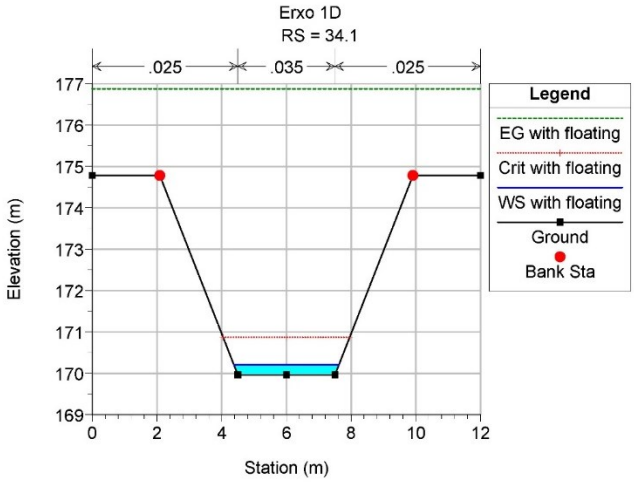

Erxo 1D
RS = 36.2 salto 5
.025
.025
.025
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta

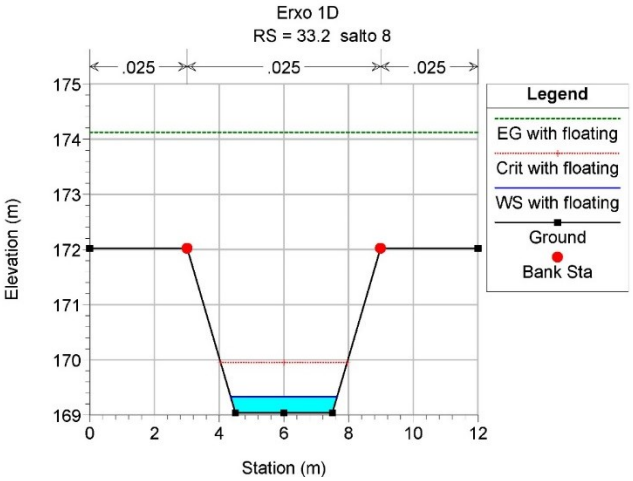

Erxo 1D
RS = 36.1
.025
.035
.025
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta

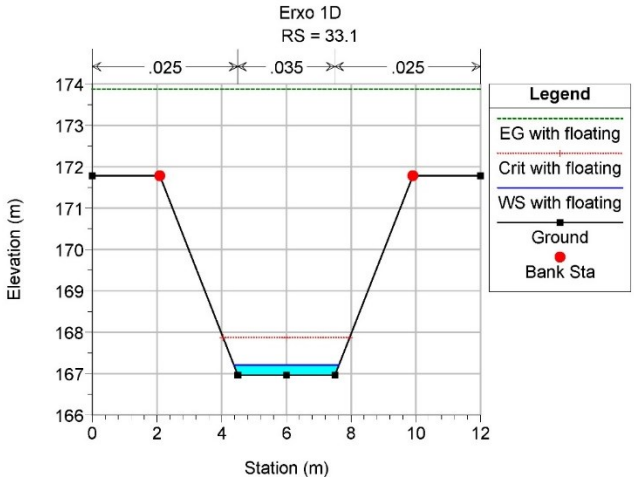

Erxo 1D
RS = 35.2 salto 6
.025
.025
.025
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta

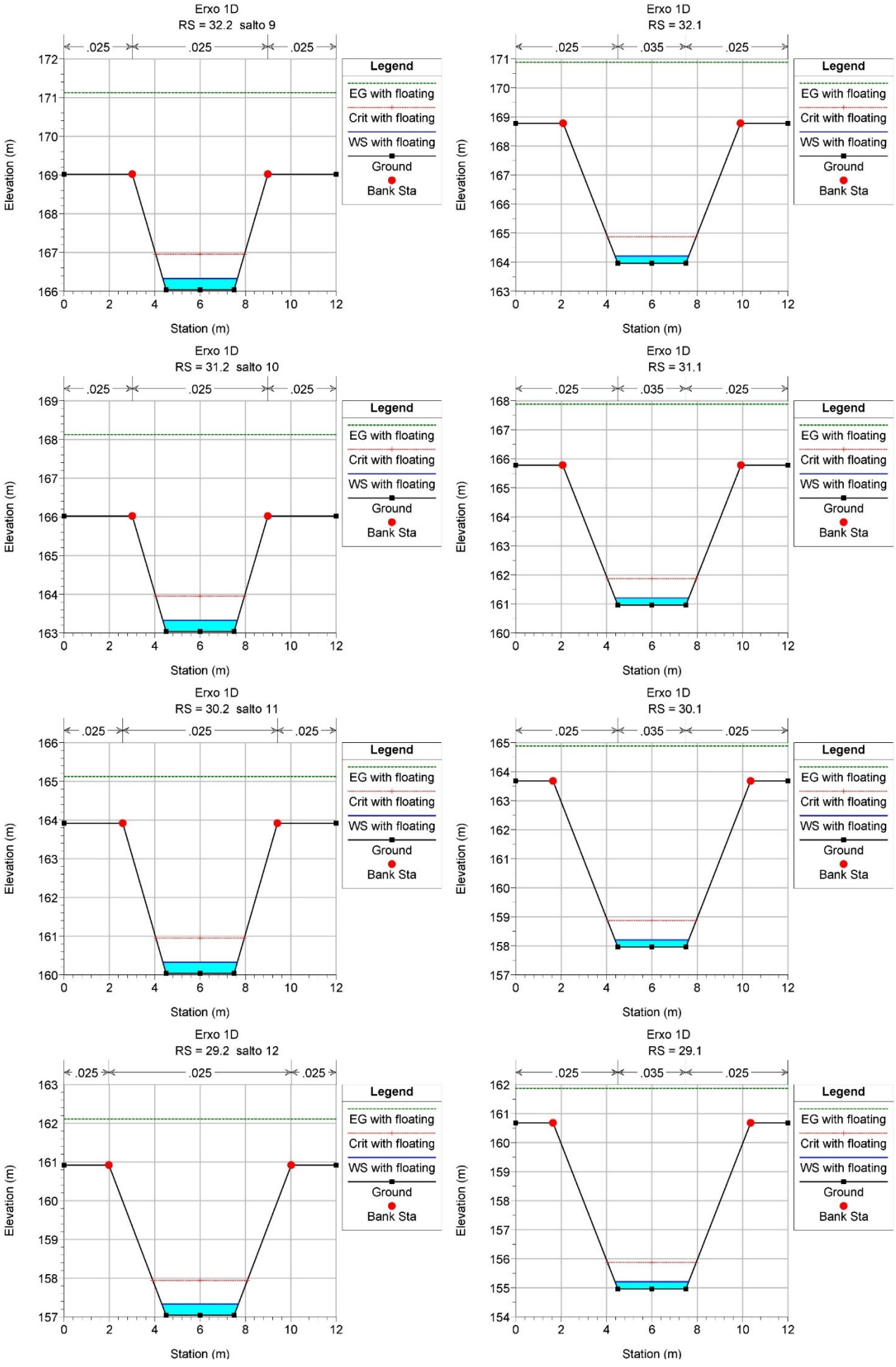

Erxo 1D
RS = 35.1
.025
.035
.025
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta

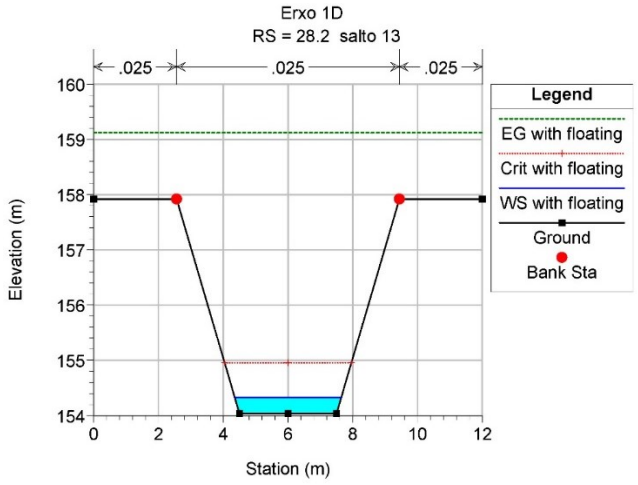

Erxo 1D
RS = 34.2 salto 7
.025
.025
.025
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta

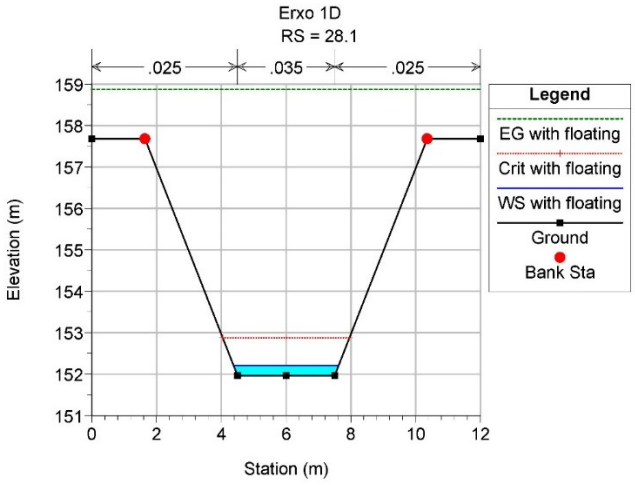

Erxo 1D
RS = 34.1
.025
.035
.025
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta

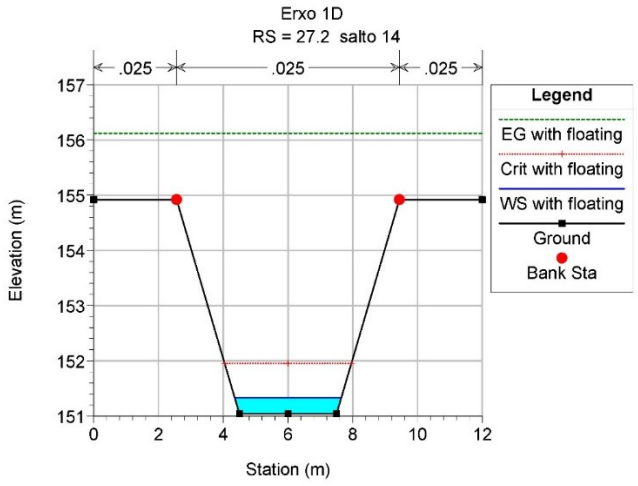

Erxo 1D
RS = 33.2 salto 8
.025
.025
.025
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta

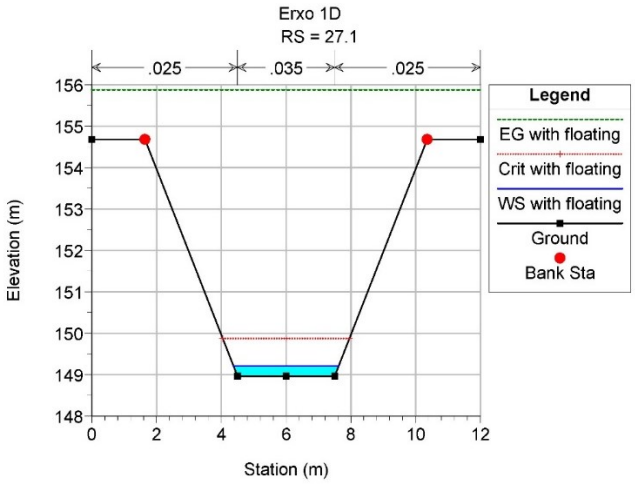

Erxo 1D
RS = 33.1
.025
.035
.025
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta

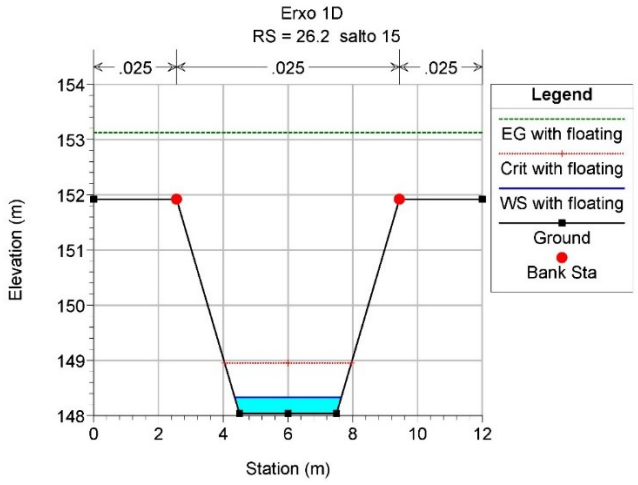

Erxo 1D
RS = 32.2 salto 9
.025 .025 .025
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta
Erxo 1D
RS = 32.1
.025 .035 .025
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta
Erxo 1D
RS = 31.2 salto 10
.025 .025 .025
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta
Erxo 1D
RS = 31.1
.025 .035 .025
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta
Erxo 1D
RS = 30.2 salto 11
.025 .025 .025
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta
Erxo 1D
RS = 30.1
.025 .035 .025
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta
Erxo 1D
RS = 29.2 salto 12
.025 .025 .025
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta
Erxo 1D
RS = 29.1
.025 .035 .025
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta

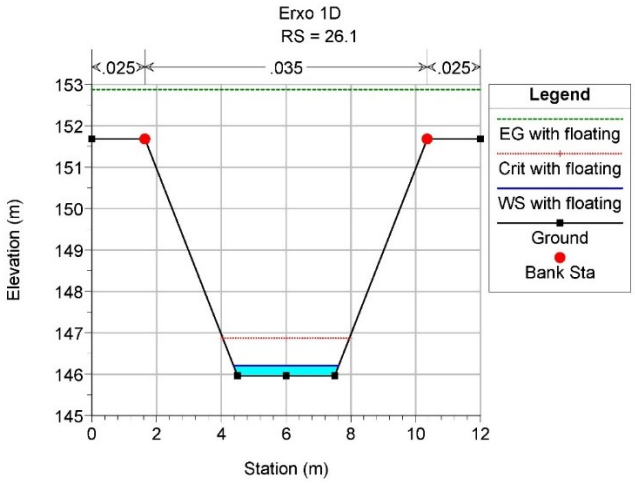

Erxo 1D
RS = 28.2 salto 13
.025
.025
.025
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta

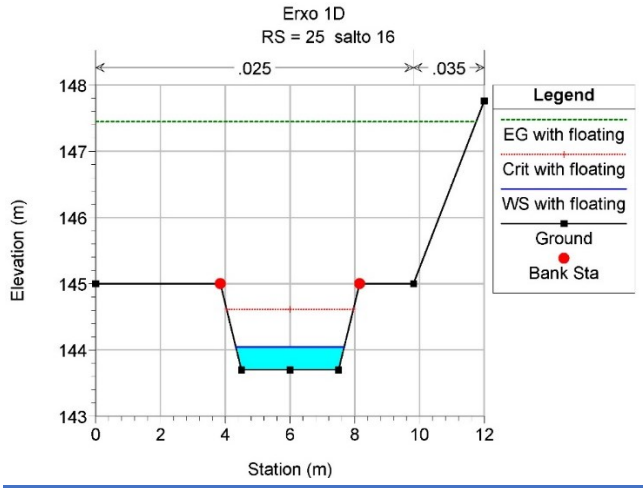

Erxo 1D
RS = 28.1
.025
.035
.025
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta

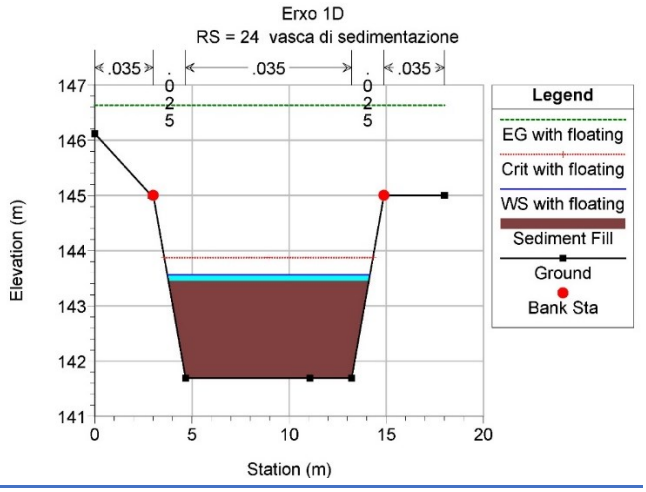

Erxo 1D
RS = 27.2 salto 14
.025
.025
.025
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta

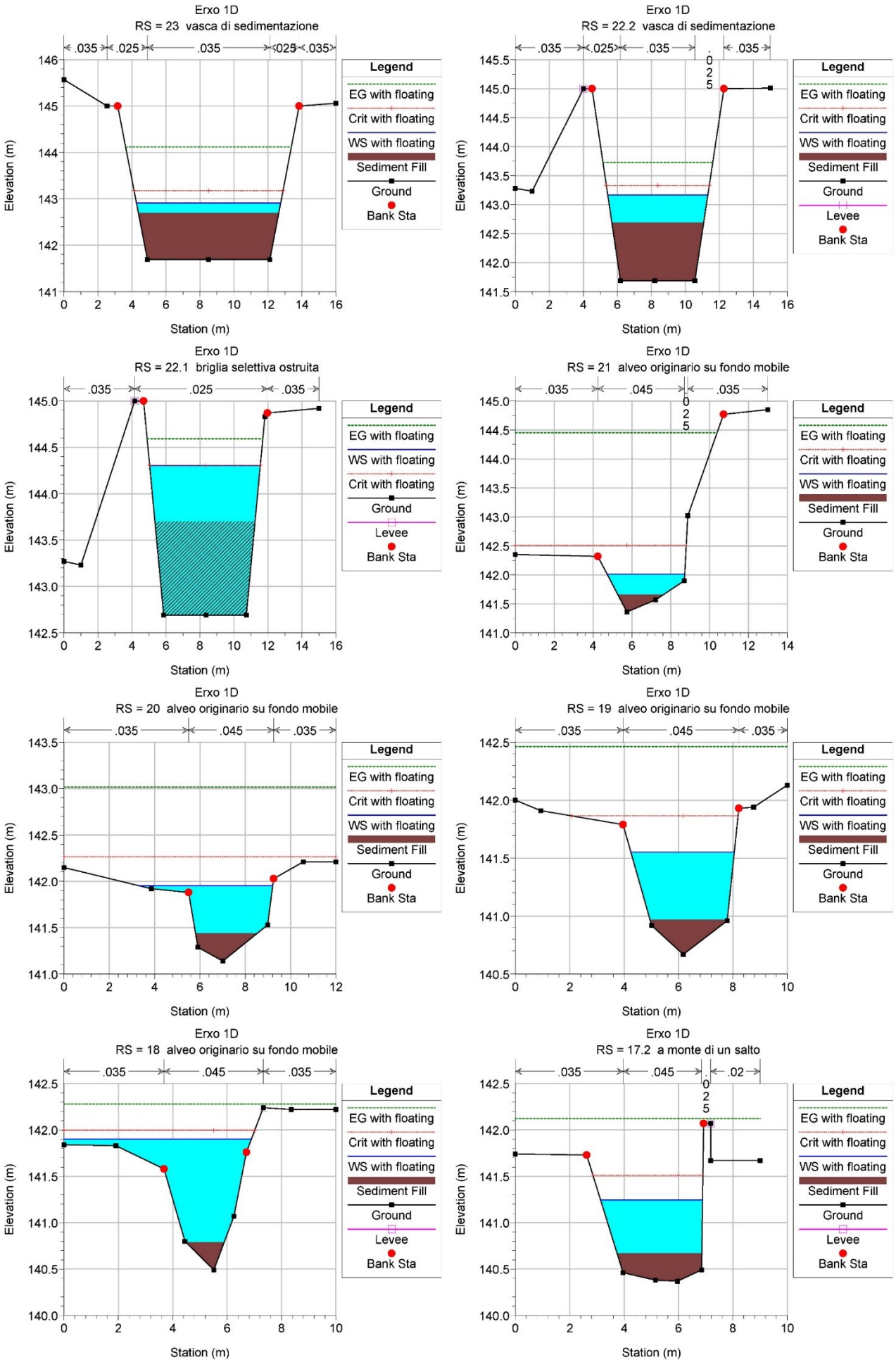

Erxo 1D
RS = 27.1
.025
.035
.025
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta

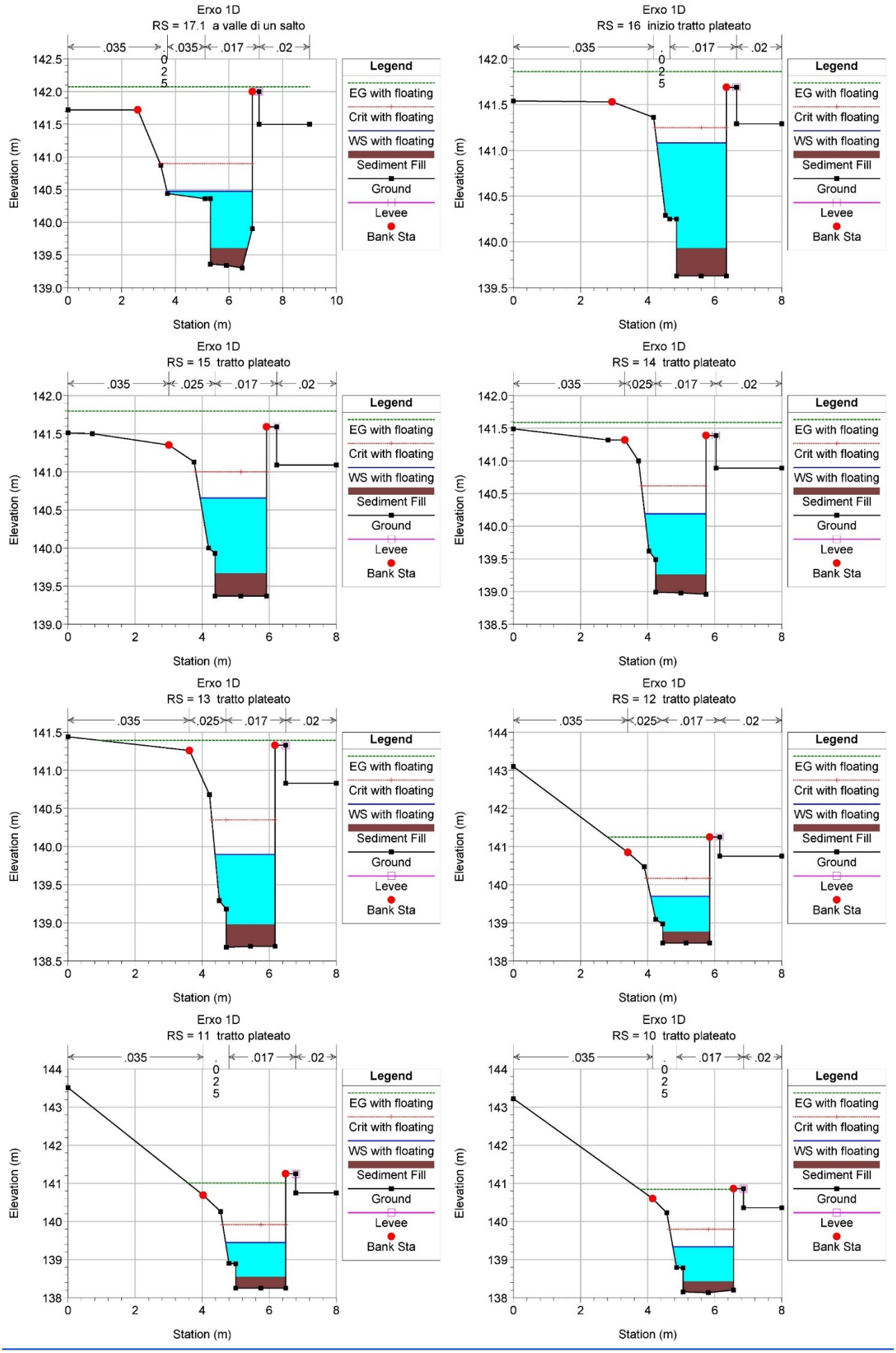

Erxo 1D
RS = 26.2 salto 15
.025
.025
.025
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta

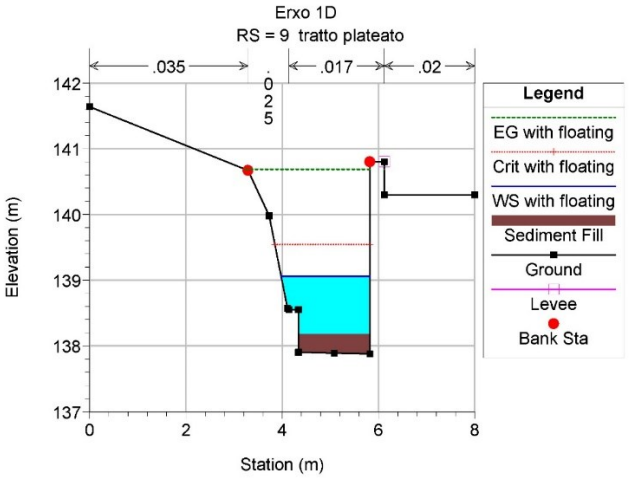

Erxo 1D
RS = 26.1
.025
.035
.025
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta

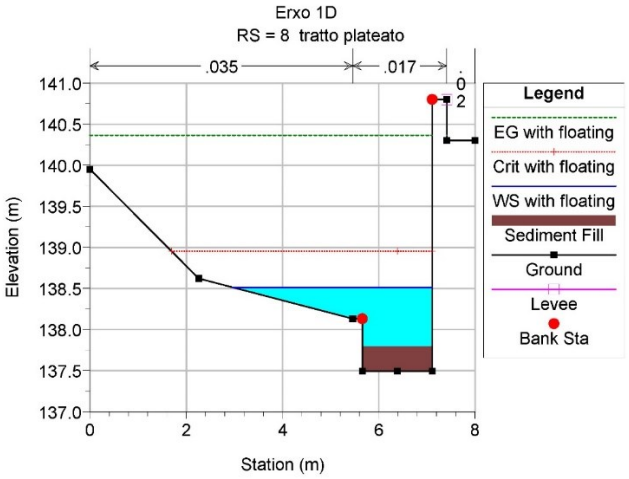

Erxo 1D
RS = 25 salto 16
.025
.035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Ground
Bank Sta

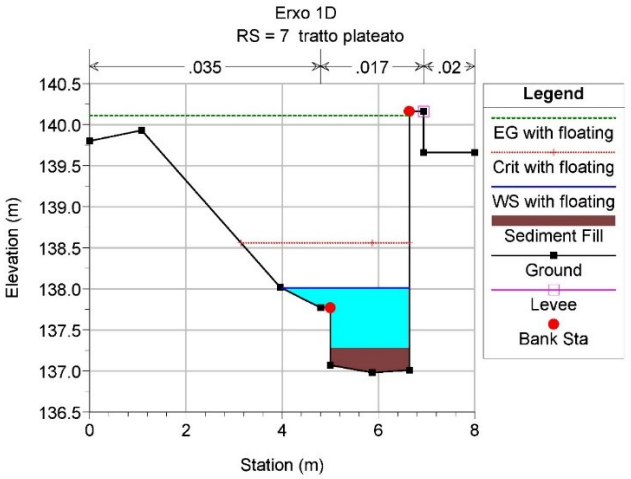

Erxo 1D
RS = 24 vasca di sedimentazione
.035
.035
.035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Bank Sta

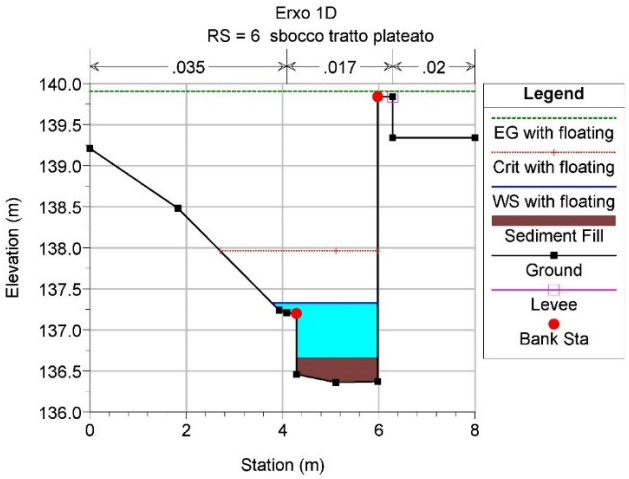

Erxo 1D
RS = 23 vasca di sedimentazione
.035 .025 .035 .025 .035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Bank Sta
Erxo 1D
RS = 22.2 vasca di sedimentazione
.035 .025 .035 .035
0 2 5
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Levee
Bank Sta
Erxo 1D
RS = 22.1 briglia selettiva ostruita
.035 .025 .035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
WS with floating
Crit with floating
Ground
Levee
Bank Sta
Erxo 1D
RS = 21 alveo originario su fondo mobile
.035 .045 .035
0 2 5
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Bank Sta
Erxo 1D
RS = 20 alveo originario su fondo mobile
.035 .045 .035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Bank Sta
Erxo 1D
RS = 19 alveo originario su fondo mobile
.035 .045 .035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Bank Sta
Erxo 1D
RS = 18 alveo originario su fondo mobile
.035 .045 .035
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Levee
Bank Sta
Erxo 1D
RS = 17.2 a monte di un salto
.035 .045 .02
0 2 5
Elevation (m)
Station (m)
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Levee
Bank Sta

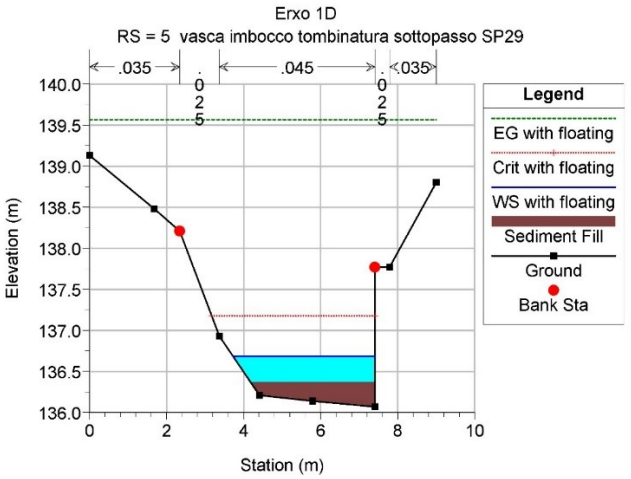

Erxo 1D
RS = 17.1 a valle di un salto
.035
.035
.017
.02
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Levee
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Erxo 1D
RS = 16 inizio tratto plateato
.035
.017
.02
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Levee
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Erxo 1D
RS = 15 tratto plateato
.035
.025
.017
.02
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Levee
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Erxo 1D
RS = 14 tratto plateato
.035
.025
.017
.02
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Levee
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Erxo 1D
RS = 13 tratto plateato
.035
.025
.017
.02
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Levee
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Erxo 1D
RS = 12 tratto plateato
.035
.025
.017
.02
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Levee
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Erxo 1D
RS = 11 tratto plateato
.035
.017
.02
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Levee
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Erxo 1D
RS = 10 tratto plateato
.035
.017
.02
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Levee
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

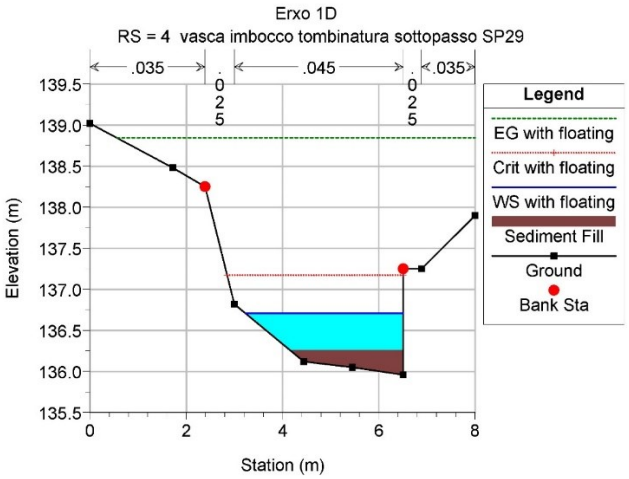

Erxo 1D
RS = 9 tratto plateato
.035
.017
.02
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Levee
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

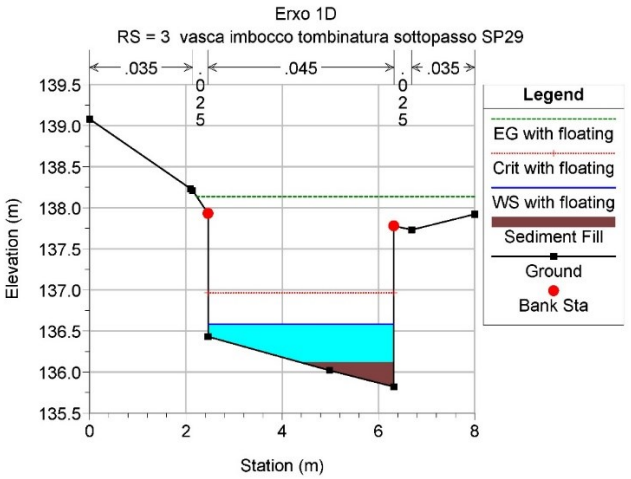

Erxo 1D
RS = 8 tratto plateato
.035
.017
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Levee
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

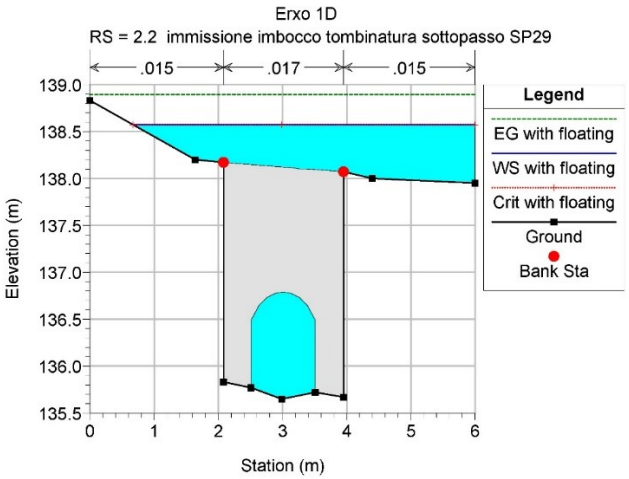

Erxo 1D
RS = 7 tratto plateato
.035
.017
.02
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Levee
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

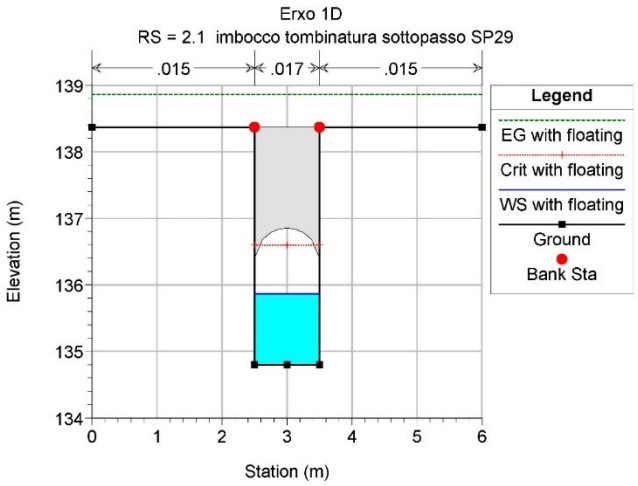

Erxo 1D
RS = 6 sbocco tratto plateato
.035
.017
.02
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Levee
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

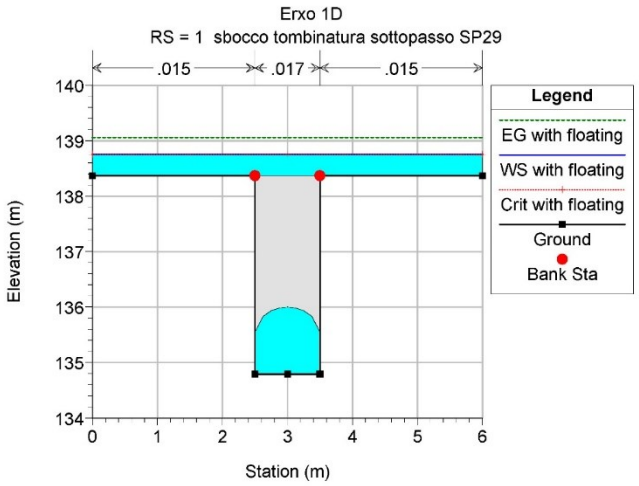

Erxo 1D
RS = 5 vasca imbocco tombinatura sottopasso SP29
.035
.045
.035
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)


Erxo 1D
RS = 4 vasca imbocco tombinatura sottopasso SP29
.035
.045
.035
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)


Erxo 1D
RS = 3 vasca imbocco tombinatura sottopasso SP29
.035
.045
.035
Legend
EG with floating
Crit with floating
WS with floating
Sediment Fill
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)


Erxo 1D
RS = 2.2 immissione imbocco tombinatura sottopasso SP29
.015
.017
.015
Legend
EG with floating
WS with floating
Crit with floating
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)





4.3.3 Dati geometrici e idraulici derivati dalla modellazione

Tabella 4.5 – Estratto dei principali dati geometrici e idraulici per l'evento con T_R = 200 anni.

corso d'acqua	sezione	Q_R [m³/s]	fondo alveo [m]	pelo libero [m]	profondità critica [m]	carico energetico [m]	velocità media [m/s]	area bagnata [m²]	Fr
rio Erxo	60	8.92	205.20	205.82	205.82	206.07	2.46	4.21	1.00
”	59.5	8.92	204.80	206.38	206.38	207.02	3.55	2.51	0.90
”	59.4	8.92	204.11	204.82	205.38	206.88	6.36	1.40	2.41
”	59.3	8.92	203.77	204.37	204.97	206.79	6.90	1.29	2.85
”	59.2	8.92	203.42	204.01	204.64	206.69	7.26	1.23	3.03
”	59.1	8.92	201.10	201.92	202.62	205.33	8.18	1.09	2.88
”	58	8.92	201.25	201.55	202.02	204.28	7.31	1.22	4.42
”	57	8.92	201.02	201.48	201.79	202.55	4.59	1.95	2.29
”	56	8.92	200.79	201.38	201.55	201.95	3.37	2.65	1.52
”	55	8.92	200.66	201.31	201.41	201.76	2.97	3.01	1.28
”	54	8.92	200.42	201.14	201.19	201.52	2.72	3.28	1.11
”	53	8.92	200.19	200.92	200.97	201.30	2.75	3.24	1.13
”	52	8.92	199.96	200.63	200.72	201.07	2.94	3.05	1.23
”	51	8.92	199.73	200.42	200.50	200.83	2.85	3.18	1.17
”	50	8.92	199.27	199.97	200.04	200.38	2.82	3.16	1.17
”	49	8.92	198.81	199.52	199.58	199.91	2.78	3.20	1.15
”	48	8.92	198.35	199.05	199.12	199.45	2.80	3.18	1.16
”	47	8.92	197.88	198.47	198.59	198.92	2.99	2.98	1.37
”	46	8.92	197.42	198.09	198.14	198.44	2.61	3.41	1.13
”	45	8.92	196.96	197.59	197.68	197.99	2.81	3.17	1.24
”	44	8.92	196.50	197.15	197.22	197.52	2.72	3.28	1.19
”	43	8.92	196.04	196.68	196.76	197.07	2.75	3.25	1.20
”	42	8.92	195.52	196.15	196.23	196.54	2.77	3.22	1.23
”	41	8.92	195.30	195.81	195.98	196.36	3.28	2.72	1.60
”	40.2	8.92	190.12	190.41	191.03	195.34	9.83	0.91	5.98
”	40.1	8.92	187.96	188.21	188.87	194.96	11.51	0.77	7.52
”	39.2	8.92	187.04	187.33	187.95	192.17	9.74	0.92	5.89
”	39.1	8.92	184.96	185.21	185.87	191.92	11.47	0.78	7.49
”	38.2	8.92	184.04	184.33	184.95	189.14	9.71	0.92	5.87
”	38.1	8.92	181.96	182.21	182.87	188.78	11.35	0.79	7.38
”	37.2	8.92	181.04	181.33	181.95	186.08	9.65	0.92	5.81
”	37.1	8.92	178.96	179.21	179.87	185.84	11.40	0.78	7.42

corso d'acqua	sezione	Q_R [m³/s]	fondo alveo [m]	pelo libero [m]	profondità critica [m]	carico energetico [m]	velocità media [m/s]	area bagnata [m²]	Fr
”	36.2	8.92	178.04	178.33	178.95	183.10	9.67	0.92	5.84
”	36.1	8.92	175.96	176.21	176.87	182.86	11.42	0.78	7.44
”	35.2	8.92	175.04	175.33	175.95	180.12	9.69	0.92	5.85
”	35.1	8.92	172.96	173.21	173.87	179.87	11.43	0.78	7.45
”	34.2	8.92	172.04	172.33	172.95	177.12	9.69	0.92	5.85
”	34.1	8.92	169.96	170.21	170.87	176.87	11.43	0.78	7.45
”	33.2	8.92	169.04	169.33	169.95	174.12	9.69	0.92	5.86
”	33.1	8.92	166.96	167.21	167.87	173.88	11.44	0.78	7.45
”	32.2	8.92	166.04	166.33	166.95	171.12	9.69	0.92	5.86
”	32.1	8.92	163.96	164.21	164.87	170.88	11.44	0.78	7.45
”	31.2	8.92	163.04	163.33	163.95	168.13	9.70	0.92	5.86
”	31.1	8.92	160.96	161.21	161.87	167.88	11.44	0.78	7.46
”	30.2	8.92	160.04	160.33	160.95	165.13	9.70	0.92	5.85
”	30.1	8.92	157.96	158.21	158.87	164.88	11.44	0.78	7.46
”	29.2	8.92	157.04	157.33	157.94	162.11	9.68	0.92	5.92
”	29.1	8.92	154.96	155.21	155.87	161.86	11.42	0.78	7.44
”	28.2	8.92	154.04	154.33	154.95	159.12	9.69	0.92	5.85
”	28.1	8.92	151.96	152.21	152.87	158.87	11.43	0.78	7.45
”	27.2	8.92	151.04	151.33	151.95	156.12	9.69	0.92	5.85
”	27.1	8.92	148.96	149.21	149.87	155.88	11.43	0.78	7.45
”	26.2	8.92	148.04	148.33	148.95	153.12	9.69	0.92	5.86
”	26.1	8.92	145.96	146.21	146.87	152.87	11.43	0.78	7.45
”	25	8.92	143.70	144.04	144.61	147.44	8.17	1.09	4.56
”	24	8.92	143.45	143.56	143.87	146.63	7.76	1.15	7.46
”	23	8.92	142.69	142.91	143.18	144.12	4.88	1.83	3.35
”	22.2	8.92	142.69	143.17	143.33	143.73	3.32	2.69	1.57
”	22.1	8.92	143.70	144.30	144.30	144.59	2.38	3.75	1.00
”	21	8.17	141.66	142.01	142.51	144.45	6.92	1.18	4.06
”	20	8.17	141.44	141.95	142.27	143.02	4.60	1.84	2.14
”	19	8.17	140.97	141.55	141.87	142.46	4.23	1.93	1.90
”	18	8.17	140.79	141.90	141.99	142.28	2.80	3.21	0.94
”	17.2	8.17	140.67	141.24	141.51	142.12	4.15	1.97	1.83
”	17.1	8.17	139.60	140.47	140.90	142.07	5.60	1.46	2.64
”	16	8.17	139.93	141.08	141.25	141.86	3.91	2.09	1.25
”	15	8.17	139.67	140.66	141.00	141.80	4.73	1.73	1.62
”	14	8.17	139.26	140.19	140.62	141.59	5.24	1.56	1.81
”	13	8.17	138.98	139.90	140.35	141.39	5.42	1.51	1.88
”	12	8.17	138.77	139.69	140.17	141.25	5.52	1.48	1.92
”	11	8.17	138.55	139.45	139.92	141.01	5.54	1.47	1.95
”	10	8.17	138.43	139.34	139.79	140.84	5.43	1.50	1.90
”	9	8.17	138.18	139.06	139.54	140.69	5.66	1.44	2.04
”	8	8.17	137.79	138.51	138.95	140.37	6.51	1.60	2.45
”	7	8.17	137.28	138.01	138.56	140.11	6.54	1.34	2.44
”	6	8.17	136.66	137.33	137.96	139.91	7.15	1.17	2.80
”	5	8.17	136.37	136.68	137.18	139.57	7.52	1.09	4.42
”	4	8.17	136.26	136.71	137.17	138.84	6.47	1.26	3.33
”	3	8.17	136.12	136.58	136.96	138.14	5.52	1.48	2.85
”	2.2	8.17	135.65	138.57	138.57	138.89	2.14	3.39	0.47

corso d'acqua	sezione	Q_R [m³/s]	fondo alveo [m]	pelo libero [m]	profondità critica [m]	carico energetico [m]	velocità media [m/s]	area bagnata [m²]	Fr
"	2.1	8.17	134.80	135.87	136.60	138.86	7.67	1.07	2.37
"	1	8.17	134.79	138.75	138.75	139.06	2.14	3.39	0.39

5 CONCLUSIONI

Sulla base dei dati riportati in Tabella 4.5 e degli elaborati grafici S02, S03 e S04 si rileva che:

- il nuovo canale del rio Erxo, nel tratto collocato all'interno dell'abbancamento e immediatamente a valle dello stesso, nel segmento d'alveo che comprende la vasca di sedimentazione e la briglia selettiva in progetto, consente il deflusso delle acque in occasione degli eventi di piena con tempo di ritorno duecentennale;
- tenuto conto che il bacino idrografico può considerarsi mediamente dissestato e che il valore minimo del franco idraulico è pari a 70 cm (sezione 22.1, coincidente con la briglia selettiva considerata completamente ostruita), le nuove opere rispettano le prescrizioni stabilite dall'allegato 2 al R.R. n. 3/2011 per argini e difese spondali di tratti corsi d'acqua appartenenti al reticolo di secondo livello;
- sebbene non sia stato quantificato sperimentalmente il contributo dei materiali in sospensione e di quelli flottanti, il segmento d'alveo derivante da reinalveazione consente lo smaltimento di portate liquide incrementate del 20% (tra le sezioni 60 e 41);
- nel tratto d'alveo non interessato da nuove opere si osserva insufficienza idraulica in corrispondenza delle sezioni 20 (tirante al sormonto arginale di 12 cm) e 18 (tirante al sormonto arginale di 7 cm per configurazione di argine infinito);
- la tombinatura di sottopasso alla S.P. n. 29 risulta gravemente insufficiente a smaltire la portata di progetto, con fenomeni di rigurgito in corrente lenta, sormonto dell'estradosso della tombinatura, transito in pressione e laminazione sulla superficie viaria.

Sulla base delle criticità rilevate, comunque localizzate all'esterno dell'area di intervento, a scopo indicativo e di primo dimensionamento, si è provveduto a modificare la geometria della tombinatura che interessa la viabilità, ipotizzando l'adeguamento dell'opera mediante la demolizione del manufatto esistente e la realizzazione di un attraversamento a sezione rettangolare, con larghezza di 1.60 m e dislivello tra fondo alveo e intradosso dell'impalcato pari a 2 m (cfr. P05 – planimetria stato di progetto).
La configurazione proposta consente lo smaltimento delle portate di progetto con franco idraulico minimo di 1.10 m in corrispondenza delle sezioni 2.2 (imbocco) e 2.1 (centro strada) (cfr. S04 – sezioni idrauliche da 28.1 a 1 e Figura 6.1).
In conclusione, sulla base degli esiti dello studio idraulico è possibile affermare che le opere in progetto sono compatibili da un punto di vista idraulico e normativo con le disposizioni stabilite dal R.R. n. 3/2011.

6 ALLEGATI

I seguenti elaborati, che si allegano alla presente relazione, costituiscono parte integrante e sostanziale documento in epigrafo:

- P01 – planimetria stato attuale (scala 1:500);
- P02 – planimetria stato di progetto (scala 1:500);
- P06 – bacino idrografico su carta tecnica regionale (scala 1:5.000);
- S02 – sezioni idrauliche da 60 a 43 (scala 1:100);
- S03 – sezioni idrauliche da 42 a 28.2 (scala 1:100);
- S04 – sezioni idrauliche da 28.1 a 1 (scala 1:100);
- A01 – documentazione fotografica.

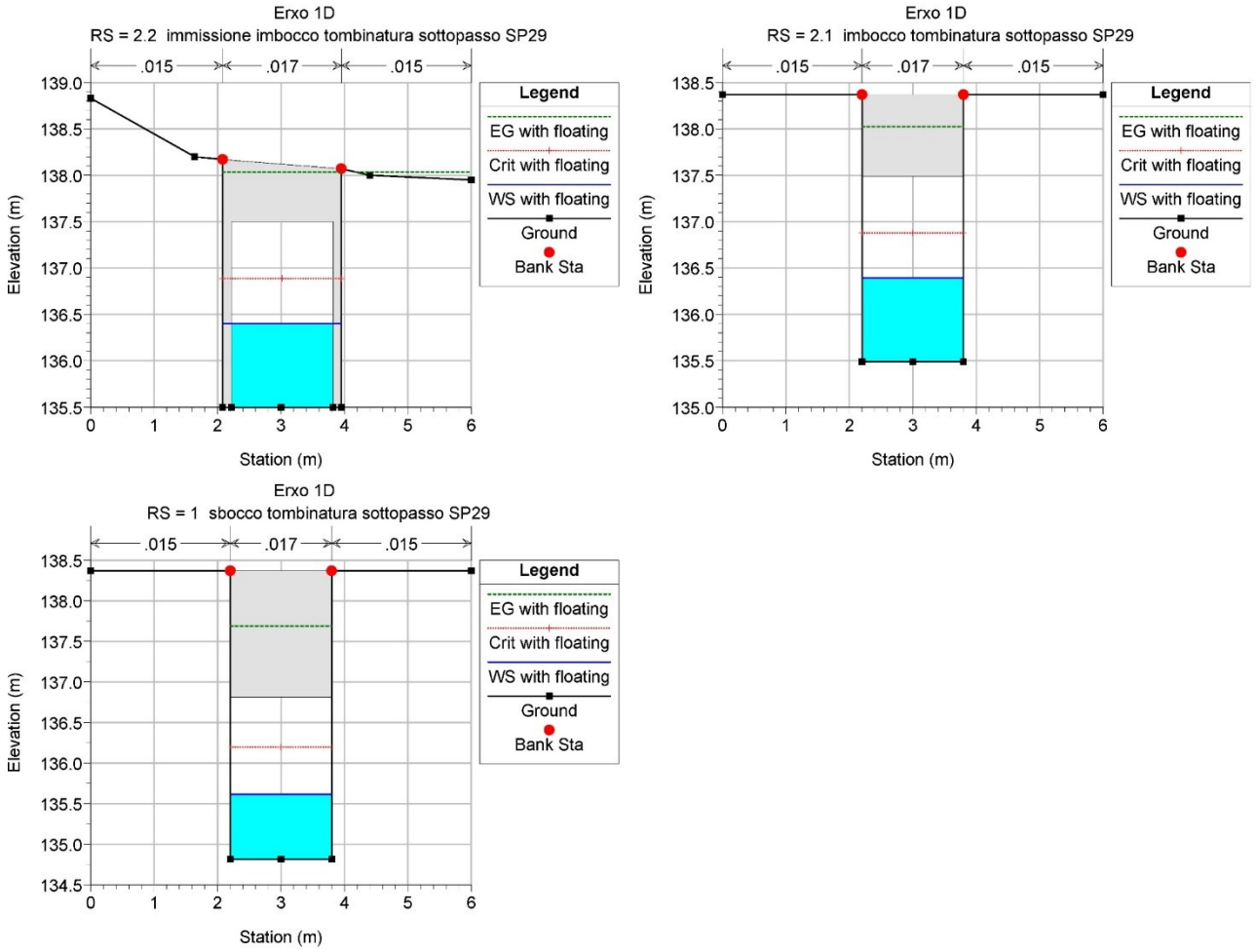


Figura 6.1 – Estratto dal codice di calcolo delle sezioni idrauliche situate in corrispondenza della tombinatura di sottopasso alla S.P. n. 29 del Colle di Cadibona nella configurazione geometrica successiva all'adeguamento dell'opera esistente mediante variazione della geometria e incremento della sezione utile al deflusso.

Savona, aprile 2024.

I tecnici progettisti,

geol. Massimo BOCHIOLO ing. Enrico MASSA