



“Area di laminazione di Inverigo – interventi idraulici
e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo,
Nibionno e Veduggio con Colzano”

APPALTO INTEGRATO - PROGETTO ESECUTIVO

M-G-019

INDICE

1. PREMESSA.....	2
2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE.....	3
3. STUDI PREGRESSI E MATERIALE DISPONIBILE	5
4. VERIFICHE IDRAULICHE	6
4.1 IL CODICE DI CALCOLO HEC-RAS.....	6
4.2 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO MATEMATICO	9
4.2.1 <i>Descrizione geometrica del corso del corso d'acqua</i>	9
4.2.2 <i>Coefficienti di scabrezza</i>	14
4.3 SCENARI SIMULATI E CONDIZIONI AL CONTORNO.....	15
4.4 ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI.....	19
4.4.1 <i>Scenario Attuale B_bis</i>	19
4.4.2 <i>Scenario di Progetto B_bis (assetto transitorio)</i>	22
4.4.3 <i>Scenario di Progetto C (assetto definitivo)</i>	26
5. VERIFICHE ALLA FILTRAZIONE DEL RILEVATO ARGINALE.....	36
5.1 SCELTA DELLA SEZIONE DA SOTTOPORRE A VERIFICA.....	36
5.2 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO DI FILTRAZIONE	36
5.2.1 <i>Caratteristiche del modello matematico</i>	36
5.2.2 <i>Schematizzazione geometrica delle sezione</i>	37
5.2.3 <i>Condizioni al contorno</i>	38
5.3 ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI.....	38
5.4 VERIFICHE AL SIFONAMENTO.....	39
5.4.1 <i>Verifica al sifonamento con il metodo del gradiente critico</i>	39
5.4.2 <i>Verifica delle velocità limite</i>	40
6. CONCLUSIONI.....	42

ALLEGATO 1: Sezioni di calcolo e livelli di piena nei diversi scenari

ALLEGATO 2: Relazione idrologico-idraulica e integrazioni del Progetto Definitivo

ALLEGATO 3: Studio idrologico-idraulico dell'evento alluvionale occorso sul Lambro nel Novembre 2014 in corrispondenza dell'area di laminazione di Inverigo (CO)

1. PREMESSA

In accordo con quanto previsto dall'art. 33 del DPR 207/2010 il presente Il presene elaborato costituisce la Relazione Idrologica ed Idraulica del Progetto Esecutivo delle "OPERE DI REGOLAZIONE DELLE PORTATE PREVISTE NELL'INTERVENTO "AREA DI LAMINAZIONE DI INVERIGO – INTERVENTI IDRAULICI E DI RIQUALIFICAZIONE FLUVIALE NEI TERRITORI DI INVERIGO, NIBIONNO E VEDUGGIO CON COLZANO", redatto sulla scorta del Progetto Definitivo approvato dall'amministrazione appaltante con Verbale di Conferenza dei Servizi del 23 dicembre 2014.

Per non appesantire la trattazione, nella presente relazione vengono descritti solamente gli approfondimenti idraulici svolti nel presente Progetto Esecutivo lasciando come allegato la relazione idrologica e idraulica del Progetto Definitivo che contiene le valutazioni idrologiche, l'analisi storica degli eventi e le informazioni topografiche prese a riferimento per il dimensionamento e la verifica idraulica idraulico delle opere oggetto della presente progettazione Esecutiva.

Non avendo a disposizione il modello matematico implementato nel Progetto Definitivo, per la redazione del Progetto Esecutivo si è reso necessario ricostruire il medesimo modello, sia per quanto riguarda la geometria che per le condizioni al contorno, al fine di poter effettuare tutti gli approfondimenti idraulici necessari per la progettazione delle opere. In particolare gli approfondimenti idraulici condotti nell'ambito della presente progettazione definitiva riguardano essenzialmente:

- Modellazione idraulica dello scenario attuale che tiene in considerazione l'adeguamento idraulico del cavo Diotti già realizzato.
- Modellazione idraulica per il dimensionamento e la verifica delle opere in progetto nello scenario idrologico attuale e nell'ipotesi di realizzazione delle opere previste dal PAI.
- Modellazione idraulica per il dimensionamento e la verifica dell'opera di sfioro.
- Verifiche al sifonamento dei nuovi rilevati arginali.

2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE

Dal punti di vista territoriale il bacino del fiume Lambro può essere suddiviso sostanzialmente in quattro parti:

- la prima parte del bacino (*Lago*), situata a monte del Lago di Pusiano, presenta numerosi piccoli corsi d'acqua a regime torrentizio, con pendenze generalmente elevate (torrenti Lambretto, Valle di Rezzago, Foce, Ravella, Bistonda, Bova). Al termine di questa parte il fiume diminuisce la sua pendenza sino a confluire nel lago di Pusiano dove deposita notevoli quantità di detriti che ne caratterizzano il conoide; in tale porzione di bacino può anche essere incluso il bacino afferente al lago di Alserio che ha un comportamento simile al lago di Pusiano;
- la seconda parte (*Lambro naturale*), compresa tra il Lago di Pusiano e il comune di Villasanta (a monte del comune di Monza), presenta versanti acclivi o mediamente acclivi ed è caratterizzato da urbanizzazione ridotta; in tale porzione del bacino sono presenti alcuni affluenti, tutti localizzati in sinistra idraulica, di cui i principali sono: Bevera di Molteno, Bevera di Veduggio, Bevera di Renate, Roggia Brovada, Roggia Pegorino e Roggia Molgorana;
- la terza parte (*Lambro urbano*), compreso tra il comune di Monza e la periferia sud-est di Milano, fino alla confluenza del Deviatore Redefossi (limite del tratto oggetto della presente relazione), presenta versanti pressoché pianeggianti ed un'elevata urbanizzazione; il contributo di tale porzione di bacino è interamente derivante dagli scaricatori delle reti fognarie comunali e consortili;
- la quarta parte del bacino (*Lambro irriguo*), compreso tra la confluenza con il Deviatore Redefossi e il fiume Po, è costituito da terreni pianeggianti nei quali è presente un vasto reticolo irriguo; all'interno di tale bacino vi è la confluenza tra il Lambro e il Lambro Meridionale.

Dall'uscita dal lago di Pusiano il corso d'acqua assume un andamento con direzione prevalente nord-sud e giunge a Villasanta, prima di attraversare il Parco di Monza, attraversando un fondovalle prevalentemente incassato. La zona che si estende dal Parco di Monza a Sesto San Giovanni fino alle porte di Milano è caratterizzata da un corso ricco di anse e meandri, incassato nell'alveo ordinario dalla serie quasi continua di insediamenti circostanti, ma immerso in un alveo di massima piena ampio e coronato da un terrazzamento continuo ed evidente soprattutto in sponda destra. In questa zona le sponde del Lambro sono quasi ininterrottamente cinte da insediamenti abitativi e produttivi, per la maggior parte edificati entro l'alveo di piena e quindi in aree sottratte alla naturale espansione del fiume. A questa parte ne segue una, ad Est di Milano, in cui il fiume scorre con pendenza modesta in campagna, in un alveo ordinario tendenzial-

mente rettilineo, contenuto in arginature artificiali che in talune zone ne impediscono l'espansione nelle aree circostanti.

L'area oggetto di intervento è collocata poco a valle del "sistema dei laghi" costituito dal lago di Pusiano (il principale), dall'Alserio e dal Segrino che si estendono per una superficie complessiva di poco più di 7 km², mentre il tratto di fiume Lambro interessato dalle opere in progetto si estende dal ponte della S.S. n.342 "Briantea" a nord, al ponte di via Fornacetta in comune di Inverigo a sud.

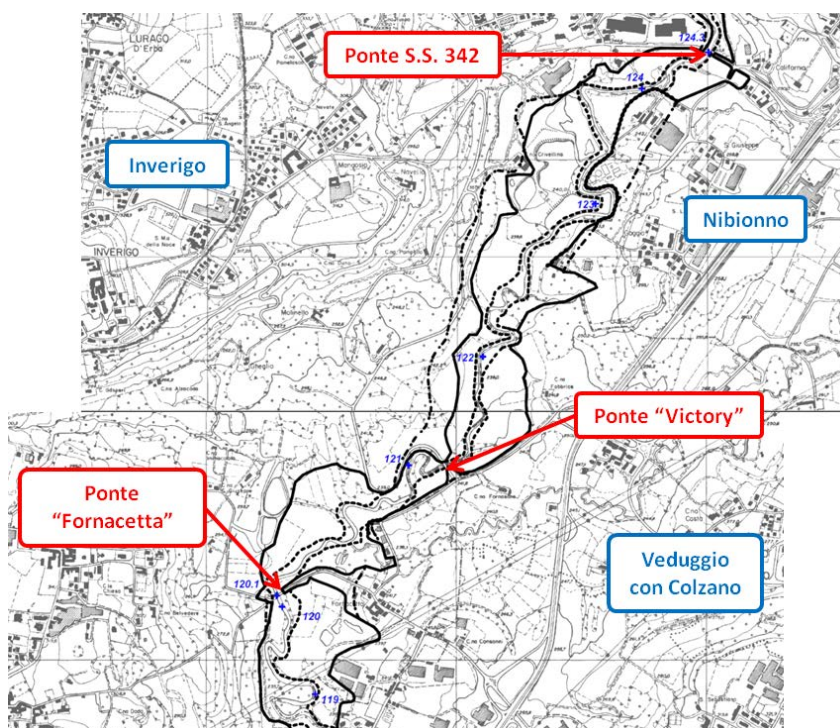


Figura 1 – Inquadramento geografico del tratto di fiume Lambro d'interesse

La struttura morfologica di quest'area è caratterizzata da allineamenti semicirculari concentrici di cordoni collinari, appartenenti ad apparati morenici depositatisi in fasi successive durante i periodi glaciali. L'alveo risulta essere generalmente incassato nel fondo valle; nella sua parte più settentrionale il fiume assume un andamento meandriforme e le aree perfluviali sono caratterizzate dalla presenza di lanche e aree umide naturali anche grazie alla presenza di diverse risorgive, piccoli affluenti e dreni presenti su entrambi i lati. Inoltre, nell'area d'interesse sono presenti una serie di laghetti di origine antropica, lascito dell'attività estrattiva lì svolta un tempo a servizio della produzione di laterizi e altri materiali da costruzione.

3. STUDI PREGRESSI E MATERIALE DISPONIBILE

Gli scriventi oltre al Progetto Definitivo approvato dall'amministrazione, dispongono degli studi che erano già disponibili al momento della redazione dello stesso.

Inoltre, ai fini della modellazione idraulica, è stato attentamente esaminato lo "Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua naturali e artificiali all'interno dell'ambito idrografico di pianura Lambro – Olona" e la conseguente "Variante al Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) Fasce fluviali del fiume Lambro nel tratto dal Lago di Pusiano alla confluenza con il deviatore Redefossi", che sostanzialmente ha recepito e fatto propri gli esiti del citato Studio di Fattibilità ed è stata adottata nel mese di marzo 2004. Da tali studi sono state dedotte le informazioni riguardanti le condizioni al contorno da utilizzare nella modellazione idraulica.

Oltre a quanto elencato in precedenza, gli scriventi hanno potuto analizzare le informazioni desumibili dai seguenti documenti, resi disponibili dal committente:

- Rilievo topografico per il progetto definitivo e successiva integrazione eseguiti dal Committente;
- Rilievo LIDAR del Ministero riguardanti il tratto d'alveo e le aree perifluviali d'interesse a passo 1x1 m;
- Studio idrologico idraulico dell'evento alluvionale occorso sul fiume Lambro nel novembre 2014 in corrispondenza dell'area di laminazione di Inverigo (CO). Studio Idrologico Idraulico (Rosso – La Ferlita);
- Studio idraulico del tratto terminale della bevera di Veduggio in corrispondenza dell'area di laminazione di Inverigo (CO) (Rosso – La Ferlita).

4. VERIFICHE IDRAULICHE

Come già anticipato in premessa nella presente relazione vengono descritti gli approfondimenti idraulici eseguiti nella presente progettazione esecutiva rimandando alla relazione idrologica ed idraulica del Progetto Definitivo allegata alla presente relazione per la definizione delle portate di riferimento, dei valori di scabrezza, e delle informazioni topografiche necessarie per la costruzione del modello matematico.

Non avendo a disposizione il modello matematico implementato nel Progetto Definitivo, per la redazione del Progetto Esecutivo si è reso necessario ricostruire il medesimo modello, sia per quanto riguarda la geometria che per le condizioni al contorno, al fine di poter effettuare tutti gli approfondimenti idraulici necessari per la progettazione delle opere. In particolare gli approfondimenti idraulici condotti nell'ambito della presente progettazione definitiva riguardano essenzialmente:

- Modellazione idraulica dello scenario attuale che tiene in considerazione l'adeguamento idraulico del cavo Diotti già realizzato.
- Modellazione idraulica per il dimensionamento e la verifica delle opere in progetto nello scenario idrologico attuale e nell'ipotesi di realizzazione delle opere previste dal PAI.
- Modellazione idraulica per il dimensionamento e la verifica dell'opera di sfioro.
- Verifiche al sifonamento dei nuovi rilevati arginali.

Analogamente a quanto fatto nel Progetto Definitivo il modello matematico è stato implementato mediante l'utilizzo del codice di calcolo HEC-RAS dell'U.S. Army Corps of Engineers.

Detto codice, che è oggi ampiamente utilizzato in campo nazionale ed internazionale nello studio dei problemi di idraulica fluviale, a partire dalla conoscenza della geometria dell'alveo, dei valori di scabrezza e della portata calcola il corrispondente profilo di corrente.

Di seguito, dopo una breve descrizione del codice HEC-RAS, vengono descritte le verifiche idrauliche effettuate per il dimensionamento del manufatto di regolazione e di sfioro della vasca di laminazione in progetto.

4.1 Il codice di calcolo HEC-RAS

Per la definizione del profilo di corrente ci si è avvalsi di uno specifico codice di calcolo denominato HEC-RAS, elaborato dall'U.S. Army Corps of Engineers.

Detto codice, che è oggi ampiamente utilizzato in campo nazionale ed internazionale nello studio dei problemi di idraulica fluviale, a partire dalla conoscenza della geometria dell'alveo, dei valori di scabrezza e della portata di riferimento, restituisce il profilo di corrente monodimensionale, corrispondente al passaggio della portata di riferimento.

Il codice di calcolo in questione è basato sostanzialmente sull'integrazione, in termini finiti, dell'equazione dell'energia di una corrente:

$$\frac{\Delta E}{\Delta S} = i - j$$

dove:

- E = variazione dell'energia della corrente tra due sezioni di calcolo;
- S = distanza tra le due sezioni di calcolo;
- i = pendenza del fondo alveo;
- j = cadente della linea dell'energia.

In particolare HEC-RAS utilizza lo "standard step method" per integrare la precedente equazione discretizzata nella forma seguente:

$$Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + \Delta H$$

dove:

- Z_2 (m) = quota assoluta del pelo libero nella sezione 2 (incognita);
- α_2 = coefficiente di velocità alla sezione 2 (incognito);
- V_2 (m/s) = velocità media nella sezione 2 (incognita);
- g (m/s²) = accelerazione di gravità;
- H (m) = perdita di carico tra le sezioni 1 e 2;

Le grandezze con pedice 1 hanno analogo significato, ma con riferimento alla sezione 1 e sono tutte quantità note.

Quando la sezione trasversale che descrive la geometria dell'alveo è costituita da un unico canale (ovvero non vi è la presenza di aree golenali – come nel caso attuale), il coefficiente di velocità α è assunto pari a 1.

Viceversa, quando il flusso della corrente si suddivide tra il canale principale e le aree golenali, il coefficiente di velocità α è calcolato in base alla "conveyance" totale della sezione (k_t) risolvendo la seguente equazione:

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 * \left[\frac{(k_{sx})^3}{(A_{sx})^2} + \frac{(k_{ch})^3}{(A_{ch})^2} + \frac{(k_{dx})^3}{(A_{dx})^2} \right]}{(k_t)^3}$$

dove:

- A_t = area bagnata totale della sezione;

- A_{sx} , A_{ch} , A_{dx} = aree bagnate rispettivamente della golena sinistra, del canale principale e della golena destra;
- $k_t = Q_t/(i)(1/2) =$ "conveyance" totale della sezione;
- k_{sx} , k_{ch} , k_{dx} = "conveyance" rispettivamente della golena sinistra, del canale principale e della golena destra.

Il termine ΔH rappresenta la perdita di carico che si genera nella corrente tra una sezione e l'altra ed è calcolato come somma del termine relativo alle perdite distribuite e del termine relativo alle perdite concentrate per contrazione o espansione dovute alla variazione di geometria della sezione trasversale:

$$\Delta H = LJ + K \left(\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right)$$

dove:

- L (m) = distanza fra le due sezioni;
- J (m/m) = cadente della linea dell'energia;
- K = coefficiente di espansione o contrazione.

La cadente J è calcolata utilizzando la ben nota espressione di Chézy:

$$J = \frac{V^2}{C^2 R}$$

che, utilizzando per l'indice di resistenza " C " la forma proposta da Manning, si trasforma nella:

$$J = n^2 \frac{V^2}{R^{4/3}}$$

dove:

- n = coefficiente di scabrezza secondo Manning;
- V (m/s) = velocità media nella sezione;
- R (m) = raggio idraulico della sezione.

Per il coefficiente K di contrazione e di espansione si sono utilizzati i valori riportati nella tabella seguente, con riferimento alla situazione di graduale variazione di larghezza tra una sezione e l'altra e a quella di variazione generalmente più brusca dovuta alla presenza di ponti con pile in alveo.

	Contrazione	Espansione
Variazione graduale	0.1	0.3
Ponti	0.3	0.5

Tabella 1 – Coefficienti di contrazione ed espansione utilizzati nel modello

4.2 Implementazione del modello matematico

4.2.1 Descrizione geometrica del corso del corso d'acqua

Il tratto di Lambro oggetto di intervento si estende dal ponte della S.S. 342 "Briantea" in comune di Nibionno sino a valle del ponte di via Fornacetta in comune di Inverigo, per uno sviluppo complessivo di circa 4.5 km. Essendo l'opera di regolazione in progetto posizionata immediatamente a monte del ponte di via Fornacetta, al fine di non condizionare i risultati del modello con una condizione di valle collocata proprio a ridosso del manufatto, per la presente progettazione si è deciso di prolungare verso valle il modello di circa 2.6 km fino in corrispondenza della traversa di località Peregallo in comune di Briosco. Il tratto oggetto di simulazione ha quindi una lunghezza totale di circa 7.1 km.

La geometria del fiume Lambro è stata definita per mezzo di 41 sezioni estrapolate dalle informazioni topografiche disponibili, previa verifica di attendibilità delle stesse. Analogamente a quanto fatto nel Progetto Definitivo tutte le sezioni trasversali inserite nel modello sono state estrapolate dal rilievo LIDAR a maglia 1x1 del Ministero dell'Ambiente elaborato per conto della Regione Lombardia. Le sezioni sono state estrapolate in corrispondenza di quelle utilizzate per il modello idraulico del Progetto Definitivo ed è stata utilizzata la stessa nomenclatura.

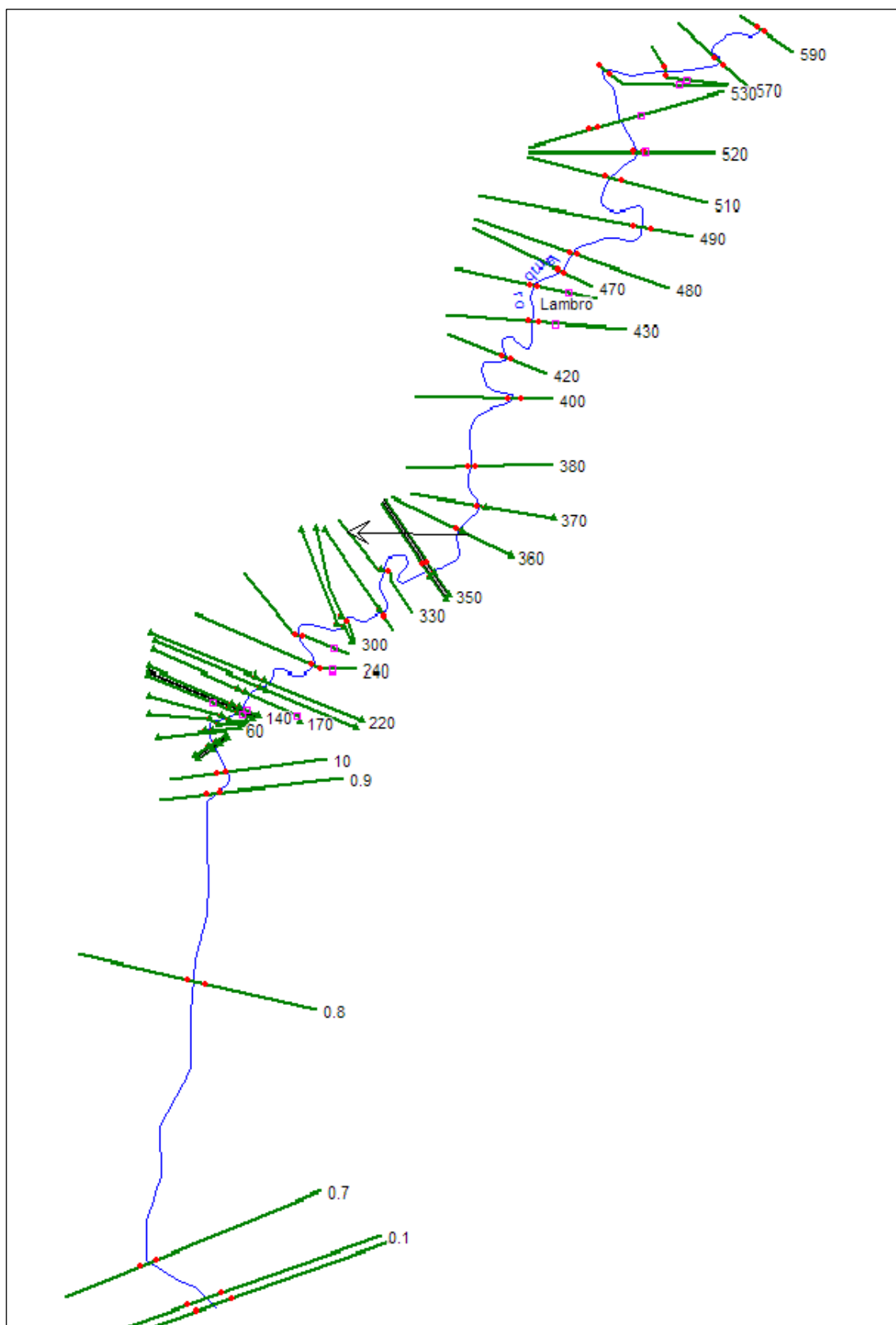


Figura 2 – Localizzazioni delle sezioni di calcolo inserite nel modello

Le sezioni estrapolate dal modello digitale sono state sottoposte ad una approfondita verifica di congruenza sia con il rilievo topografico eseguito per lo svolgimento del Progetto Definitivo sia con le sezioni rilevate nello "Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua naturali e artificiali all'interno dell'ambito idrografico di pianura Lambro – Olona". In particolare, con quest'ultimo sono state confrontate le sezioni poste a valle del ponte via Fornacetta al fine di definire correttamente la condizione al contorno di valle.

Nella figura seguente si riporta a titolo esemplificativo il confronto tra la sezione posta a valle del ponte della Fornacetta (sezione 10) e la sezione dello studio Lambro-Olona LA120. Come si evince dal confronto le sezioni estratte dal LIDAR trovano una buona corrispondenza con le sezioni rilevate nel suddetto studio.

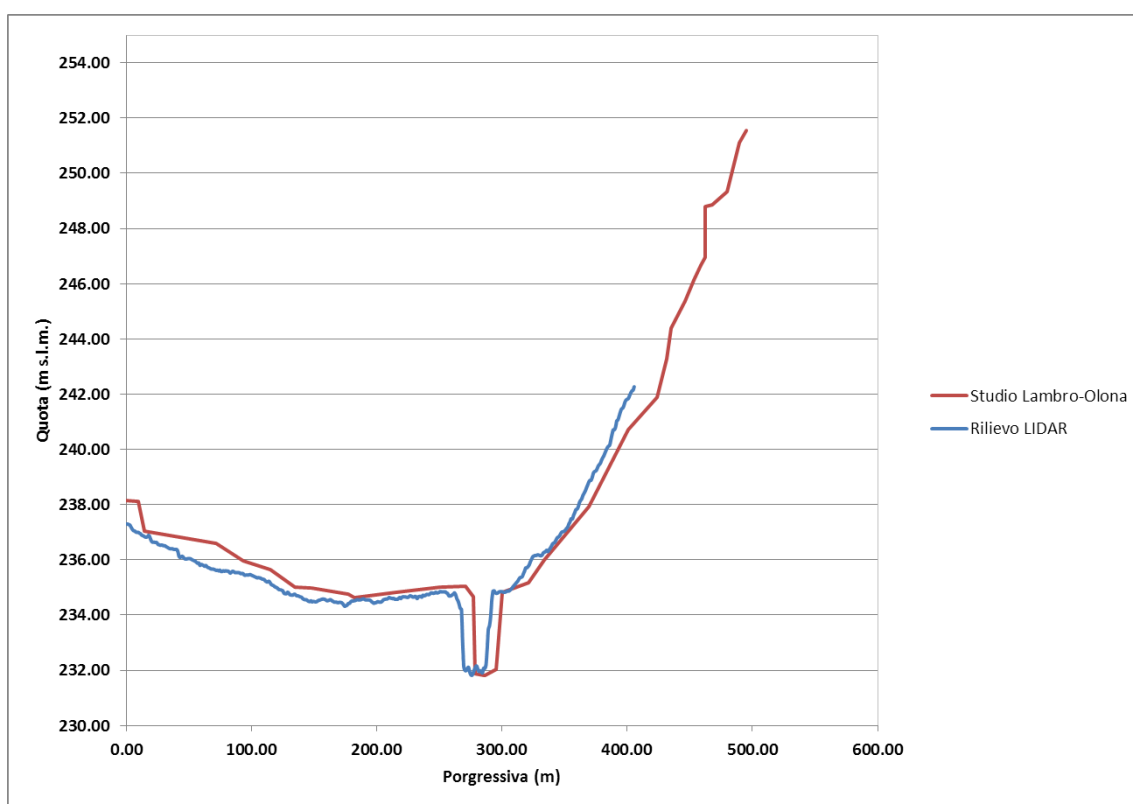


Figura 3 – Confronto tra sezioni estrapolate dal LIDAR e rilievo Lambro-Olona

Le sezioni utilizzate per la descrizione geometrica coprono dunque l'intero tratto oggetto di studio, ma in corrispondenza dei manufatti di attraversamento e del manufatto di regolazione si è reso necessario duplicare alcune sezioni per descrivere al meglio la geometria delle diverse strutture presenti. In particolare è stata inserita la geometria del ponte "Victory" e del ponte di via Fornacetta.

Il funzionamento di questi manufatti è stato schematizzato mediante quattro sezioni di calcolo, che si rifanno alla geometria rilevata topograficamente. Di queste quattro sezioni, partendo da

valle verso monte, la prima descrive la sezione "naturale" posta a valle del ponte, con andamento del terreno pari a quello del canale in corrispondenza del manufatto; la seconda e la terza sezione descrivono, rispettivamente, la faccia di valle e la faccia di monte del ponte e sono poste ad una distanza fra loro pari alla larghezza dell'impalcato; la quarta, infine, descrive la sezione "naturale" a monte del manufatto, anch'essa con andamento del terreno pari a quello del canale sotto al ponte. La schematizzazione geometrica dei manufatti di attraversamento è riportata nelle figure seguenti.

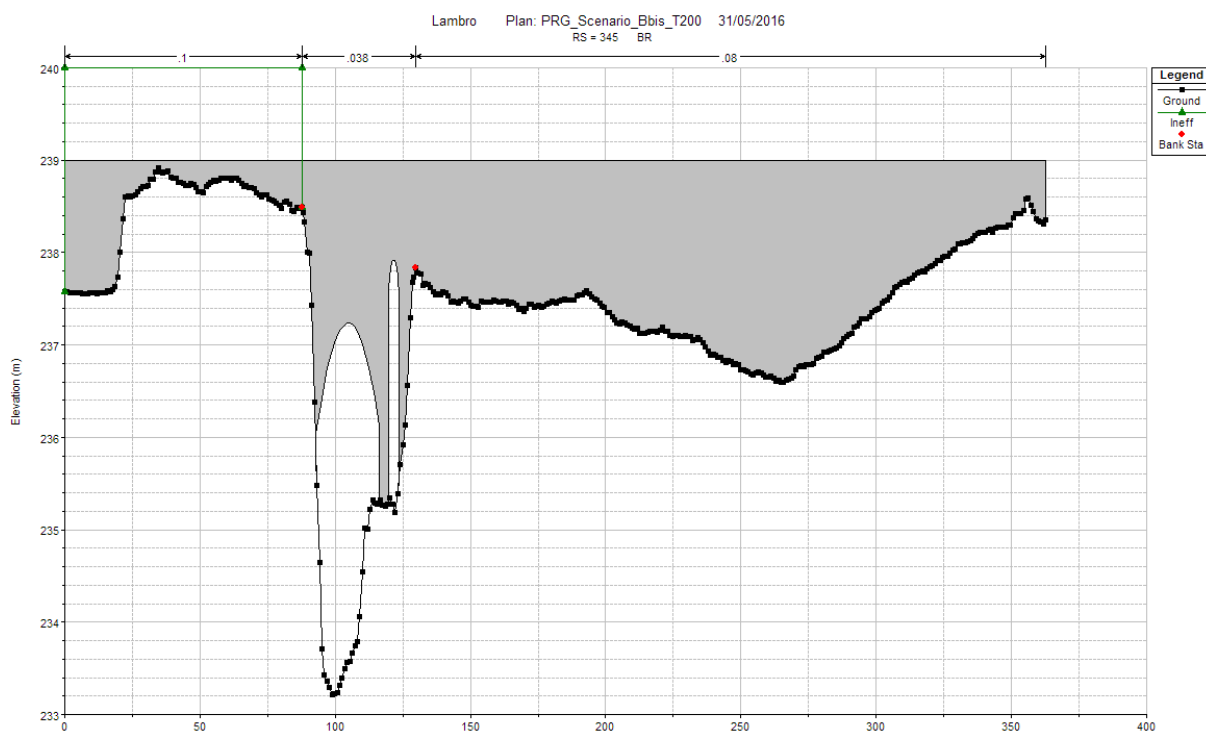


Figura 4 – Schematizzazione geometrica del ponte "Victory"

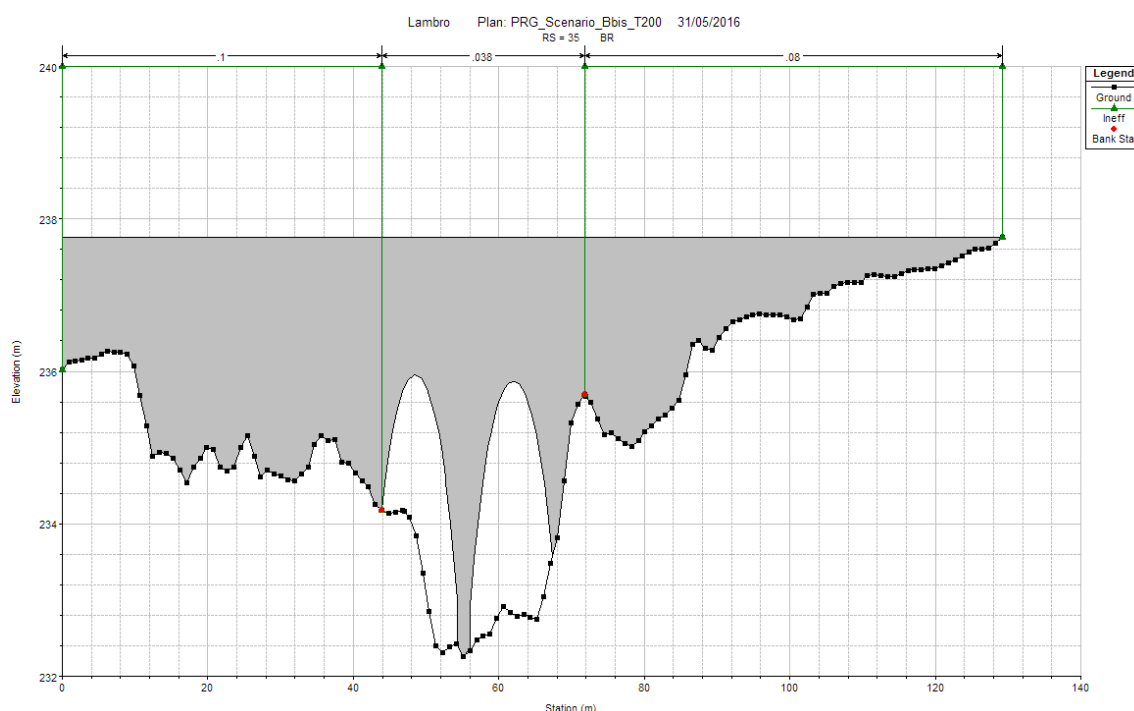


Figura 5 – Schematizzazione geometrica del ponte di via Fornacetta

Infine per la configurazione di progetto è stato inserito il manufatto di regolazione posto in corrispondenza della sezione 135. Tale manufatto è stato schematizzato mediante una "*inline structure*" che simula il comportamento di una soglia sfiorante. La quota di sommità del manufatto è stata posta a 237.9 m s.l.m., mentre la quota di fondo è pari a 232.3 m s.l.m.. All'interno del manufatto sono state inserite due luci per la regolazione della portata transitante verso valle, ciascuna delle quali ha una larghezza di 6.0 m ed un'altezza di 5,1 m.

La schematizzazione geometrica del manufatto di regolazione è riportata nella figura seguente.

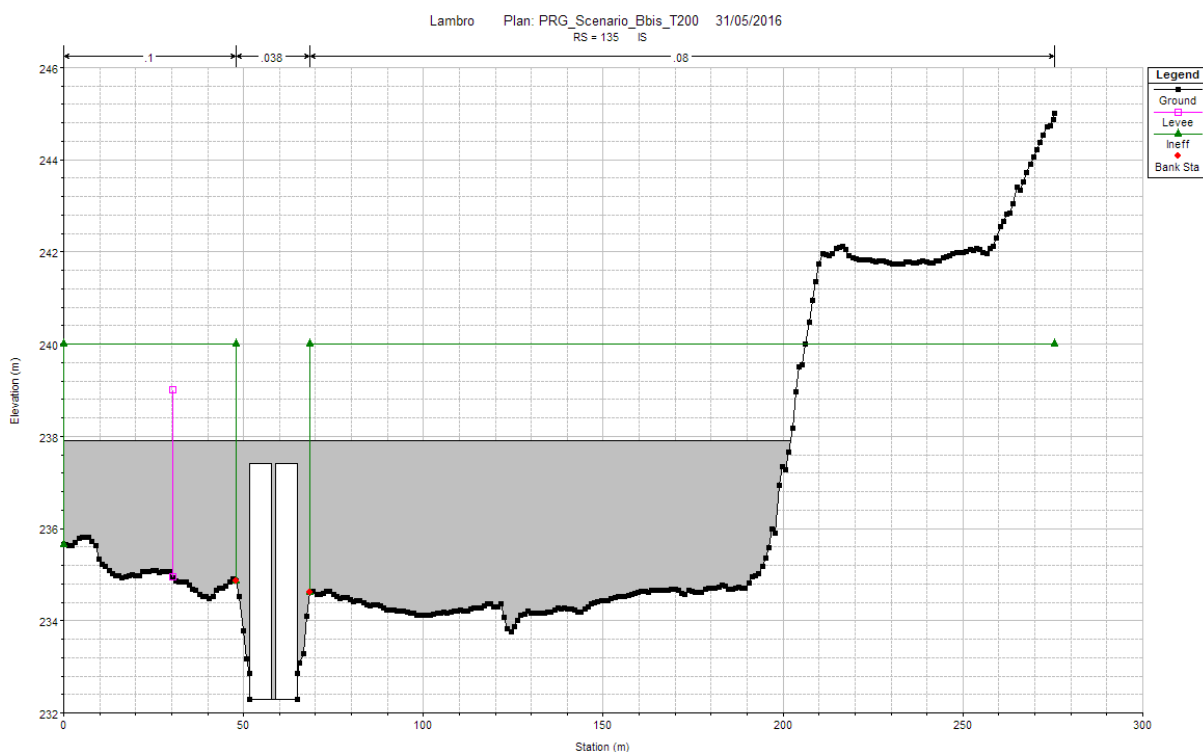


Figura 6 – Schematizzazione geometrica del manufatto di regolazione

4.2.2 Coefficienti di scabrezza

I coefficienti di scabrezza utilizzati nel modello sono quelli assunti nelle modellazioni condotte nel Progetto Definitivo. Tali valori sono stati definiti mediante l'analisi dei valori consigliati in letteratura (cfr. *"Criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico all'interno delle fasce A e B"*, allegata alla deliberazione n. 2/99 in data 11 maggio 1999 dell'AdBPo) e dall'osservazione operata in sito.

Nella presente progettazione i valori assunti sono stati confrontati anche con le indicazioni di letteratura fornite da *"U.S. Department of Agricultura- Technical Bulletin"* n° 129, - Novembre 1929, n° 652 - Febbraio 1934 e da quelle fornite dalle tabelle dei testi *"Ven Te Chow, Ph. D - Open - Channel Hydraulics"*, Mc Graw - Hill International Editions – 1973, *"M. Hanif Chaudhry - Open Channel Flow"*, Prentice Hall 1993.

Con riferimento al parametro di Strikler si sono adottati seguenti valori:

- Alveo di magra e sponde naturali in terra: 26
- Aree golenali con rara vegetazione: 25
- Aree golenali con vegetazione fitta: 10-15

4.3 Scenari simulati e condizioni al contorno

Come anticipato nella premessa le modellazioni condotte nella presente progettazione riguardano solamente alcuni scenari resi necessari per aggiornare lo stato attuale con la sistemazione idraulica del cavo Diotti e per la verifica delle nuove opere in progetto.

Vengono di seguito riassunti gli scenari simulati nel Progetto Definitivo:

1. Scenario A: portate attuali T200 anni senza la sistemazione idraulica del cavo Diotti e senza opera di laminazione in progetto.
2. Scenario B: portate attuali T200 anni senza la sistemazione idraulica del cavo Diotti, con opera di laminazione in progetto.
3. Scenario B_bis: portate T 200 e T500 anni con la sistemazione idraulica del cavo Diotti e con opera di laminazione in progetto.
4. Scenario C: portate di progetto P.A.I. T = 200 e 500 anni con opera di laminazione in progetto.

Per una trattazione completa degli scenari simulati nel Progetto Definitivo si rimanda alla relazione idrologico-idraulica e integrazioni allegate. Gli ideogrammi considerati sono quelli dell'analisi idrologica del progetto definitivo.

Successivamente, gli stessi progettisti del Progetto Definitivo hanno svolto per il Parco Regionale Valle del Lambro, ulteriori simulazioni sia sul corso d'acqua oggetto di intervento sia sull'affluente Bevera di Veduggio. Nel dettaglio sono state svolte le seguenti simulazioni

1. Simulazione dell'evento alluvionale del Novembre 2014.
2. Simulazione degli effetti della regolazione con le nuove opere in progetto in occasione dell'evento alluvionale del Novembre 2014
3. Simulazione idraulica della Bevera di Veduggio in condizioni attuali, ipotizzando livelli di magra nel fiume Lambro.
4. Simulazione idraulica della Bevera di Veduggio in condizioni attuali, ipotizzando livelli di piena nel fiume Lambro.
5. Simulazione idraulica della Bevera di Veduggio con la nuova opera di laminazione e con riferimento allo scenario B
6. Simulazione idraulica della Bevera di Veduggio con la nuova opera di laminazione e con riferimento allo scenario B_bis
7. Simulazione idraulica della Bevera di Veduggio con la nuova opera di laminazione e con riferimento allo scenario C

In fase esecutiva mediante la ricostruzione dello stesso modello implementato nel Definitivo si è provveduto ad aggiornare lo stato di fatto con la sistemazione del cavo Diotti e a simulare le configurazioni di progetto negli scenari B_bis e C.

In definitiva sono stati simulati i seguenti scenari:

1. **Scenario Attuale B_bis:** portate T200 con sistemazione idraulica del cavo Diotti e senza opera di laminazione in progetto.

2. **Scenario di Progetto B_bis (assetto transitorio):** portate T200 anni con sistemazione idraulica del cavo Diotti e con opera di laminazione in progetto.
3. **Scenario di Progetto C (assetto definitivo):** portate di progetto P.A.I. T200 e T500 anni con opera di laminazione in progetto.

Per lo scenario Attuale B_bis e per lo scenario di Progetto B-Bis, nella sezione di monte del modello (sezione 590) è stato immesso l'idrogramma duecentennale che tiene conto della sistemazione idraulica del cavo Diotti, e caratterizzato da un picco di portata pari a **99 m³/s**.

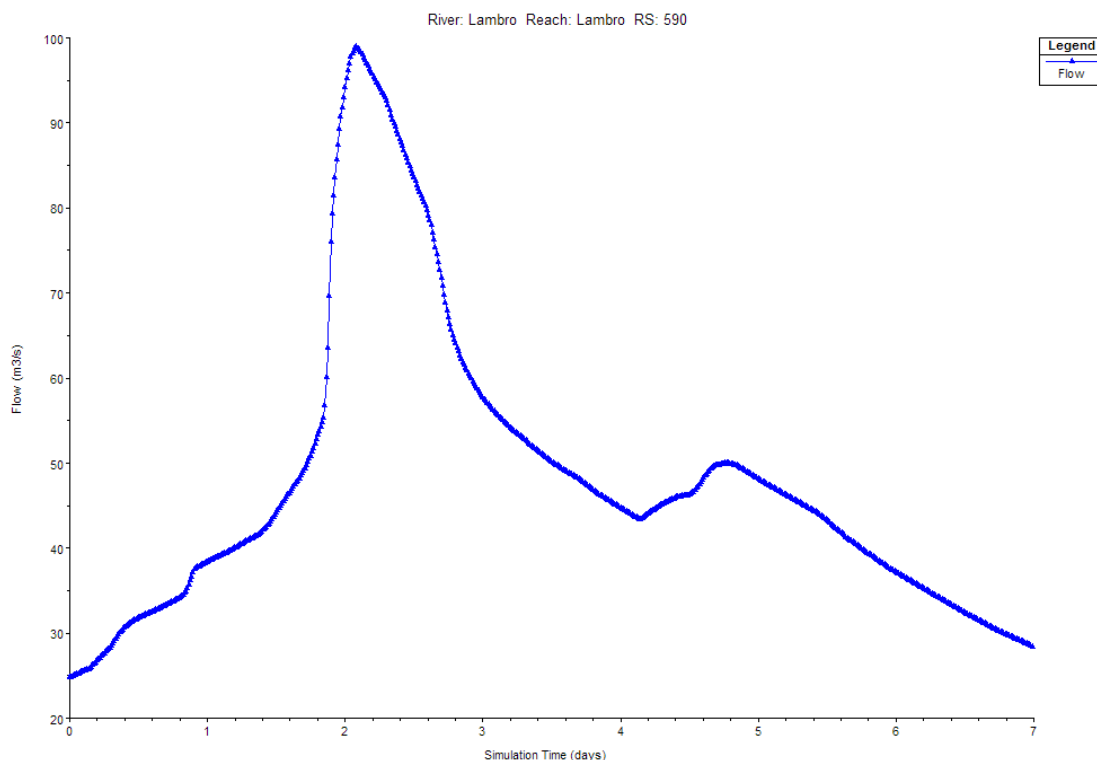


Figura 7 – Idrogramma T200 immesso nella sezione di monte nello Scenario Attuale B_bis e nello scenario di Progetto B_bis (assetto transitorio)

Per lo scenario di Progetto C, nella sezione di monte del modello (sezione 590) sono stati immessi gli idrogrammi T200 e T500 anni che tengono conto delle opere di sistemazione pianificate nel P.A.I. nello "Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua naturali e artificiali all'interno dell'ambito idrografico di pianura Lambro – Olona", e caratterizzati rispettivamente da una portata pari a **65 m³/s** e **85 m³/s**

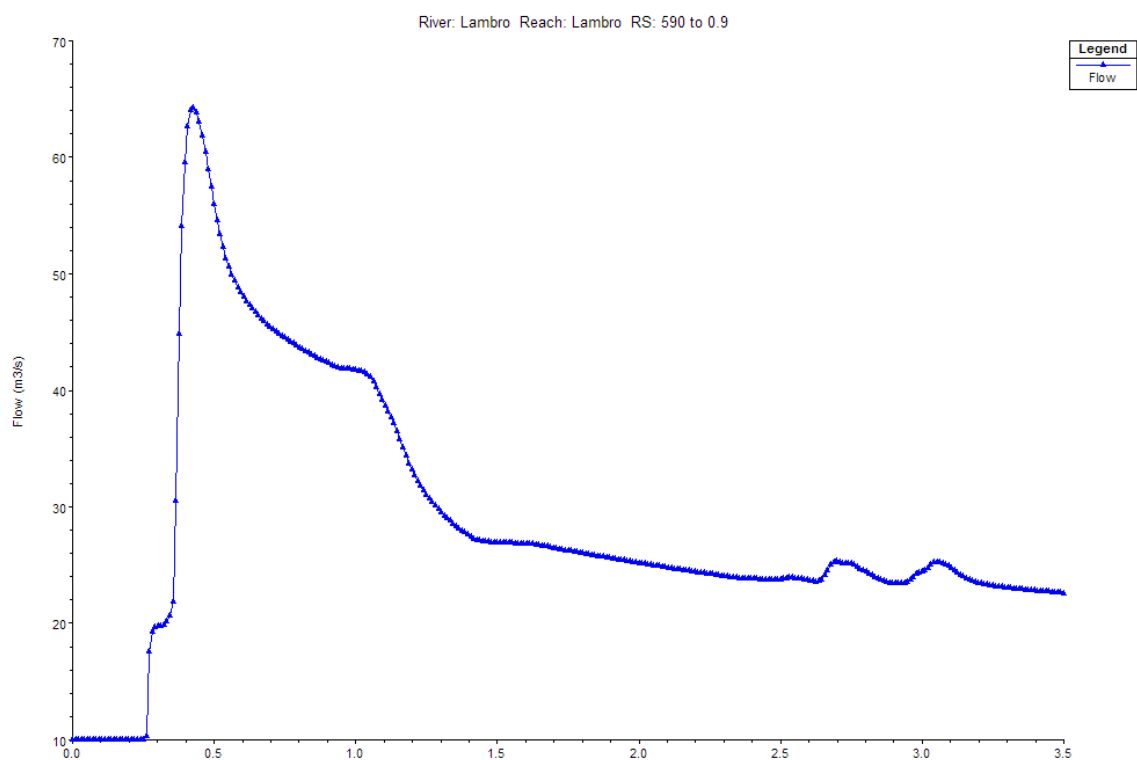


Figura 8 – Idrogramma T200 immesso nella sezione di monte nello scenario di Progetto C (assetto definitivo)

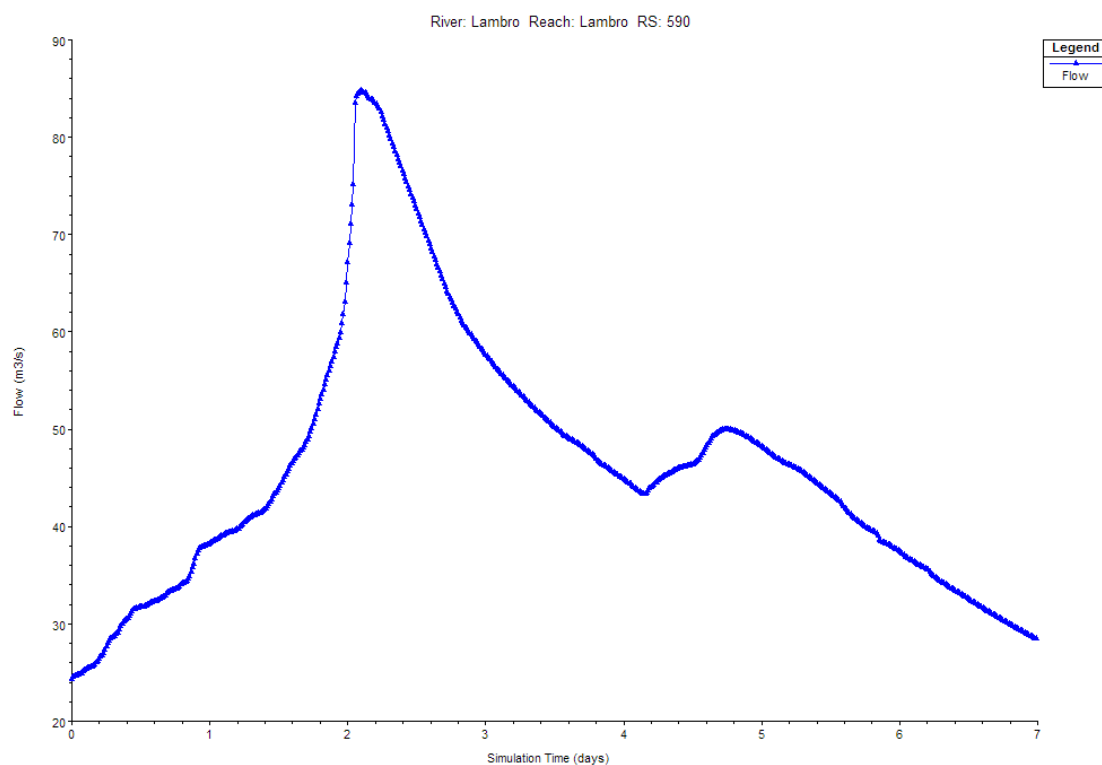


Figura 9 – Idrogramma T500 immesso nella sezione di monte nello scenario di Progetto C (assetto definitivo)

Per simulare il corretto funzionamento del corso d'acqua sono stati considerati anche i contributi di portata derivanti delle onde di piena relative ai "sottobacini residui" ovvero a quelle porzioni di bacino comprese tra i diversi tratti del corso d'acqua. Nello specifico, con riferimento alla nomenclatura assunto nello studio Lambro-Olona, si sono presi in considerazione i contributi di portata uniformemente distribuiti relativi ai sottobacini LAM6, LAM7 e LAM8. Il sottobacino bacinno LAM6 rappresenta il bacino diretto del Lambro compreso tra il ponte della SS-342 e la confluenza con la Bevera di Veduggio, ha un'estensione di circa 10.93 km² e comprende parte del territorio dei comuni di Lurago d'Erba e Veduggio con Colzano.

Il sottobacino LAM7 rappresenta il bacino diretto del Lambro compreso tra la confluenza con la Bevera di Veduggio e la confluenza con la Bevera di Renate, ha un'estensione di circa 4.6 km² e comprende parte del territorio del comune di Inverigo.

Il sottobacino LAM8 rappresenta il bacino diretto del Lambro compreso tra la confluenza con la Bevera di Renate e il ponte della strada provinciale n.6 ha un'estensione di circa 11.75 km² e comprende parte del territorio dei comuni di Briosco e Verano Brianza. Essendo la sezione di valle posta a monte della sezione di chiusura del bacino LAM8, il contributo di portata di quest'ultimo è stato opportunamente riscalato in funzione della lunghezza del tratto afferente.

Tali idrogrammi sono stati immessi nel modello utilizzando la condizione "*Uniform Lateral In-flow*" in modo tale da simulare l'apporto del bacino non come immissione concentrata (in una sezione ben precisa), ma distribuita omogeneamente lungo l'asta del torrente, tenendo quindi conto dei tempi di corrivazione e di propagazione dell'onda stessa.

Infine si sono considerate le immissioni della Bevera di Veduggio e della Bevera di Renate. Quale condizione al contorno di valle è stata imposta la pendenza media dell'alveo. In merito a quest'ultima condizione occorre fare alcune considerazioni in merito. Essendo l'opera di regolazione in progetto posizionata immediatamente a monte del ponte di via Fornacetta, al fine di non condizionare i risultati del modello con una condizione di valle collocata proprio a ridosso del manufatto, per la presente progettazione si è deciso di prolungare verso valle il modello di circa 2.6 km fino in corrispondenza della traversa di località Peregallo in comune di Briosco.

Nella tabella seguente si riporta un quadro riassuntivo delle condizioni al contorno "*interne*" considerate nel modello idraulico dove si riporta la sezione di riferimento, il tipo di immissione (distribuita o concentrata) e le portate al colmo relative ai tempi di ritorno considerati nell'analisi idraulica (T200 e T500).

Sezione	Tipo di immissione	Bacino di riferimento	Portata T200 [mc/s]	Portata T500 [mc/s]
590-240	Distribuita	Sottobacino LAM6	36.0	50.7
240	Concentrata	Bevera di Veduggio	36.7	63.7
240-0.8	Distribuita	Sottobacino LAM7	17.3	24.2
0.8	Concentrata	Bevera di Renate	32.9	52.6
0.8-0	Distribuita	Sottobacino LAM8	4.4	5.7

Tabella 2 – Condizioni al contorno utilizzate nel modello

4.4 Analisi dei risultati ottenuti

Assegnate le condizioni al contorno descritte nel paragrafo precedente e note quindi le portate transistanti, mediante il modello idraulico sono stati ricostruiti i profili di piena in condizioni di moto vario per tutti gli scenari simulati.

Nei paragrafi seguenti, per ognuno degli scenari simulati, si descrivono i risultati ottenuti.

4.4.1 Scenario Attuale B_bis

Il primo scenario simulato è stato quello relativo alla condizione attuale del tratto di corso d'acqua nella configurazione morfologica esistente. Dal punto di vista idrologico lo scenario attuale, rispetto al Progetto Definitivo, tiene conto degli interventi di sistemazione del cavo Diotti già eseguiti. L'idrogramma duecentennale in ingresso al modello è quello riportato nella Figura 7, caratterizzato da un picco di portata pari a 99 m³/s.

La simulazione numerica ha quindi consentito di calcolare i livelli idrici massimi raggiunti in ciascuna sezione di calcolo e la loro evoluzione nel tempo in funzione degli idrogrammi in ingresso.

Di seguito si riporta il profilo di piena ottenuto con il modello idraulico e la tabella completa che sintetizza per ciascuna sezione di calcolo le principali grandezze idrauliche. Si rimanda all'ALLEGATO 1 per il dettaglio delle sezioni di calcolo.

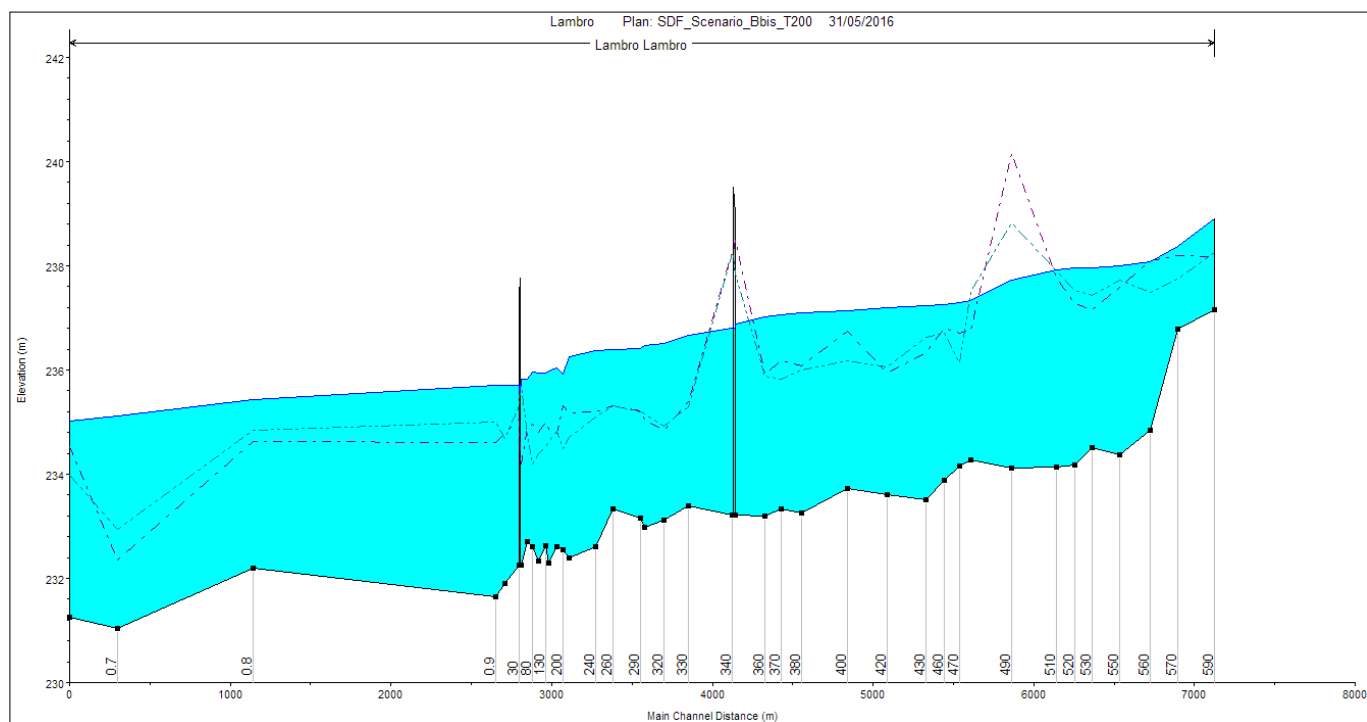


Figura 10 – Profilo di piena calcolato con il modello per lo Scenario Attuale B_bis

Reach	River Sta	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)	F
Lambro	590	98.92	237.16	238.90		238.97	0.002058	1.44	112.56	138.10	0.40
Lambro	570	98.89	236.79	238.37		238.44	0.002635	1.43	110.48	159.11	0.44
Lambro	560	99.13	234.85	238.08		238.14	0.000891	1.24	143.81	190.02	0.27
Lambro	550	99.50	234.38	238.00		238.02	0.000199	0.65	293.50	324.00	0.13
Lambro	530	99.87	234.51	237.97		237.98	0.00023	0.69	280.08	270.08	0.14
Lambro	520	100.10	234.17	237.96		237.96	0.000049	0.34	402.40	350.95	0.07
Lambro	510	100.35	234.13	237.92		237.94	0.000344	0.69	186.73	239.64	0.17
Lambro	490	100.93	234.12	237.73		237.80	0.000844	1.26	132.56	182.09	0.27
Lambro	480	100.29	234.28	237.34		237.46	0.00206	1.82	116.97	186.69	0.41
Lambro	470	100.28	234.16	237.29		237.33	0.000485	1.04	236.88	282.02	0.21
Lambro	460	100.30	233.89	237.25		237.28	0.000399	0.90	272.93	284.16	0.19
Lambro	430	100.52	233.52	237.23		237.24	0.000147	0.59	429.25	473.02	0.12
Lambro	420	100.90	233.61	237.19		237.20	0.000163	0.66	389.64	284.59	0.12
Lambro	400	101.30	233.72	237.14		237.16	0.000228	0.72	260.88	203.85	0.15
Lambro	380	101.81	233.25	237.10		237.11	0.000131	0.61	402.05	276.48	0.11
Lambro	370	102.02	233.34	237.06		237.08	0.000285	0.83	235.86	360.01	0.16
Lambro	360	102.20	233.20	237.03		237.06	0.000306	0.92	226.23	301.91	0.17
Lambro	350	102.50	233.21	236.89	235.40	236.97	0.000834	1.27	80.72	35.37	0.27
Lambro	345	Bridge									
Lambro	340	102.48	233.22	236.81		236.90	0.001099	1.40	73.35	39.95	0.31
Lambro	330	102.95	233.39	236.66		236.68	0.000329	0.88	246.21	173.33	0.17
Lambro	320	103.19	233.11	236.51		236.63	0.00091	1.55	70.72	86.70	0.29
Lambro	300	103.40	232.99	236.47		236.53	0.000545	1.18	135.92	150.93	0.23
Lambro	290	103.44	233.15	236.42		236.51	0.00074	1.37	75.34	271.65	0.26
Lambro	260	103.73	233.34	236.38		236.39	0.000204	0.67	390.20	315.66	0.14
Lambro	240	103.93	232.60	236.37		236.38	0.000094	0.50	526.91	393.11	0.09
Lambro	220	114.69	232.39	236.25		236.36	0.000805	1.45	79.27	464.01	0.27
Lambro	200	114.57	232.55	235.92		236.30	0.003477	2.74	41.81	468.72	0.55
Lambro	170	114.69	232.61	236.04		236.20	0.001288	1.79	63.90	281.54	0.35
Lambro	140	114.73	232.30	235.99		236.14	0.00109	1.76	65.23	197.84	0.31
Lambro	130	114.76	232.62	235.94		236.12	0.001382	1.88	60.98	158.69	0.36
Lambro	100	114.80	232.33	235.93		236.07	0.001029	1.64	70.19	151.87	0.31
Lambro	80	114.87	232.61	235.96		236.04	0.000528	1.24	92.68	137.43	0.23
Lambro	60	114.83	232.70	235.82		236.00	0.00163	1.90	60.49	121.05	0.38
Lambro	40	114.91	232.26	235.81	234.34	235.95	0.001194	1.64	70.19	74.90	0.33
Lambro	35	Bridge									
Lambro	30	114.80	232.26	235.71		235.82	0.000943	1.48	77.76	57.05	0.29
Lambro	10	114.91	231.91	235.71		235.73	0.000251	0.80	334.18	250.56	0.15
Lambro	0.9	114.99	231.65	235.71		235.71	0.000079	0.46	565.01	341.85	0.09
Lambro	0.8	116.85	232.20	235.43		235.44	0.00029	0.75	331.31	259.36	0.16

Lambro	0.7	129.24	231.04	235.11		235.17	0.000382	1.20	167.58	82.79	0.20
Lambro	0.1	130.20	231.25	235.01		235.06	0.000341	0.96	178.18	142.66	0.18
Lambro	0	130.20	231.25	235.01	233.02	235.06	0.000342	0.96	178.14	142.66	0.18

Tabella 3 – Risultati della simulazione dello Scenario Attuale B_bis

Sebbene la portata in ingresso al modello sia inferiore rispetto allo Scenario A simulato nel Progetto Definitivo ($99 \text{ m}^3/\text{s}$ anziché $115 \text{ m}^3/\text{s}$) i livelli di piena risultano tra loro confrontabili. Ciò è dovuto alla modifica della condizione di valle che implica un livello maggiore immediatamente a valle del ponte della Fornacetta con conseguente rigurgito verso le sezioni di monte.

4.4.2 Scenario di Progetto B_bis (assetto transitorio)

Il secondo scenario considerato è quello che considera la presenza del manufatto di regolazione ed un assetto idrologico che tiene conto della sistemazione idraulica del cavo Diotti (idrogramma T200 di monte riportato in Figura 7). **Scopo del presente scenario è trovare una regola di gestione per la chiusura delle paratoie che consenta, nell'assetto di idrologico transitorio (solo sistemazione del cavo Diotti senza interventi P.A.I. realizzati), di ottenere in corrispondenza della Cascina Cattafame gli stessi livelli idrici che si osservano nella condizione attuale.**

Per la simulazione della configurazione di progetto è stato inserito nel modello il manufatto di regolazione posto in corrispondenza della sezione 135. Tale manufatto è stato schematizzato mediante una "inline structure" che simula il comportamento di una soglia sfiorante. La quota di sommità del manufatto è stata posta a 237.9 m s.l.m., mentre la quota di fondo è pari a 232.3 m s.l.m. All'interno del manufatto sono state inserite due luci per la regolazione della portata transitante verso valle, ciascuna delle quali ha una larghezza di 6.0 m ed un'altezza di 5.1 m. La regolazione della portata transitante a valle sarà garantita da una coppia di paratoie a doppia lente in grado di parzializzarne gradualmente e progressivamente la sezione.

La simulazione numerica ha quindi consentito di calcolare i livelli idrici massimi raggiunti in ciascuna sezione di calcolo, la loro evoluzione nel tempo in funzione degli idrogrammi in ingresso, nonché l'idrogramma in corrispondenza del ponte di via Fornacetta ovvero l'idrogramma in uscita dalla vasca.

Di seguito si riporta il profilo di piena ottenuto con il modello idraulico e la tabella completa che sintetizza per ciascuna sezione di calcolo le principali grandezze idrauliche. Si rimanda all'ALLEGATO 1 per il dettaglio delle sezioni di calcolo.

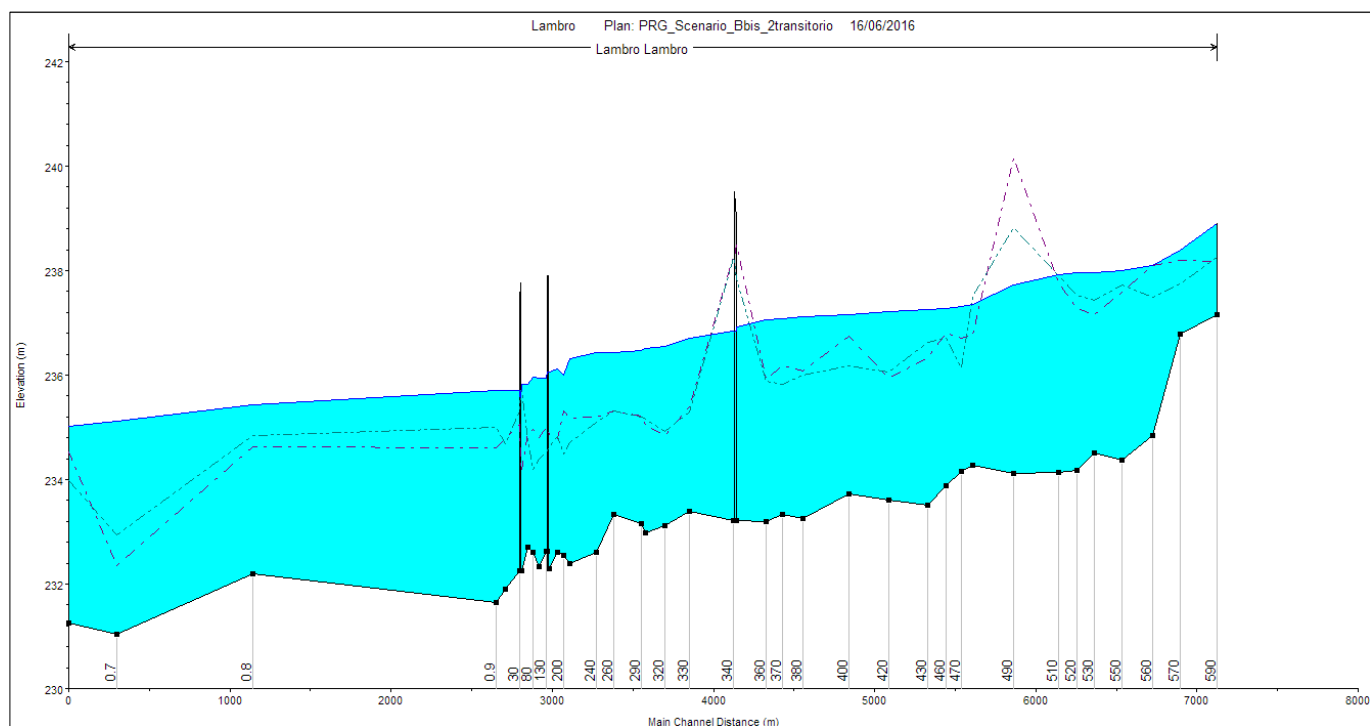


Figura 11 – Profilo di piena calcolato con il modello per lo Scenario Progetto B_bis

Reach	River Sta	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)	F
Lambro	590	98.92	237.16	238.90		238.96	0.002085	1.44	112.01	137.90	0.40
Lambro	570	98.88	236.79	238.39		238.45	0.002466	1.40	113.11	159.75	0.42
Lambro	560	99.12	234.85	238.09		238.16	0.001031	1.33	123.93	153.84	0.29
Lambro	550	99.50	234.38	238.00		238.02	0.000218	0.68	263.26	269.53	0.14
Lambro	530	99.86	234.51	237.97		237.98	0.000238	0.71	261.36	211.08	0.14
Lambro	520	100.11	234.17	237.96		237.96	0.000054	0.36	349.42	308.43	0.07
Lambro	510	100.36	234.13	237.92		237.94	0.000343	0.69	186.95	239.70	0.17
Lambro	490	100.91	234.12	237.73		237.80	0.000842	1.26	132.83	182.44	0.27
Lambro	480	100.25	234.28	237.35		237.47	0.001982	1.79	119.54	190.92	0.40
Lambro	470	100.32	234.16	237.31		237.34	0.000467	1.03	241.11	283.99	0.21
Lambro	460	100.34	233.89	237.27		237.30	0.000391	0.89	272.23	276.41	0.18
Lambro	430	100.55	233.52	237.25		237.26	0.000149	0.60	386.56	305.86	0.12
Lambro	420	100.89	233.61	237.21		237.22	0.000157	0.65	394.41	284.69	0.12
Lambro	400	101.32	233.72	237.16		237.18	0.00022	0.71	264.61	203.94	0.14
Lambro	380	101.81	233.25	237.12		237.12	0.000126	0.60	407.55	278.47	0.11
Lambro	370	102.04	233.34	237.08		237.10	0.000275	0.82	239.58	361.64	0.16
Lambro	360	102.22	233.20	237.05		237.08	0.000295	0.90	229.70	302.57	0.17
Lambro	350	102.52	233.21	236.92	235.40	236.99	0.000789	1.24	88.96	77.90	0.26
Lambro	345	Bridge									
Lambro	340	102.48	233.22	236.83		236.93	0.001055	1.38	74.57	45.26	0.30
Lambro	330	102.94	233.39	236.70		236.72	0.000308	0.86	252.04	275.44	0.17
Lambro	320	103.18	233.11	236.55		236.67	0.000863	1.52	72.10	232.87	0.29
Lambro	300	103.41	232.99	236.52		236.57	0.000506	1.15	139.94	161.27	0.22
Lambro	290	103.44	233.15	236.47		236.56	0.000698	1.35	76.67	276.11	0.26
Lambro	260	103.74	233.34	236.40		236.45	0.000176	0.63	404.05	303.02	0.13
Lambro	240	103.93	232.60	236.39		236.43	0.000087	0.49	521.00	350.98	0.09
Lambro	220	114.72	232.39	236.31		236.41	0.000751	1.42	80.95	465.69	0.27
Lambro	200	114.64	232.55	236.01		236.36	0.003126	2.65	43.18	469.22	0.52
Lambro	170	114.78	232.61	236.12		236.27	0.001172	1.75	65.75	283.24	0.33
Lambro	140	114.82	232.30	236.07	234.19	236.22	0.001002	1.72	66.93	167.82	0.30
Lambro	135	Inl Struct									
Lambro	130	114.77	232.62	235.94		236.12	0.001381	1.88	61.00	69.60	0.36
Lambro	100	114.84	232.33	235.93		236.07	0.001029	1.64	70.21	151.87	0.31
Lambro	80	114.90	232.61	235.96		236.04	0.000527	1.24	92.70	137.43	0.23
Lambro	60	114.88	232.70	235.82		236.00	0.00163	1.90	60.50	121.08	0.38
Lambro	40	114.92	232.26	235.81	234.34	235.95	0.001193	1.64	70.21	74.90	0.33
Lambro	35	Bridge									
Lambro	30	114.84	232.26	235.71		235.82	0.000943	1.48	77.79	57.06	0.29
Lambro	10	114.95	231.91	235.71		235.73	0.000251	0.80	334.41	250.58	0.15
Lambro	0.9	115.03	231.65	235.71		235.72	0.000079	0.45	565.33	341.88	0.09

Lambro	0.8	116.88	232.20	235.43		235.44	0.000289	0.75	331.63	259.39	0.16
Lambro	0.7	129.36	231.04	235.11		235.17	0.000383	1.20	167.68	82.80	0.20
Lambro	0.1	130.32	231.25	235.01		235.06	0.000341	0.96	178.40	142.68	0.18
Lambro	0	130.32	231.25	235.01	233.02	235.06	0.000342	0.96	178.36	142.68	0.18

Tabella 4 – Risultati della simulazione dello Scenario di Progetto B_bis

L'analisi dei risultati mette in evidenza che i livelli di piena a monte dell'opera di regolazione sono in linea con quelli dello scenario Attuale B_bis ed in corrispondenza della Cascina Cattafame il livello di piena non si scostano da quelli che si verificano attualmente. Tale configurazione implica la non regolazione delle portate ovvero **la completa apertura delle paratoie durante l'evento duecentennale di riferimento**. La portata transitante a valle del manufatto è pari a circa 115 m³/s come riportato nell'idrogramma di figura seguente.

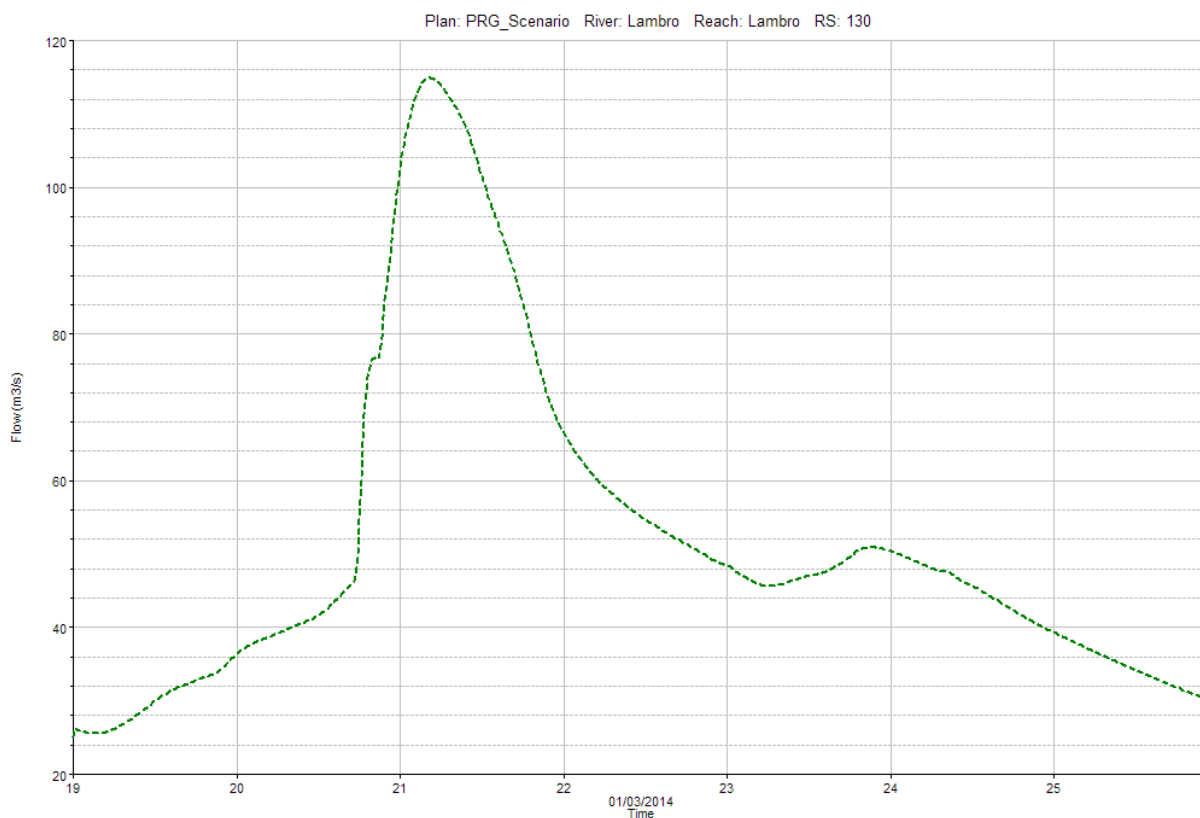


Figura 12 – Idrogramma T200 anni in uscita dalla vasca calcolato con il modello

Il livello idrico che si instaura a monte del manufatto di regolazione è pari a 236.07 m s.l.m. quindi con un franco di 1.83 m rispetto alla quota di sommità di 237.9 m s.l.m., mentre il livello a valle del manufatto è pari a 235.94 m s.l.m. Come già detto nello scenario di progetto transitorio B_bis le paratoie sono previste completamente aperte come rappresentato nella figura seguente.

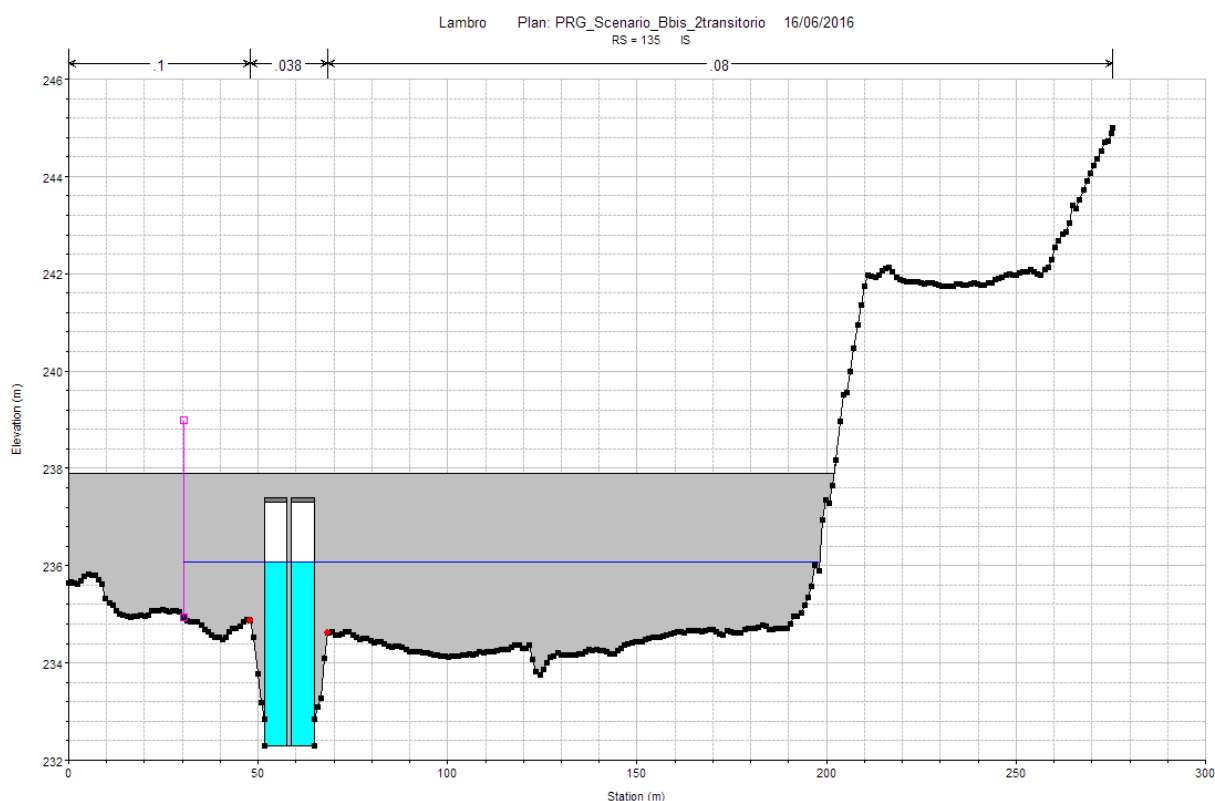


Figura 13 – Livello idrico e apertura delle paratoie nello scenario di Progetto B_bis

4.4.3 Scenario di Progetto C (assetto definitivo)

Mentre lo scenario precedente si pone quale configurazione transitoria durante la realizzazione progressiva degli interventi che dallo stato attuale porteranno allo stato di definitiva sistemazione del corso d'acqua nel tratto d'interesse, lo scenario di Progetto C consente di verificare la funzionalità del manufatto di regolazione con riferimento alle portate indicate nell'assetto di progetto definito dal P.A.I., ovvero al momento in cui tutte le opere di laminazione pianificate a monte dell'area d'interesse saranno realizzate. Tale configurazione prevede che in corrispondenza del ponte della Fornacetta la **portata duecentennale sia pari a $65 \text{ m}^3/\text{s}$** .

L'idrogramma duecentennale in ingresso al modello è quello riportato nella Figura 8 caratterizzato da un picco di portata pari a $65 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tramite il modello matematico è stato possibile determinare l'apertura massima delle paratoie per far transitare a valle una portata di $65 \text{ m}^3/\text{s}$ e verificare i livelli che si instaurano a monte del manufatto di regolazione.

Di seguito si riporta il profilo di piena ottenuto con il modello idraulico e la tabella completa che sintetizza per ciascuna sezione di calcolo le principali grandezze idrauliche. Si rimanda all'ALLEGATO 1 per il dettaglio delle sezioni di calcolo.

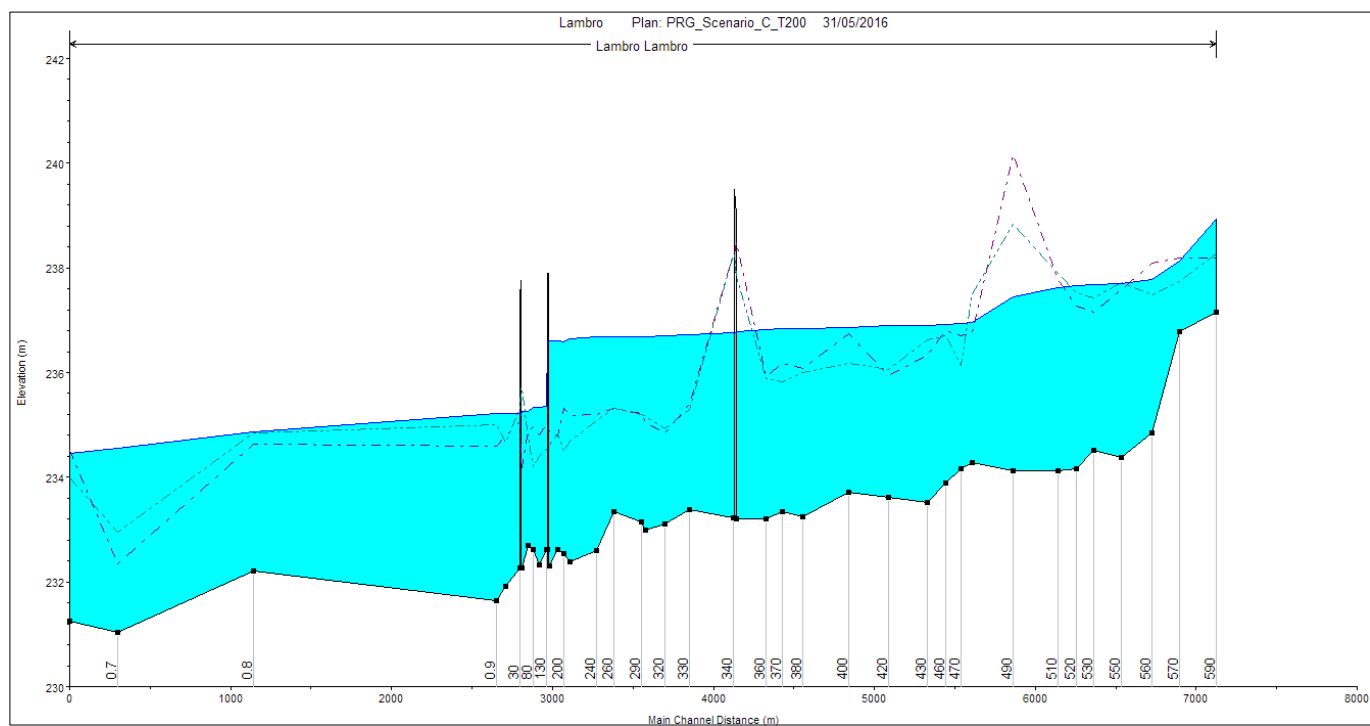


Figura 14 – Profilo di piena T200 calcolato con il modello per lo Scenario Progetto C

Reach	River Sta	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)	F
Lambro	590	64.84	237.16	238.93		238.93	0.000065	0.26	116.05	138.66	0.07
Lambro	570	63.47	236.79	238.12		238.19	0.003365	1.40	72.82	144.71	0.48
Lambro	560	62.93	234.85	237.78		237.84	0.000859	1.16	79.17	128.25	0.26
Lambro	550	63.65	234.38	237.70		237.72	0.000194	0.60	182.69	265.03	0.13
Lambro	530	64.33	234.51	237.68		237.68	0.000194	0.58	201.57	198.48	0.13
Lambro	520	64.84	234.17	237.67		237.67	0.000046	0.31	261.19	296.57	0.06
Lambro	510	65.33	234.13	237.63		237.65	0.000445	0.72	118.31	221.24	0.19
Lambro	490	66.58	234.12	237.45		237.51	0.000681	1.10	84.44	166.40	0.24
Lambro	480	48.69	234.28	236.96		237.05	0.001303	1.34	58.77	123.50	0.32
Lambro	470	48.68	234.16	236.94		236.96	0.000298	0.74	141.09	262.30	0.16
Lambro	460	48.74	233.89	236.92		236.93	0.000238	0.62	176.74	269.25	0.14
Lambro	430	48.87	233.52	236.91		236.91	0.000076	0.39	283.38	302.20	0.08
Lambro	420	49.24	233.61	236.89		236.89	0.000072	0.40	303.77	277.26	0.08
Lambro	400	49.61	233.72	236.87		236.87	0.000096	0.43	205.46	202.49	0.09
Lambro	380	50.07	233.25	236.85		236.85	0.00005	0.36	336.05	261.04	0.07
Lambro	370	50.29	233.34	236.84		236.85	0.000104	0.47	198.38	348.65	0.10
Lambro	360	50.46	233.20	236.83		236.83	0.000103	0.51	195.62	288.19	0.10
Lambro	350	50.76	233.21	236.79	234.58	236.81	0.000234	0.66	79.77	60.07	0.14
Lambro	345	Bridge									
Lambro	340	50.76	233.22	236.77		236.79	0.000285	0.70	72.00	34.42	0.16
Lambro	330	51.23	233.39	236.73		236.74	0.000072	0.42	257.24	288.55	0.08
Lambro	320	51.48	233.11	236.70		236.72	0.000181	0.72	77.03	256.51	0.13
Lambro	300	51.69	232.99	236.69		236.70	0.000097	0.53	154.95	188.94	0.10
Lambro	290	51.73	233.15	236.68		236.70	0.000137	0.63	82.53	292.04	0.12
Lambro	260	52.02	233.34	236.68		236.68	0.000028	0.27	478.14	311.99	0.05
Lambro	240	52.21	232.60	236.68		236.68	0.000014	0.21	609.23	351.62	0.04
Lambro	220	64.85	232.39	236.65		236.68	0.000166	0.72	90.45	479.97	0.13
Lambro	200	64.89	232.55	236.59		236.67	0.000515	1.23	52.71	510.82	0.22
Lambro	170	64.94	232.61	236.61		236.65	0.000219	0.84	77.33	296.57	0.15
Lambro	140	65.00	232.30	236.61	233.64	236.64	0.000193	0.83	77.93	168.31	0.14
Lambro	135	Inl Struct									
Lambro	130	65.00	232.62	235.35		235.44	0.000971	1.35	48.21	69.60	0.29
Lambro	100	65.06	232.33	235.33		235.41	0.000739	1.18	55.13	137.49	0.25
Lambro	80	65.11	232.61	235.34		235.38	0.00036	0.88	73.92	124.33	0.18
Lambro	60	65.15	232.70	235.26		235.36	0.001223	1.39	46.92	102.20	0.32
Lambro	40	65.20	232.26	235.25	233.80	235.32	0.000786	1.19	55.01	64.51	0.26
Lambro	35	Bridge									
Lambro	30	65.20	232.26	235.22		235.28	0.000576	1.03	63.40	45.83	0.22
Lambro	10	65.31	231.91	235.21		235.23	0.000246	0.69	212.49	237.13	0.15
Lambro	0.9	65.40	231.65	235.21		235.21	0.000063	0.36	402.88	315.76	0.07

Lambro	0.8	67.02	232.20	234.87		234.88	0.000387	0.71	195.43	226.59	0.18
Lambro	0.7	82.66	231.04	234.55		234.59	0.000316	0.97	122.57	75.45	0.18
Lambro	0.1	85.37	231.25	234.45		234.49	0.00034	0.83	105.31	77.38	0.17
Lambro	0	85.37	231.25	234.45	232.77	234.49	0.00034	0.83	105.28	77.23	0.17

Tabella 5 – Risultati della simulazione dello Scenario di Progetto C (piena duecentennale)

L'analisi dei risultati mette in evidenza un innalzamento dei livelli a monte dell'opera di regolazione di circa 30 cm **senza però incremento apprezzabile delle aree di esondazione**. La morfologia del territorio, che presenta un alveo fortemente incassato, è infatti tale da far sì che un innalzamento di livello non corrisponde a un uguale allargamento delle aree allagate.

Per consentire di ottenere una portata a valle di 65 m³/s la regolazione delle paratoie deve essere tale da ottenere un'apertura massima delle luci di 1,10 m.

Il livello idrico che si instaura a monte del manufatto di regolazione è pari a 236.60 m s.l.m. quindi con un franco di 1.30 m rispetto alla quota di sommità di 237.9 m s.l.m., mentre a valle del manufatto il livello idrico è pari a 235.35 m s.l.m.

Per conservare i livelli ante operam ed evitare a valle la portata di 65 mc/s, nell'assetto finale, è necessario che i progetti attualmente in corso di sviluppo per le ulteriori opere a monte vadano a ridurre ulteriormente le portate in ingresso al sistema di cui al presente progetto. Ovvero, per mantenere gli stessi livelli, è necessario definire tra i soggetti coinvolti una opportuna regola di gestione che possa evitare a valle portate maggiori.

Tale aspetto è già stato chiarito dai progettisti del progetto definitivo e noto al Committente, che lo ha ribadito nella nota di istruzioni agli scriventi progettisti per la redazione del progetto esecutivo.

Nelle figure seguenti si riportano a titolo di sintesi l'idrogramma laminato in uscita dalla vasca e la rappresentazione della regolazione delle paratoie calcolata col modello.

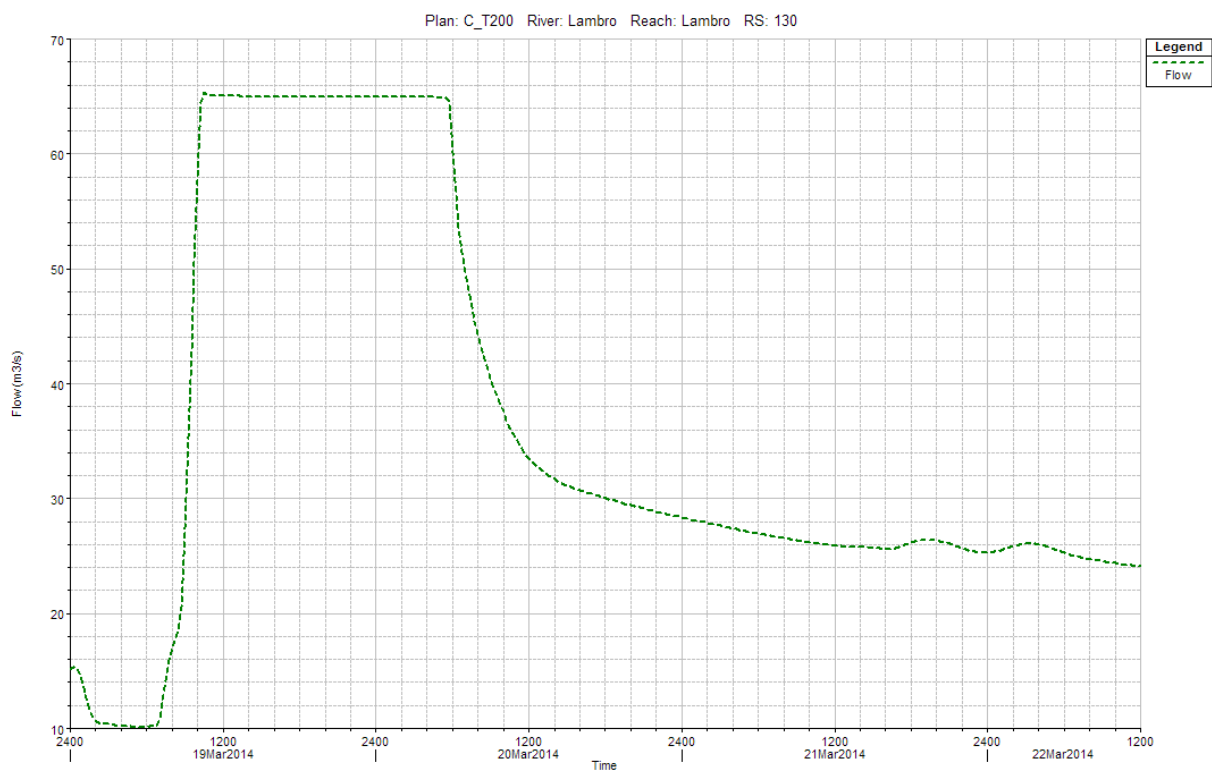


Figura 15 – Idrogramma T200 in uscita dalla vasca nello scenario di Progetto C

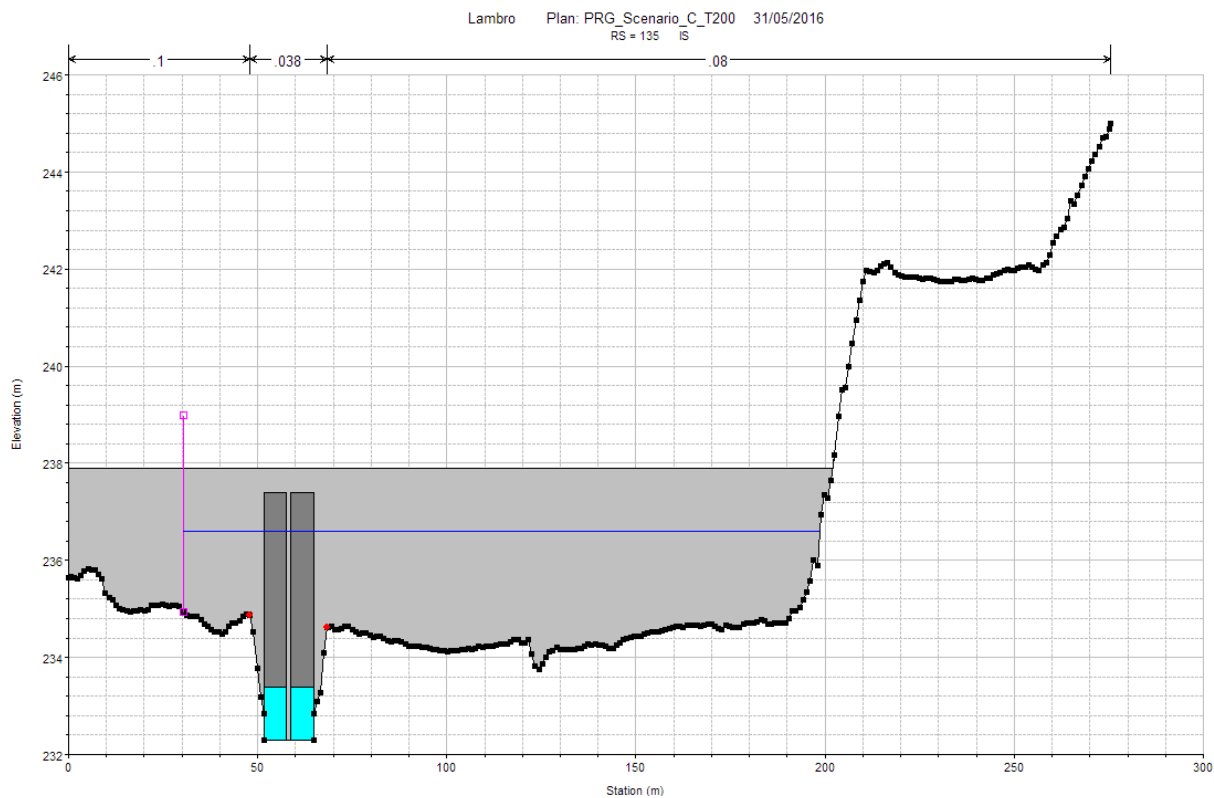


Figura 16 – Livello idrico T200 e apertura delle paratoie nello scenario di Progetto C

Nella presente progettazione, ai sensi del punto 9.2 *"Dispositivi idraulici di scarico. Scarichi di superficie"* della DGR della Regione Lombardia 3699/2001 (Direttive per l'applicazione della L.R. 23 marzo 1998 n. 8) è inoltre stato dimensionato il manufatto di sfioro superficiale. Secondo tale direttiva gli sbarramenti in materiali sciolti devono essere non tracimabili e i loro scarichi di superficie devono essere realizzati con manufatti in muratura indipendenti dal rilevato.

Sempre secondo la DGR 3699/2001 la portata di piena di progetto per gli scarichi di superficie viene assunta, per gli sbarramenti con altezza superiore a 10 m o che diano luogo a volumi totali di invaso sup a 100'000 mc, pari alla portata naturale di piena del bacino sotteso allo sbarramento non inferiore a T500.

E' stato quindi simulato uno Scenario di Progetto C considerando un evento di piena caratterizzato da un tempo di ritorno di 500 anni. L'idrogramma cinquecentennale in ingresso al modello è quello riportato nella Figura 9 caratterizzato da un picco di portata pari a $85 \text{ m}^3/\text{s}$. Lo sfioratore in progetto prevede una soglia sfiorante di lunghezza 15 metri e posta a quota 236.60 m s.l.m.

La verifica del funzionamento dello sfioratore è stata condotta ipotizzando che le luci di fondo siano chiuse per il 50%, che nel manufatto di progetto corrisponde ad ipotizzare che una luce sia completamente chiusa mentre l'altra aperta. Ciò può simulare ad esempio un malfunzionamento di una paratoia, ovvero l'occlusione di una luce per effetto del materiale trasportato dalla corrente.

Tramite il modello matematico è stato possibile determinare l'efficienza dello sfioratore in termini di franco idraulico di sicurezza e di portata transitante a valle della vasca.

Di seguito si riporta il profilo di piena ottenuto con il modello idraulico e la tabella completa che sintetizza per ciascuna sezione di calcolo le principali grandezze idrauliche. Si rimanda all'ALLEGATO 1 per il dettaglio delle sezioni di calcolo.

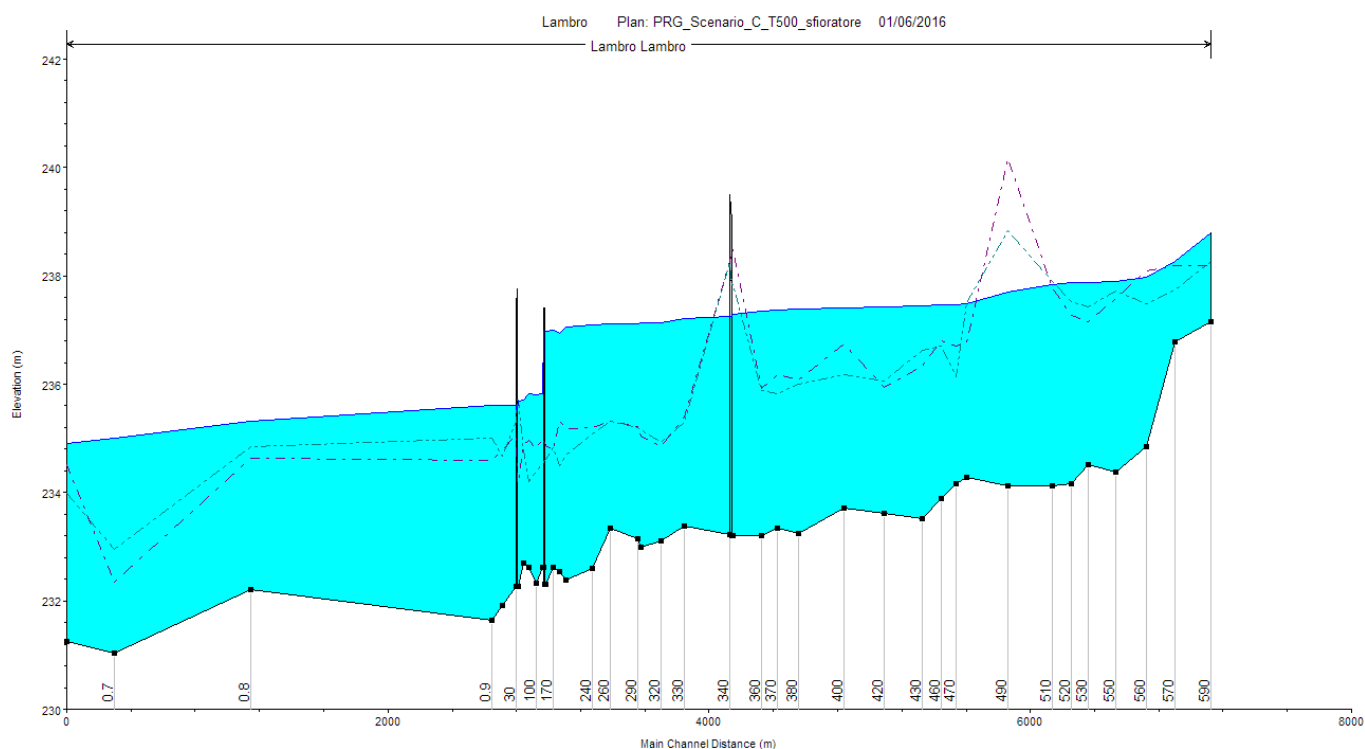


Figura 17 – Profilo di piena T500 calcolato con il modello per lo Scenario Progetto C

Reach	River Sta	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)	F
Lambro	590	84.80	237.16	238.82		238.88	0.001974	1.35	102.04	134.16	0.39
Lambro	570	84.36	236.79	238.30		238.36	0.002612	1.36	98.82	153.36	0.43
Lambro	560	83.92	234.85	238.00		238.06	0.00089	1.24	110.36	146.32	0.27
Lambro	550	84.19	234.38	237.92		237.94	0.000191	0.63	241.43	268.90	0.13
Lambro	530	84.45	234.51	237.89		237.90	0.0002	0.63	245.65	206.56	0.13
Lambro	520	84.69	234.17	237.88		237.89	0.000046	0.33	326.72	306.37	0.06
Lambro	510	84.84	234.13	237.85		237.87	0.000314	0.64	170.42	233.49	0.16
Lambro	490	84.99	234.12	237.70		237.75	0.000627	1.09	127.84	174.31	0.23
Lambro	480	84.76	234.28	237.50		237.56	0.000966	1.27	150.87	216.22	0.28
Lambro	470	84.79	234.16	237.48		237.50	0.00022	0.74	290.48	288.19	0.14
Lambro	460	84.92	233.89	237.46		237.47	0.00018	0.64	325.62	280.01	0.13
Lambro	430	85.11	233.52	237.45		237.46	0.000072	0.44	449.43	308.42	0.08
Lambro	420	85.49	233.61	237.43		237.44	0.000075	0.47	458.26	286.20	0.08
Lambro	400	85.93	233.72	237.41		237.42	0.000101	0.51	316.05	206.95	0.10
Lambro	380	86.40	233.25	237.39		237.39	0.000058	0.43	485.95	293.07	0.07
Lambro	370	86.66	233.34	237.37		237.39	0.000122	0.59	292.07	372.38	0.11
Lambro	360	86.84	233.20	237.36		237.37	0.000133	0.65	279.69	315.89	0.11
Lambro	350	87.15	233.21	237.30	235.07	237.34	0.000328	0.87	128.76	130.99	0.17
Lambro	345	Bridge									
Lambro	340	87.15	233.22	237.25		237.30	0.000411	0.95	114.57	119.31	0.19
Lambro	330	87.65	233.39	237.21		237.21	0.000099	0.55	333.38	347.64	0.10
Lambro	320	87.92	233.11	237.15		237.20	0.000324	1.06	93.49	279.62	0.18
Lambro	300	88.15	232.99	237.14		237.16	0.000157	0.73	193.46	242.10	0.13
Lambro	290	88.18	233.15	237.12		237.16	0.000254	0.93	94.39	323.41	0.16
Lambro	260	88.49	233.34	237.11		237.11	0.000039	0.35	619.30	341.12	0.06
Lambro	240	88.69	232.60	237.11		237.11	0.000021	0.28	761.68	352.93	0.05
Lambro	220	103.47	232.39	237.06		237.11	0.000283	1.01	101.99	537.29	0.17
Lambro	200	103.51	232.55	236.94		237.10	0.000929	1.77	58.44	515.40	0.30
Lambro	170	103.57	232.61	237.00		237.07	0.000386	1.20	86.25	332.33	0.20
Lambro	140	103.63	232.30	236.98	234.08	237.05	0.00036	1.21	85.56	173.96	0.19
Lambro	135	Inl Struct									
Lambro	130	103.59	232.62	235.82		235.98	0.001302	1.77	58.39	158.58	0.34
Lambro	100	103.66	232.33	235.81		235.93	0.000975	1.54	67.10	151.48	0.30
Lambro	80	103.72	232.61	235.83		235.90	0.000496	1.17	88.81	136.99	0.22
Lambro	60	103.72	232.70	235.71		235.87	0.001556	1.80	57.70	114.56	0.37
Lambro	40	103.77	232.26	235.70	234.26	235.82	0.00114	1.55	66.92	74.25	0.32
Lambro	35	Bridge									
Lambro	30	103.69	232.26	235.62		235.71	0.000867	1.38	75.02	55.78	0.28
Lambro	10	103.84	231.91	235.62		235.63	0.000248	0.78	310.37	248.59	0.15
Lambro	0.9	103.90	231.65	235.61		235.62	0.000075	0.43	532.66	337.63	0.08

Lambro	0.8	100.79	232.20	235.35		235.36	0.000258	0.69	310.59	257.40	0.15
Lambro	0.7	122.87	231.04	235.05		235.11	0.000372	1.17	162.36	82.11	0.20
Lambro	0.1	124.55	231.25	234.95		234.99	0.000343	0.95	169.21	141.74	0.18
Lambro	0	124.56	231.25	234.95	232.99	234.99	0.000343	0.95	169.17	141.73	0.18

Tabella 6 – Risultati della simulazione dello Scenario di Progetto C (piena cinquecentennale)

Il livello idrico che si instaura sulla soglia sfiorante è pari a 236.98 m s.l.m. quindi con un franco di 0.92 m rispetto alla quota di sommità di 237.9 m s.l.m. A valle del manufatto il livello idrico che si instaura è pari a 235.82 m s.l.m. La portata transitante a valle del manufatto di regolazione è pari a circa 115 m³/s. Nelle figure seguenti si riportano a titolo di sintesi la verifica dello sfioratore mediante modello e l'idrogramma cinquecentennale in uscita dalla vasca.

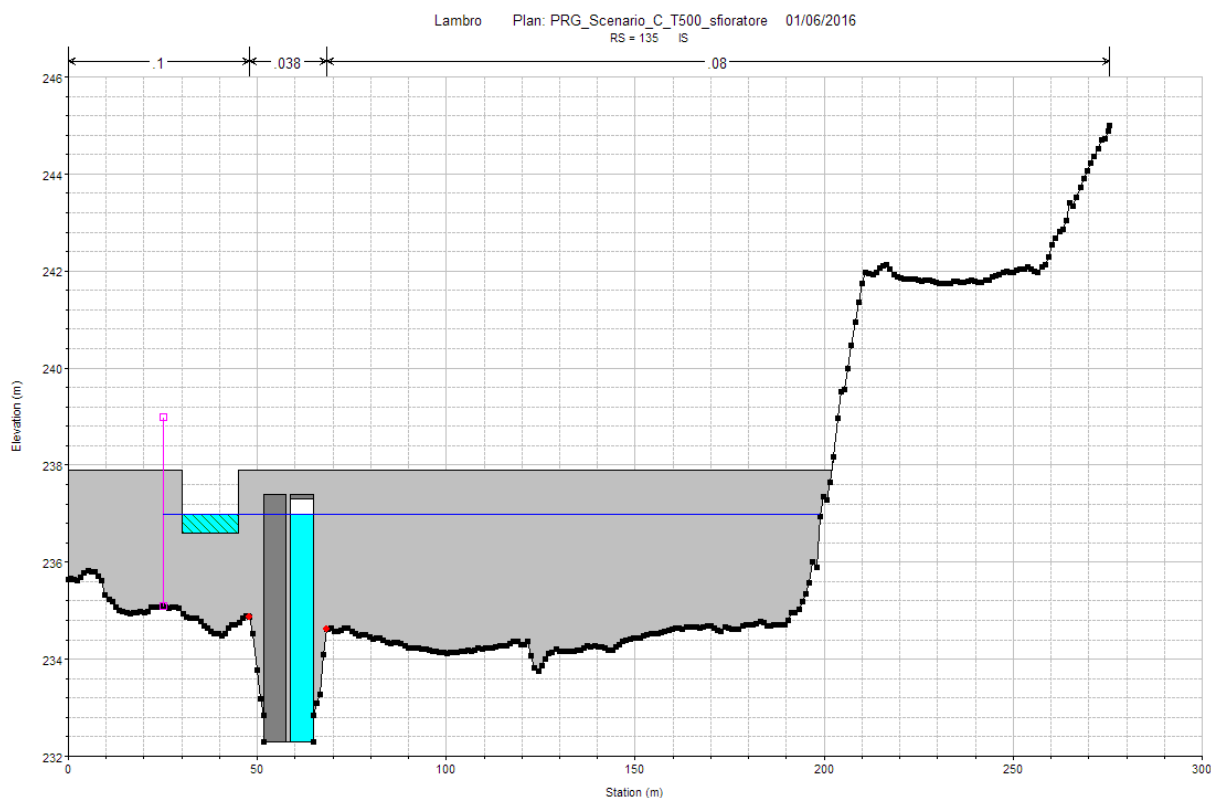


Figura 18 – Livello idrico T500 in corrispondenza del manufatto di regolazione e sfioro

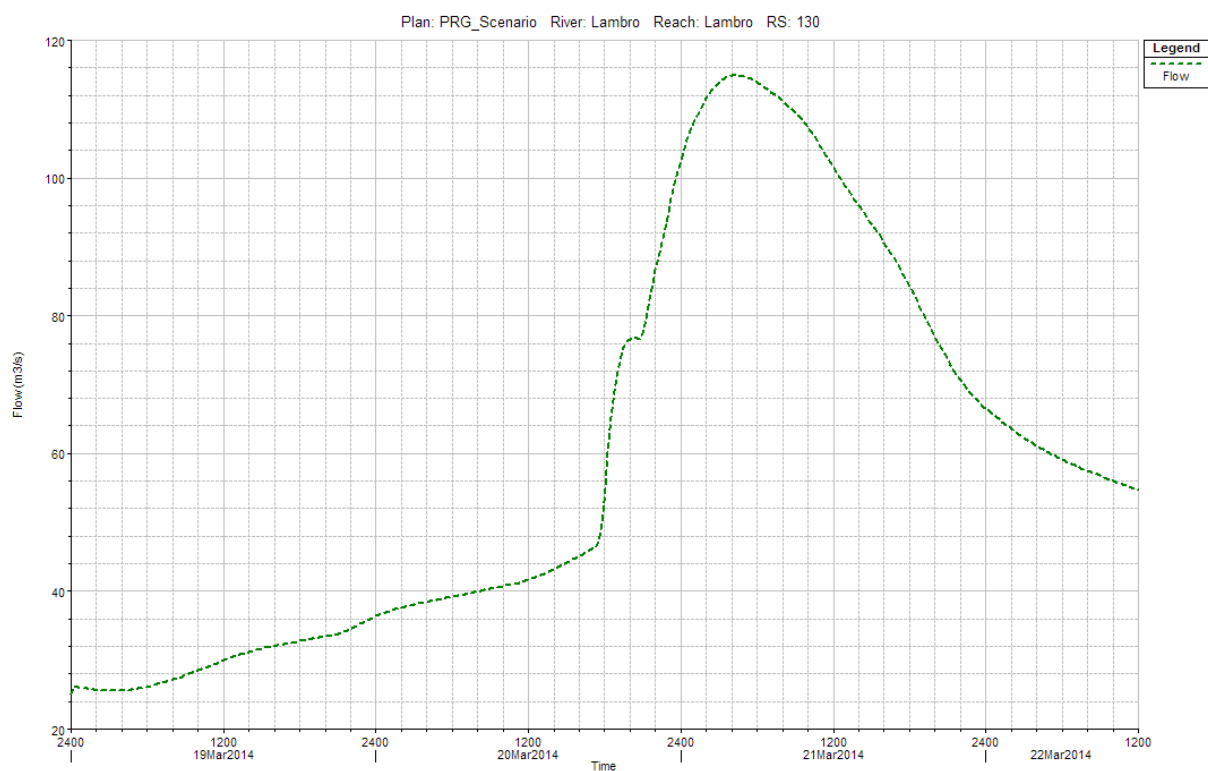


Figura 19 – Idrogramma T500 in uscita dalla vasca nello scenario di Progetto C con sfioratore funzionante

5. VERIFICHE ALLA FILTRAZIONE DEL RILEVATO ARGINALE

Allo scopo di valutare l'efficacia delle nuove arginature in progetto è stata effettuata una verifica al sifonamento mediante l'implementazione di un modello bidimensionale agli elementi finiti attraverso il codice di calcolo *SEEP2D* e l'interfaccia grafica *GMS 6.0 (Groundwater Modelling System)*.

Per la sezione più critica (in termini di carico idraulico) è stata effettuata la simulazione del moto di filtrazione a favore di sicurezza, considerando il livello di massima piena coincidente con la sommità arginale e annullando il franco idraulico di sicurezza.

Partendo dai risultati ottenuti si sono quindi effettuate le verifiche al sifonamento utilizzando sia il metodo del gradiente critico che il metodo della velocità limite, in cui si mettono a confronto le velocità di filtrazione che si instaurano all'interno del terreno con la velocità limite di trascinamento delle particelle oltre la quale la stabilità della fondazione risulta critica.

5.1 Scelta della sezione da sottoporre a verifica

In primo luogo si è provveduto a scegliere, tra le varie sezioni di progetto, quella più sfavorevole, ovvero caratterizzata dalle più gravose condizioni in relazione ai moti di filtrazione. La scelta della sezione è stata effettuata in base ai seguenti criteri:

- massimo dislivello tra la quota di sommità arginale e il piano campagna;
- percorso di filtrazione più breve.

Dopo un'accurata analisi è stata cautelativamente scelta la sezione n. 3 in corrispondenza del manufatto di regolazione (zona Fornacetta) che presenta un dislivello tra la sommità arginale ed il piano campagna di 4 metri.

5.2 Implementazione del modello di filtrazione

5.2.1 Caratteristiche del modello matematico

I calcoli sono stati effettuati utilizzando un modello matematico agli elementi finiti bidimensionale sul piano verticale. L'equazione differenziale che descrive il moto vario bidimensionale nel piano verticale entro un acquifero saturo è la seguente:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

in cui:

- $h [m] = z + p/\gamma$ è il carico idraulico variabile da punto a punto in funzione del tempo ($h(x,z,t)$);
- γ è il peso specifico dell'acqua,

- $k_x, k_z [m/s]$ sono i valori dei coefficienti di permeabilità nelle due direzioni del piano verticale x-z;
- $S_S [m^{-1}]$ è il coefficiente di immagazzinamento specifico, funzione delle caratteristiche di comprimibilità dell'acqua e del mezzo poroso.

Salvo particolari applicazioni (problemi di subsidenza), considerato il valore molto piccolo di S_S si trascura interamente il termine a secondo membro dell'equazione sopra riportata. Con questa semplificazione scompare l'influenza diretta della variabile temporale e l'evoluzione temporale del carico idraulico è dovuta esclusivamente alle condizioni al contorno, anch'esse variabili nel tempo.

La soluzione, con S_S posto uguale a zero, viene individuata tramite il metodo degli elementi finiti; come è noto questo metodo prevede una suddivisione del dominio di interesse in elementi di forma regolare (mesh) entro i quali si ipotizza un certo andamento analitico (funzioni interpolari) della funzione incognita da individuare. Gli elementi sono definiti geometricamente dalle coordinate dei nodi di contorno in corrispondenza dei quali il metodo fornisce il valore dell'incognita.

Nel modello matematico adottato le funzioni interpolari sono state imposte lineari, le funzioni peso sono state poste uguali alle funzioni interpolari e di conseguenza anch'esse lineari (metodo di Galerkin).

5.2.2 Schematizzazione geometrica delle sezioni

Il primo passo è stato quello di riprodurre geometricamente la sezione di progetto sottoposte a verifica. Utilizzando il modulo *MAP* dell'interfaccia grafica *GMS 6.0* si è pertanto ricostruita la geometria del rilevato arginale e del terreno di fondazione posto immediatamente al di sotto di essa; ai fini delle verifiche di filtrazione, le sezioni sono state schematizzate in modo da ricondurle ad una situazione geometricamente semplificata ma più gravosa, trascurando in particolare il terreno vegetale superficiale.

Le condizioni di moto sono state supposte piane ed il campo di moto è stato delimitato:

- inferiormente, con un piano impermeabile posto alla quota di 223.55 m s.l.m.;
- lato campagna, con una sezione verticale posta a circa 5 m dal piede arginale;
- lato vasca, con una sezione verticale posta a circa 5 metri dal piede arginale.

L'assetto litostratigrafico è stato definito sulla base dei risultati delle indagini sismiche e delle prove penetrometriche eseguite nell'ambito della presente progettazione in corrispondenza delle nuove opere in progetto. In particolare per la zona Fornacetta i terreni di fondazione sono costituiti prevalentemente da limi sabbioso-argillosi per i quali è stato assunto un valore di permeabilità pari a 1.00×10^{-6} m/s. Per quanto riguarda invece il materiale costituente il nuovo rilevato arginale si è assunto, a favore di sicurezza, un valore di k pari a 5×10^{-7} m/s corrispondente ad un **materiale di tipo A4** secondo la classificazione proposta dalle norme CNR-UNI 10006.

5.2.3 Condizioni al contorno

Come già detto per la verifica alla filtrazione il livello idrico lato vasca è stato assunto pari alla quota di sommità arginale di 237.90 m s.l.m..

A lato campagna invece è stata presa in considerazione la condizione più gravosa ovvero quella di terreno saturo imponendo una condizione di carico costante posta alla stessa quota del piano campagna ovvero a 233.90 m s.l.m. La simulazione è in condizioni stazionarie.

5.3 Analisi dei risultati ottenuti

Nel presente paragrafo sono riportati ed analizzati i risultati ottenuti nella simulazione, in termini sia di velocità massima di filtrazione sia di portata totale filtrante, entrambi riferiti alla sezione trasversale e pertanto da intendersi come valori unitari (per sviluppo longitudinale). Nella tabelle seguenti si riportano la massima velocità di filtrazione riscontrata all'interno del campo di moto, la portata totale filtrante e la permeabilità del substrato all'interno del quale si instaura la massima velocità, nonché il valore di piena di riferimento ed il massimo valore del carico idraulico considerato.

Sezione	V_{max} (m/s)	Q_{TOT} (mc/s)	$K_{substrato}$ (m/s)	Livello max (m s.l.m.)	H_{max} (m)
Sezione 3 Zona Fornacetta	6.43×10^{-7}	1.77×10^{-8}	1.00×10^{-6}	237.90	4.00

Tabella 7: Risultati della simulazione matematica

Nelle figura seguente si riporta il reticolo di filtrazione ottenuto con il modello.

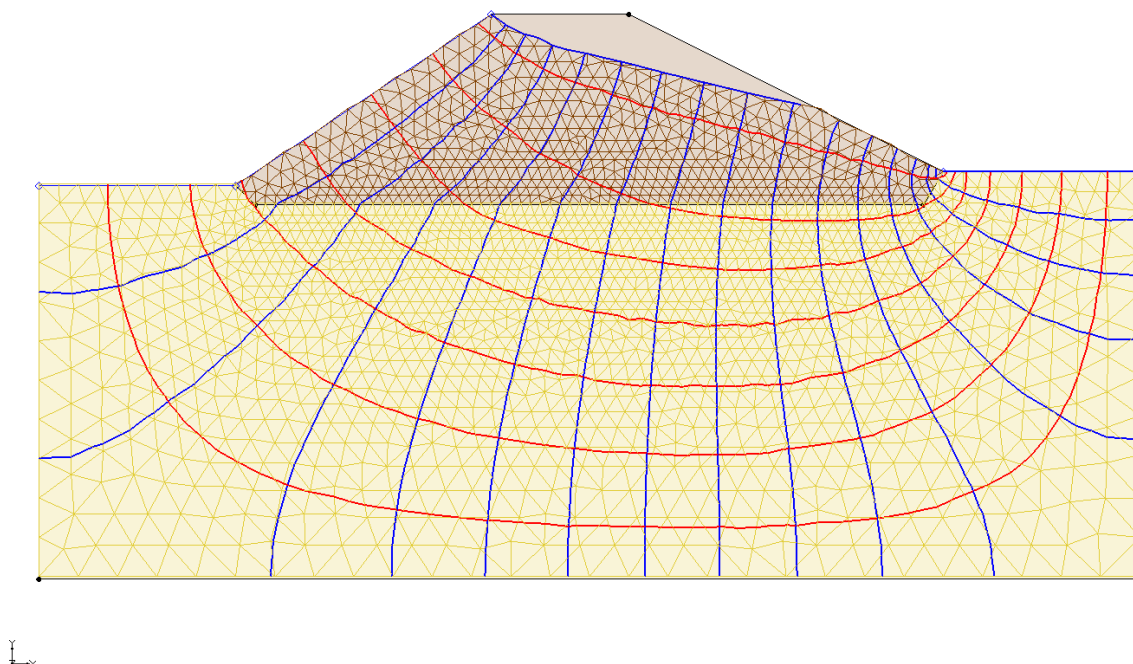


Figura 20 – Reticolo di filtrazione calcolato con la simulazione matematica

Dalle figura si evince che la linea di filtrazione intercetta per un breve tratto il rilevato arginale, senza però nessuna conseguenza nei confronti della sua stabilità, in quanto le componenti della velocità sono tali da non provocare fuoriuscite di acqua dal paramento. Inoltre, come descritto, nel paragrafo successivo le velocità di filtrazioni sono di entità tale da non instaurare in alcun modo fenomeni di sifonamento all'interno del rilevato.

5.4 Verifiche al sifonamento

5.4.1 Verifica al sifonamento con il metodo del gradiente critico

Con riferimento al concetto di gradiente idraulico critico si ricorda che il movimento dell'acqua all'interno di un materiale granulare dà luogo ad un campo di pressioni neutre che possono arrivare ad annullare la pressione effettiva e di conseguenza le particelle di un terreno granulare possono essere trascinate dall'acqua in movimento.

Il metodo di verifica del gradiente critico consente di mettere a confronto i massimi gradienti che si determinano nel campo di filtrazione con il cosiddetto gradiente critico ottenuto imponendo l'equilibrio tra le forze stabilizzanti (forza peso) e le forze destabilizzanti (forza di filtrazione).

Il valore del gradiente critico, secondo fonti di letteratura, si aggira normalmente intorno all'unità (si tratta di un numero puro adimensionale), mentre i massimi valori del gradiente all'interno del

campo di moto si possono calcolare dividendo il massimo valore della velocità riscontrato per il valore della permeabilità del substrato all'interno del quale avviene il moto: il grado di sicurezza al sifonamento è tanto più elevato quanto più il gradiente così determinato è inferiore all'unità. I risultati della verifica vengono riassunti nella tabella seguente in cui si riporta il massimo valore del gradiente che si instaura all'interno del campo di moto.

$K_{\text{substrato}}$ (m/s)	V_{max} (m/s)	Gradiente massimo	Gradiente critico
1.00×10^{-6}	6.43×10^{-7}	0.643	1

Tabella 8: Risultati verifica al sifonamento con il metodo del gradiente critico

5.4.2 Verifica delle velocità limite

Con questo metodo si confronta il massimo valore della velocità con alcuni valori caratteristici, dette *velocità limite*, oltre le quali si riscontra sperimentalmente un trascinamento dei granuli di terreno. I valori delle *velocità limite* sono stati determinati in contesti diversi dal presente, normalmente nel campo di utilizzazione di pozzi per acqua. A questo scopo si considera il più piccolo tra i seguenti valori:

$$V_{1, \text{limite}} = 0.03 \text{ m/s}$$

e

$$V_{2, \text{limite}} = \sqrt{k} / 15 \quad (\text{formula di Sichardt})$$

I risultati delle verifiche vengono riassunti nella tabella seguente in cui si riportano il valore della velocità massima di filtrazione, il valore della permeabilità del terreno in cui questa velocità si manifesta e il valore della velocità limite.

$K_{\text{substrato}}$ (m/s)	V_{max} (m/s)	V_{limite} (m/s)
1.00×10^{-6}	6.43×10^{-7}	6.67×10^{-5}

Tabella 9: Risultati verifica al sifonamento con il metodo della velocità limite

I valori dei gradienti massimi ottenuti risultano sempre inferiori a 1 e quindi la verifica al sifonamento risulta positiva; in altri termini le velocità di filtrazione che si instaurano all'interno del corpo arginale sono tali da non movimentare le particelle di terreno costituenti il rilevato arginale stesso. Analogamente le velocità limite calcolate utilizzando la formula di Sichardt risultano

sempre superiori alle massime velocità di filtrazione che si manifestano all'interno del campo di moto per cui anche in questo caso la verifica al sifonamento risulta positiva.

6. CONCLUSIONI

La presente relazione idrologico-idraulica è stata predisposta con l'intento di descrivere gli approfondimenti idraulici svolti nel presente Progetto Esecutivo

In particolare gli approfondimenti idraulici condotti nell'ambito della presente progettazione definitiva hanno riguardato i seguenti aspetti:

- Aggiornamento dello scenario attuale che tiene in considerazione l'adeguamento idraulico del cavo Diotti già realizzato.
- Modellazione idraulica per il dimensionamento e la verifica delle opere in progetto nello scenario idrologico attuale e nell'ipotesi di realizzazione delle opere previste dal PAI.
- Modellazione idraulica per il dimensionamento e la verifica dell'opera di sfioro.
- Verifiche al sifonamento dei nuovi rilevati arginali.

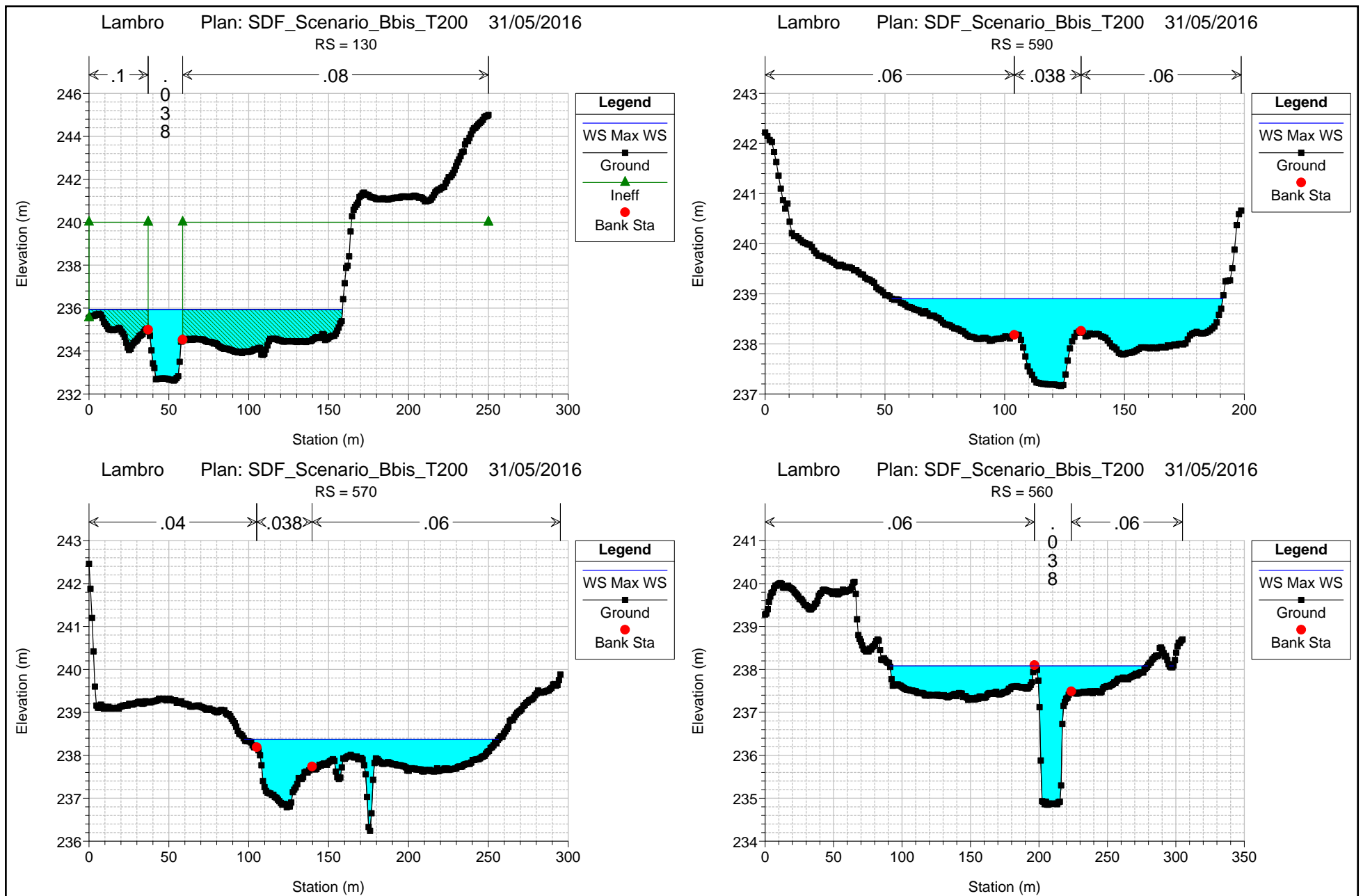
Non avendo a disposizione il modello matematico implemento per la fase di progettazione definitiva, gli scriventi hanno provveduto a raccogliere e analizzare criticamente gli studi pregressi e i dati resi disponibili dal Committente al fine di ricostruire lo stesso modello idraulico utilizzato nella precedente fase progettuale.

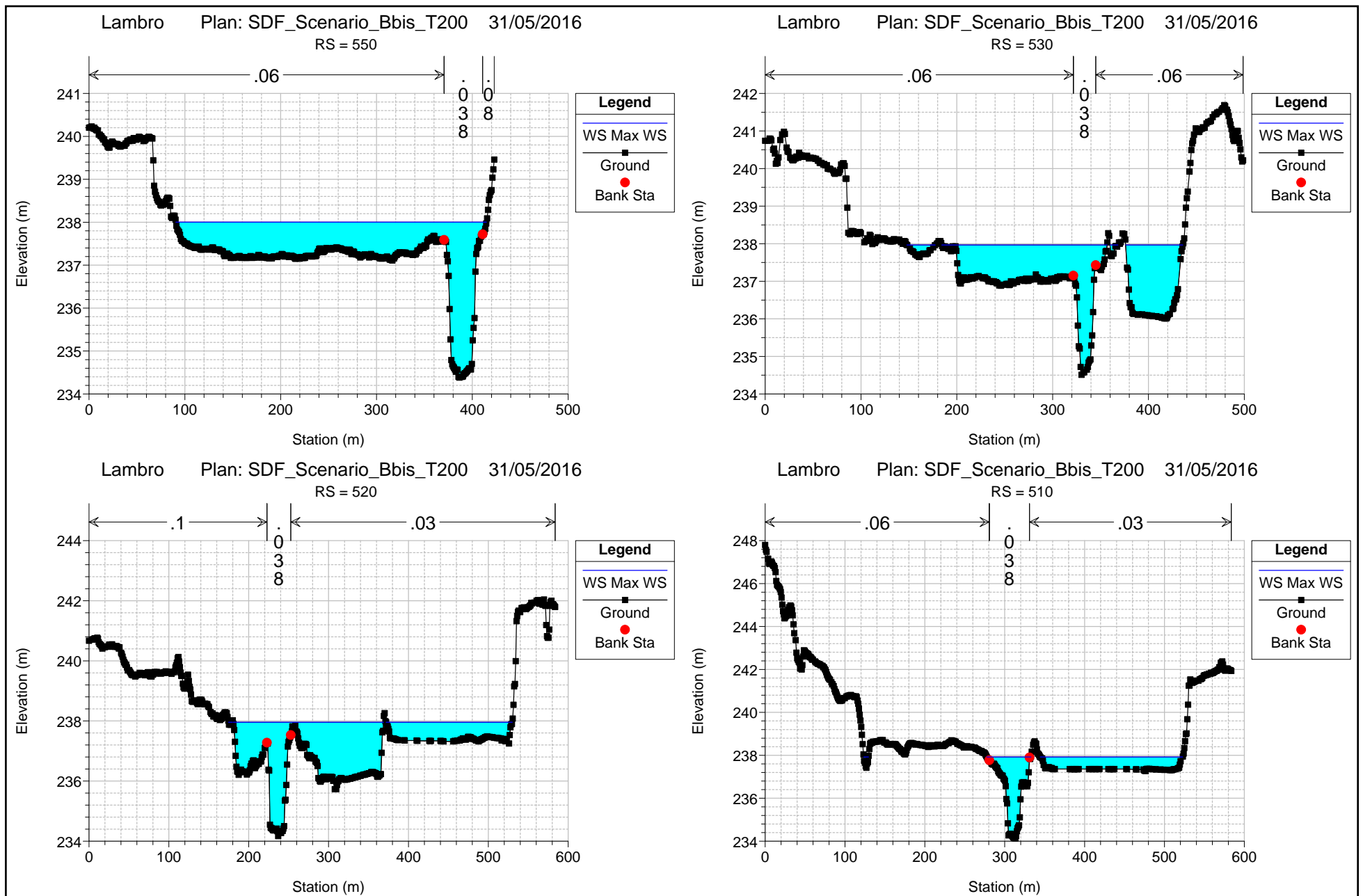
Il comportamento idrodinamico del fiume Lambro nel tratto d'interesse e la verifica delle opere in progetto è stato quindi approfondito mediante la simulazione dei seguenti scenari:

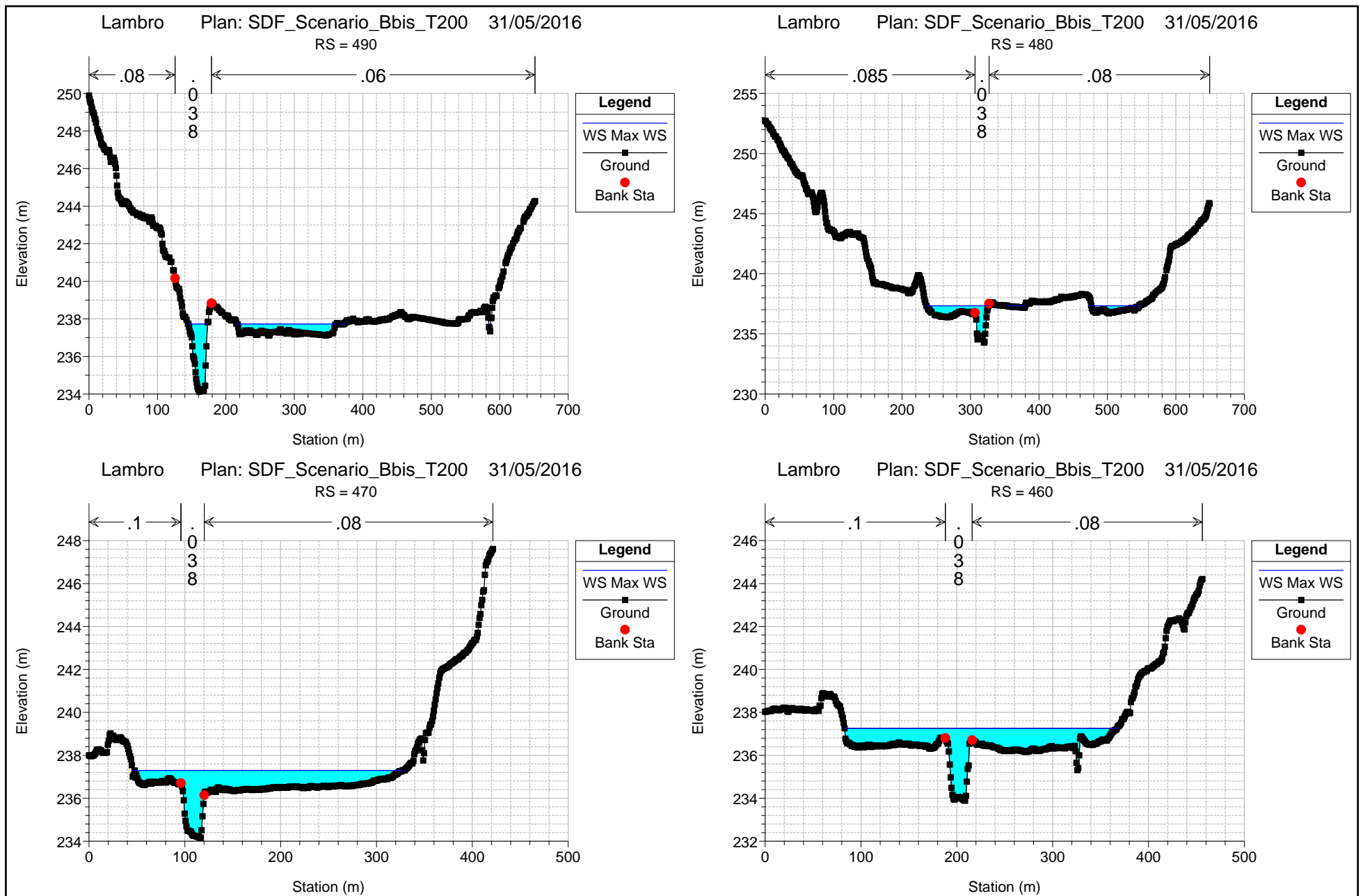
1. **Scenario Attuale B_bis:** portate T200 con sistemazione idraulica del cavo Diotti e senza opera di laminazione in progetto.
2. **Scenario di Progetto B_bis (assetto transitorio):** portate T200 anni con sistemazione idraulica del cavo Diotti e con opera di laminazione in progetto.
3. **Scenario di Progetto C (assetto definitivo):** portate di progetto P.A.I. T200 e T500 anni con opera di laminazione in progetto.

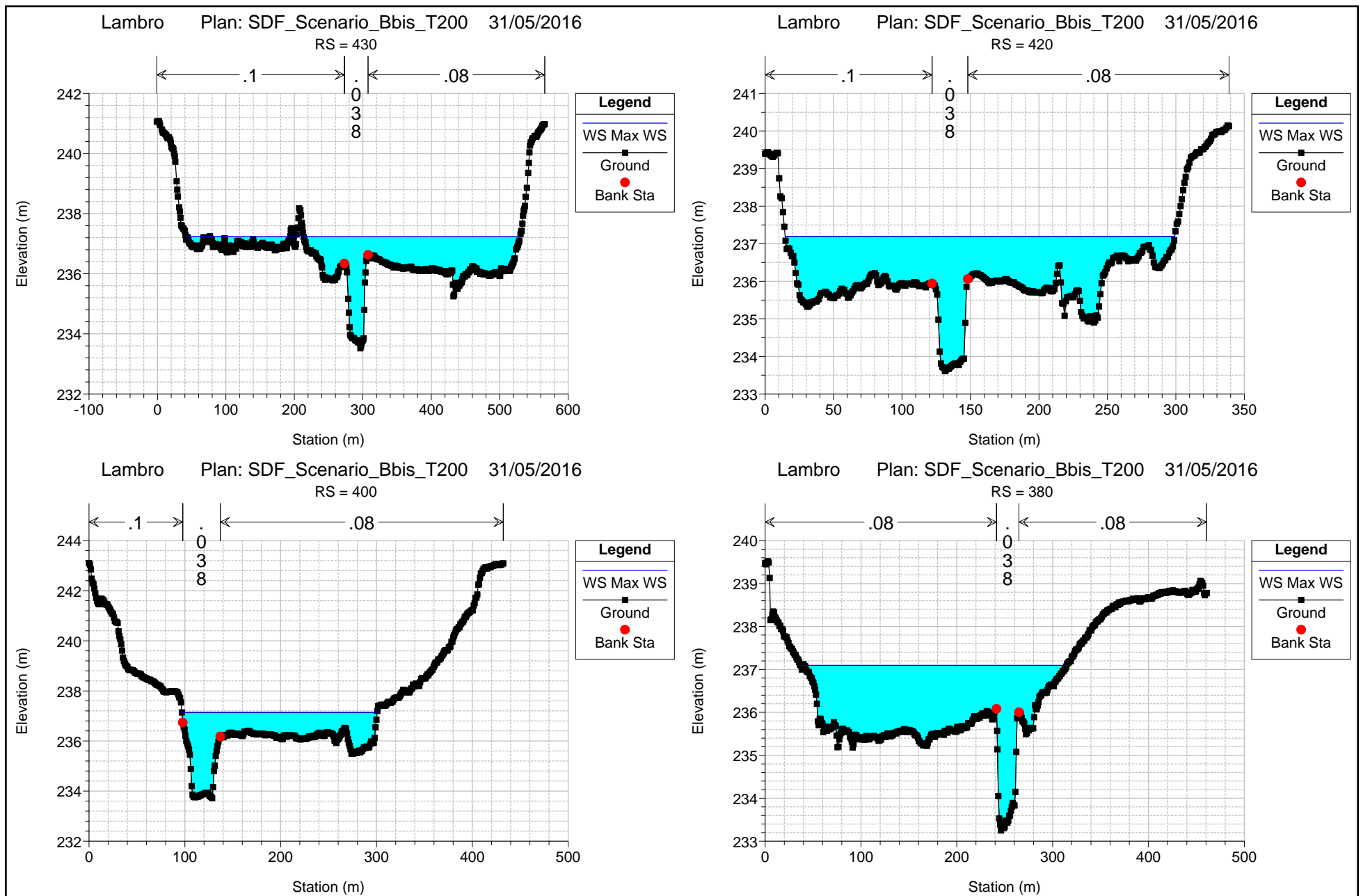
Le simulazioni idrauliche hanno quindi consentito di verificare il funzionamento e l'efficienza della nuova opera di laminazione ed in particolare del manufatto di regolazione. Inoltre ai sensi del punto 9.2 "Dispositivi idraulici di scarico. Scarichi di superficie" della DGR della Regione Lombardia 3699/2001 (Direttive per l'applicazione della L.R. 23 marzo 1998 n. 8) è stato dimensionato il manufatto di sfioro superficiale. Infine sono state svolte le verifiche al sifonamento dei nuovi rilevati arginali.

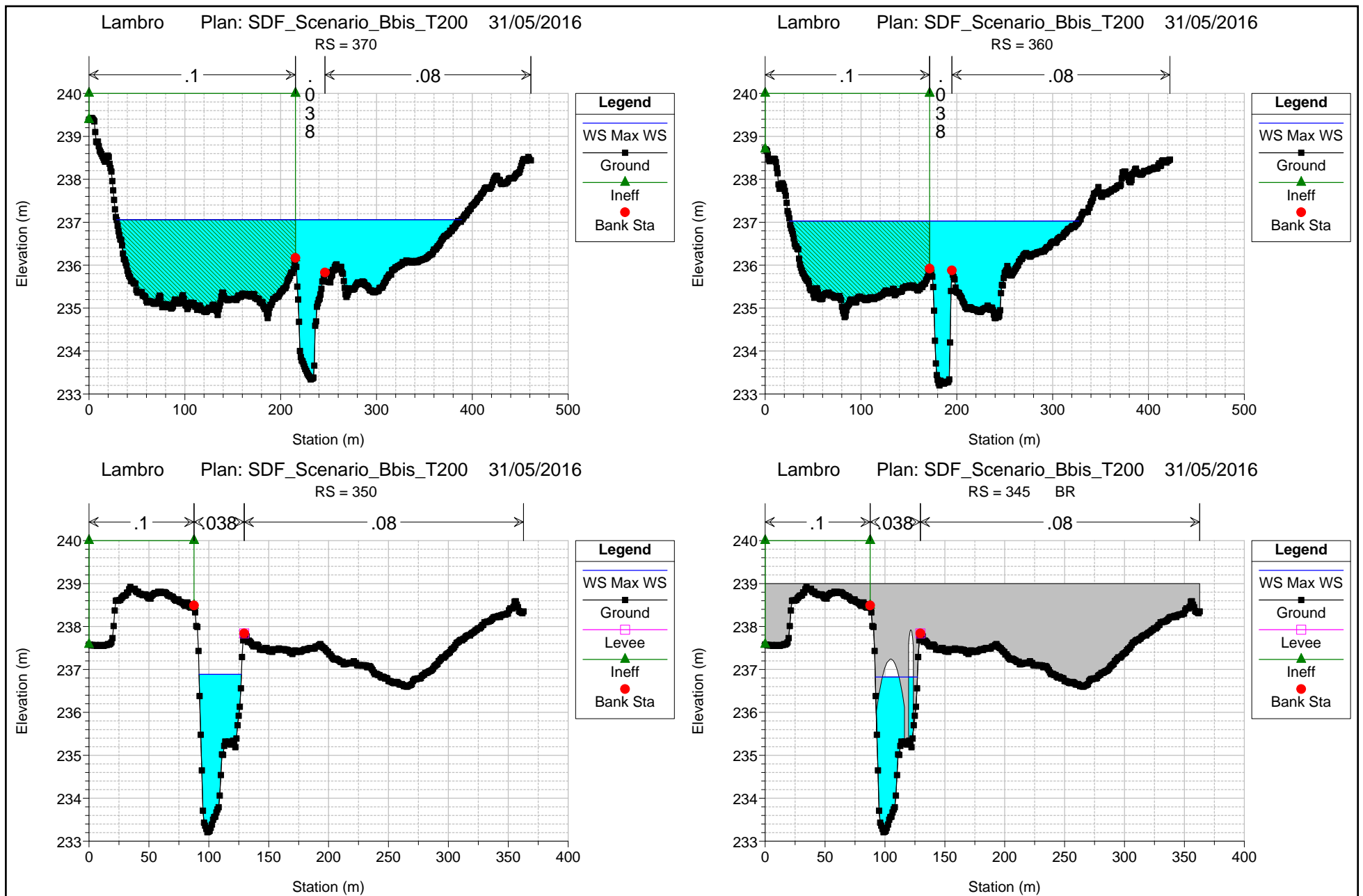
ALLEGATO 1: Sezioni di calcolo e livelli di piena nei diversi scenari

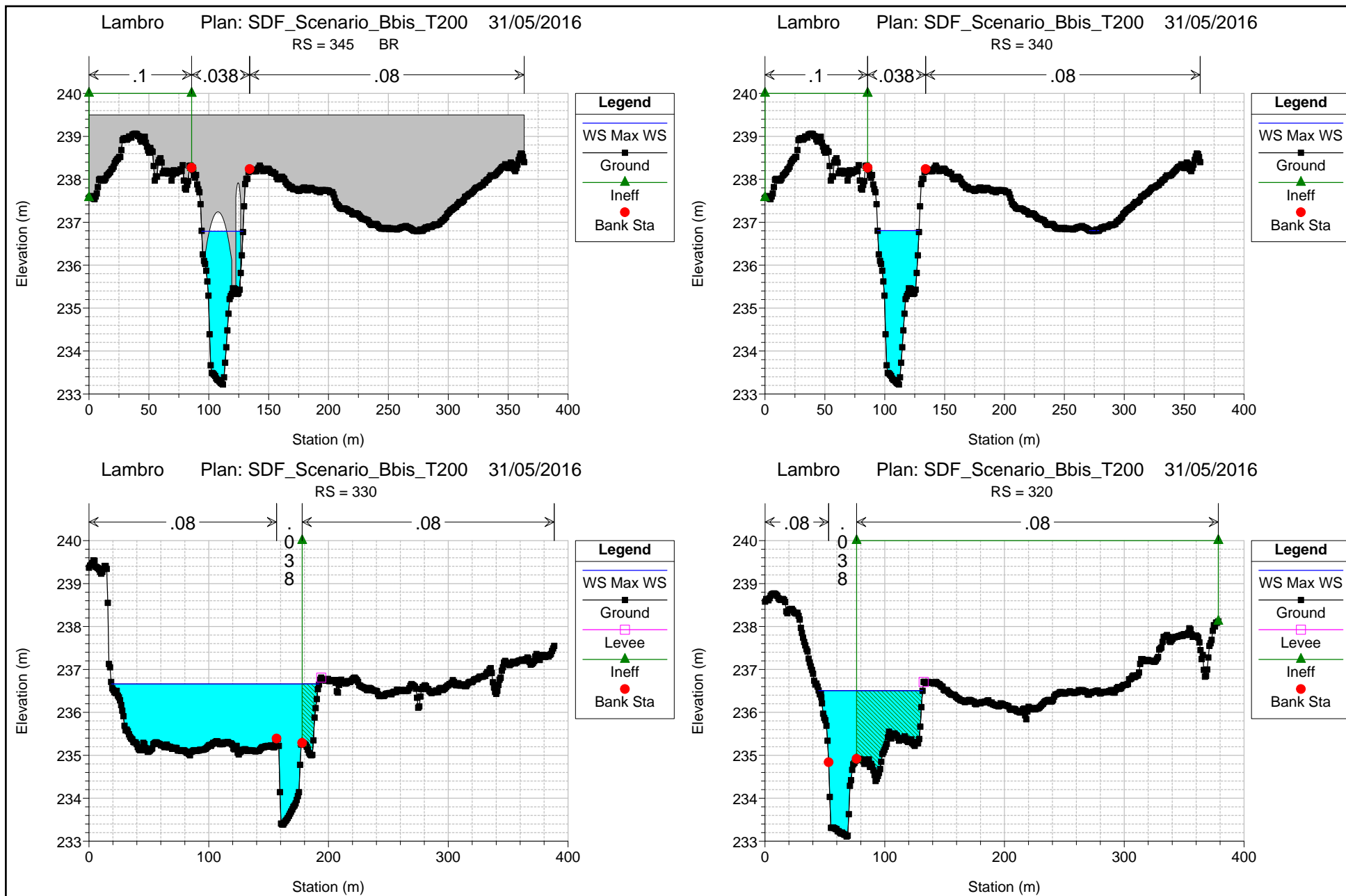


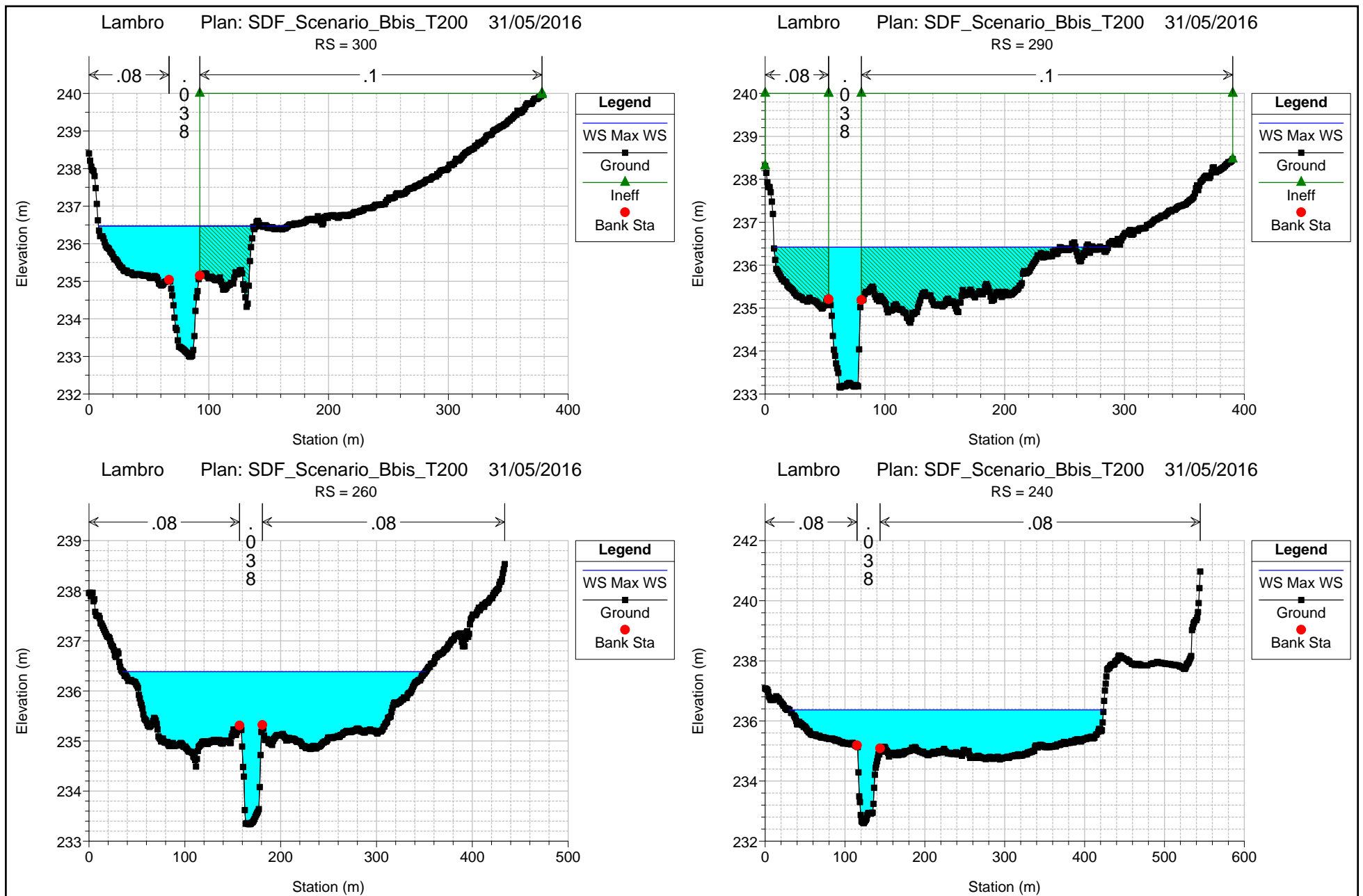


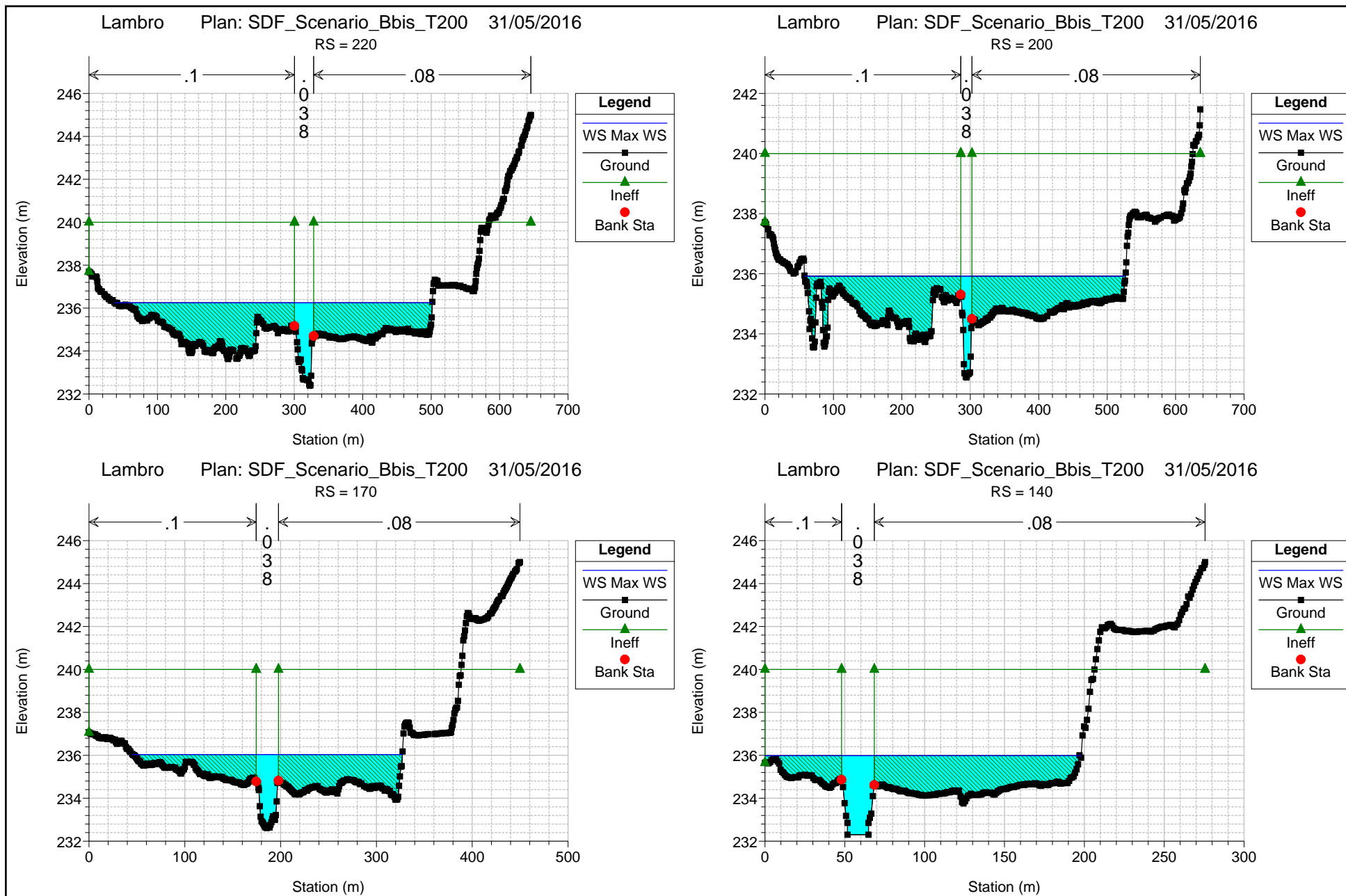


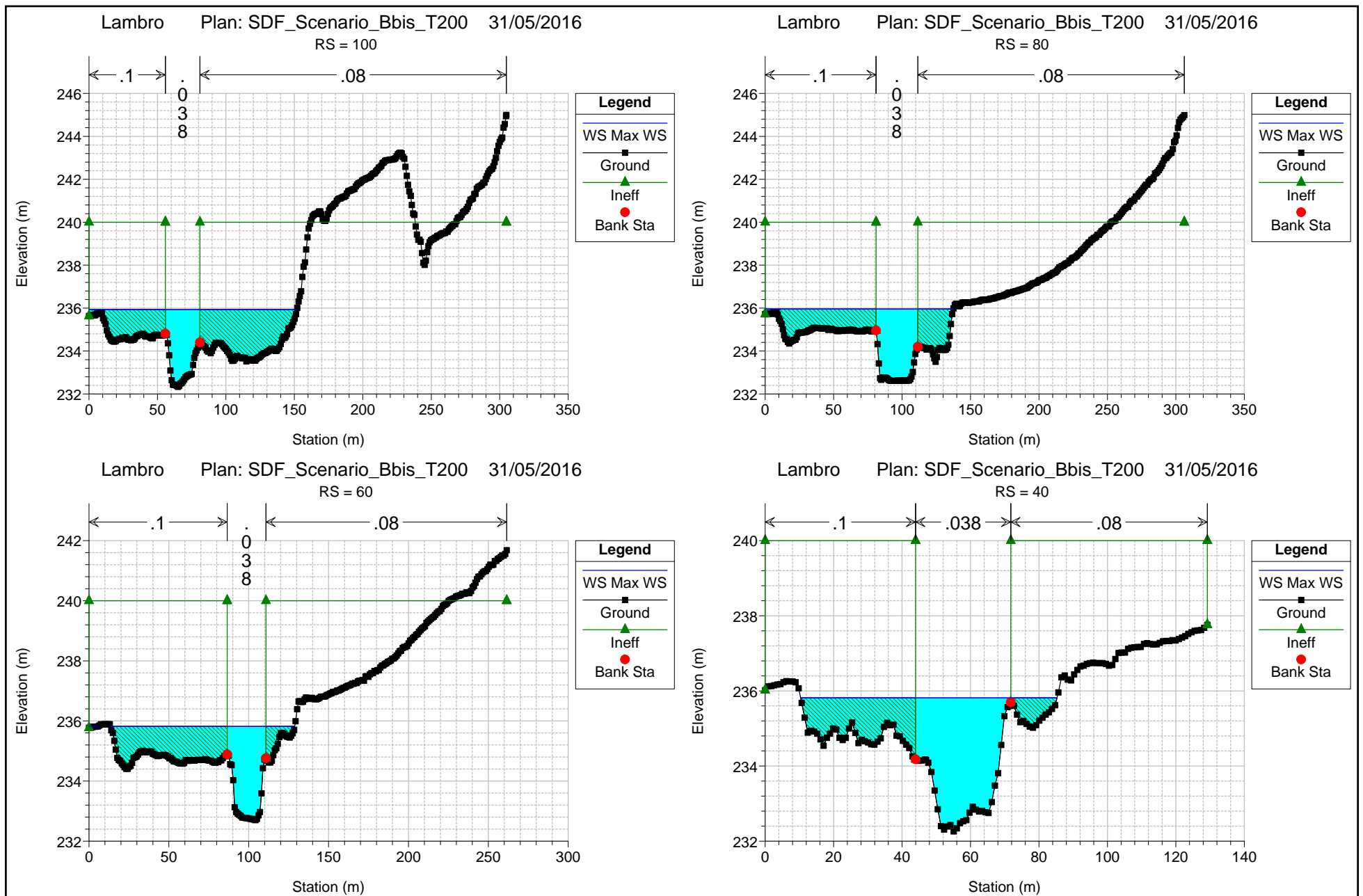


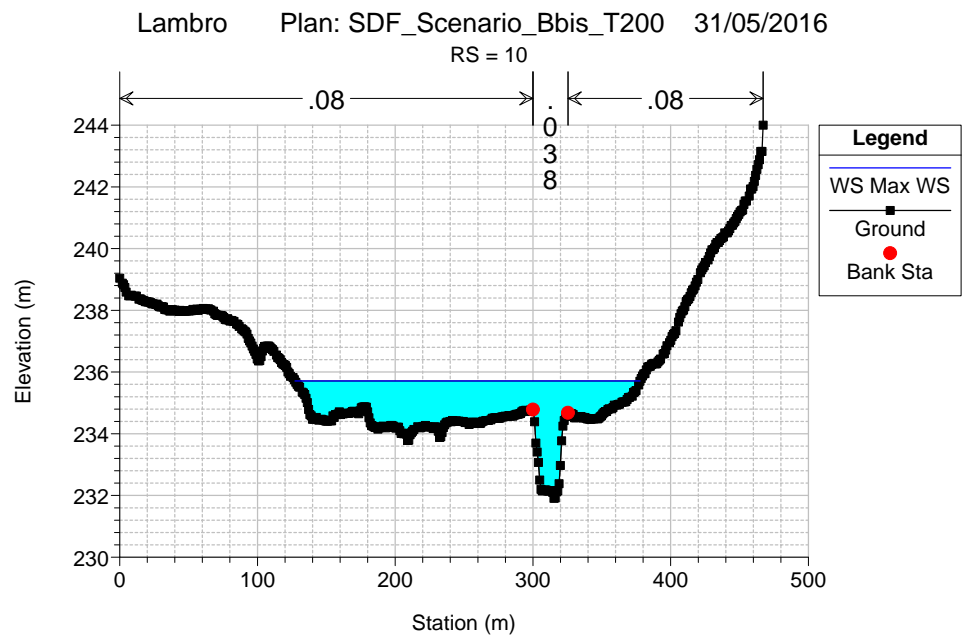
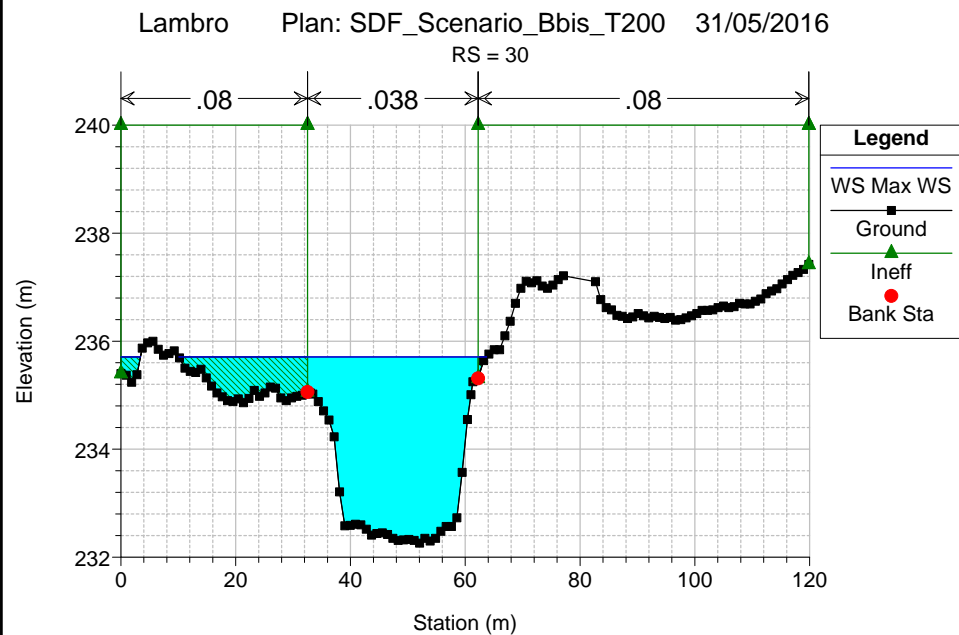
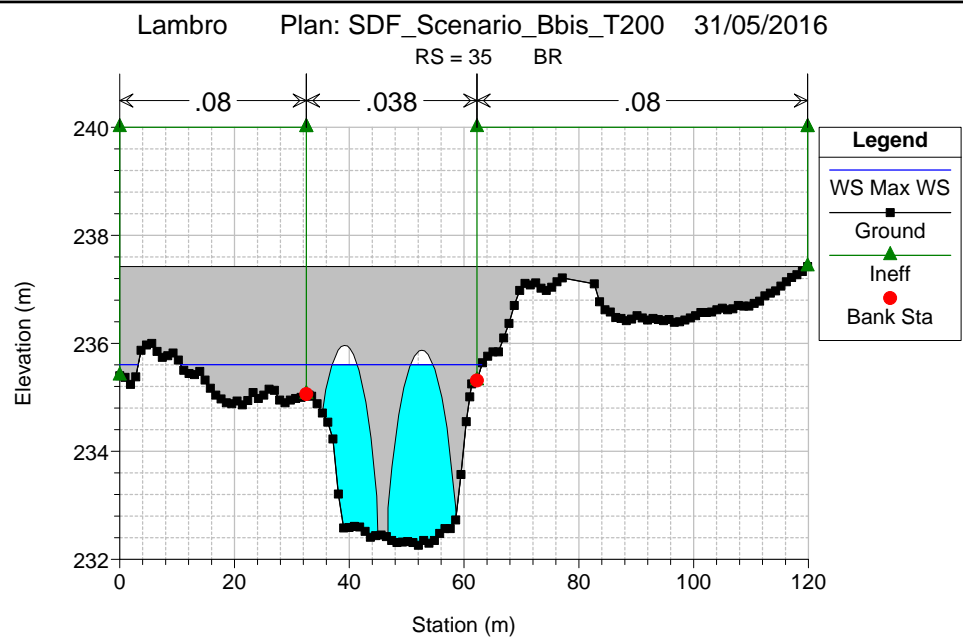
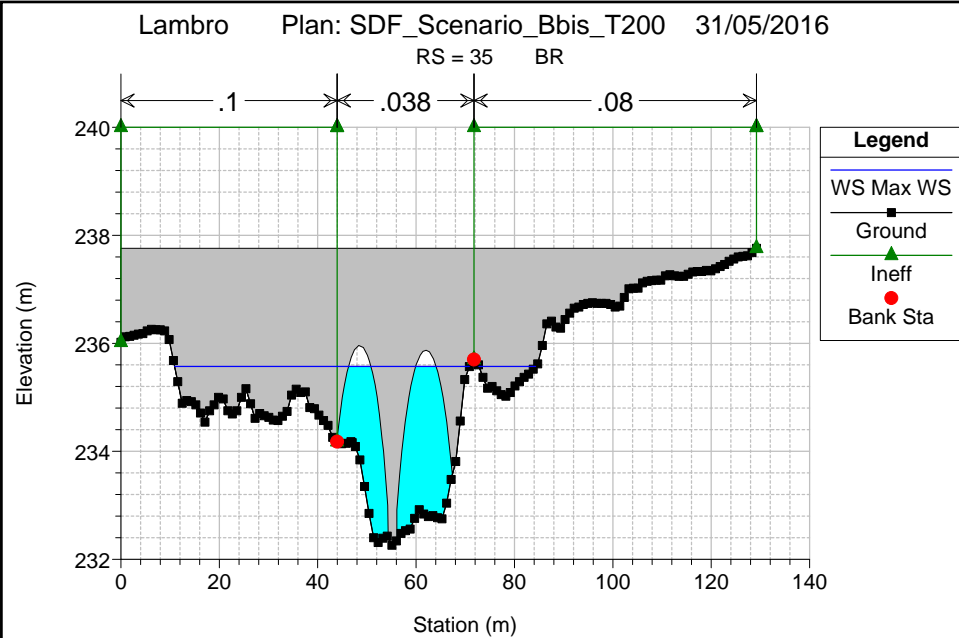




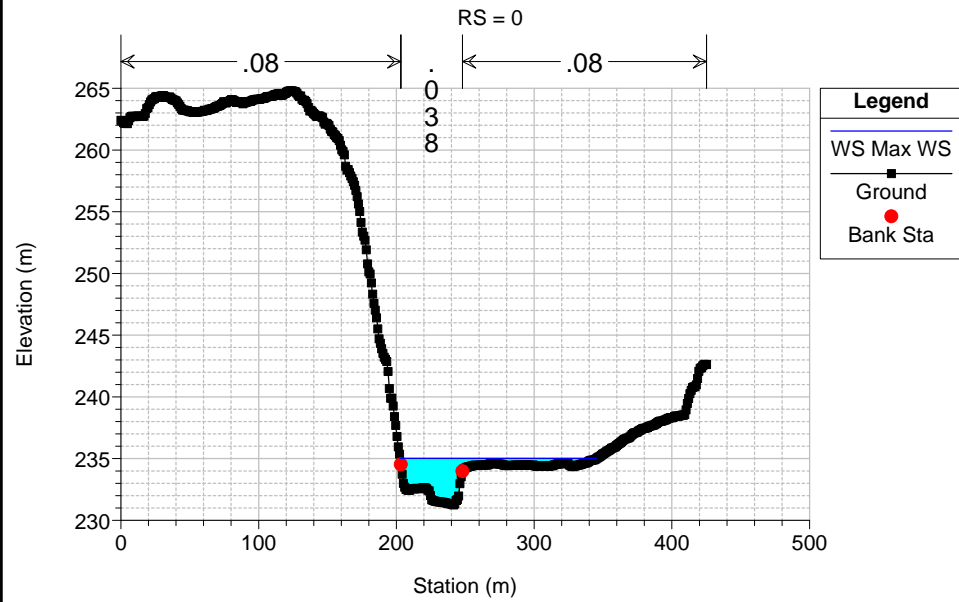




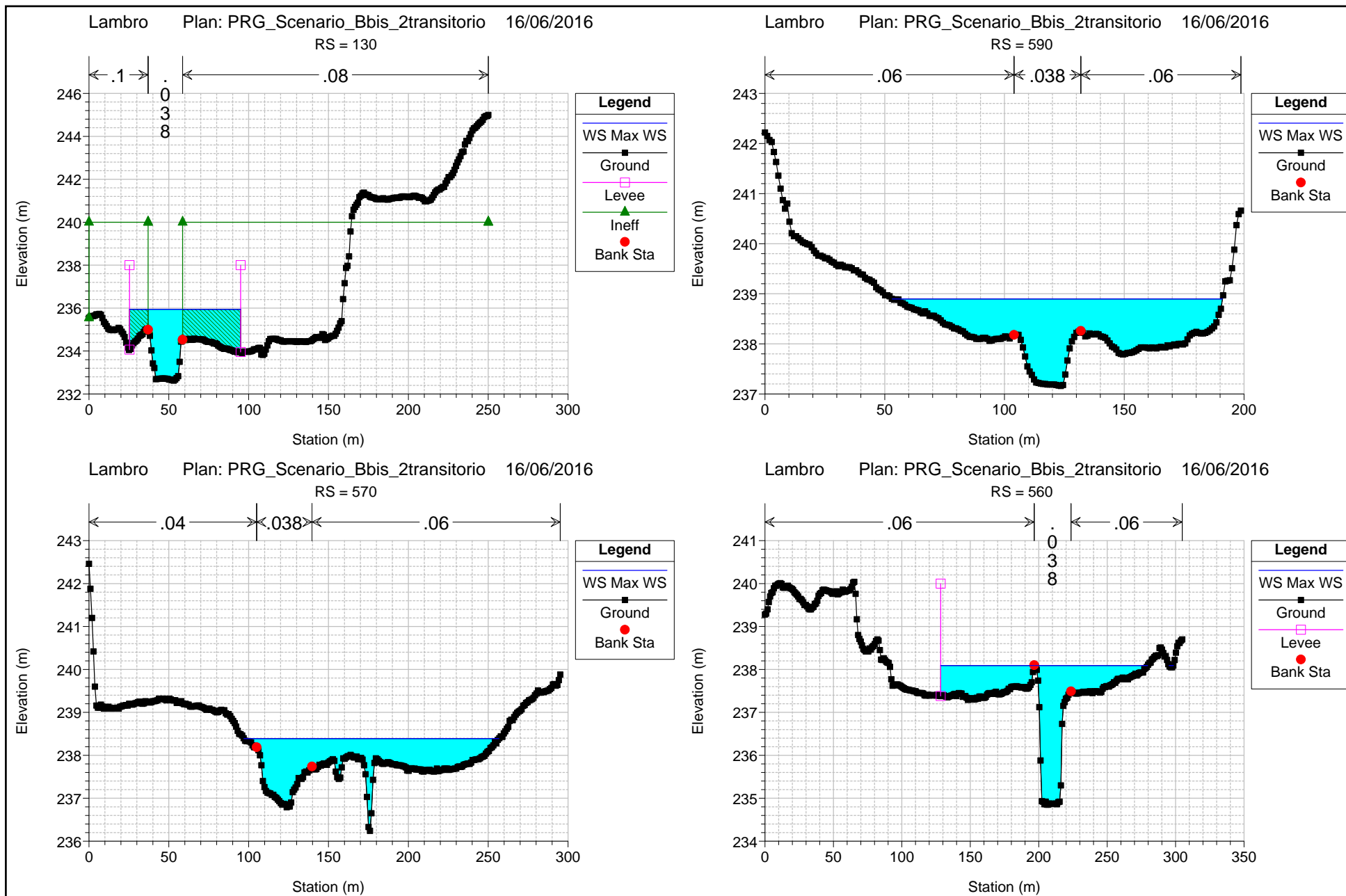


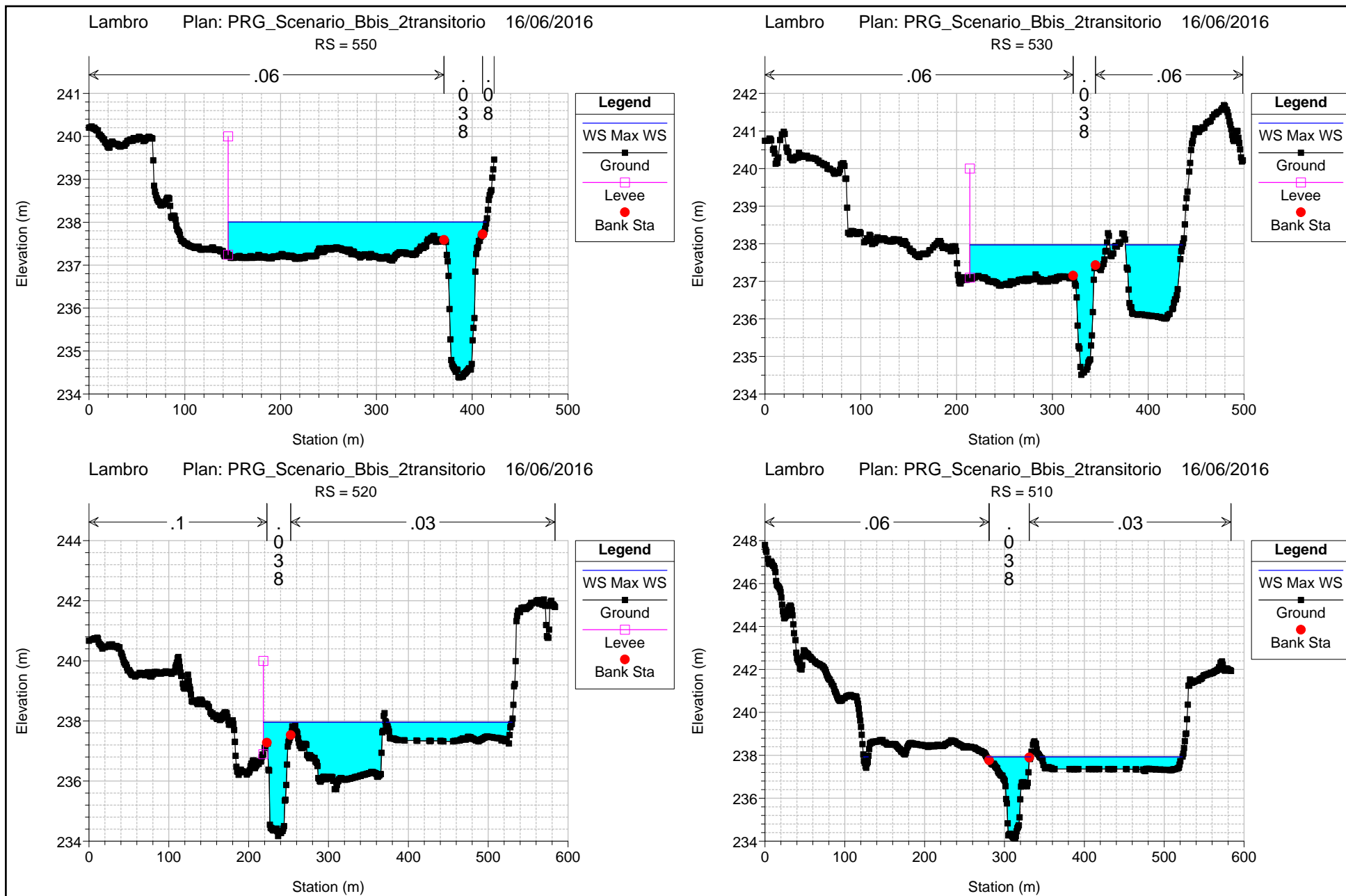


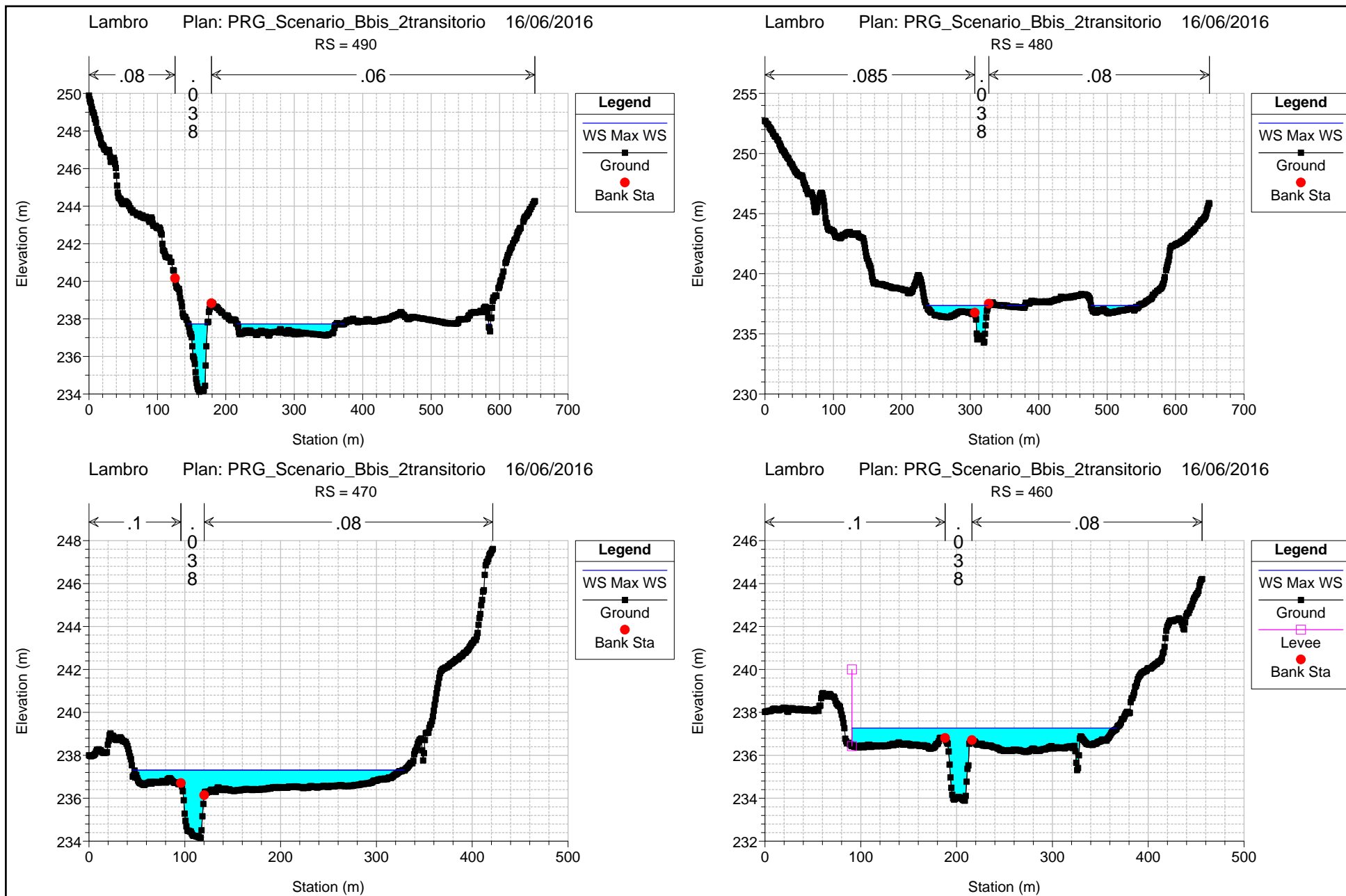
Lambro Plan: SDF_Scenario_Bbis_T200 31/05/2016

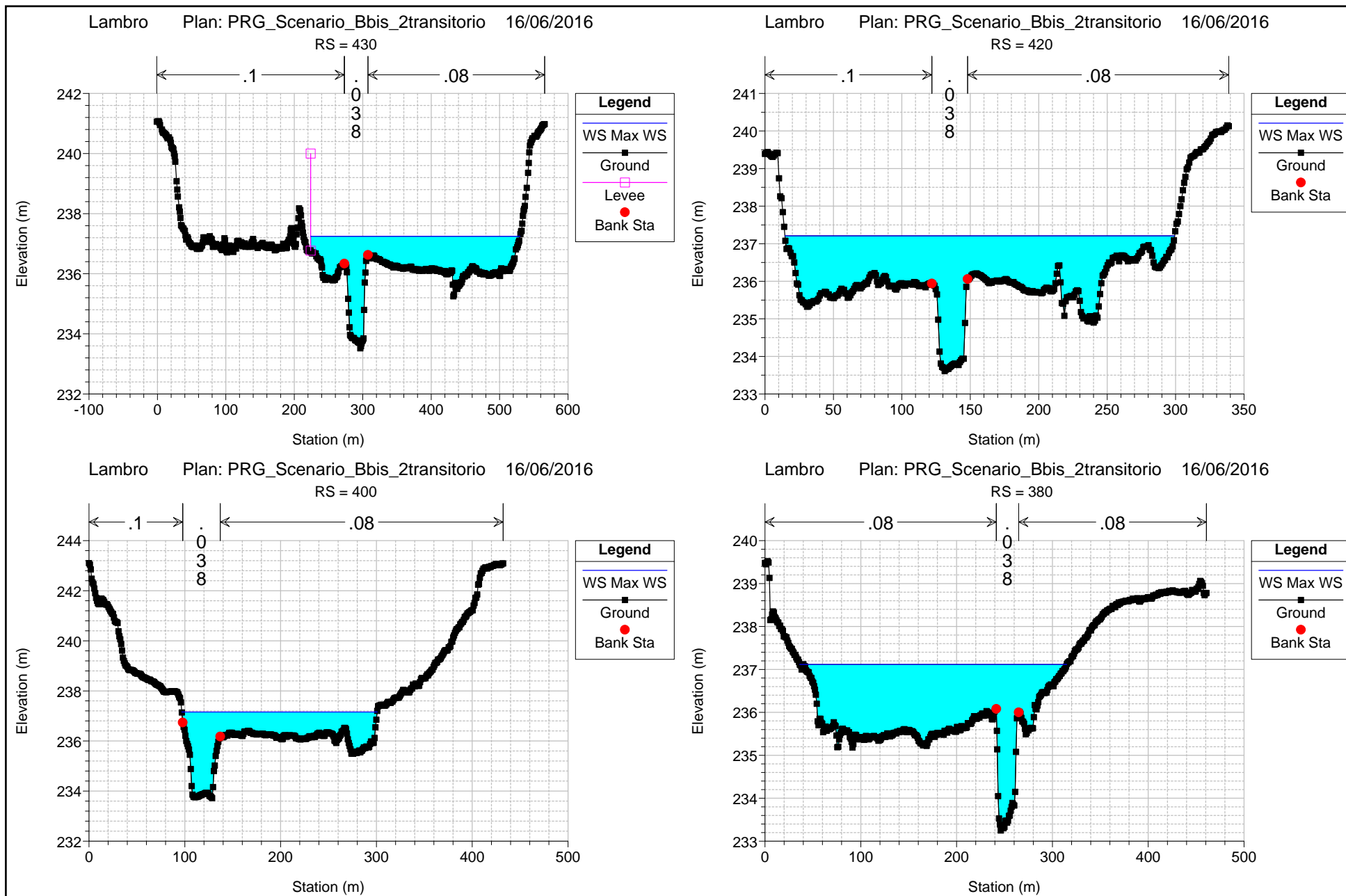


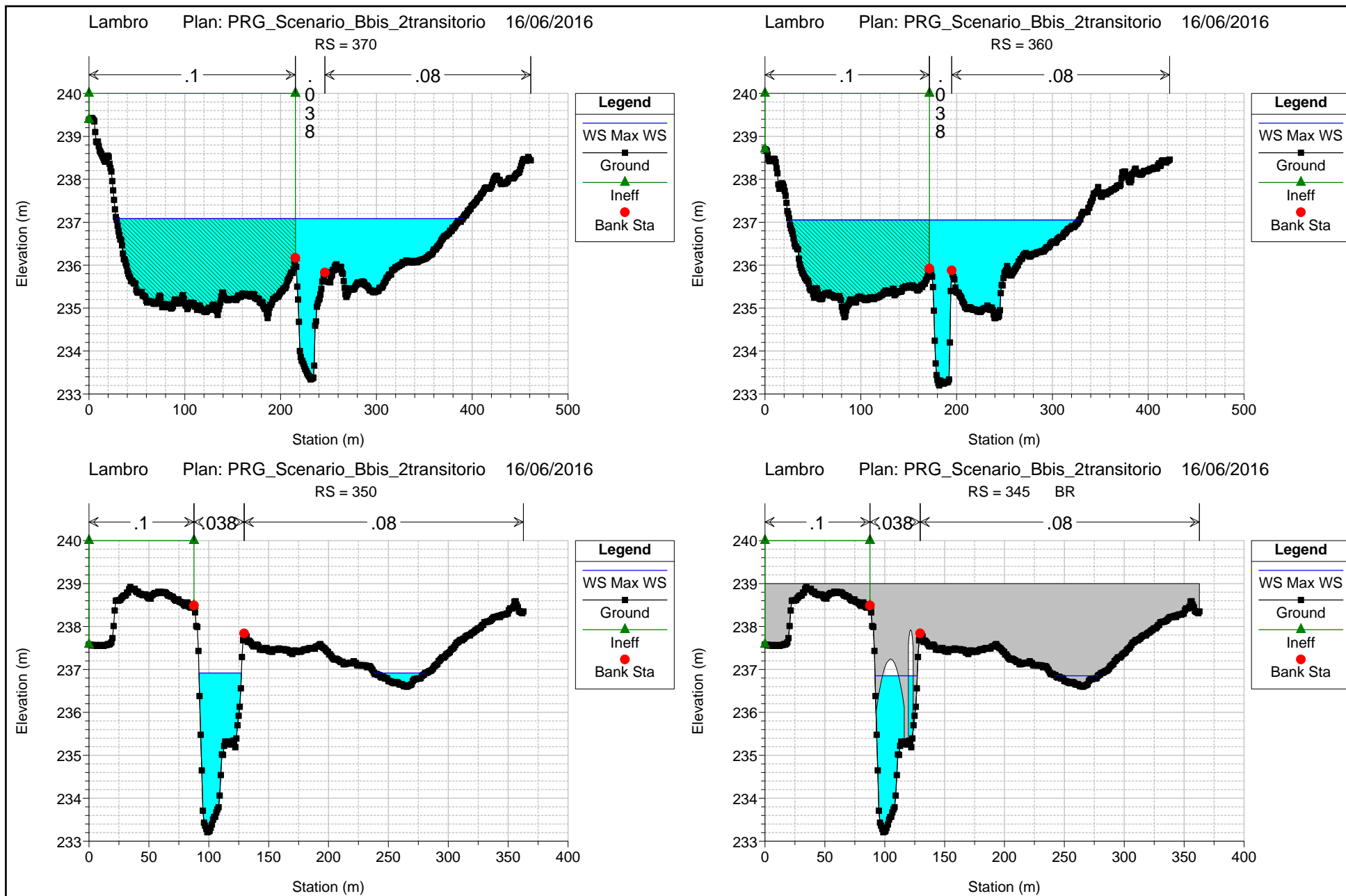
SEZIONI DI CALCOLO E LIVELLI DI PIENA NELLO SCENARIO DI PROGETTO B_bis

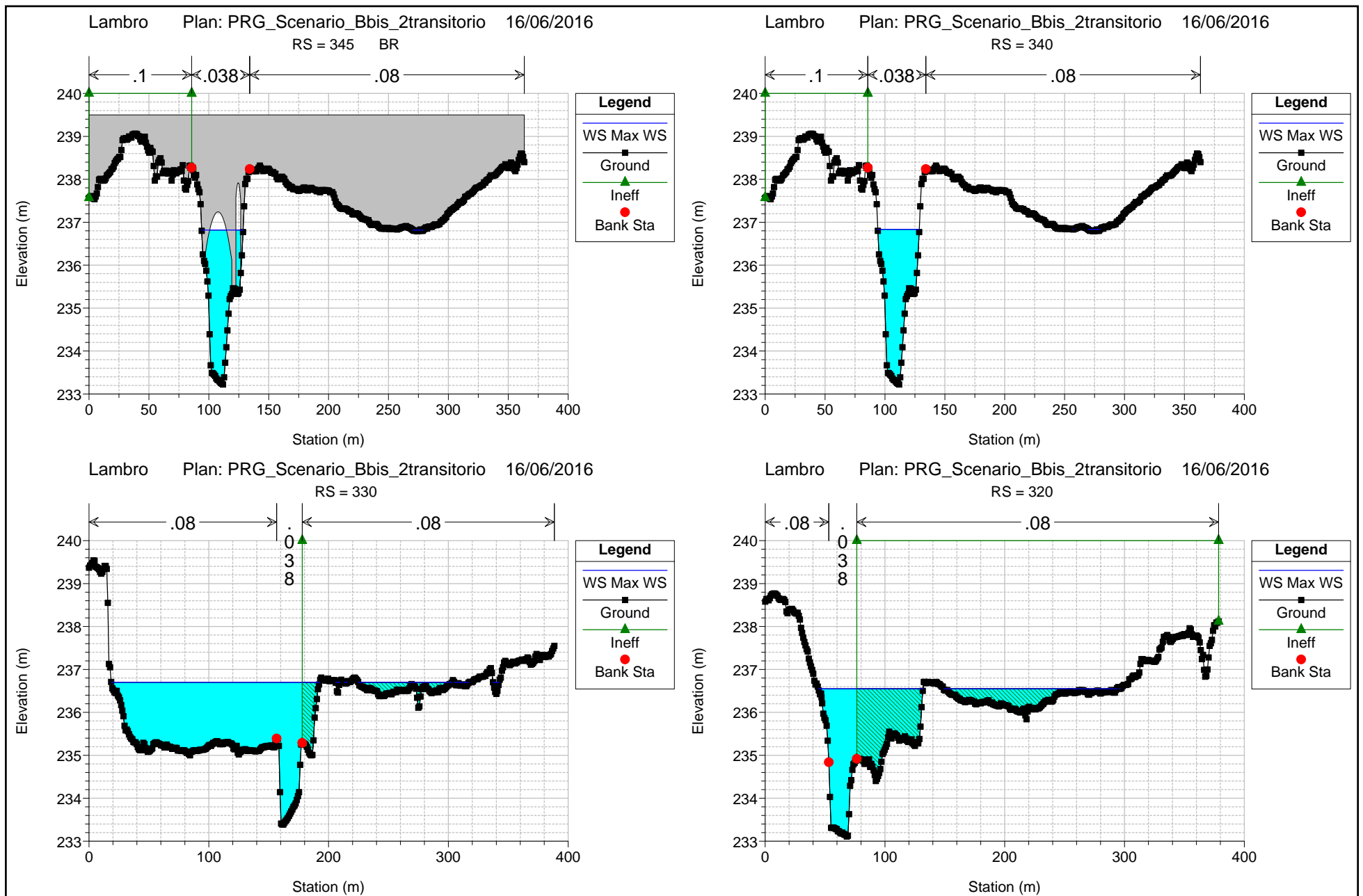


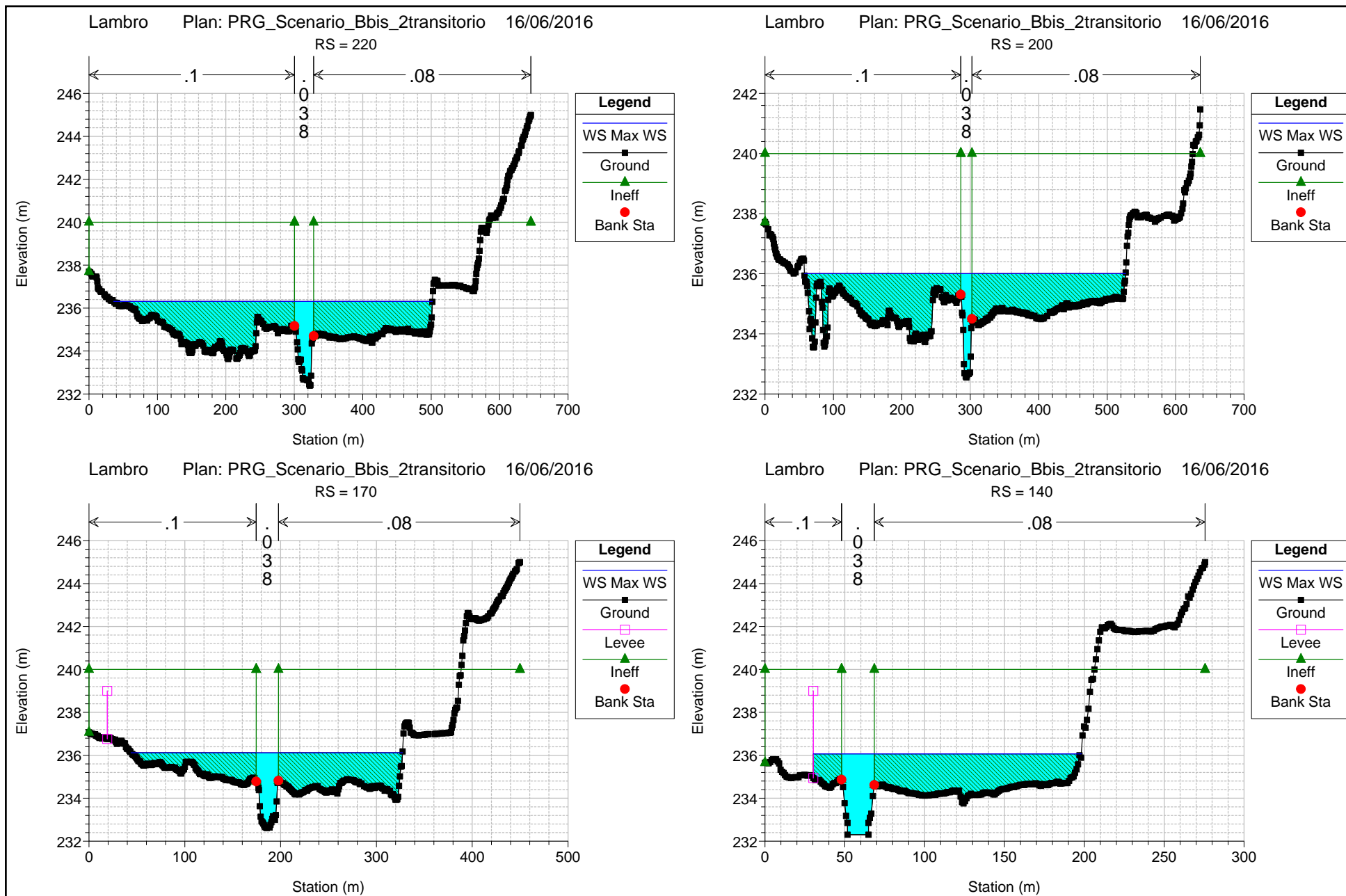


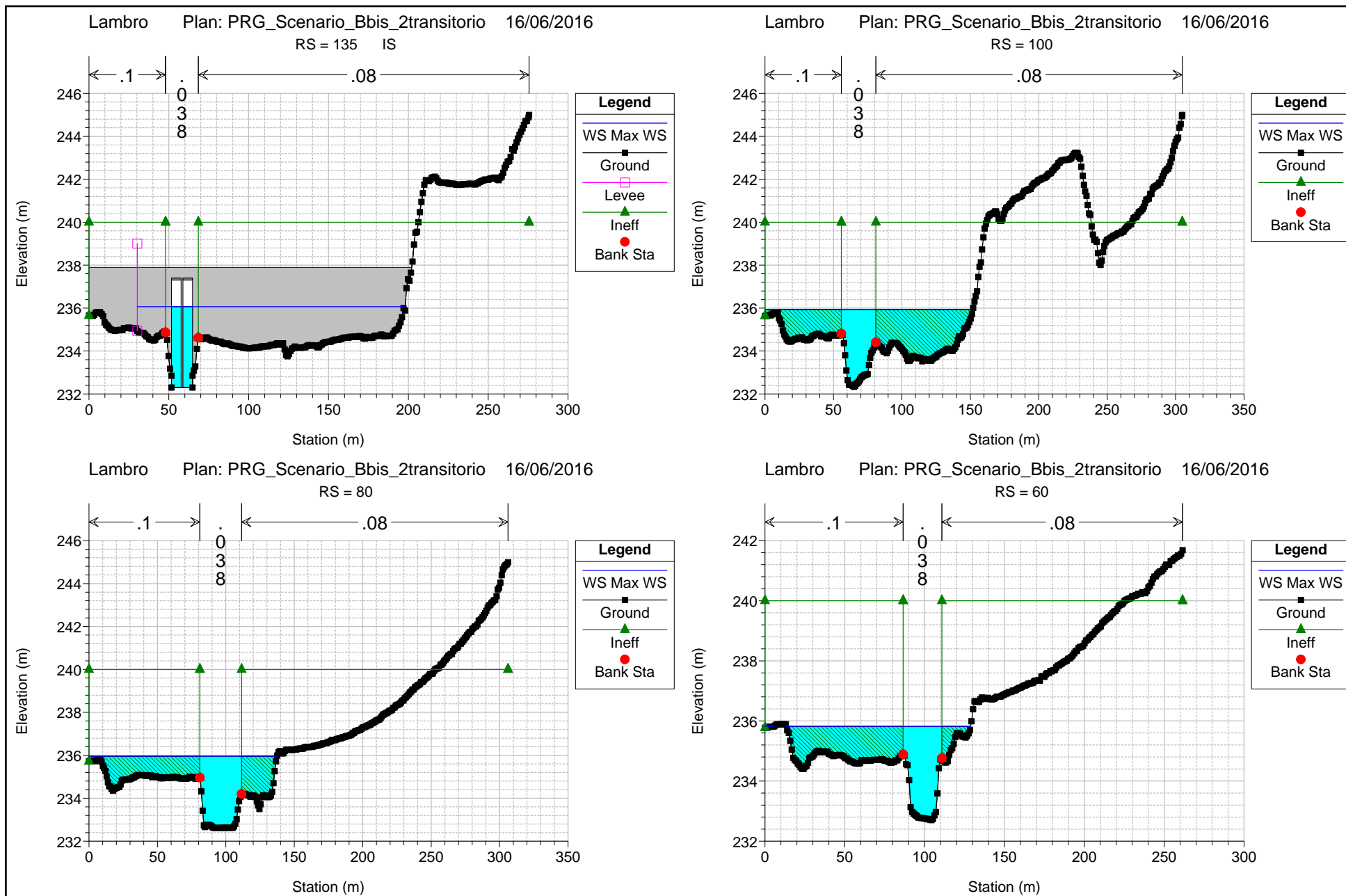


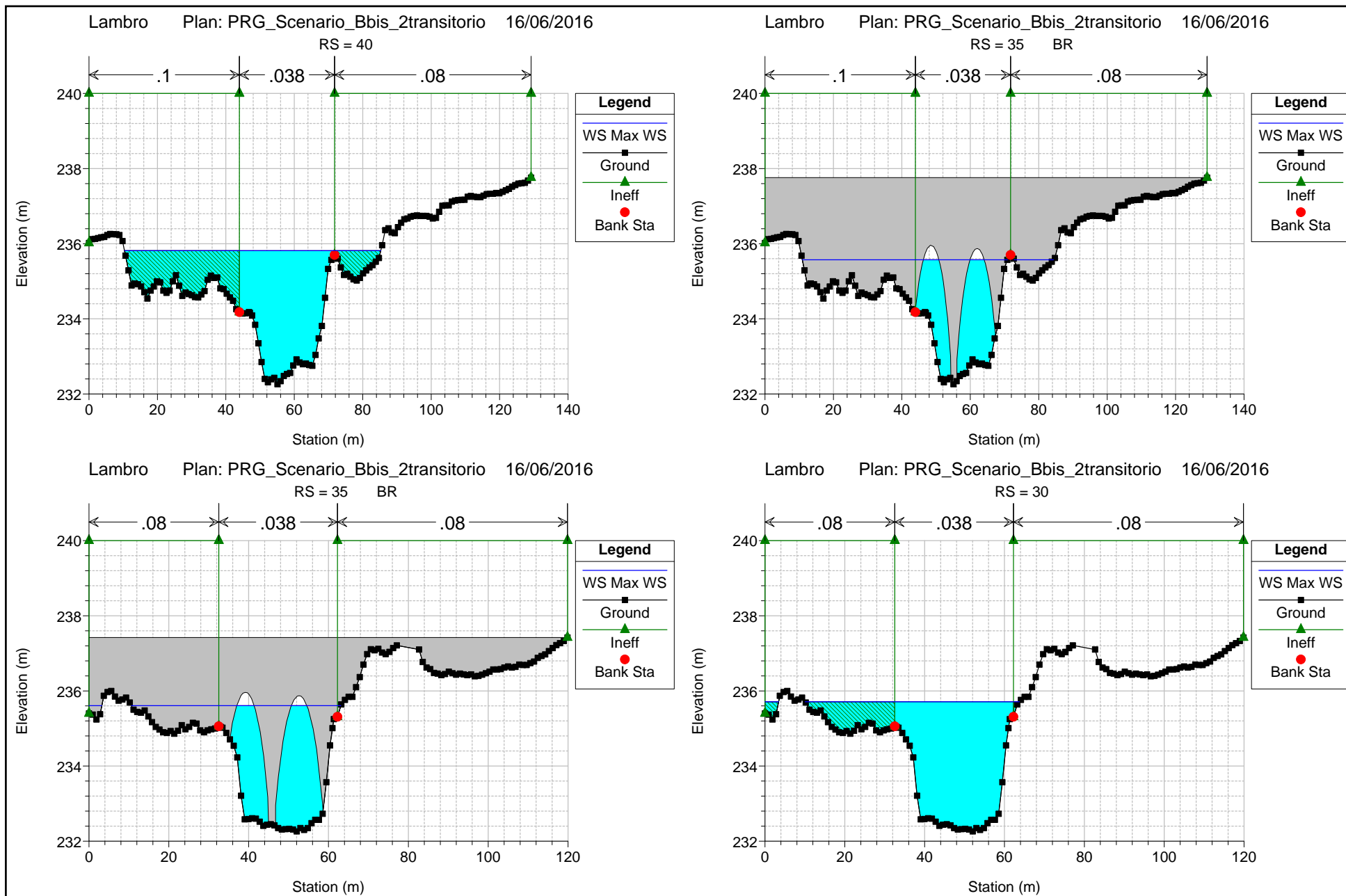


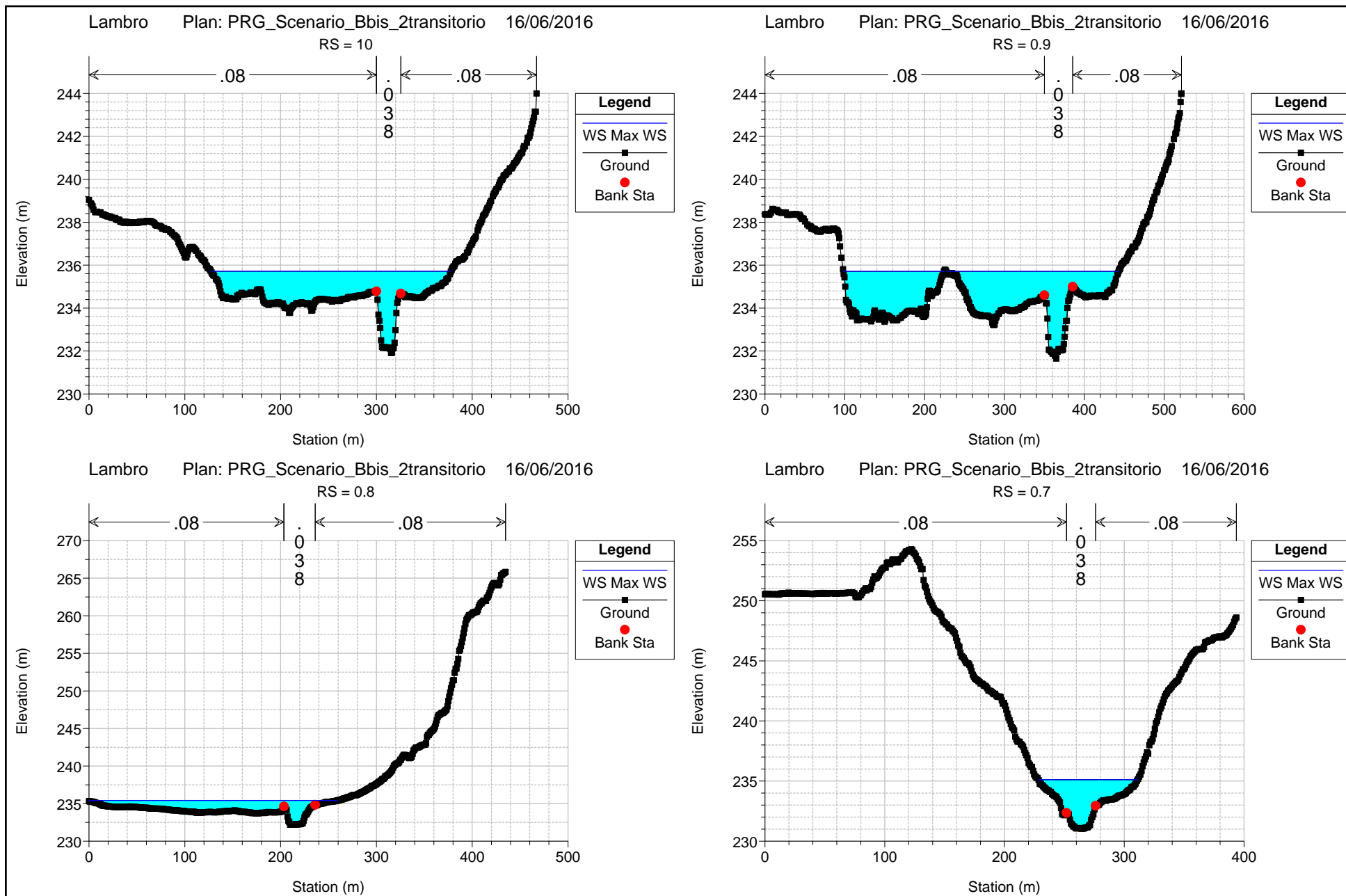




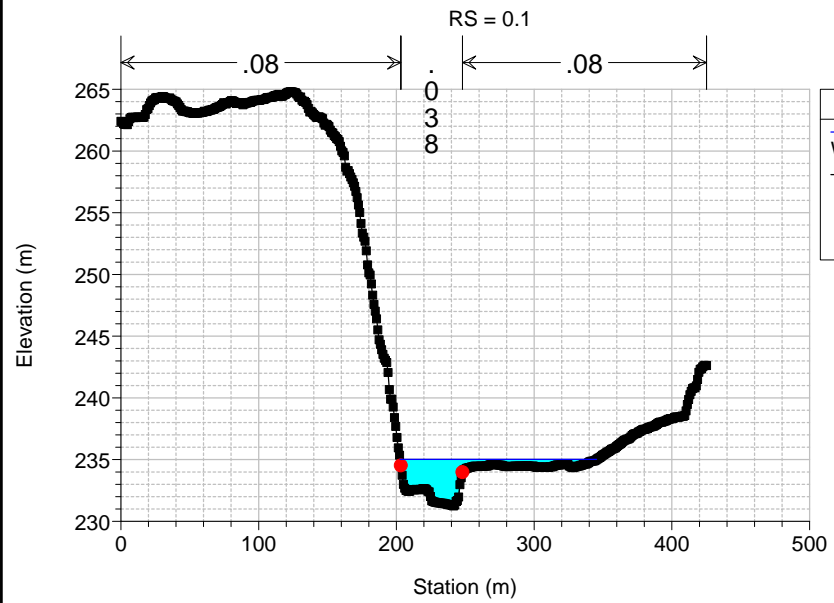




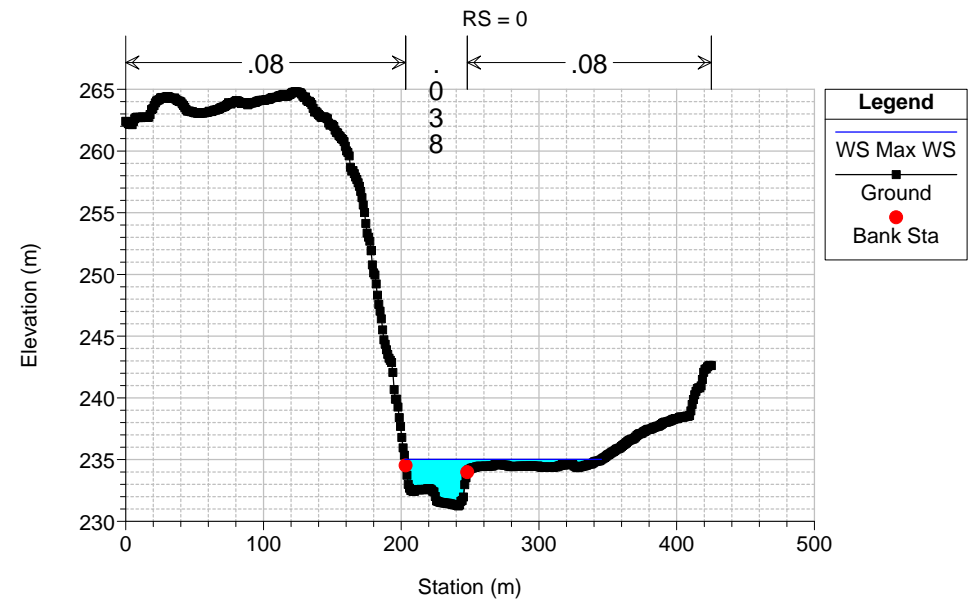




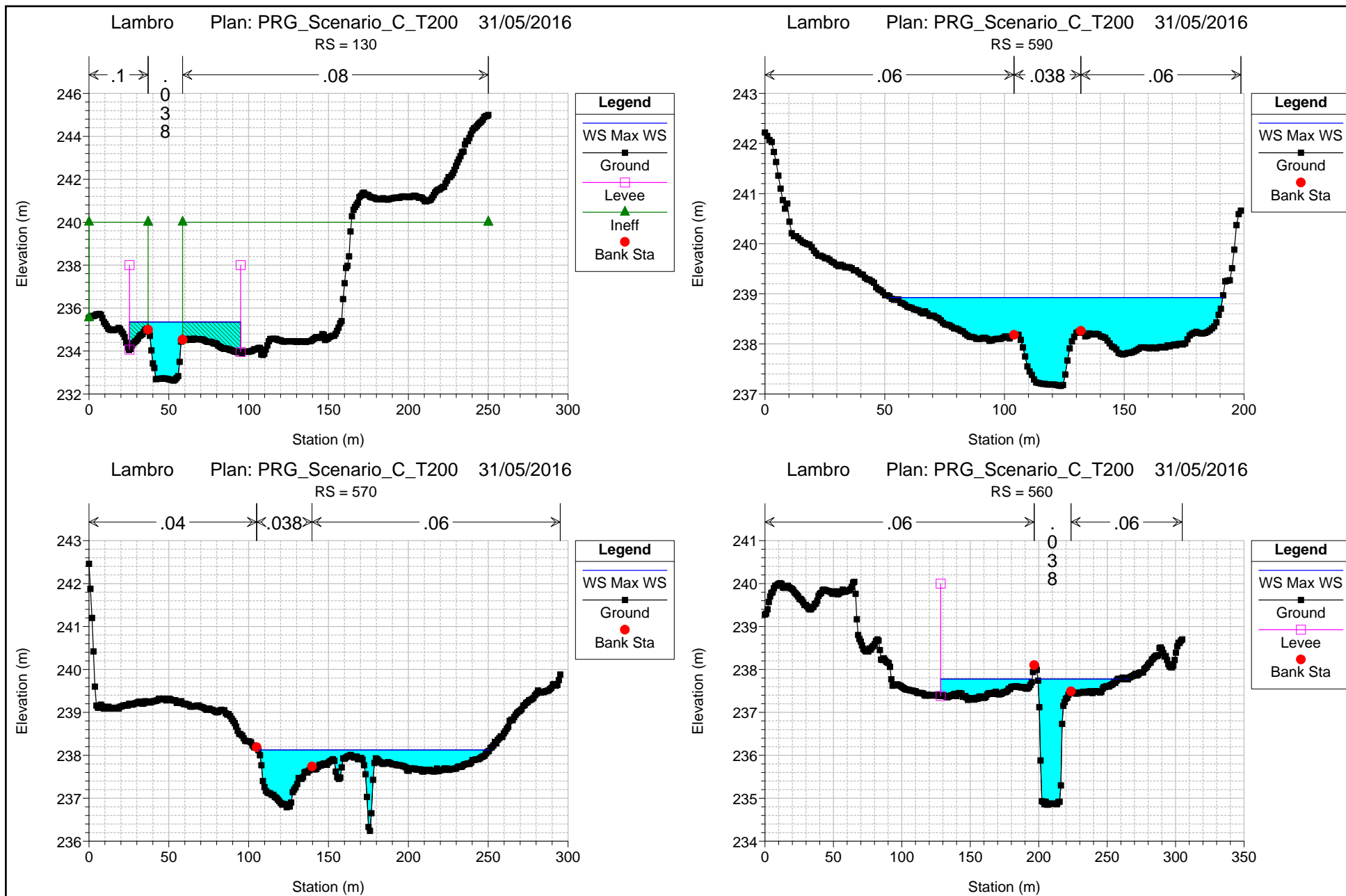
Lambro Plan: PRG_Scenario_Bbis_2transitorio 16/06/2016

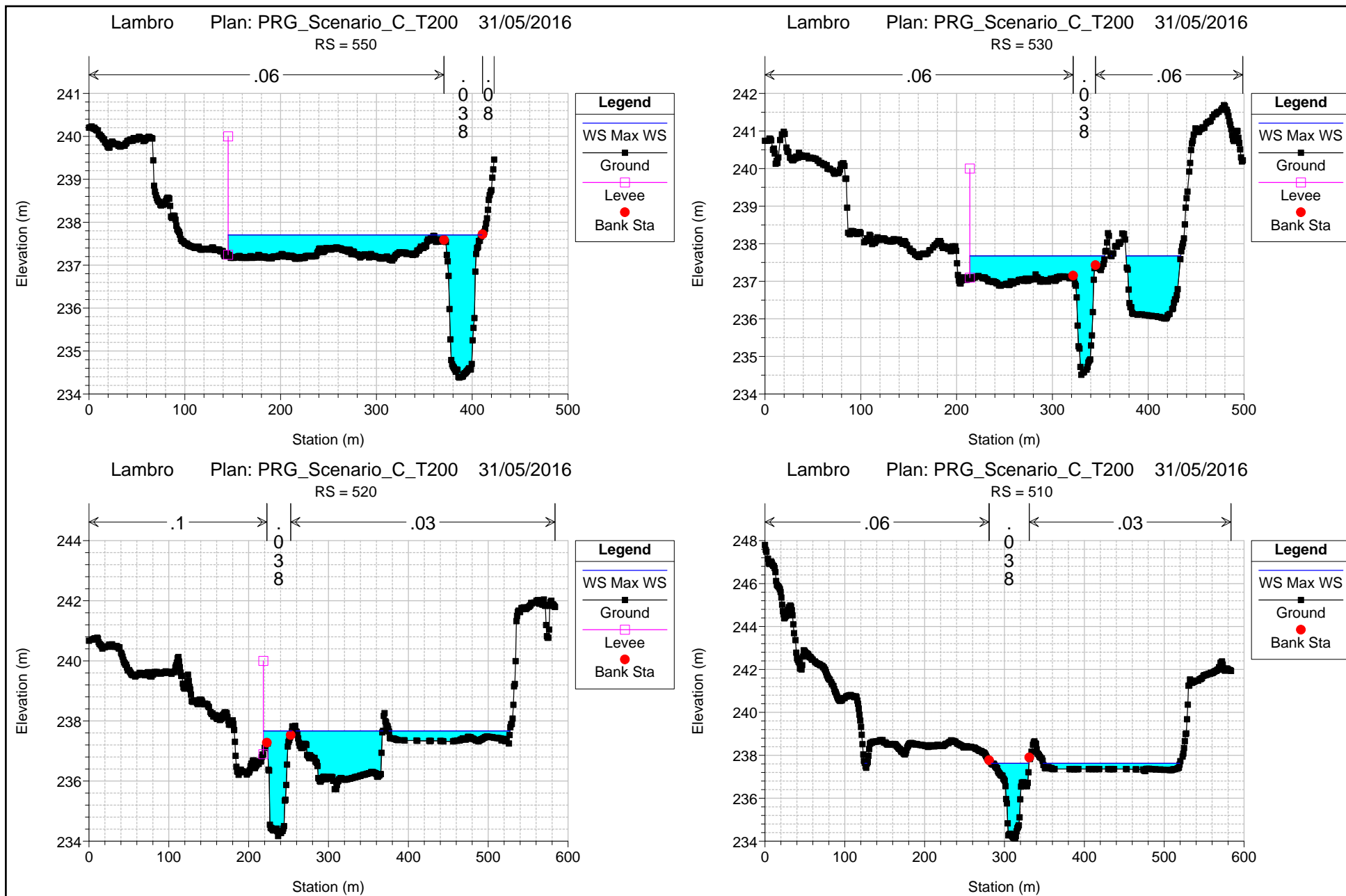


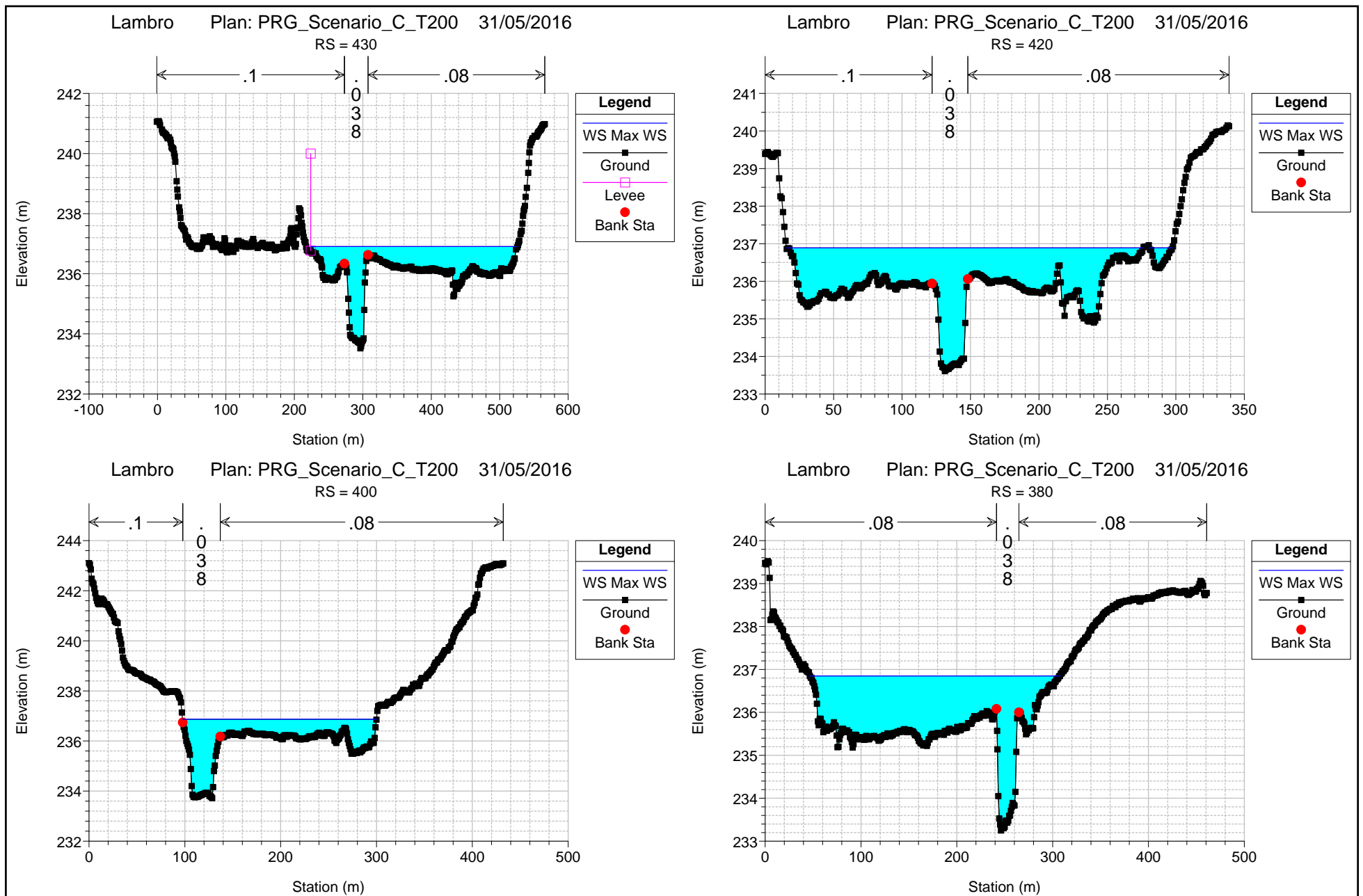
Lambro Plan: PRG_Scenario_Bbis_2transitorio 16/06/2016

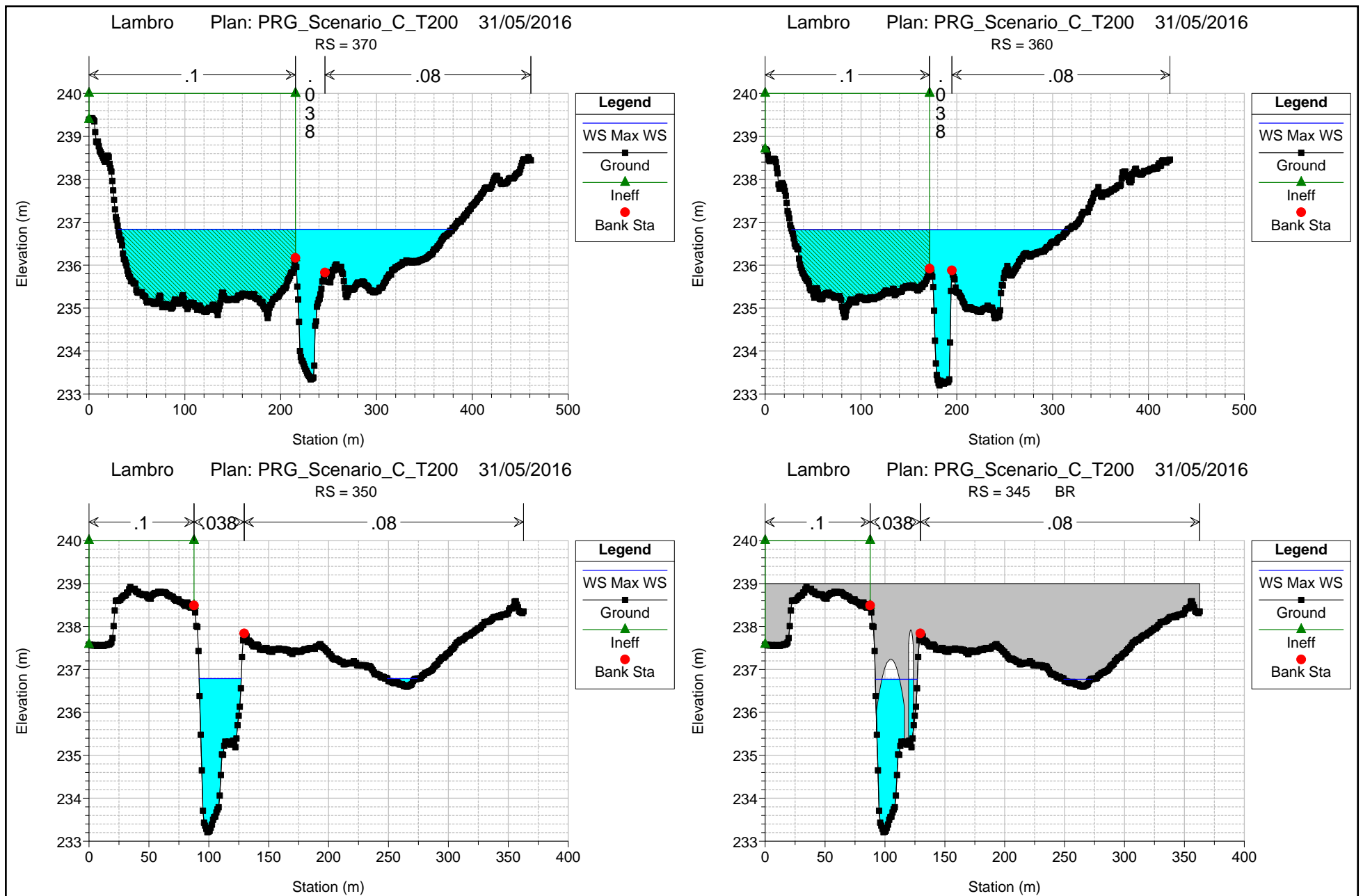


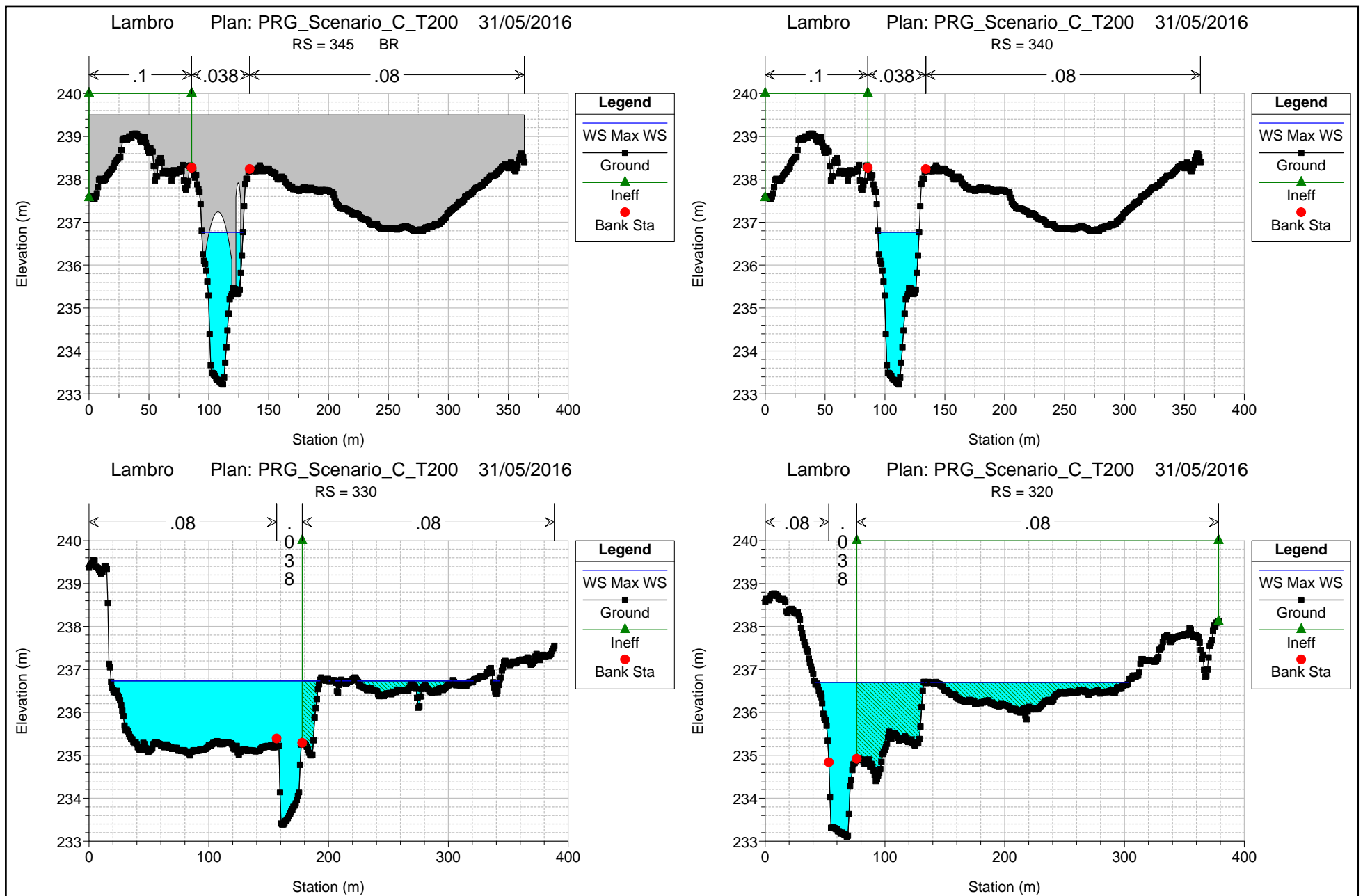
SEZIONI DI CALCOLO E LIVELLI DI PIENA NELLO SCENARIO DI PROGETTO C (T200 ANNI)

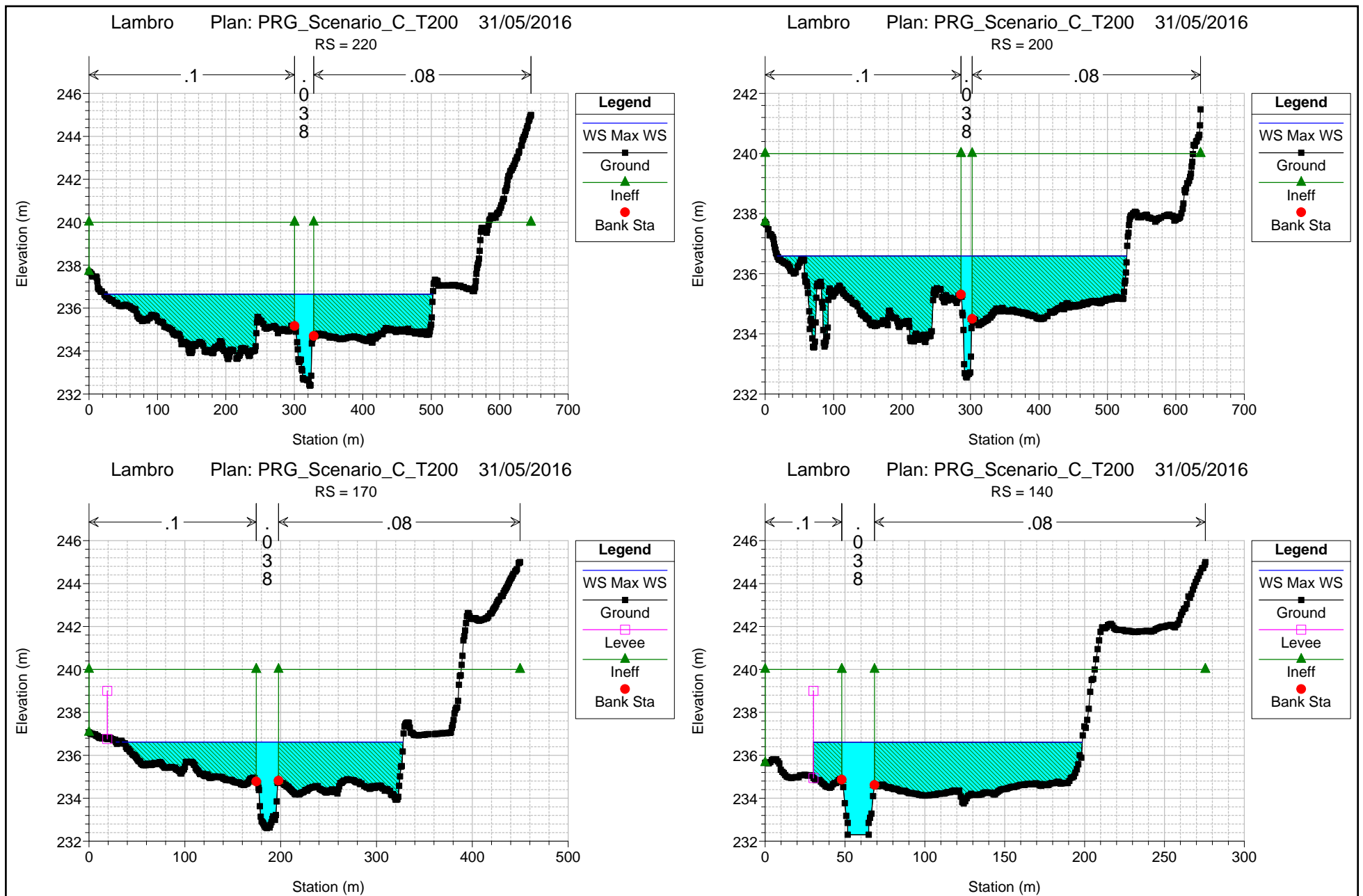


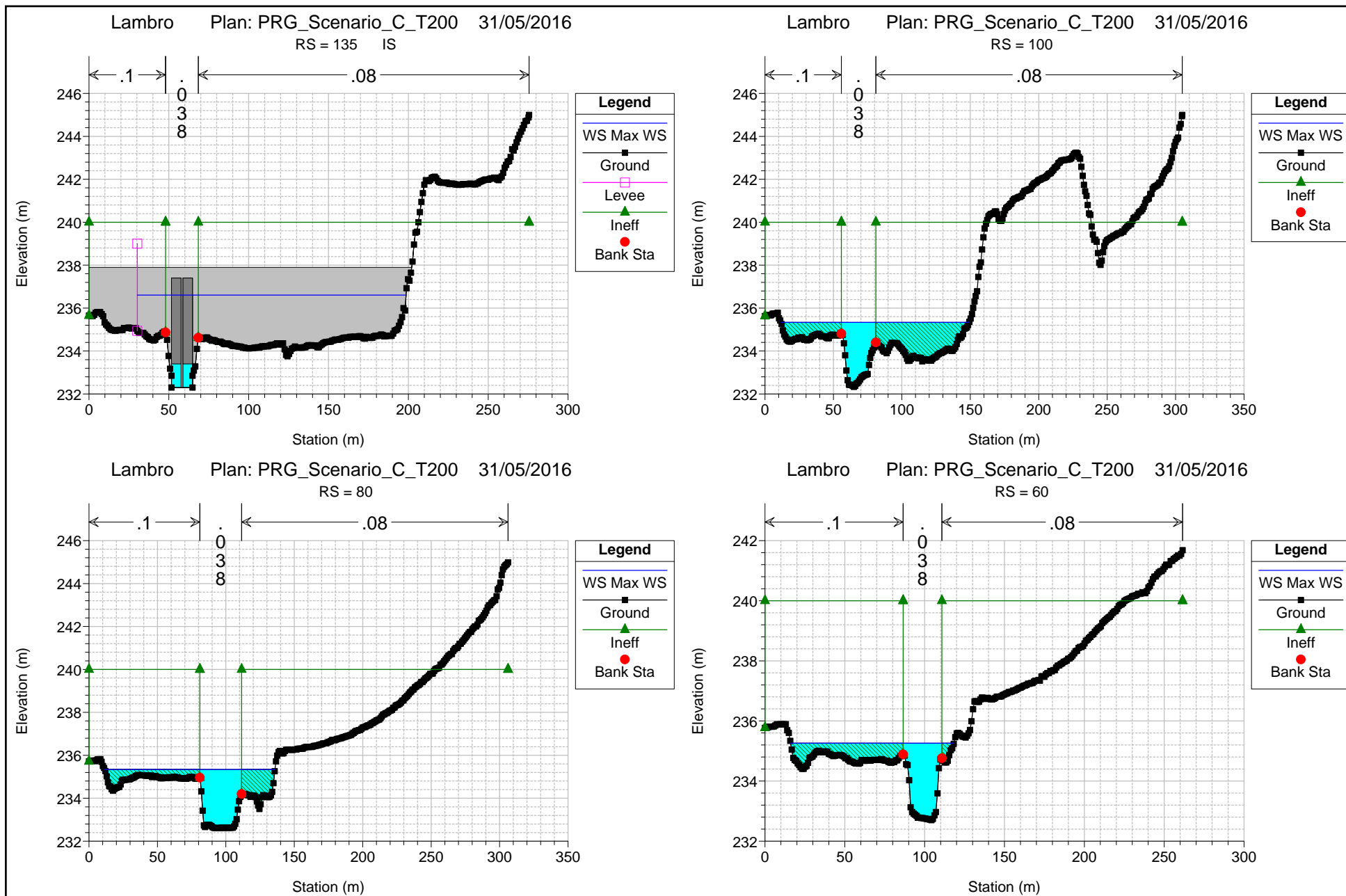


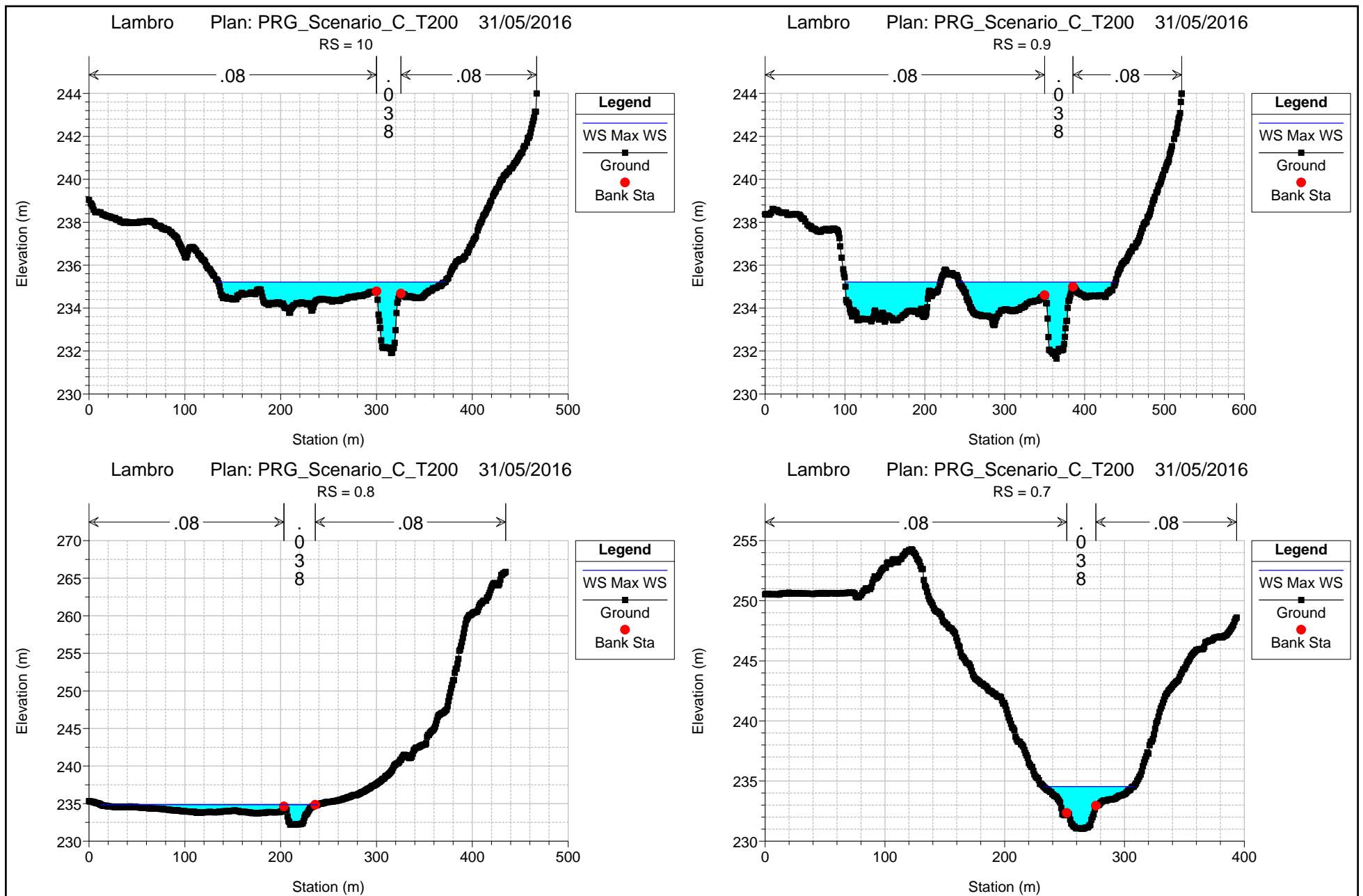


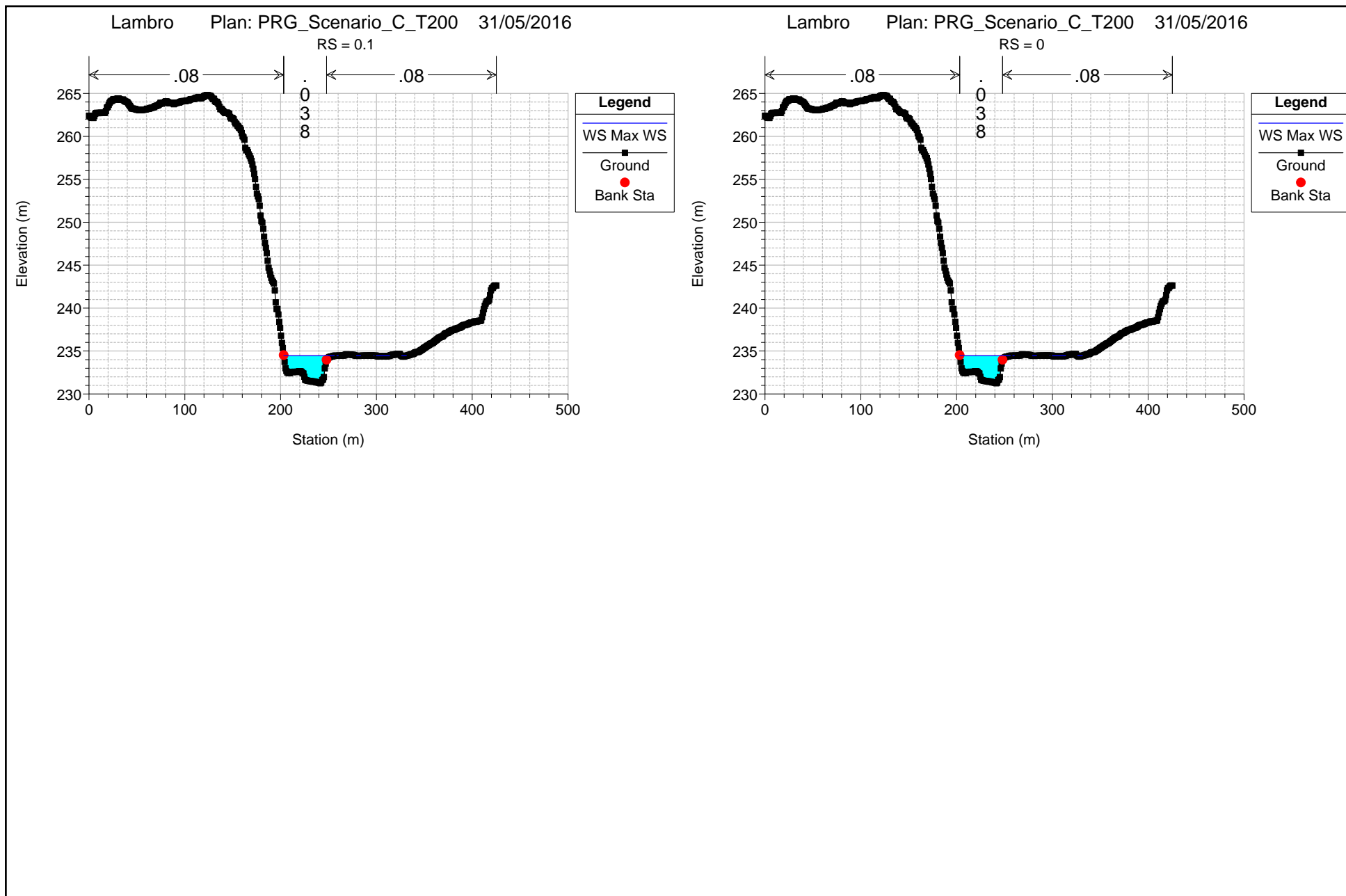




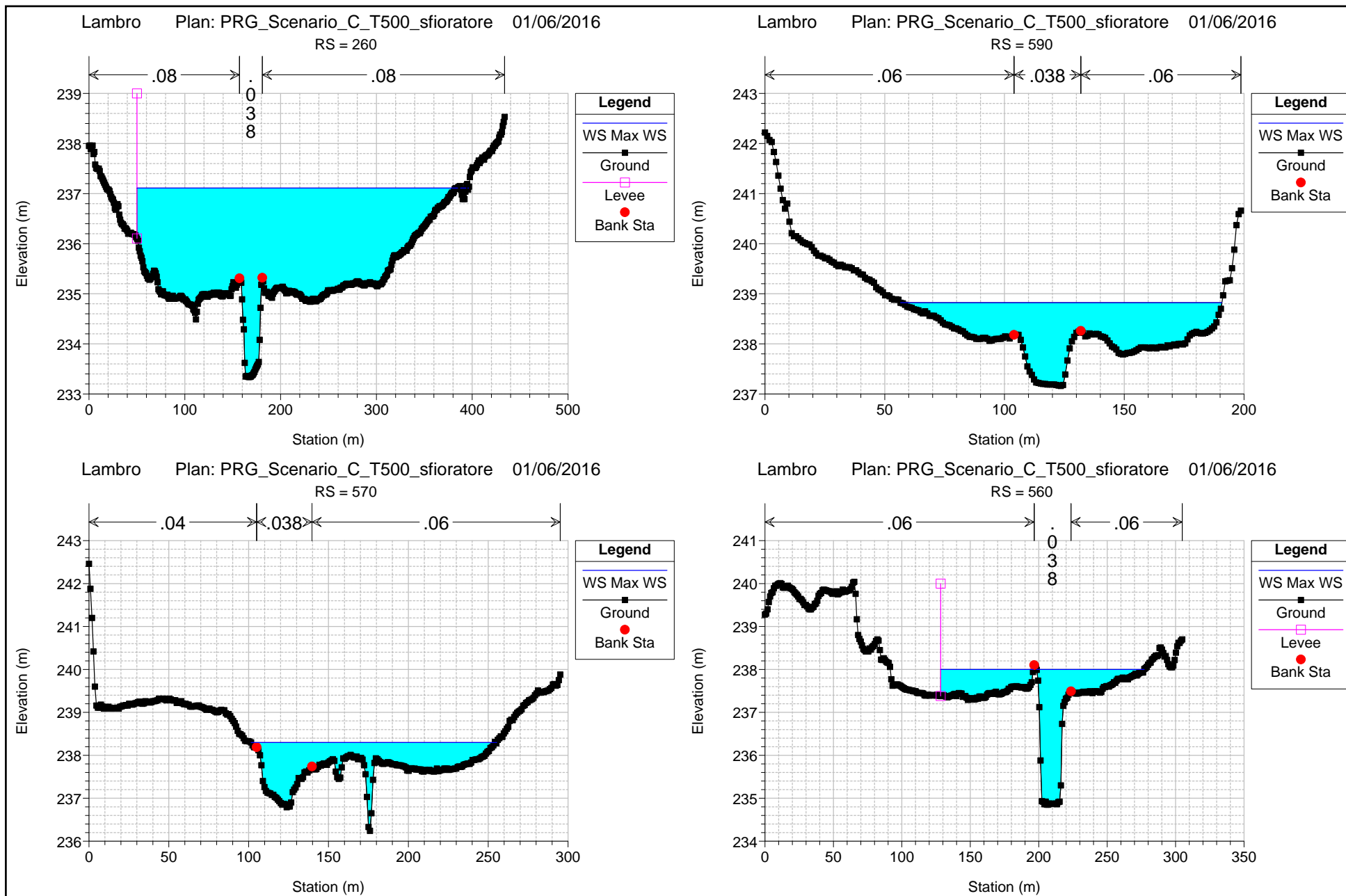


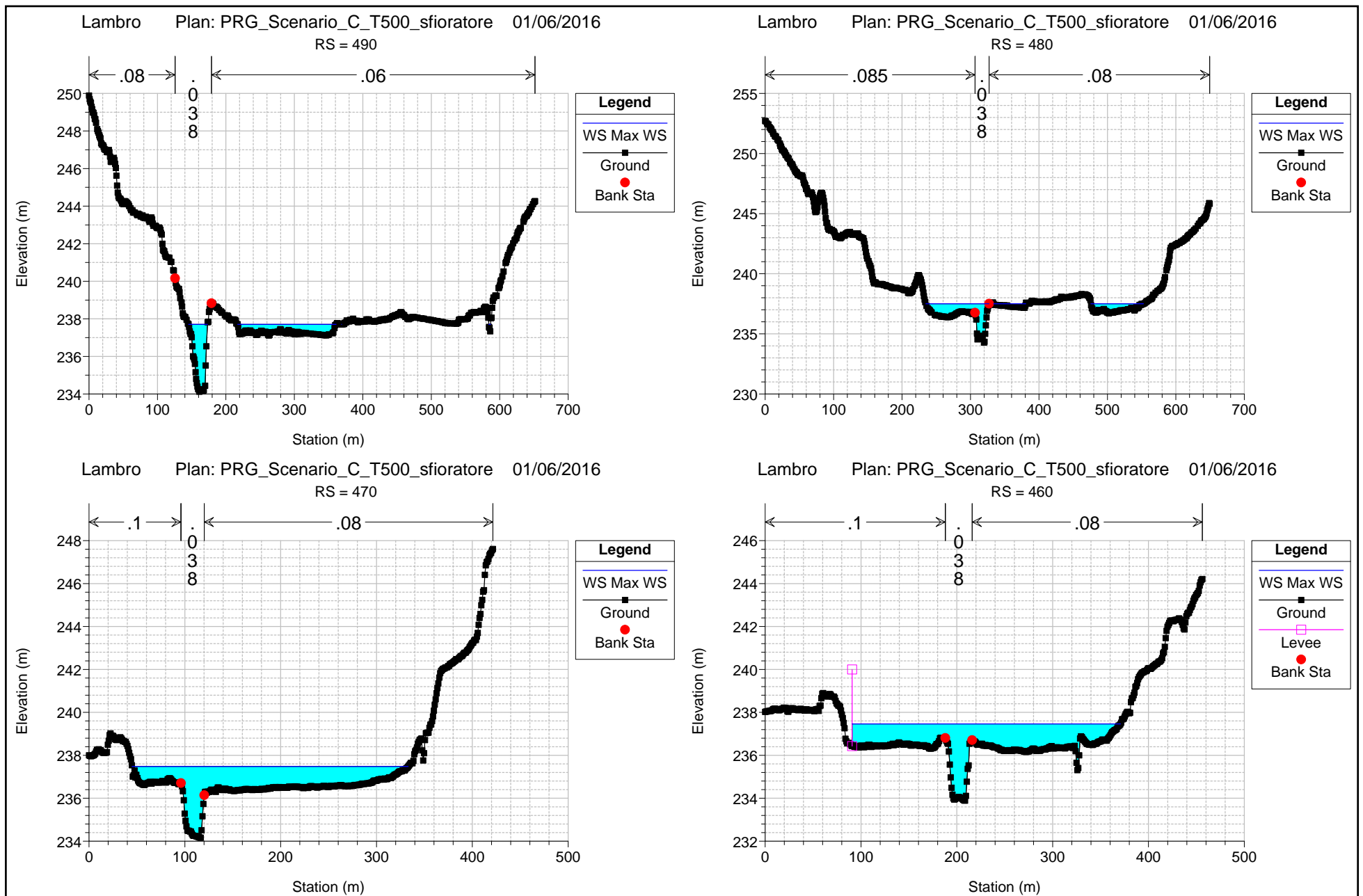


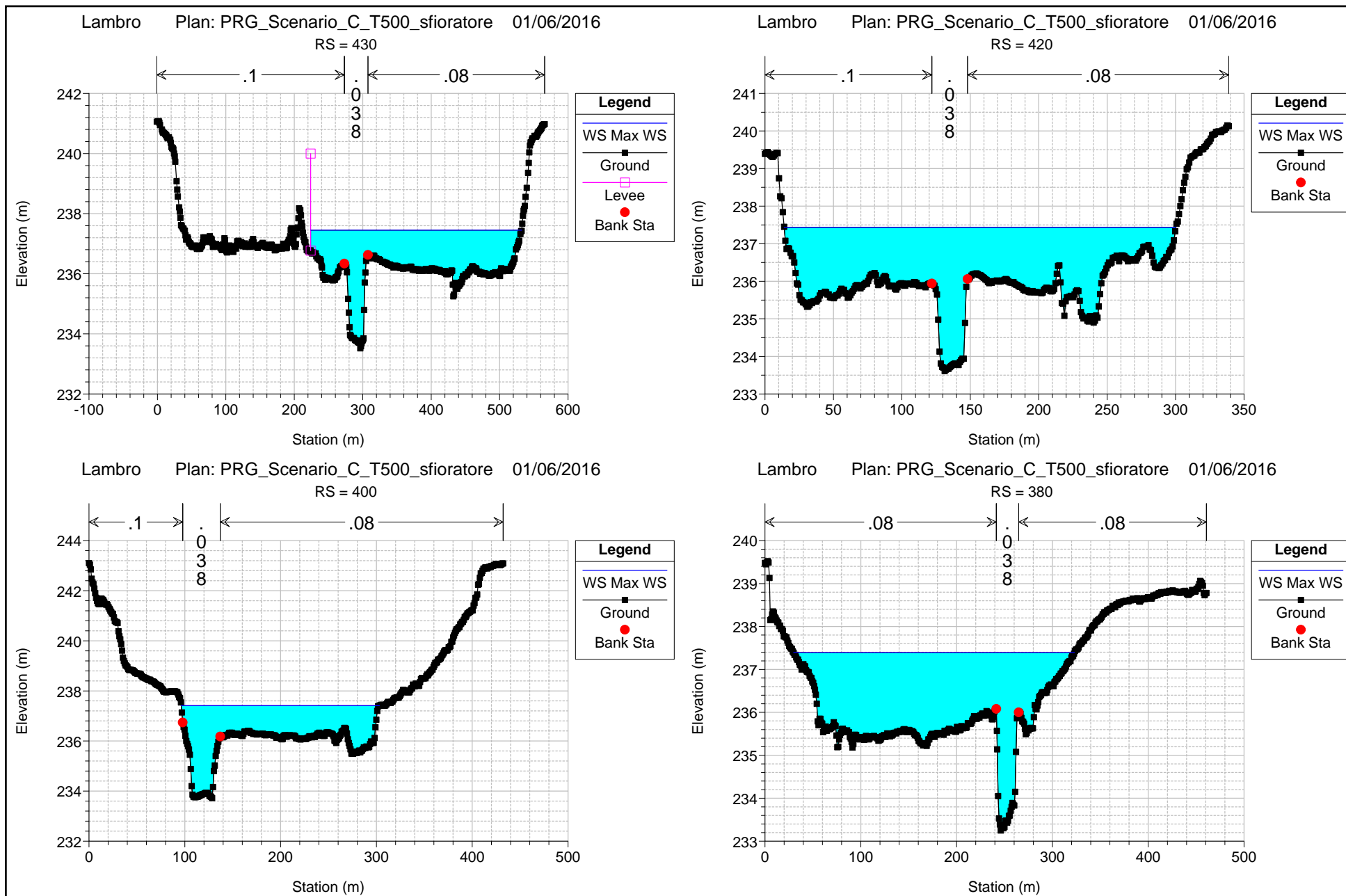


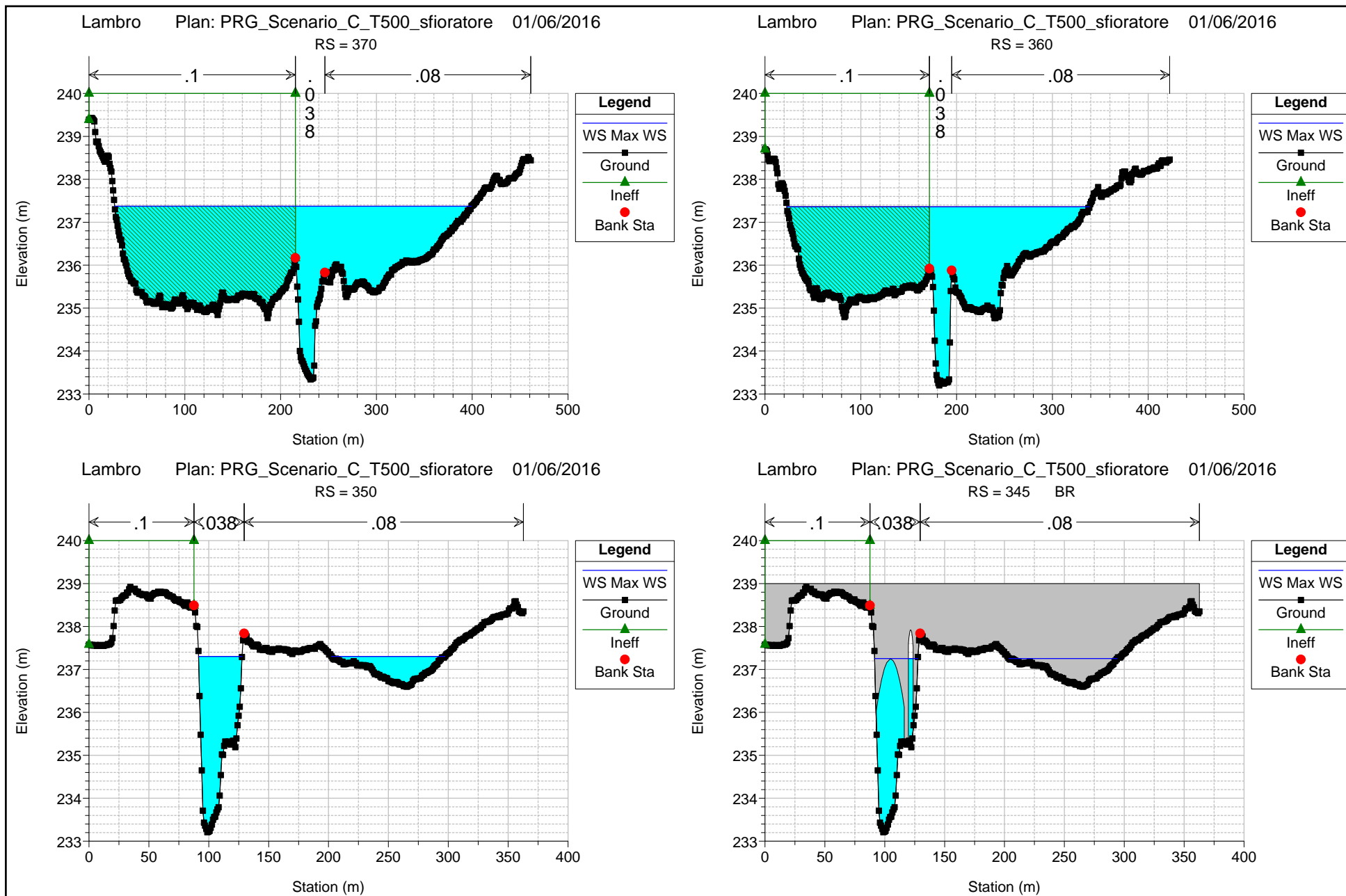


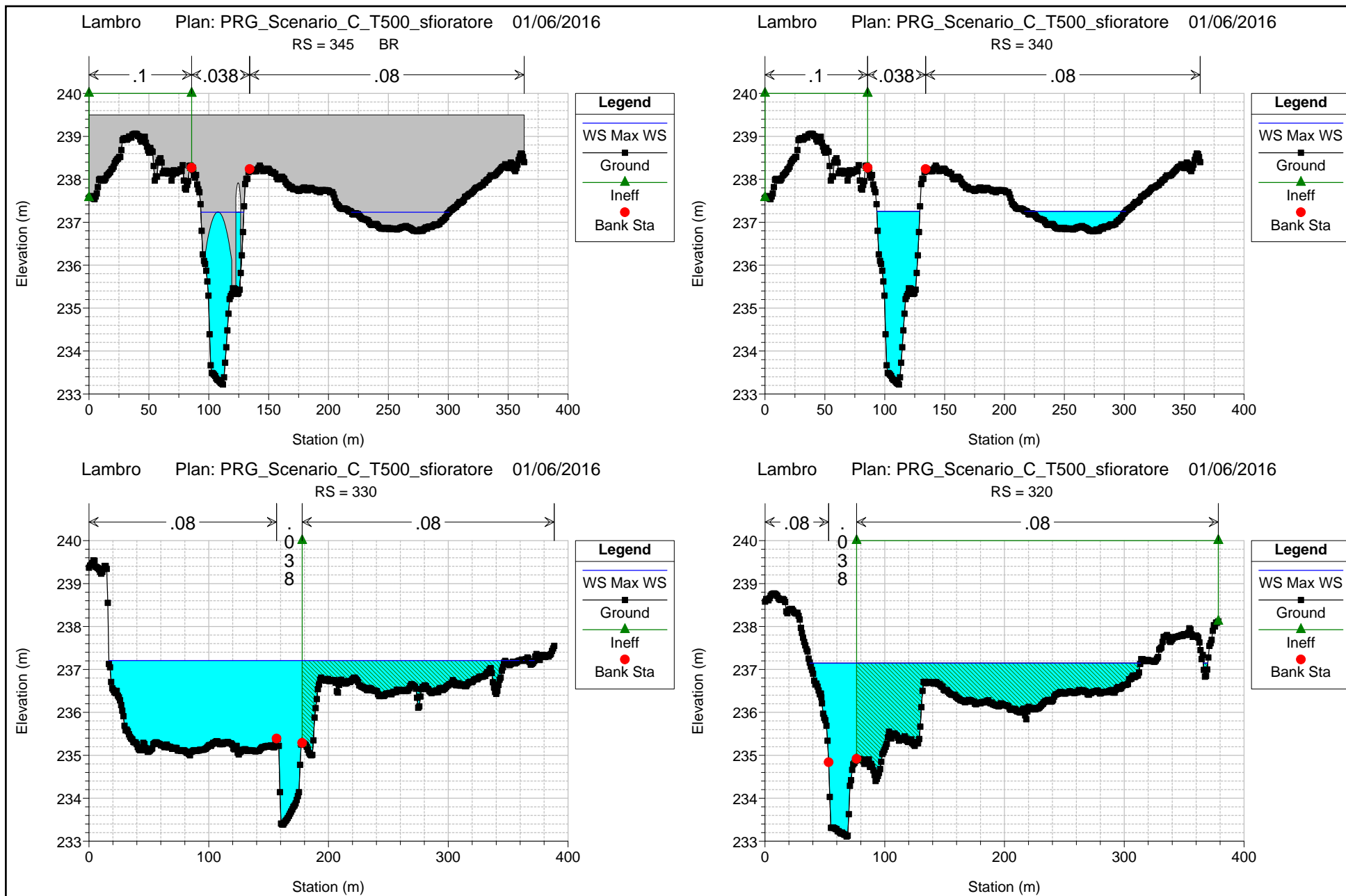
SEZIONI DI CALCOLO E LIVELLI DI PIENA NELLO SCENARIO DI PROGETTO C (T500 ANNI)

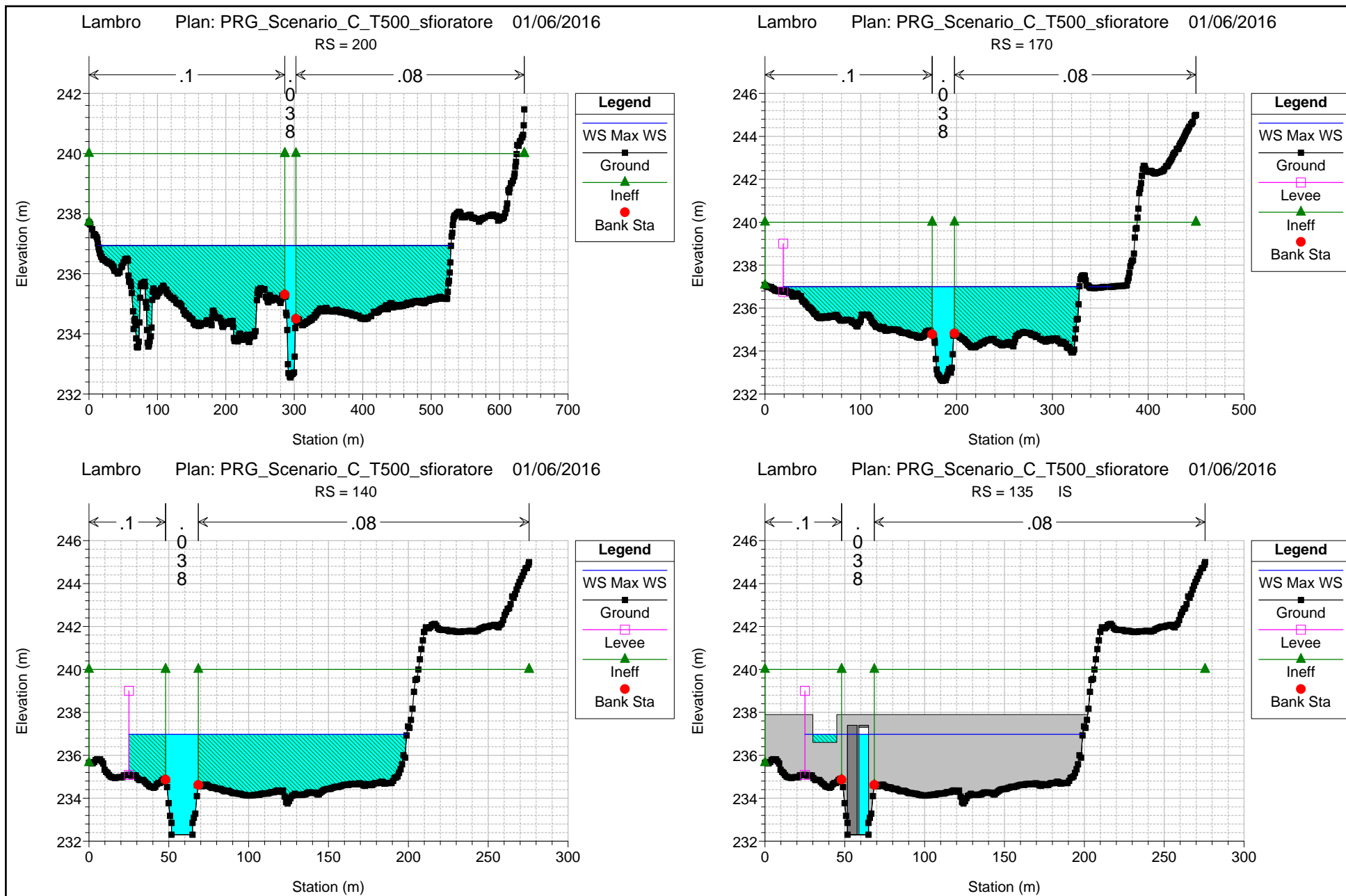


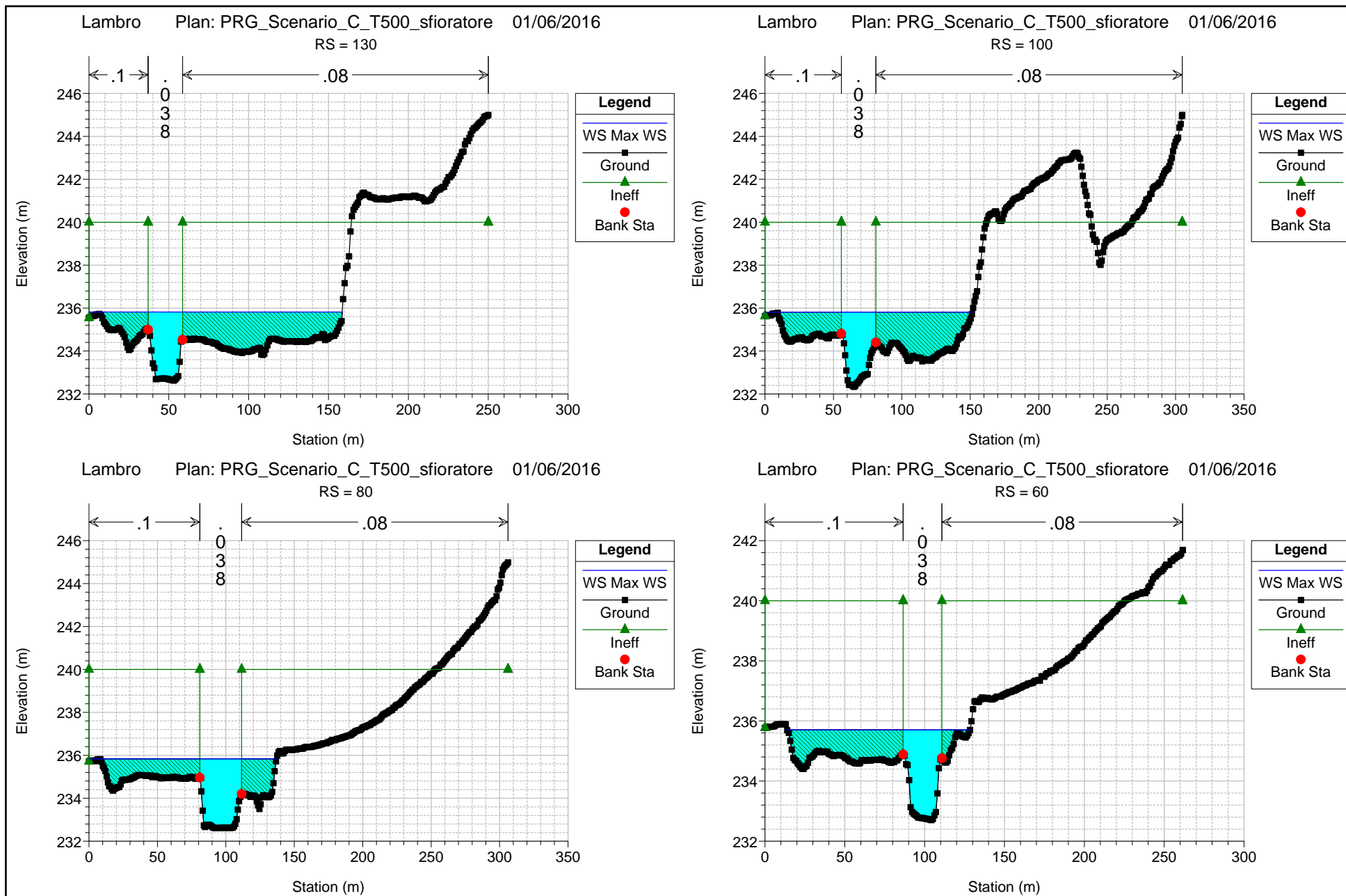


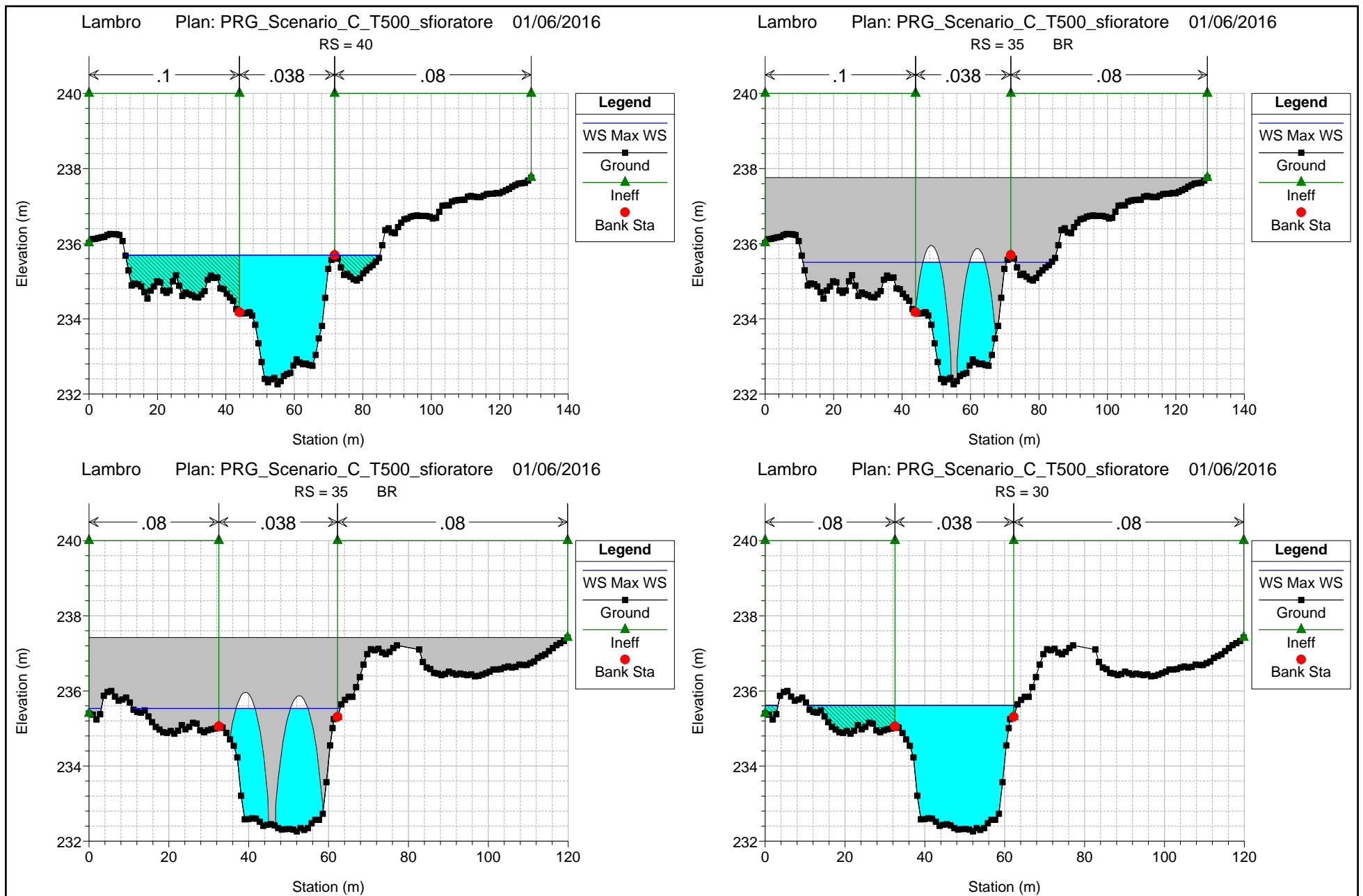


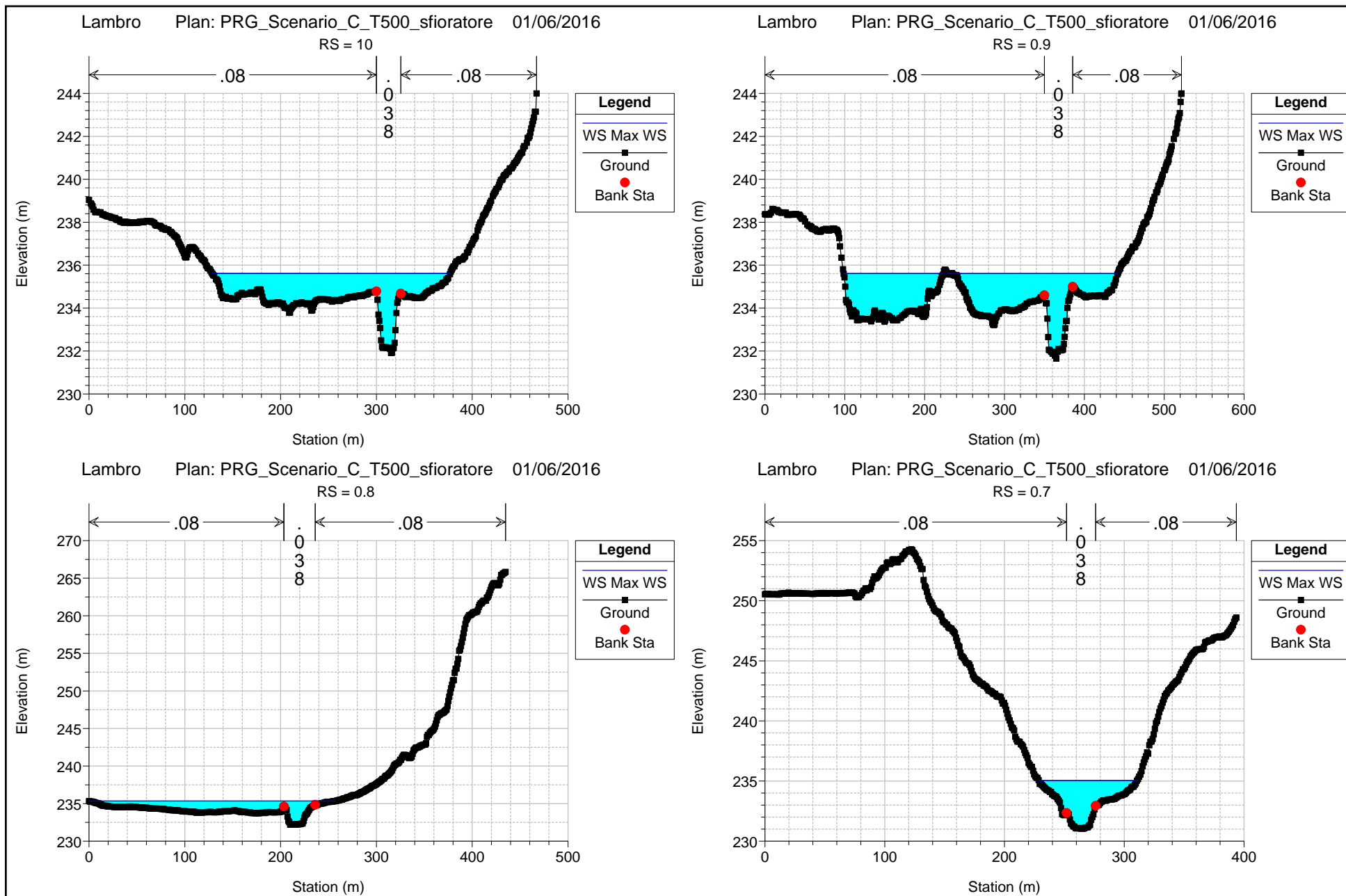




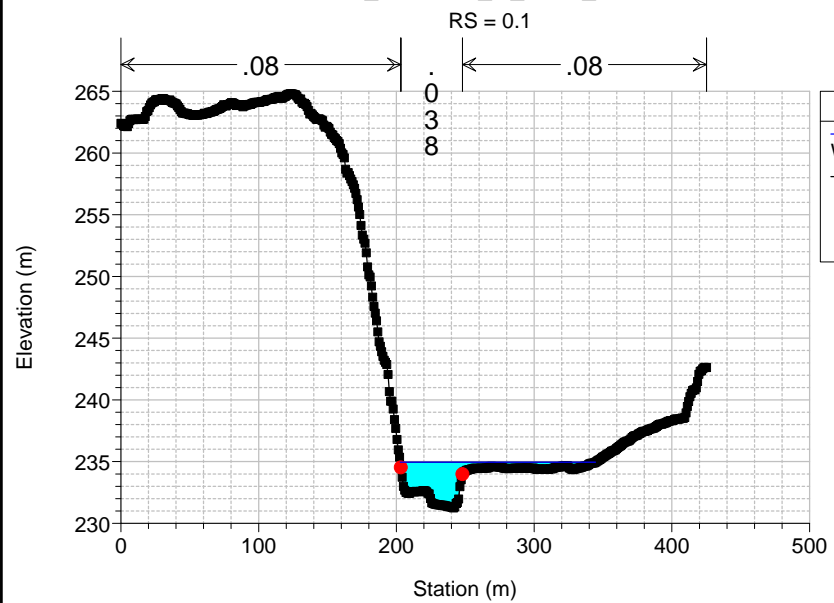




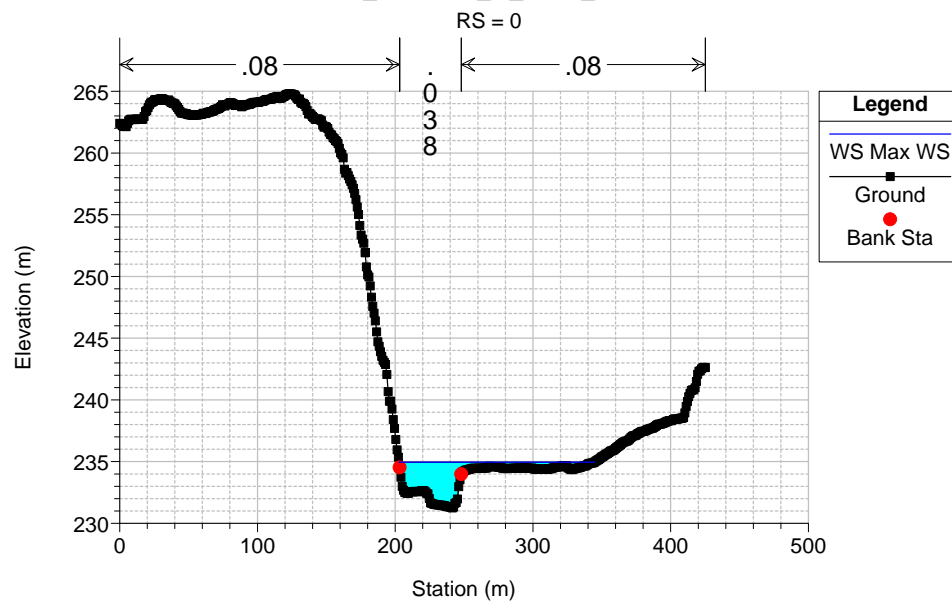




Lambro Plan: PRG_Scenario_C_T500_sfioratore 01/06/2016



Lambro Plan: PRG_Scenario_C_T500_sfioratore 01/06/2016



ALLEGATO 2: Relazione idrologico-idraulica e integrazioni del Progetto Definitivo



*Il Commissario Straordinario
delegato all'attuazione degli interventi
di mitigazione del rischio idrogeologico*



Regione
Lombardia



Parco Regionale
Valle del Lambro

Comuni di Inverigo (CO), Nibionno (LC) e Veduggio con Colzano (MB)



Oggetto

AREA DI LAMINAZIONE DI INVERIGO

INTERVENTI IDRAULICI E DI RIQUALIFICAZIONE FLUVIALE NEI TERRITORI DI
INVERIGO, NIBIONNO E VEDUGGIO CON COLZANO

PROGETTO DEFINITIVO

RELAZIONE IDROLOGICO - IDRAULICA

Progettisti -Timbri e Firme



PARCO REGIONALE DELLA
VALLE DEL LAMBRO

Via Veneto 19
TRIUGGIO

web: www.parcovalldelambro.it
web: www.progettolambro.it

Consulenze

Progettazione Idraulica: prof.ing. Maurizio ROSSO - ing. Santo LA FERLITA

Progettazione Strutturale: ing. Piergiorgio LOCATELLI - ing. Nicola NAVA

Consulenza Ambientale: arch. Moris LORENZI

Consulenza Geologica: dott. geol. Pietro ALBORGHETTI

Assistenza Grafica: arch. Massimo NEGRI

VERSIONE N°

DATA

DESCRIZIONE REVISIONE E RIFERIMENTI DOCUMENTI SOSTITUTIVI

Elaborato

0

MAGGIO 2014

EMISSIONE

R02



INDICE

1. PREMESSA	3
2. STUDI PREGRESSI E DATI DISPONIBILI	4
3. DESCRIZIONE DELL'ASSETTO FLUVIALE NEL TRATTO D'INTERESSE	6
3.1 CENNI TEORICI SULLA LAMINAZIONE DELLE PIENE	8
3.2 INTERVENTI DI LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA PREVISTI NEL P.A.I. NEL TRATTO D'INTERESSE DEL FIUME LAMBRO	10
4. STUDIO IDROLOGICO	11
4.1 PORTATE DI PIENA DEL P.A.I.	11
4.2 AGGIORNAMENTO DELLE INFORMAZIONI IDROLOGICHE E IDRAULICHE	12
4.3 DEFINIZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DI RIFERIMENTO	18
5. STUDIO IDRAULICO	19
5.1 VALUTAZIONE DELLE ALTERNATIVE PROGETTUALI	19
5.1.1 Ipotesi 0: mancata realizzazione delle opere	19
5.1.2 Ipotesi 1: regolazione delle portate di piena mediante realizzazione di una "bocca tarata"	20
5.1.3 Ipotesi 2: realizzazione del volume d'invaso mediante ribassamento dei piani golenali	21
5.1.4 Ipotesi 3: realizzazione degli interventi di regolazione previsti in sede di progetto preliminare	22
5.1.5 Ipotesi 4: soluzione progettuale adottata	23
5.2 MODELLAZIONE NUMERICA IDRAULICA: DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO	23
5.2.1 Equazione di continuità	25
5.2.2 Equazione di bilancio della quantità di moto (equazione del moto)	25
5.2.3 Metodo risolutivo numerico alle differenze finite	26
5.3 SCENARI SIMULATI E COSTRUZIONE DELLA GEOMETRIA DEL MODELLO	27
5.3.1 Verifica di congruenza delle informazioni topografiche disponibili	28
5.4 DESCRIZIONE DEI RISULTATI	30
5.4.1 Scenario "A" – Stato attuale	30
5.4.2 Scenario "B" – Portate attuali con intervento di laminazione di Inverigo	33
5.4.3 Scenario "C" – Portate di progetto P.A.I. con intervento di laminazione di Inverigo	39
6. DESCRIZIONE DELLE OPERE IN PROGETTO	41
6.1 OPERA DI REGOLAZIONE DELLE PORTATE A MONTE DEL PONTE DI VIA FORNACETTA IN COMUNE DI INVERIGO	41
6.2 LINEA ARGINALE A PROTEZIONE DELLA CASCINA "CATTAFAME" IN COMUNE DI INVERIGO	44
6.3 LINEA ARGINALE IN LOCALITÀ "FORNACE CONSONNI" IN COMUNE DI NIBIONNO	46
6.4 LINEA ARGINALE IN LOCALITÀ "MOLINO NUOVO" IN COMUNE DI NIBIONNO	47
7. VERIFICHE DI STABILITÀ DEI RILEVATI ARGINALI	48
7.1 FENOMENO DI SIFONAMENTO	48
7.1.1 Metodo di Bligh	49
7.1.2 Metodo di Lane	50
7.1.3 Verifiche con metodi numerici	50
7.1.3.1 Descrizione del codice di calcolo	51
7.1.3.2 Descrizione della simulazione e dei risultati ottenuti	52
7.2 VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI INDOTTI SULLE STRUTTURE DA FENOMENI EROSIVI IN CONDIZIONI DI PIENA	55
7.2.1 Metodi per la valutazione dei fenomeni di trasporto solido di fondo	56
7.2.2 Analisi dei fenomeni di erosione per le opere in progetto	58



8. VERIFICHE RELATIVE AL RISCHIO DI COLLASSO DELLA NUOVA OPERA DI REGOLAZIONE DELLE PORTATE.....	61
8.1 ANALISI PRELIMINARE.....	62
8.2 ANALISI DELL'ONDA DI PIENA ARTIFICIALE: DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO.....	63
8.2.1 <i>Dati in ingresso</i>	67
8.2.2 <i>Allestimento del modello di simulazione</i>	70
8.2.3 <i>Geometria dell'alveo</i>	70
8.2.4 <i>Costituzione fisica dell'alveo</i>	70
8.2.5 <i>Ipotesi di base: dinamiche evolutive e approccio modellistico</i>	70
8.2.6 <i>Idrogramma in ingresso all'invaso</i>	71
8.3 PROSPETTO SINTETICO DEGLI SCENARI IPOTIZZATI.....	71
8.4 APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA AL CASO IN STUDIO: ANALISI E RISULTATI	71
8.4.1 <i>Scenario 1: cedimento repentino localizzato</i>	72
8.4.2 <i>Scenario 2: formazione breccia per progressiva erosione laterale</i>	72
8.5 SINTESI DEI RISULTATI.....	73
9. CONCLUSIONI	74
9.1 RECEPIMENTO DELLE OSSERVAZIONI FORMULATE DALLA REGIONE LOMBARDIA.....	75

ALLEGATI

- ALLEGATO 1 – Dati e risultati studio idrologico
- ALLEGATO 2 – Risultati simulazione idraulica: scenario A – Stato attuale
- ALLEGATO 3 – Risultati simulazione idraulica: scenario B – Portate attuali con laminazione Inverigo
- ALLEGATO 4 – Risultati simulazione idraulica: scenario C – Portate progetto con laminazione Inverigo
- ALLEGATO 5 – Rischio di collasso dell'opera



1. PREMESSA

Le attività descritte nella presente relazione tecnica si collocano nell'ambito della progettazione definitiva delle opere di regolazione delle portate previste nell'intervento *"Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"*.

Sulla scorta dei seguenti atti propedeutici:

- Accordo di Programma finalizzato alla programmazione e al finanziamento di interventi urgenti e prioritari per la mitigazione del rischio idrogeologico sottoscritto in data 4 novembre 2010 tra Regione Lombardia e Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare;
- Convenzione stipulata in data 30 novembre 2011 tra il Parco Regionale della Valle del Lambro e il Commissario Straordinario delegato all'attuazione degli interventi urgenti e prioritari per la mitigazione del rischio idrogeologico la Regione Lombardia, avente oggetto: *"Convenzione per la progettazione e la realizzazione dell'intervento di laminazione sul fiume Lambro nei Comuni di Inverigo, Nibionno, Veduggio con Colzano"*, mediante la quale la Regione Lombardia si è impegnata a erogare il finanziamento di € 5.200.000,00 per l'attuazione degli interventi medesimi;
- Successiva pubblicazione sul sito web <http://www.parcovalldelambro.it> e affisso all'Albo Pretorio dell'Ente, dell'Avviso pubblico esplorativo per la ricerca di manifestazioni di interesse all'affidamento di servizi tecnici di ingegneria e architettura relativo alle suddette opere;

il Parco Regionale del Lambro ha provveduto ad affidare agli scriventi un incarico avente come oggetto l'esecuzione delle seguenti prestazioni:

- Verifica dei dati idrologici proposti dall'Autorità di Bacino nel Piano di Assetto Idrogeologico con particolare riferimento all'area di interesse ed in considerazione degli eventi meteorologici successivi alla pubblicazione del Piano di Assetto Idrogeologico;
- Modellazione idraulica dell'area di interesse;
- Determinazione delle geometrie di deflusso in corrispondenza sia della nuova passerella con paratoie sia nel ponte esistente attrezzato con elementi gonfiabili e restrizioni fisiche d'alveo;
- Determinazione delle quote di sommità arginali;
- Progettazione degli interventi in alveo e arginali, nonché supporto alla progettazione strutturale degli interventi sui ponti.

Nel presente documento sono pertanto descritte le attività che hanno consentito di fornire adeguato riscontro alle richieste del Committente.

Si sottolinea sin d'ora il processo partecipato assunto nell'esecuzione delle prestazioni, con coinvolgimento della Committenza, degli Enti interessati e dei cittadini nel corso di incontri e sopralluoghi appositamente svolti.



2. STUDI PREGRESSI E DATI DISPONIBILI

Prima di procedere con l'esecuzione delle attività richieste dalla Committenza, gli scriventi hanno eseguito un attento screening degli studi, della documentazione e dei dati disponibili al fine di verificarne i contenuti, costituendo così un quadro esaustivo dell'ambito in cui collocare le prestazioni descritte nel presente elaborato e nelle tavole grafiche allegate.

Sin dai primi decenni del secolo scorso il Lambro è stato interessato da numerosi studi e progetti di sistemazione fluviale sia a scala d'asta, sia localizzati. In particolare:

- Sistemazione del fiume Lambro proposta dal "Comitato Coordinatore per le Acque della Provincia di Milano" nel 1937;
- "Proposte per la sistemazione idraulica del Lambro e per il riassetto paesaggistico della sua valle", detto "Piano Lambro" – Provincia di Milano, 1986;
- Progetto esecutivo per i "Lavori di sistemazione delle opere idrauliche del Lambro Settentrionale nel tronco compreso tra il ponte dell'autostrada MI-BG ed il ponte di innesto alla tangenziale est di C.na Gobba nei comuni di Brugherio e Milano" del Magistrato per il Po di Parma – 1989 ÷ 1997.
- "Progetto Preliminare di sistemazione del fiume Lambro a monte di Villasanta" di competenza della Regione Lombardia, redatto dagli scriventi nel 1998;
- "Progetto di Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico" redatto dall'Autorità di Bacino del fiume Po.

Tuttavia, in seguito all'evento alluvionale occorso nel mese di Novembre 2002, gli Enti preposti hanno affidato un incarico per la predisposizione dello "*Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua naturali e artificiali all'interno dell'ambito idrografico di pianura Lambro – Olona*" che identificasse le criticità idrauliche esistenti lungo il corso d'acqua e, alla luce degli effetti generati dall'evento dell'autunno 2002, ne individuasse una compiuta soluzione.

In seguito, nel mese di Marzo 2004, è stata adottata la "*Variante al Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) Fasce fluviali del fiume Lambro nel tratto dal Lago di Pusiano alla confluenza con il deviatore Redefossi*" che sostanzialmente ha recepito e fatto propri gli esiti del citato Studio di Fattibilità. I principali interventi ricadenti nel tratto d'interesse del fiume Lambro, la cui esecuzione è stata pianificata con la Variante e tra i quali sono compresi quelli oggetto della presente attività, sono descritti nel paragrafo §3.2.

Oltre a quanto elencato in precedenza, gli scriventi hanno potuto acquisire ed analizzare le informazioni desumibili da quanto segue:



PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo



- Progetto preliminare degli "Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano – Area di laminazione di Inverigo" redatto dal Parco Regionale della Valle del Lambro nel novembre 2012;
- Contributi delle Associazioni locali rispetto ai contenuti di detto progetto;
- Tesi di Laurea Magistrale dell'ing. Chiara Vellani redatta presso il Politecnico di Milano con il supporto del relatore prof. G. Becciu e inerente lo "*Studio del sistema delle aree di laminazione lungo il Lambro sublacuale ed affluenti finalizzata alla stesura del protocollo di gestione integrato per la difesa idraulica della valle e della città di Monza*".

Infine, la Committenza ha reso disponibile una serie di informazioni topografiche, riguardanti il tratto d'alveo e le aree perfluviali d'interesse, la cui descrizione è riportata nello specifico paragrafo §5.3.



3. DESCRIZIONE DELL'ASSETTO FLUVIALE NEL TRATTO D'INTERESSE

Il tratto del fiume Lambro oggetto della presente attività di progettazione definitiva si estende dal ponte della S.S. n.342 "Briantea" a nord, al ponte di via Fornacetta in comune di Inverigo a sud.

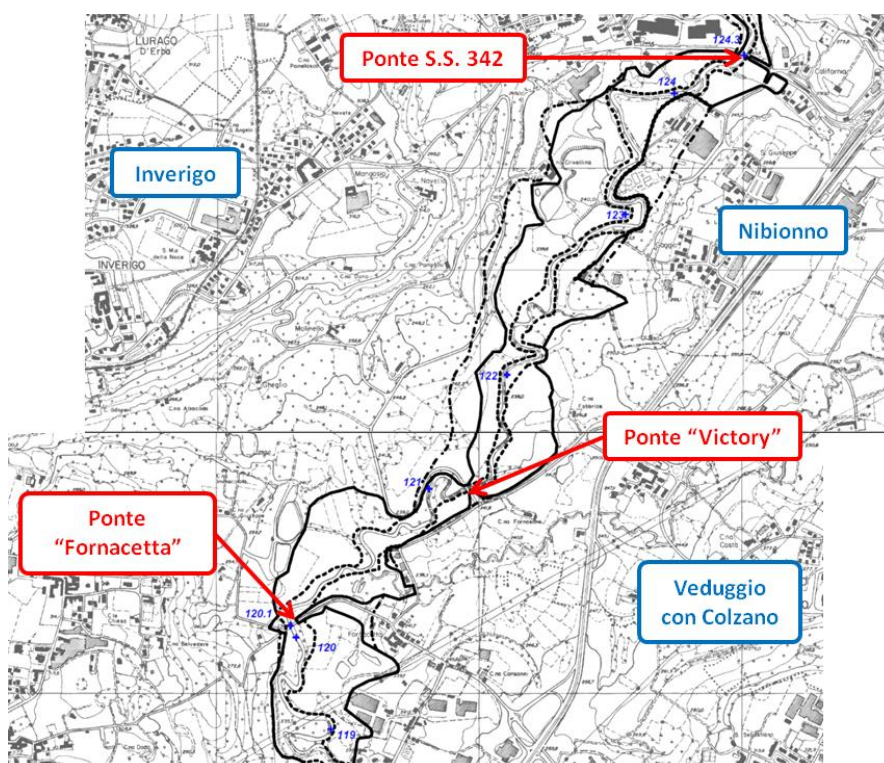


Figura 1 – Inquadramento geografico del tratto di fiume Lambro d'interesse

L'area è collocata poco a valle del "sistema dei laghi" costituito dal lago di Pusiano (il principale), dall'Alserio e dal Segrino che si estendono per una superficie complessiva di poco più di 7 km².

Dall'uscita del lago di Pusiano, attraverso un emissario naturale ed uno artificiale (Cavo Diotti), il Lambro, dopo aver ricevuto anche le acque in uscita dal lago di Alserio, riprende il suo andamento con direzione principale nord-sud; assume il carattere di fiume e, col nome di Lambro settentrionale, inizia il suo percorso collinare. Lungo il suo sviluppo attraversa diversi comuni come: Merone, Costa Masnaga, Lambrugo, Nibionno, Inverigo, Briosco, Giussano, Verano Brianza, Albiate, Triuggio, Carate Brianza, Sovico, Lesmo, Biassono e Arcore, giungendo infine a Villasanta, appena prima del suo ingresso nel Parco di Monza.

La struttura morfologica di quest'area è caratterizzata da allineamenti semicircolari concentrici di cordoni collinari, appartenenti ad apparati morenici depositatisi in fasi successive durante i periodi glaciali.



L'alveo risulta essere generalmente incassato nel fondo valle; nella sua parte più settentrionale il fiume assume un andamento meandriforme e le aree perifluviali sono caratterizzate dalla presenza di lanche e aree umide naturali anche grazie alla presenza di diverse risorgive, piccoli affluenti e dreni presenti su entrambi i lati. Inoltre, nell'area d'interesse sono presenti una serie di laghetti di origine antropica, lascito dell'attività estrattiva lì svolta un tempo a servizio della produzione di laterizi e altri materiali da costruzione.

Come è possibile osservare nello schema idrografico mostrato in Figura 2, il Lambro riceve anche i contributi idrici di alcuni affluenti (Bevere di Molteno, Veduggio e Renate) e ovviamente i contributi diretti di alcuni sottobacini denominati LAM 4, 5, 6 e 7 nel citato Studio di Fattibilità.

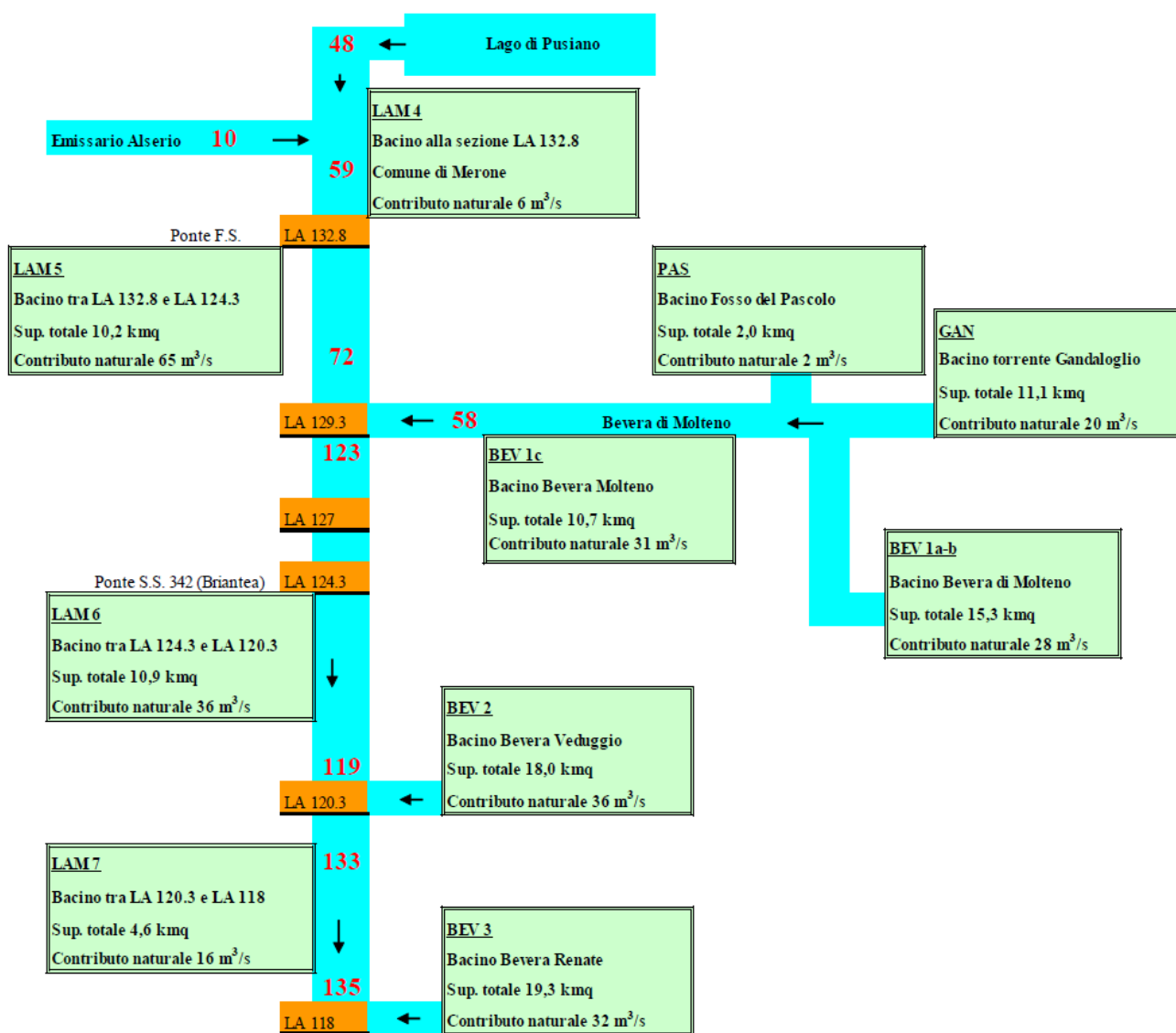


Figura 2 – Schema idrografico del fiume Lambro nel tratto d'interesse (fonte: SdF – 2003)



Gli approfonditi studi condotti a supporto del P.A.I. hanno consentito di appurare come la realizzazione di interventi di difesa passiva nei territori vallivi del Lambro (comuni di Monza, Milano, etc.) debbano necessariamente essere accompagnati da interventi attivi di riduzione delle portate al colmo in caso di piena. Dette opere sono da realizzarsi in aree poste più a monte, come ad esempio in comune di Inverigo, poiché meglio si prestano allo scopo essendo ancora relativamente libere da insediamenti antropici.

3.1 CENNI TEORICI SULLA LAMINAZIONE DELLE PIENE

Interventi attivi di riduzione del colmo delle portate di piena sono abitualmente attuati realizzando le seguenti tipologie di opere:

- Canali scolmatori;
- Casse di laminazione in derivazione;
- Casse di laminazione in linea.

In realtà nel tratto d'interesse il P.A.I. prevede la realizzazione di interventi appartenenti alle ultime due categorie. Ad esempio, sulla Bevera di Molteno è prevista l'esecuzione di una cassa in derivazione mediante l'utilizzo del volume d'invaso offerto dalla Cava di Brenno in comune di Costa Masnaga (LC).

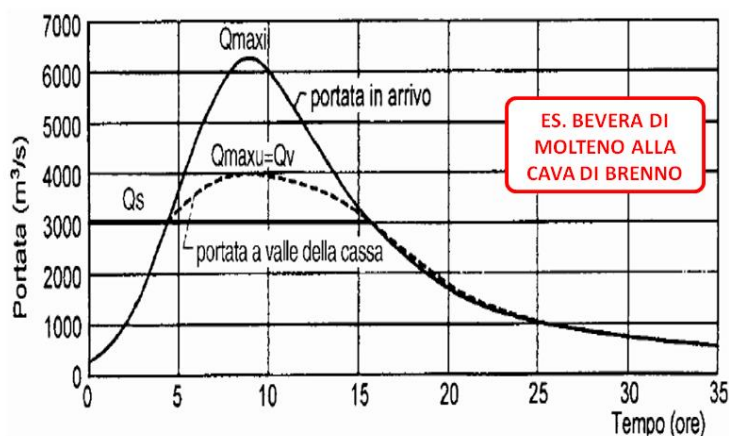
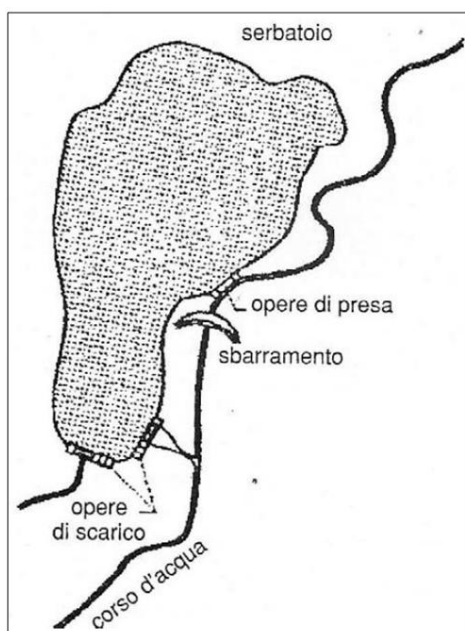


Figura 3 – Schema di funzionamento di una cassa di espansione in derivazione

Come è possibile osservare nei precedenti schemi grafici la laminazione in derivazione si attua sottraendo una quota parte della portata defluente nel corso d'acqua: di solito ciò avviene realizzando uno sbarramento in alveo che consente un locale innalzamento dei livelli idrici a monte dello stesso e lo sfioro laterale delle portate



attraverso un organo di regolazione appositamente dimensionato che governa la derivazione stessa. Come detto, il volume idrico sottratto è stoccato temporaneamente in un invaso appositamente predisposto e successivamente rilasciato non appena i livelli idrici in alveo si riducono a quote compatibili con le condizioni di sicurezza dei territori posti a valle. L'efficienza di laminazione è tanto più evidente, quanto maggiore è il volume d'invaso disponibile e quanto più si riesce ad attivare la derivazione in prossimità (prima) del passaggio del colmo di piena (cfr. idrogrammi di Figura 3).

L'opera di regolazione oggetto della presente attività di progettazione è invece classificabile tra le casse di espansione "in linea".

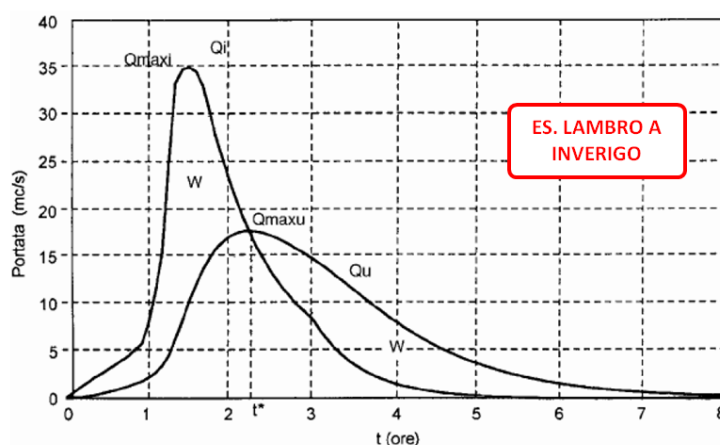
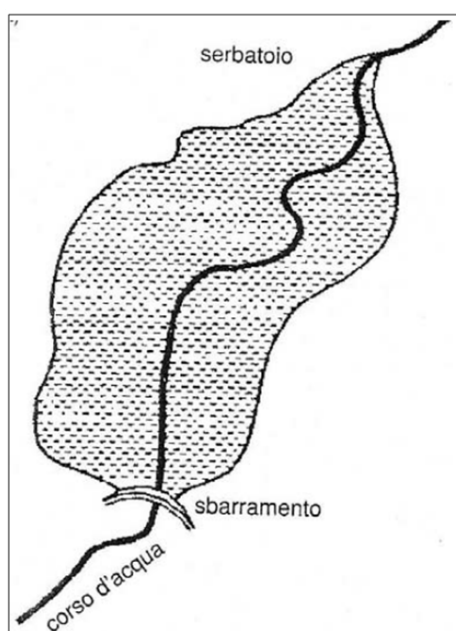


Figura 4 – Schema di funzionamento di una cassa di espansione in linea

Analogamente al caso precedente l'attivazione della laminazione avviene mediante realizzazione di un'opera di regolazione delle portate in alveo che determini un innalzamento dei livelli a monte della stessa. Tuttavia, in questo caso ciò è finalizzato ad un più esteso coinvolgimento delle aree golenali di monte al deflusso della portata di piena: ciò determina un incremento dell'ampiezza delle sezioni idrauliche e dei tiranti e una consistente riduzione delle velocità di deflusso il che si traduce nell'appiattimento dell'idrogramma di piena, così come mostrato a destra nella precedente figura. Il volume idrico dell'onda di piena è dunque costante, ma la sua traslazione a valle avviene in tempi più lunghi e con un picco di portata più modesto.



3.2 INTERVENTI DI LAMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA PREVISTI NEL P.A.I. NEL TRATTO D'INTERESSE DEL FIUME LAMBRO

Come accennato in precedenza il P.A.I. prevede una serie di interventi di laminazione delle portate nel tratto sublacuale del Lambro. La localizzazione degli interventi ed i benefici attesi in termini di riduzione dei picchi di portata sono sintetizzati nello schema mostrato in Figura 5.

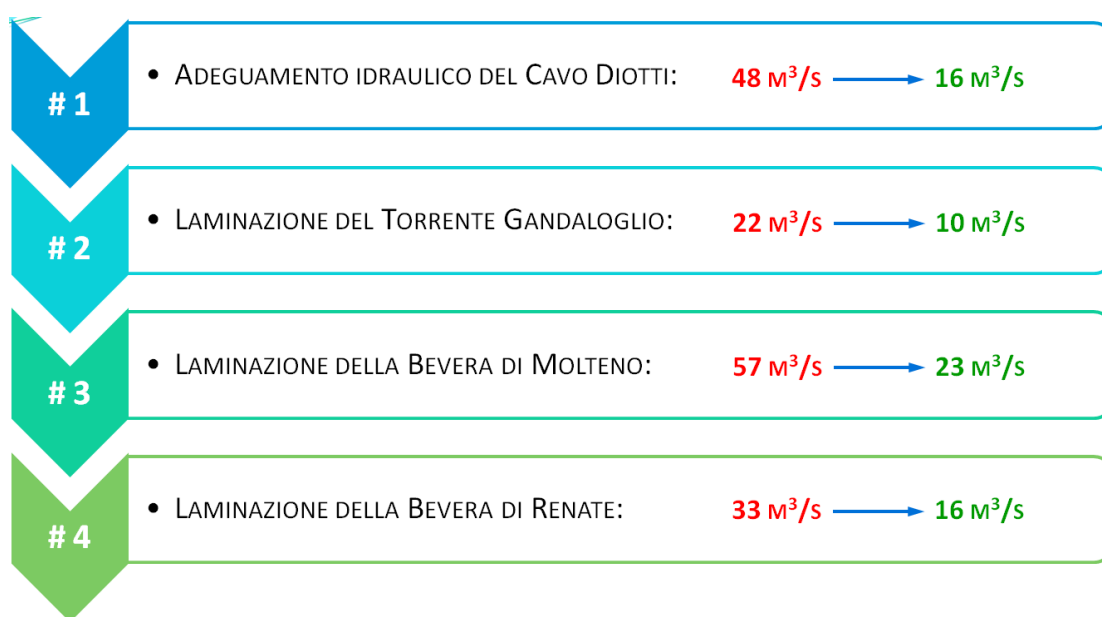


Figura 5 – Schema dei benefici attesi in termini di riduzione del colmo di portata grazie alla realizzazione degli interventi di regolazione e laminazione previsti nel P.A.I.

Oltre agli interventi anzidetti, il P.A.I. prevede anche la conservazione della capacità di laminazione naturale nell'area di Inverigo. Oltre a ciò, in sede di progettazione preliminare di attuazione degli interventi e sulla scorta di analisi più approfondite i progettisti hanno ritenuto necessario prevedere la realizzazione di "due sistemi di controllo, in prossimità delle restrizioni già esistenti allo scopo di regolare le portate in transito e rendere, al tempo stesso, il sistema modulare ovvero mantenendo la possibilità di decidere quale delle due aree invasare per prima e fino a che livello prima dell'attivazione della seconda area".

Le citate "restrizioni esistenti" sono il ponte di via Fornacetta e quello presente nell'area "Ex-Victory", entrambi in comune di Inverigo.

In realtà gli scriventi ritengono sia più efficiente la realizzazione di una sola opera di regolazione dei livelli da collocare in corrispondenza del ponte di valle (via Fornacetta): una descrizione più accurata delle motivazioni che hanno indotto a tale scelta e dei benefici attesi dalla realizzazione dell'opera è riportata nel prosieguo della presente relazione.



4. STUDIO IDROLOGICO

Il presente capitolo della relazione è dedicato alla descrizione delle attività condotte al fine di individuare le portate di riferimento per il dimensionamento delle opere in progetto.

4.1 PORTATE DI PIENA DEL P.A.I.

In allegato alla Relazione descrittiva della "Variante al Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) Fasce fluviali del fiume Lambro nel tratto dal Lago di Pusiano alla confluenza con il deviatore Redefossi", predisposta dall'Autorità di Bacino del fiume Po, sono resi disponibili i valori attualmente vigenti delle portate della piena di progetto riferite a diverse sezioni significative del fiume Lambro.

In Figura 6 è riportato uno stralcio della tabella allegata a detta relazione dal quale è possibile desumere il valore delle portate di riferimento per le sezioni d'interesse, ossia in corrispondenza del ponte della S.S. 342 e del ponte di via Fornacetta (Camisasca) in comune di Inverigo. Facendo riferimento alla colonna denominata "Portata idraulica stato attuale (T=200)" si nota come, in condizioni attuali, la portata cresca progredendo verso valle: ciò dipende dai contributi idrici aggiuntivi forniti dagli affluenti (Bevere) e dai sottobacini del Lambro direttamente sottesi da quest'ultimo. Invece, facendo riferimento alla condizione di progetto, ossia allo scenario che prevede la completa realizzazione di tutte le opere citate nel precedente capitolo compreso l'intervento oggetto del presente progetto definitivo, la portata di $65 \text{ m}^3/\text{s}$ si mantiene costante lungo l'intero tratto di corso d'acqua d'interesse: ciò è giustificato proprio dal benefico effetto garantito dalle opere di laminazione previste nel P.A.I.

Sezione	Progr.	Descrizione	Portata idrologica stato attuale (T=200)	Portata idraulica stato attuale (T=200)	Portata idraulica assetto progetto completo (T=200)	Valori limite delle portate di progetto scaricabili dagli affluenti naturali e dai recapiti urbani	Denominazione
	[m]		[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	
LA 132.19	21249	uscita Lago di Pusiano	70	50	15	15	Lago di Pusiano
LA 132.11	22545	Ponte S.P. 41 Merone	85	60	20		
LA 129.2	25528	confluenza Bevera Molteno	150	120	55	22	Bevera di Molteno
LA 127	27039	Ponte via Dante Lambrugo	150	120	65		
LA 124.3	28882	Ponte S.S. 342 (Briantea)	155	115	65		
LA 120.2						Attuale (36)	Bevera di Veduggio (viene laminata nell'area di Inverigo sul corso principale)
LA 120.1	33107	Ponte via Camisasca Inverigo	195	135	65		
LA 117.3						16	Bevera di Renate

Figura 6 – Valori delle portate di piena di progetto in corrispondenza di alcune sezioni significative (fonte: AdBPo – P.A.I. fiume Lambro)



4.2 AGGIORNAMENTO DELLE INFORMAZIONI IDROLOGICHE E IDRAULICHE

In seguito alla predisposizione del progetto preliminare degli interventi, alcuni dei quali sono divenuti oggetto del presente approfondimento progettuale definitivo, la Regione Lombardia ha espresso alcune osservazioni all'interno di una specifica nota scritta da recepire nel progetto definitivo.

Tra esse è richiesta l'esecuzione di un *"aggiornamento delle informazioni idrologiche e idrauliche dello 'Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del fiume Lambro'"*.

Intenzione dell'Ente è quella di verificare se gli eventi idrologici occorsi nel periodo successivo alla predisposizione di detto studio possano aver modificato le assunzioni poste alla base dello stesso.

Dato il fatto che l'evento più gravoso che ha colpito il bacino del fiume Lambro si è verificato nel novembre 2002, si evidenzia che quest'ultimo evento è già stato considerato come elemento di input nelle valutazioni condotte nel citato Studio di Fattibilità. Anzi, come già detto, è stato proprio il verificarsi dell'evento parossistico una delle cause principali che hanno indotto gli Enti competenti a ritenere necessario uno studio a scala d'asta del corso d'acqua.

Considerando del resto che l'obiettivo della presente progettazione definitiva sia la realizzazione di opere di regolazione della portata di piena duecentennale del fiume Lambro, al fine di fornire riscontro alla richiesta della Regione, gli scriventi ritengono sufficiente e significativo provvedere a verificare se nel periodo intercorso tra il novembre 2002 e oggi si siano verificati eventi egualmente o più gravosi di quello dell'autunno 2002.

Alla luce di detta premessa gli scriventi hanno provveduto ad eseguire un corposo lavoro di raccolta dei dati idrologici e idraulici registrati da numerose stazioni di monitoraggio dislocate nel territorio d'interesse. In ALLEGATO 1 si riportano le principali elaborazioni grafiche dei dati utilizzati.

In particolare sono state analizzate in dettaglio le serie storiche inerenti le seguenti grandezze idrologiche e idrauliche:

1. precipitazioni orarie registrate ai pluviometri disponibili nell'area in studio (Caslino d'Erba, Molteno, Lambrugo, Nibionno, Carate Brianza e Casatenovo) riportate in Figura 8;
2. livelli idrometrici del fiume Lambro (Caslino d'Erba, Lambrugo, Peregallo);
3. livelli idrometrici della Bevera di Molteno a Molteno;
4. livelli idrometrici del lago di Pusiano;

In prima istanza si è provveduto a confrontare, stazione per stazione, le precipitazioni cumulate annue al fine di identificare anni particolarmente piovosi in grado di competere con il 2002 per volume complessivo di pioggia: l'analisi ha evidenziato come l'anno 2010 sia caratterizzato in quasi tutte le stazioni da una cumulata annua molto simile a quella del 2002. A titolo d'esempio in Figura 7 si riporta il confronto delle serie storiche per la stazione pluviometrica di Caslino d'Erba: è evidente come in entrambi gli anni citati le precipitazioni abbiano abbondantemente superato i 2'000 mm di cumulata.



Anche per le altre stazioni di misura la precipitazione totale annua registrata è stata molto consistente e pertanto **è lecito assumere che il 2010 sia stato l'anno complessivamente più piovoso dopo il novembre 2002.**

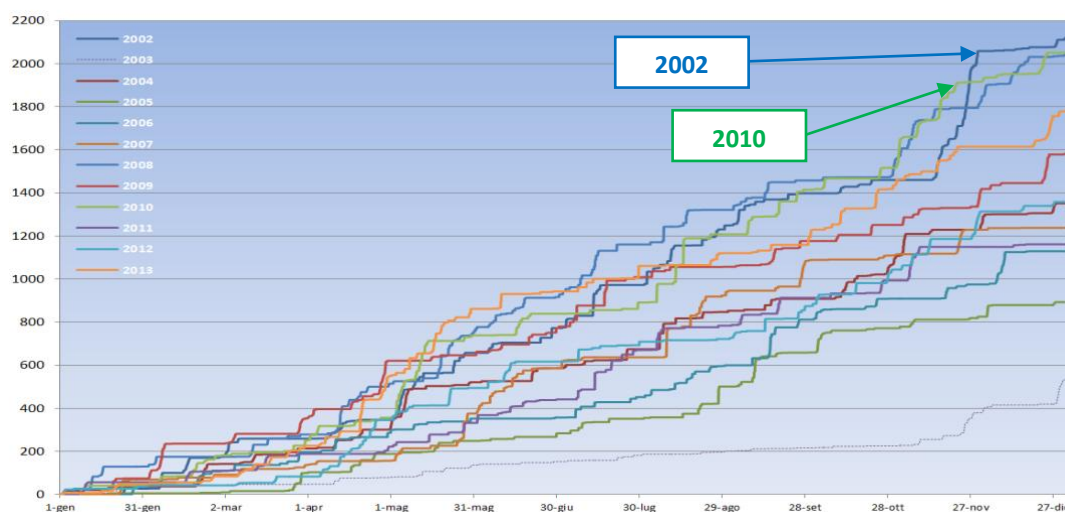


Figura 7 – Stazione di Caslino d'Erba: precipitazioni cumulate annue relative al periodo 2002 – 2013

Il passo successivo è stato dunque quello di confrontare quale sia stato l'andamento delle precipitazioni nei due anni d'interesse.

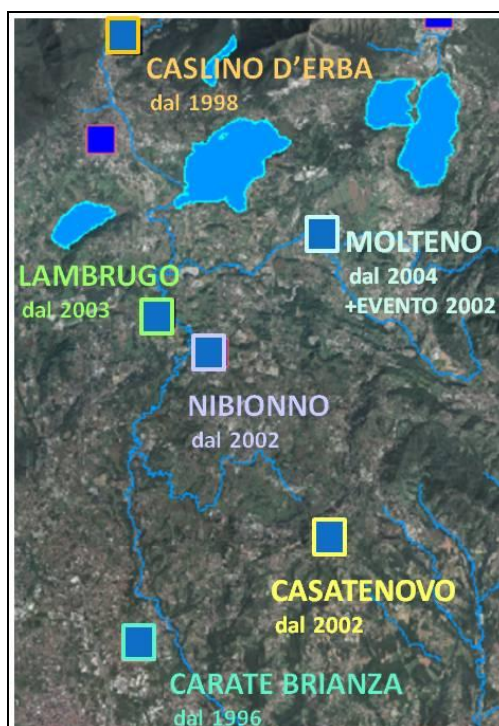


Figura 8 – Stazioni pluviometriche d'interesse



Per l'anno 2002 sono disponibili soltanto le serie storiche di Carate Brianza e Caslino d'Erba, ma considerando la dislocazione geografica e la distanza tra le stesse (cfr. Figura 8) è ragionevole presupporre che l'andamento delle piogge sia stato assolutamente analogo anche per le altre stazioni di monitoraggio considerate.

Invece, per l'anno 2010 sono disponibili le serie storiche relative a tutte le stazioni d'interesse (cfr. Figura 9).



Figura 9 – Confronto dell'andamento delle precipitazioni cumulate tra il 2002 e il 2010

Il semplice confronto visivo tra i due grafici sopra riportati mostra in modo inequivocabile come, a parità grosso modo di precipitazione annua totale (anche se Carate Brianza ha avuto precipitazioni cumulate lievemente più gravose nel 2010), il 2010 sia stato caratterizzato da un regime pluviometrico molto regolare con piogge equamente distribuite nel corso dell'anno. Invece, è molto evidente il consistente e concentrato incremento di precipitazioni registrato nel mese di novembre 2002 (cfr. frecce rosse).



Si è inoltre provveduto a verificare quale sia stata l'oscillazione dei livelli del lago di Pusiano nell'intero periodo d'interesse (2002 – 2013) ed è evidente, osservando la Figura 10, come lo specchio d'acqua risponda prontamente alle variazioni del regime pluviometrico: al massimo raggiunto nel novembre 2002, di gran lunga più consistente degli altri massimi relativi a causa delle straordinarie precipitazioni di quel mese, fa da contraltare il minimo raggiunto durante la siccitosa estate del 2003.

Si noti come i livelli del 2010 siano comunque compresi nel normale range di variazione annua, nonostante la pluviometria annua totale, come visto, sia stata equivalente a quella del 2002: ciò a conferma della diretta correlazione tra i livelli dell'invaso ed il verificarsi di eventi pluviometrici intensi.

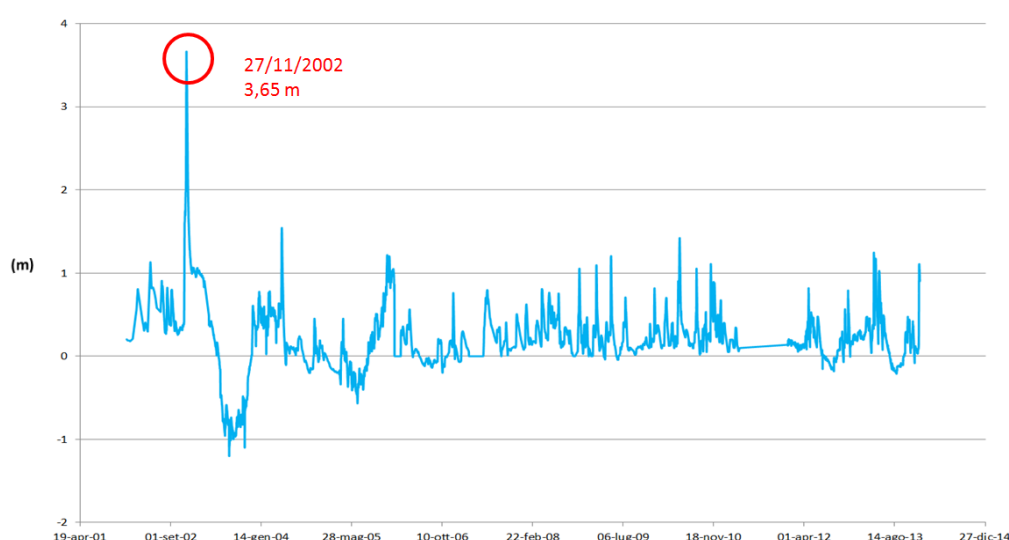


Figura 10 – Andamento dei livelli del lago di Pusiano nel periodo 2002 – 2013

Analizzando più dettagliatamente l'evento del 2002 è possibile trovare un'ulteriore conferma a quanto accennato in precedenza, ossia che nel mese di novembre di quell'anno sono state registrate precipitazioni straordinarie per continuità, non per intensità (cfr. Figura 11), che hanno determinato la saturazione dei terreni e il generale innalzamento dei livelli nei corsi d'acqua e negli invasi dell'area. Pertanto, è stato sufficiente un modesto ulteriore apporto pluviometrico (10-12 mm/giorno) nel periodo 24-27 novembre per generare l'onda di piena che ha causato l'alluvione e i conseguenti ingenti danni nella valle del Lambro.

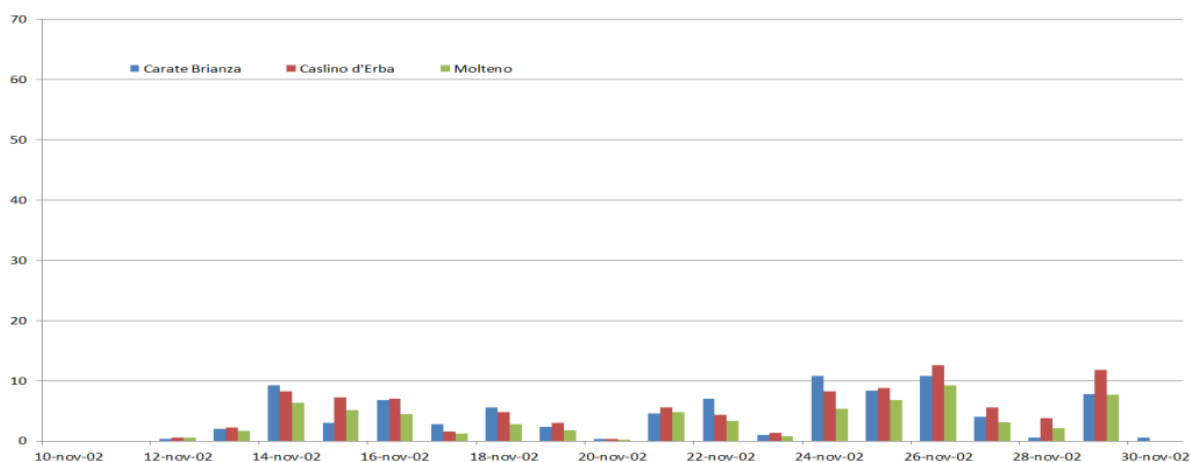


Figura 11 – Precipitazioni cumulate giornaliere per tre stazioni pluviometriche relative al novembre 2012

E' stata dunque la persistenza delle precipitazioni avvenute nel mese di novembre a determinare il picco di livello del lago di Pusiano mostrato in Figura 10. Questa evenienza ha peraltro annullato il benefico effetto di laminazione naturale delle portate abitualmente offerto dall'invaso naturale, così come è evidente osservando i grafici riportati in Figura 12. Infatti, si nota la perfetta concordanza di tempo nel raggiungimento del picco di piena degli idrogrammi del Lambro a monte e valle del lago di Pusiano.

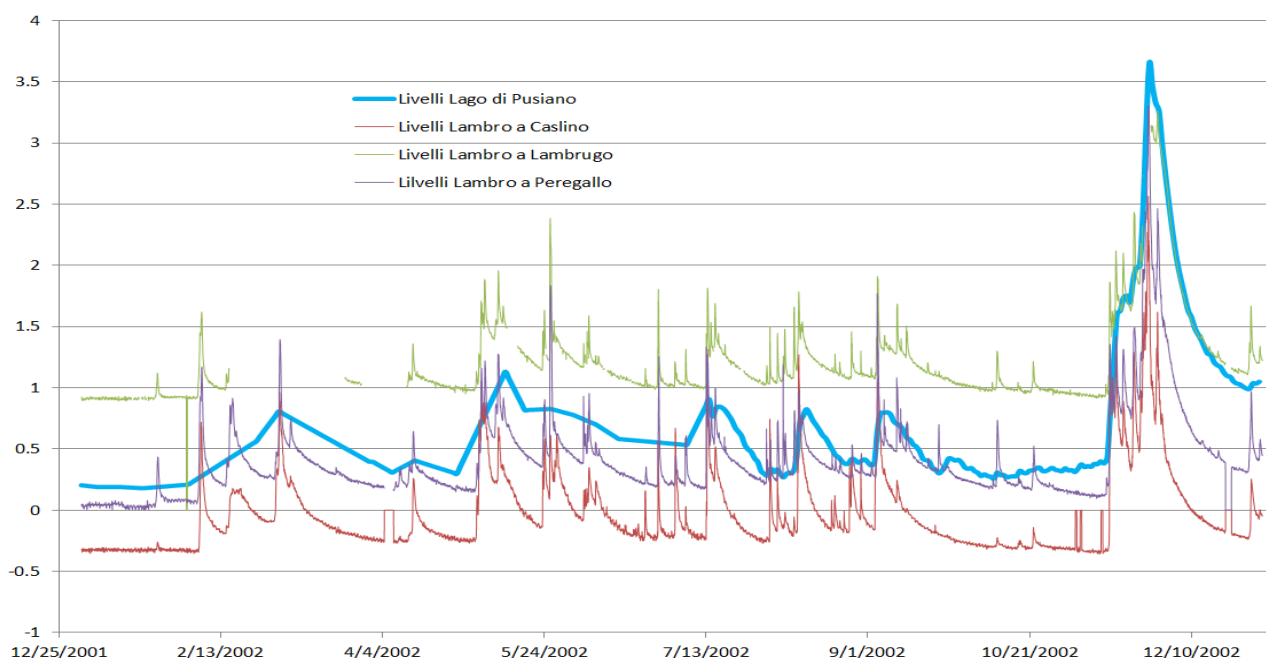


Figura 12 – Andamento dei livelli del fiume Lambro a monte (Caslino) e a valle (Lambrugo e Peregallo)



Infine, per completezza di trattazione, l'evento critico del 2002 è stato confrontato con gli eventi idropluviometrici più intensi occorsi negli anni successivi, tra i quali il più significativo è quello del maggio 2010. Come confermato dall'osservazione della Figura 13, è evidente che sia l'andamento delle precipitazioni cumulate relativo all'evento 2002, sia i corrispondenti livelli in alveo del Lambro sono ampiamente superiori a quanto registrato nel mese di maggio 2010.

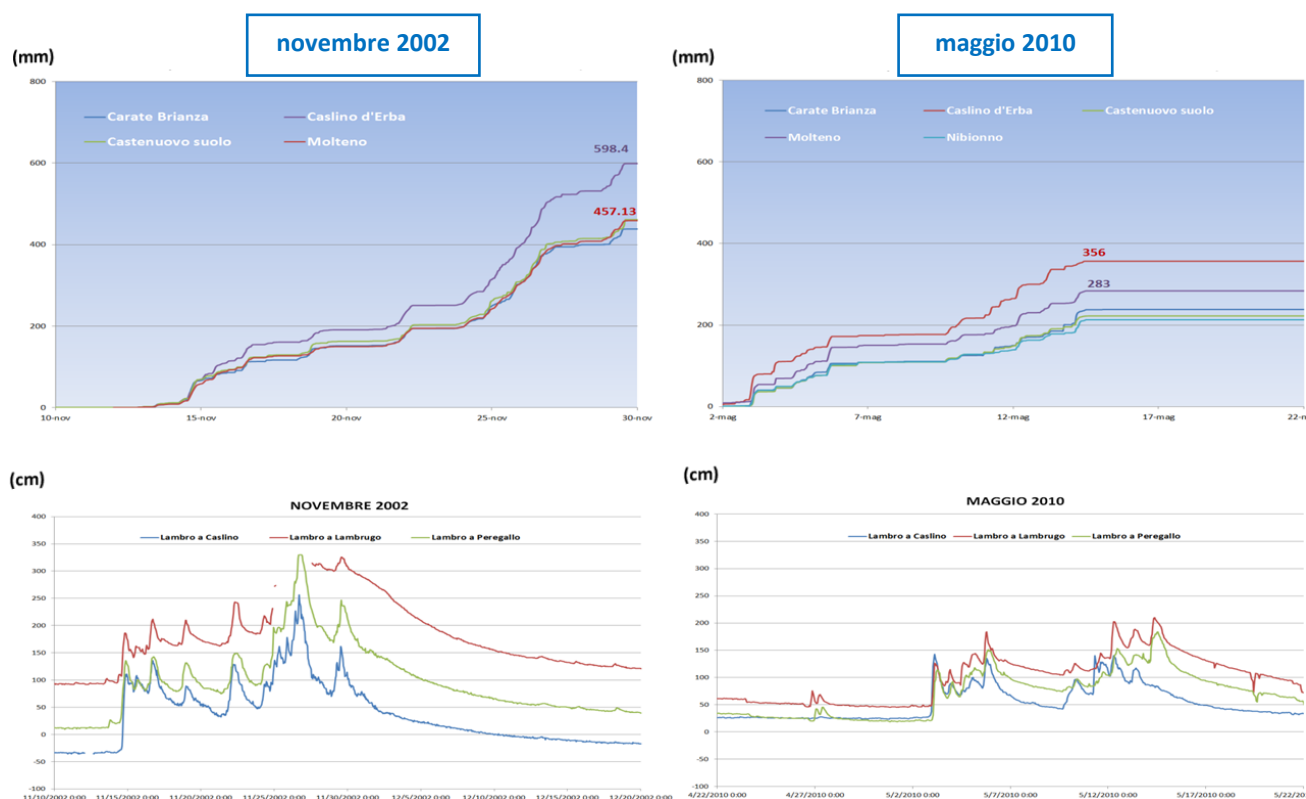


Figura 13 – Confronto tra l'andamento delle precipitazioni e dei livelli del fiume Lambro per gli eventi del novembre 2002 e del maggio 2010

Per quanto dianzi illustrato **è dunque possibile confermare la validità delle portate definite dallo Studio di Fattibilità in quanto gli eventi successivi, seppur non compresi nell'analisi statistica dello stesso, sono di entità inferiore e con caratteristiche molto differenti e meno gravose rispetto all'evento critico del 2002.**

Si può pertanto ragionevolmente affermare che, da un punto di vista statistico, l'eventuale aggiornamento della serie storica dei dati non comporterebbe comunque modifiche apprezzabili in aumento rispetto alle portate di riferimento (vigenti), calcolate nelle sezioni di interesse, che comprendono anche quelle del 2002.



4.3 DEFINIZIONE DELLE PORTATE DI PIENA DI RIFERIMENTO

Per quanto descritto nei paragrafi precedenti, gli scriventi ritengono aggiornati e attendibili i valori di portata pubblicati nel P.A.I.

Pertanto detti valori saranno assunti quale riferimento per l'esecuzione delle verifiche idrauliche e per il dimensionamento delle opere del presente progetto definitivo (cfr. Tabella 1).

Tabella 1 – Portate di piena di riferimento assunte per le successive verifiche idrauliche

Sezione	Descrizione	Portata stato attuale (TR = 200 anni)	Portata di progetto (TR = 200 anni)
LA 124.3	Ponte S.S. 342 "Briantea"	115 m ³ /s	65 m ³ /s
LA 120.1	Ponte via Camisasca - Inverigo	135 m ³ /s	65 m ³ /s

Si rammenta che i valori della portata di progetto si riferiscono ad uno scenario cui corrisponde la completa realizzazione di tutte le opere di laminazione previste nel P.A.I. di cui al paragrafo §3.2.



5. STUDIO IDRAULICO

Obiettivo dello studio idraulico condotto dagli scriventi e descritto nel presente capitolo è stato quello di identificare e dimensionare le opere necessarie per garantire il conseguimento degli obiettivi di laminazione delle portate di piena del fiume Lambro nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano.

Si tratta dell'intervento più strategico per la sicurezza idraulica della valle del Lambro tra tutti quelli identificati nella precedente fase di progettazione preliminare. Gli interventi di regimazione idraulica che saranno realizzati consentiranno la conservazione delle attuali aree di naturale espansione del Lambro in occasione dell'evento di piena duecentennale a fronte di una consistente riduzione delle portate previste a seguito degli interventi da realizzarsi a monte secondo la pianificazione dell'Autorità di Bacino.

In sede di progetto preliminare erano stati individuati due sistemi di regolazione da collocare rispettivamente in corrispondenza o nelle immediate vicinanze dei due attraversamenti rappresentati dal ponte "ex-Victory" e dal ponte di via Fornacetta ad Inverigo. Tuttavia, gli approfondimenti svolti in questa sede hanno indotto gli scriventi ad apportare alcune modifiche alla configurazione di progetto originaria così come descritto nel paragrafo successivo.

5.1 VALUTAZIONE DELLE ALTERNATIVE PROGETTUALI

Il processo decisionale seguito dagli scriventi per l'individuazione delle opere oggetto della presente attività di progettazione è stato supportato dalla valutazione preliminare di una serie di possibili alternative progettuali via via scartate per le specifiche motivazioni descritte puntualmente di seguito sino all'individuazione di una soluzione ritenuta fattibile e in grado di conseguire gli obiettivi previsti dal P.A.I.

5.1.1 Ipotesi 0: mancata realizzazione delle opere

La prima ipotesi al vaglio degli scriventi ha riguardato la possibilità di non realizzare alcuna opera di regolazione delle portate di piena del fiume Lambro nell'area d'interesse.

A seguito di una approfondita analisi dello stato di fatto tale ipotesi è stata scartata per le seguenti motivazioni:

- Avrebbe negato la cogente attuazione del P.A.I.;
- Avrebbe impedito di ottenere i benefici assicurati dalla possibilità di regolare le portate idriche a monte e a valle delle opere.

Nel corso del processo di condivisione con gli Enti e gli attori territoriali coinvolti nel progetto è stata più volte avanzata da alcune associazioni ambientaliste la proposta di non realizzare alcuna opera di regolazione nella valle di Inverigo, ma di ricercare i volumi mancanti alla messa in sicurezza della valle del Lambro tra tutte le aree di laminazione naturale esistenti lungo il suo corso. È stato loro chiaramente spiegato che in realtà il P.A.I. già contempla l'effetto benefico in termini di riduzione del picco di piena offerto dalle aree di laminazione



naturale esistenti lungo il corso del Lambro, tra le quali è compresa quella di Inverigo, e che nonostante ciò permane comunque un consistente deficit dal quale deriva la necessità della regolazione.

D'altro canto, con riferimento a quanto descritto nel paragrafo §3.1, è del tutto evidente che l'efficienza di laminazione dipende non soltanto dal volume d'invaso disponibile, ma anche e soprattutto dal momento in cui si avvia l'azione di regolazione delle portate. Infatti, a parità di volume disponibile, tanto più l'invaso delle portate avviene in prossimità del colmo di piena, tanto più è possibile ottenere una riduzione del valore di picco di portata. Peraltro, se l'attivazione delle casse d'espansione avvenisse con troppo anticipo o ritardo non soltanto ci sarebbe la possibilità che i benefici in termini di laminazione possano essere del tutto trascurabili, ma paradossalmente il rilascio incontrollato delle portate potrebbe determinare un aggravio delle condizioni idrauliche per i territori di valle: ciò potrebbe avvenire nel caso in cui il passaggio del picco dell'idrogramma in uscita dall'area di laminazione avvenga contemporaneamente all'immissione nel corso d'acqua principale dei colmi di piena provenienti da affluenti (contributo puntuale) o da sottobacini direttamente sottesi (contributo distribuito). A puro titolo d'esempio, nel caso in esame il picco dell'idrogramma in uscita dall'area di laminazione naturale di Inverigo potrebbe manifestarsi proprio al momento in cui è massimo il contributo delle Bere di Veduggio e Renate.

Per questa ragione, ove ce ne sia la possibilità, è sempre preferibile governare i fenomeni di laminazione mediante realizzazione di apposite opere di regolazione. Avendo a disposizione un'efficiente rete di monitoraggio dei livelli/portate dei corsi d'acqua d'interesse e conoscendone il comportamento idrologico-idraulico sulla scorta dell'esperienza e della modellistica numerica, il Gestore dell'opera di regolazione è in grado di decidere caso per caso quale sia il momento più opportuno per avviare la regolazione delle portate, invasandole o rilasciandole.

Per quanto detto è evidente che gli scriventi ritengono assolutamente necessario che i fenomeni di laminazione delle portate che attualmente avvengono naturalmente nelle aree golenali di Inverigo, Veduggio con Colzano e Nibionno siano regolati mediante la realizzazione di un apposito manufatto.

5.1.2 Ipotesi 1: regolazione delle portate di piena mediante realizzazione di una "bocca tarata"

Nel corso del 2° Convegno Italiano sulla Riqualificazione Fluviale, organizzato dal C.I.R.F. (Centro Italiano di Riqualificazione Fluviale), dalla Provincia Autonoma di Bolzano e dalla Libera Università di Bolzano, tenutosi nella città altoatesina il 6 e 7 novembre 2012, un raggruppamento di professionisti¹ ha presentato un "Progetto di massima relativo alla formazione di aree di espansione fluviale da trasformarsi in zone umide ove sviluppare un impianto di fitodepurazione".

¹ F. Innocenti (Gamma P.T. s.r.l.), R. Massara (Prodotto Ambiente) e C. Chiappino (SET – Società per l'Engineering del Territorio s.r.l.).



La proposta progettuale si prefiggeva *"la realizzazione di una vasta zona di laminazione controllata delle piene del fiume da configurarsi come aree umide con finalità di fitodepurazione naturale dei carichi inquinanti delle acque del Lambro"*.

L'obiettivo di regolazione idraulica sarebbe stato conseguito mediante la realizzazione di una soglia di sbarramento in località Fornaci, nel Comune di Inverigo, *"atta a contenere gli eventi di piena centennali e realizzata con le seguenti modalità costruttive:*

- *Nucleo in calcestruzzo ancorato al substrato;*
- *Luce di fondo alveo atta a garantire il regolare deflusso della portata del fiume fino alla portata limite di 64,5 m³/s;*
- *Rivestimento in legname e pietrame (...)"*

Gli scriventi hanno dunque vagliato anche la fattibilità di detta ipotesi, valutandone pro e contro, e l'esito dell'esame è stato negativo principalmente per le medesime argomentazioni adottate al punto precedente, con particolare riferimento alla mancata possibilità di regolazione manuale delle portate offerta dalla proposta progettuale. Anche in questo caso, infatti, non è prevista l'installazione di organi di regolazione mobili (paratoie, etc.) la cui attivazione e modalità di interazione con la corrente di piena possa essere stabilita dall'Ente Gestore. Inoltre, la soluzione a "bocca tarata" è soggetta ad alcuni altri elementi potenzialmente critici tra i quali:

- Difficoltà di rimozione del materiale flottante che tenderebbe ad accumularsi a monte dello sbarramento nel corso di eventi di piena di intensità anche inferiore a quello di progetto (TR = 100 anni). Ciò determinerebbe l'attivazione della regolazione anche per tempi di ritorno inferiori con difficoltà di previsione degli effetti dell'interferenza idraulica sul naturale deflusso delle portate di piena;
- L'esistenza di una singola luce farebbe venir meno il vantaggio legato alla ridondanza offerta da un'opera di regolazione formata da due o più luci: nel caso in cui la prima non garantisse la necessaria efficienza, la seconda (o le ulteriori) garantirebbero la propria funzionalità.

5.1.3 Ipotesi 2: realizzazione del volume d'invaso mediante ribassamento dei piani golenali

In terza battuta è stata esaminata un'ipotesi d'intervento supportata peraltro dalle associazioni locali, ossia la possibilità di ottenere un volume aggiuntivo d'invaso non già realizzando delle opere di regolazione che agiscano innalzando i livelli idrici a monte per fenomeni di rigurgito delle portate, ma ribassando i piani golenali mediante estrazione di materiale.

Anche in questo caso esistono molteplici elementi che hanno indotto gli scriventi a tralasciare tale alternativa progettuale. In particolare:

- il volume d'invaso necessario ad assicurare un minimo effetto positivo in termini di laminazione delle portate di piena ammonta a diverse decine di migliaia di metri cubi. Pertanto, nel caso in cui si



decidesse di attuare l'ipotesi d'intervento, si renderebbe necessaria non soltanto l'individuazione di una destinazione per il materiale escavato, ma si determinerebbe un impatto rilevante sul traffico stradale per il trasporto dello stesso con ripercussioni anche in termini di emissioni sonore ed inquinanti;

- un consistente impatto ambientale sarebbe anche generato dallo stravolgimento dell'area golenale sia a causa dei lavori di escavazione, sia per le pesanti modifiche morfologiche indotte dagli stessi;
- considerando il fatto che la soggiacenza della falda è estremamente limitata, come testimoniato dalla presenza dei numerosi laghetti formatisi laddove un tempo si era provveduto all'estrazione di materia prima per gli stabilimenti locali di produzione di laterizi e/o altro, è lecito attendersi che, oltre alle interferenze con l'acquifero in fase di esecuzione degli scavi, sarebbe necessario provvedere all'esecuzione di onerosissimi interventi di pompaggio per far sì che il volume d'invaso fornito dagli stessi sia sempre effettivamente disponibile per l'accumulo in corso di evento delle portate di piena del Lambro;
- l'assenza di opere di regolazione idraulica inoltre non permetterebbe il controllo dei tempi di attivazione delle aree di laminazione, limitando perciò di molto l'efficienza degli interventi realizzati.

5.1.4 Ipotesi 3: realizzazione degli interventi di regolazione previsti in sede di progetto preliminare

Come accennato in precedenza, gli scriventi hanno anche valutato la possibilità di realizzare gli interventi nel rispetto di quanto previsto nel progetto preliminare, ossia realizzando due diverse opere di regolazione rispettivamente in corrispondenza del ponte "ex-Victory" e a valle del ponte di via Fornacetta in comune di Inverigo. Il progetto preliminare ha correttamente colto lo spirito insito nello studio di fattibilità ed ha proposto una soluzione tecnica valida e di impatto contenuto (passerella ciclopeditone con paratoie mobili per la regolazione dell'invaso) che viene confermata nel presente livello di progettazione. Tuttavia gli approfondimenti condotti in questa sede hanno permesso di evidenziare alcuni aspetti critici:

- la realizzazione dell'opera di monte e di valle garantirebbe benefici congiunti molto ridotti, poiché l'efficienza di laminazione offerta dall'intervento presso il ponte "ex-Victory" in presenza di un analogo manufatto posto a distanza modesta a valle dello stesso sarebbe estremamente ridotta, addirittura trascurabile;
- nel rapporto costi/benefici quanto sopra determina uno sbilanciamento a favore del numeratore e dunque rende poco sostenibile la realizzazione dell'opera;
- l'opera di valle sottende un'area (e dunque un volume d'invaso) più ampia rispetto a quella di monte e dunque consente di ottenere maggiori benefici in termini di laminazione delle portate di piena;
- il posizionamento dell'opera di regolazione a valle del ponte di via Fornacetta comporterebbe un'altissima probabilità di chiusura di quest'ultimo in caso di attivazione dell'invaso e conseguente possibile allagamento della sede stradale;



- il progetto preliminare prevede che le paratoie possano dare luogo sia ad un funzionamento a battente sia ad uno a stramazzo; quest'ultima possibilità appare agli scriventi non necessaria soprattutto a fronte dei rischi di intasamento da corpi flottanti che regolarmente trasportati dalla corrente idrica in condizioni di piena.

5.1.5 Ipotesi 4: soluzione progettuale adottata

Avendo escluso le ipotesi progettuali alternative descritte in precedenza, la preferenza degli scriventi si è indirizzata sulla realizzazione di un nuovo attraversamento collocato a monte del ponte di via Fornacetta in corrispondenza del quale realizzare due luci equipaggiate con paratoie a doppio battente. Ciascun battente sarà in grado di scorrere verticalmente sovrapponendosi all'altro in modo da ridurre l'ingombro in condizioni di riposo, ossia a paratoie completamente aperte. Le due luci saranno separate da una pila centrale collocata in alveo e funzioneranno con deflusso sottobattente.

In condizioni di riposo la quota di base delle paratoie sarà tale da assicurare che il deflusso della portata di piena duecentennale possa avvenire senza alcuna interferenza con gli organi di regolazione. D'altro canto le paratoie potranno essere abbassate fino ad una quota massima non in grado di occludere del tutto le luci: la minima altezza della luce sottobattente sempre garantita sarà di 1,6 m rispetto alla quota della platea di protezione del fondo scorrevole in corrispondenza dell'opera. A monte e valle dell'opera di regolazione saranno realizzati due muri d'ala di protezione della struttura che svolgeranno anche il compito di convogliamento della corrente di piena.

Il nuovo attraversamento sarà inserito in un rilevato arginale per il contenimento dei livelli che raggiungerà la massima elevazione sul piano campagna proprio in corrispondenza dell'opera di regolazione, elevazione che si ridurrà gradualmente sino a raccordarsi con il terreno in posto.

Si realizzerà inoltre una pista ciclopeditone che sfrutterà il nuovo manufatto in progetto come elemento di attraversamento del fiume, oltre ad alcune rampe che consentano l'accesso alla stessa e il superamento del rilevato. Inoltre, sarà realizzata una casa di guardia atta ad alloggiare i servocomandi delle paratoie ed eventuali altri servizi di supporto alla pista ciclopeditone.

Saranno inoltre previste, laddove necessarie, alcune linee di arginatura a protezione di aree edificate già oggi a rischio di allagamento.

Infine, saranno realizzate delle opere di protezione spondale antierosive a monte e a valle dell'opera di regolazione, oltre che in destra all'estradosso dell'ansa fluviale collocata poco a valle della stessa, e si provvederà a ripristinare l'efficienza della luce sinistra del ponte di via Fornacetta.

5.2 MODELLAZIONE NUMERICA IDRAULICA: DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO

Le necessarie verifiche idrauliche per il dimensionamento delle opere in progetto e il calcolo dell'efficienza di laminazione delle stesse sul picco dell'onda di piena per TR = 200 anni del fiume Lambro sono state condotte grazie alla predisposizione di un modello numerico idraulico in moto vario.



L'allestimento del modello è avvenuto mediante l'utilizzo del codice di calcolo HEC-RAS River Analysis System, sviluppato dall'U.S. Army Corps of Engineering – Hydrologic Engineering Center. La versione del software utilizzata è la 4.1, aggiornata al mese di gennaio 2010.

HEC-RAS consente il calcolo idraulico monodimensionale di canali naturali e artificiali, sia in condizioni di moto permanente che di moto vario, tenendo conto dell'influenza sul moto di manufatti di vario tipo (ponti, tombini, briglie, sfioratori, luci servite da paratoie, ecc.) eventualmente presenti nel sistema. Possono essere modellati sia canali singoli che reti di canali naturali o artificiali, chiusi o aperti, con l'integrazione di profili di corrente lenta, veloce o di tipo "misto".

Un evento di piena è idraulicamente descritto dalle equazioni del moto vario per correnti a pelo libero. Esse costituiscono un sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali del primo ordine, non lineare e non integrabile analiticamente, dette equazioni di De Saint Venant.

Si assume di studiare il moto dal punto di vista monodimensionale, pertanto l'unica variabile spaziale presente è l'ascissa curvilinea.

Le variabili che compaiono nelle equazioni sono funzioni dello spazio e del tempo e sono caratterizzate dal fatto che le derivate parziali spaziali e temporali sono diverse da zero: si consideri ad esempio il vettore di velocità $v = v(x,t)$, per quanto detto, segue:

$$\frac{\partial v}{\partial t} \neq 0 \text{ e } \frac{\partial v}{\partial x} \neq 0$$

in ogni istante e in ogni punto del dominio.

Le due equazioni di D.S.V. elencate di seguito sono valide assumendo le seguenti ipotesi:

- Corrente gradualmente variata: le linee di flusso si mantengono parallele e sensibilmente orizzontali. Da questa ipotesi segue che:
 - Le sezioni fluviali possono essere ritenute piane
 - La distribuzione delle pressioni è di tipo idrostatico, per cui vale la

$$z + \frac{p}{\gamma} = \text{cost.}$$

- Sezioni trasversali verticali: causa la ridotta pendenza dell'alveo si può assumere che l'affondamento del fondo alveo (misurato sulla verticale) coincida con l'altezza del pelo libero (misurata sulla normale al fondo).
- Densità del fluido costante, cioè il fluido è incomprimibile.



5.2.1 Equazione di continuità

Rappresenta il principio di conservazione della massa secondo il quale, per un volume di controllo W, la differenza tra la portata in ingresso al volume e la portata in uscita è pari alla variazione di volume all'interno del volume di controllo sommata agli apporti laterali:

$$Q_i - Q_u = \frac{\partial W}{\partial t} + Q_l$$

5.2.2 Equazione di bilancio della quantità di moto (equazione del moto)

$$\frac{\partial(sQ)}{\partial t} + \frac{\partial \left[\beta \left(\frac{Q^2}{A} \right) \right]}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e + S_i \right) + L' = 0$$

dove:

- Q = portata (m^3/s);
- h = livello idrico (m);
- x = distanza longitudinale misurata lungo il corso d'acqua (m);
- t = tempo (s);
- s = fattore di sinuosità funzione delle caratteristiche morfologiche dell'alveo ai diversi livelli idrici;
- A = sezione attiva di deflusso (m^2);
- A_0 = sezione non attiva di deflusso (m^2);
- q = portata specifica in ingresso o uscita ($\text{m}^3/\text{s m}$);
- β = coefficiente di distribuzione delle velocità;
- S_f = pendenza della linea dei carichi totali, valutata con l'equazione di Manning di moto uniforme stazionario:

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S_f^{1/2}$$

- S_e = pendenza della linea dei carichi per variazioni di forma della sezione (resistenze localizzate);
- S_i = pendenza della linea dei carichi conseguente a dissipazioni interne di tipo viscoso per fluidi di tipo non newtoniano;
- L' = quantità di moto effetto di una corrente laterale entrante o uscente perpendicolarmente alla direzione della corrente principale.



Il sistema costituito dalle precedenti equazioni non è integrabile analiticamente, pertanto la risoluzione avviene per via numerica come descritto di seguito.

5.2.3 Metodo risolutivo numerico alle differenze finite

Il metodo può essere utilizzato per la risoluzione del sistema di equazioni di D.S.V. ed è lo stesso utilizzato da HEC – RAS. La procedura di calcolo utilizzata per la risoluzione delle equazioni si basa su uno schema implicito alle differenze finite, applicato a celle di calcolo a quattro nodi. In questo schema le derivate spaziali e i valori delle funzioni sono calcolati in un punto interno alla cella, di coordinate $[0,5; (n + \theta)]$.

Il sistema di equazioni viene così trasformato, per ogni tronco di corso d'acqua, in una successione di equazioni algebriche calcolate all'interno di ogni cella. Si perviene così a una soluzione simultanea su tutto il tronco, in cui l'intervallo temporale di calcolo può essere maggiore rispetto a un analogo schema di tipo esplicito. Le analisi di stabilità di Von Neumann mostrano che lo schema implicito è incondizionatamente stabile (teoricamente) per $0,5 < \theta < 1$ e condizionatamente stabile per $\theta = 0,5$.

Se lo schema risolutivo implicito alle differenze finite viene applicato direttamente si ottiene un sistema algebrico non lineare che può essere risolto con il metodo iterativo di Newton – Raphson. Tuttavia questo metodo presenta problemi di convergenza della soluzione in casi di discontinuità della geometria. Per evitare di risolvere il sistema non lineare, Preissman e Chen (1973) hanno sviluppato una tecnica di linearizzazione delle equazioni, che è applicata anche all'interno del software HEC–RAS.

La prima fase necessaria all'implementazione del modello consiste nel creare la geometria del sistema, ossia nel rappresentare l'alveo da analizzare, tracciando il sistema dei corsi d'acqua e le loro connessioni, secondo la direzione di scorrimento dell'acqua. Successivamente si provvede ad inserire le sezioni trasversali estratte dalle basi topografiche disponibili, definendo le quote e le distanze progressive dal punto di origine di ciascuna sezione, convenzionalmente individuato in sponda sinistra, e ad indicare le distanze reciproche procedendo in senso contrario a quello dello scorrimento dell'acqua. Per ogni sezione si identificano, mediante l'inserimento della distanza progressiva specifica, l'alveo e le zone golenali.

L'operazione prosegue con l'inserimento dei dati di scabrezza dell'alveo e delle sponde, secondo il coefficiente n di Manning. Il programma, al termine dell'inserimento delle informazioni geometriche, restituisce il grafico delle sezioni e il profilo altimetrico dell'alveo.

All'interno della geometria che schematizza il sistema si inseriscono inoltre le strutture presenti lungo il corso d'acqua, come ponti o soglie.

Il calcolo del livello del pelo libero si basa sulla risoluzione dell'equazione monodimensionale dell'energia, valuta le perdite di carico mediante l'equazione di Manning e tiene conto di perdite localizzate a mezzo di opportuni coefficienti moltiplicativi del carico cinetico. L'equazione del momento è utilizzata ogni volta in cui il profilo del moto subisce brusche variazioni, ad esempio in corrispondenza di ponti, confluenze o risalti idraulici.



Il calcolo dei profili idraulici è avvenuto in "moto vario" e si basa sulle leggi fisiche che governano il flusso in un corso d'acqua, ossia il "principio di conservazione della massa" e quello di "conservazione del momento"; tali leggi sono matematicamente espresse secondo equazioni differenziali come precedentemente descritto.

5.3 SCENARI SIMULATI E COSTRUZIONE DELLA GEOMETRIA DEL MODELLO

La geometria del fiume Lambro è stata definita per mezzo di 59 sezioni estrapolate dalle informazioni topografiche disponibili, previa verifica di attendibilità delle stesse. Sono state introdotte ulteriori sezioni per la caratterizzazione delle opere strutturali. Complessivamente il tratto d'interesse del fiume Lambro si estende dal ponte della S.S. 342 "Briantea" in comune di Nibionno sino a valle del ponte di via Fornacetta in comune di Inverigo, per uno sviluppo di oltre 4 km. Laddove possibile, le sezioni sono state fatte coincidere con quelle utilizzate nello Studio di Fattibilità predisposto a supporto della Variante al P.A.I.

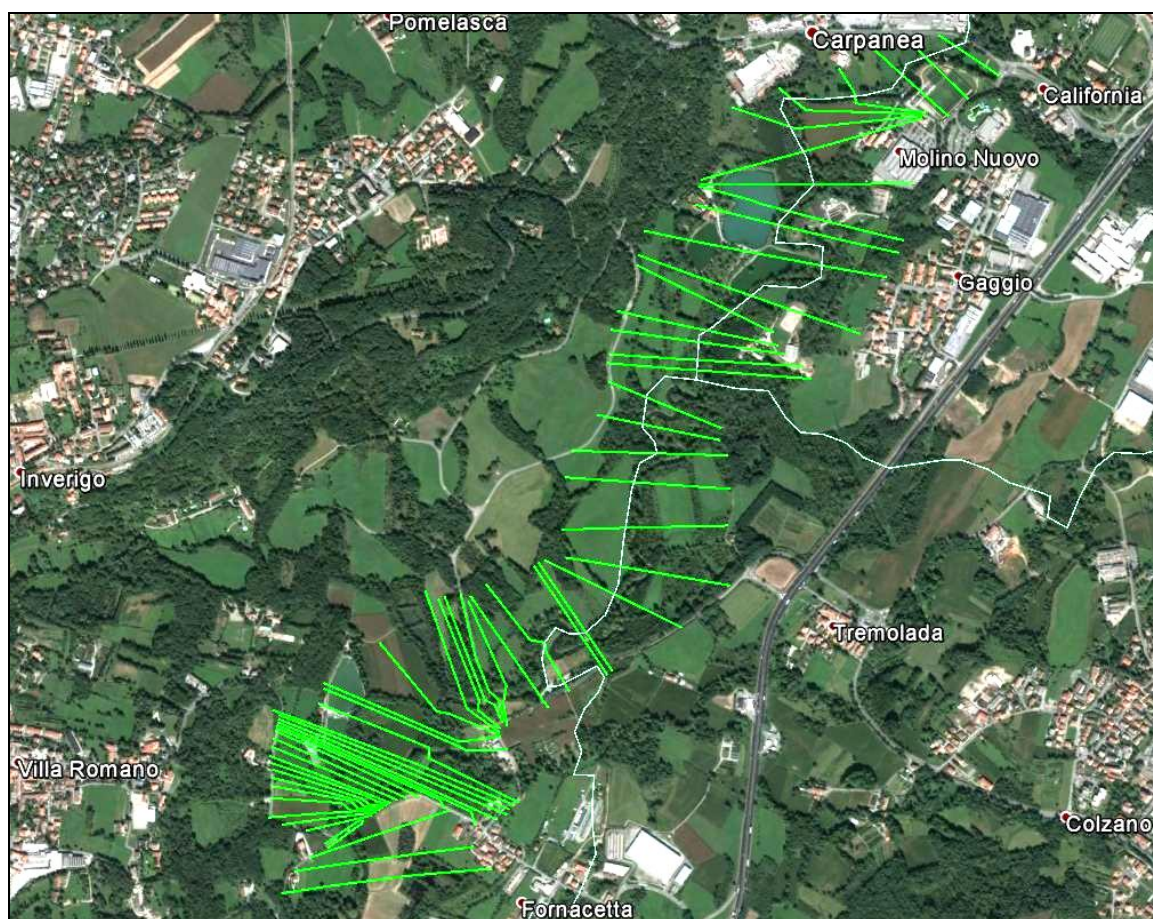


Figura 14 – Traccia delle sezioni idrauliche utilizzate per la predisposizione del modello numerico idraulico

Nel modello idraulico sono stati considerati due attraversamenti esistenti (ponti "ex-Victory" e via Fornacetta). La pendenza longitudinale media del tratto di corso d'acqua in esame si attesta intorno all'1 ‰. La definizione



delle condizioni di resistenza al moto in alveo ed in golena è avvenuta introducendo dei coefficienti di scabrezza, caratterizzati da adeguati valori del parametro n di Manning, espresso in $s/m^{1/3}$.

In generale, tale coefficiente dipende dalla granulometria del materiale presente in alveo, dalla regolarità delle sezioni, dall'andamento planimetrico del corso d'acqua, dalle caratteristiche idrauliche delle sponde e dalla possibilità che il materiale di fondo subisca fenomeni di trasporto. Esistono alcune formulazioni che consentono di determinare il coefficiente di scabrezza, note le caratteristiche medie del materiale presente in alveo, facendo ricorso a espressioni logaritmiche derivate dalla teoria della turbolenza.

Per il corso d'acqua il valore caratteristico della scabrezza in alveo e nelle aree golenali è stato definito attraverso l'analisi dei valori consigliati in letteratura (cfr. *"Criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico all'interno delle fasce A e B"*, allegata alla deliberazione n. 2/99 in data 11 maggio 1999 dell'A.d.B.Po) e dall'osservazione operata in sito.

5.3.1 Verifica di congruenza delle informazioni topografiche disponibili

Al fine di costituire un adeguato set di dati topografici per le finalità della commessa si è provveduto a raccogliere quanto già esistente e reso disponibile dalla committenza, oppure da altre fonti.

In particolare, sono stati assunti i seguenti riferimenti topografici:

- Sezioni d'alveo utilizzate per l'allestimento dei modelli idraulici nell'ambito dello *"Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua naturali e artificiali all'interno dell'ambito idrografico di pianura Lambro – Olona"*
- Rilievo topografico plano-altimetrico del fiume Lambro nei comuni di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano;
- Digital Terrain Model (DTM) ottenuto per elaborazione di rilievo lidar (Prodotti Lidar Regione Lombardia, Griglia 1x1 (Bacini e aree critiche).

Le sezioni d'alveo estratte dal DTM, dagli altri dati disponibili e battute ex-novo nel corso del recente rilievo topografico eseguito specificatamente per lo svolgimento della presente commessa, sono state sottoposte ad un'approfondita verifica di congruenza tra loro.

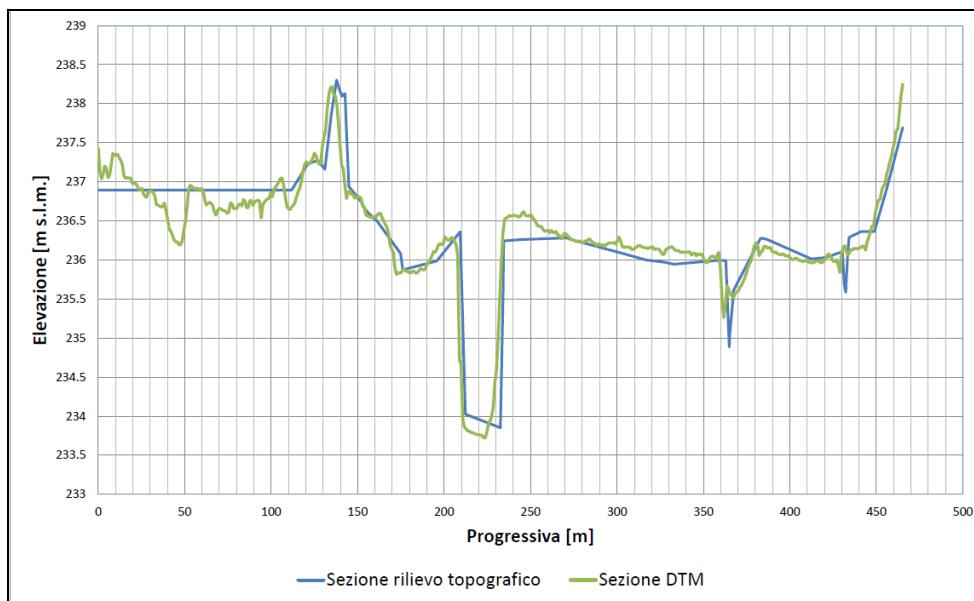


Figura 15 – Sezione n. 12: confronto tra la geometria tratta dal rilievo topografico e quella del DTM

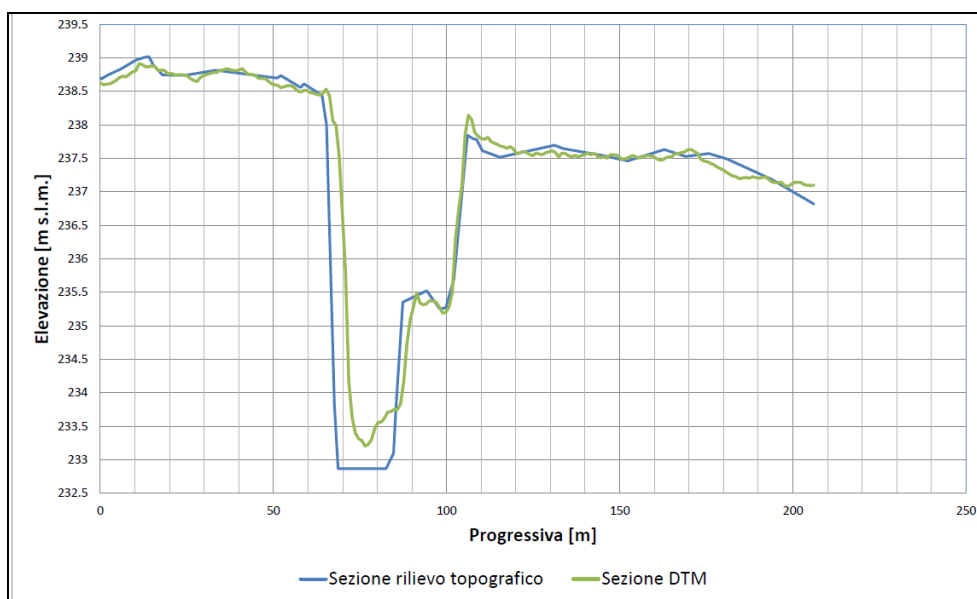


Figura 16 – Sezione n. 19: confronto tra la geometria tratta dal rilievo topografico e quella del DTM

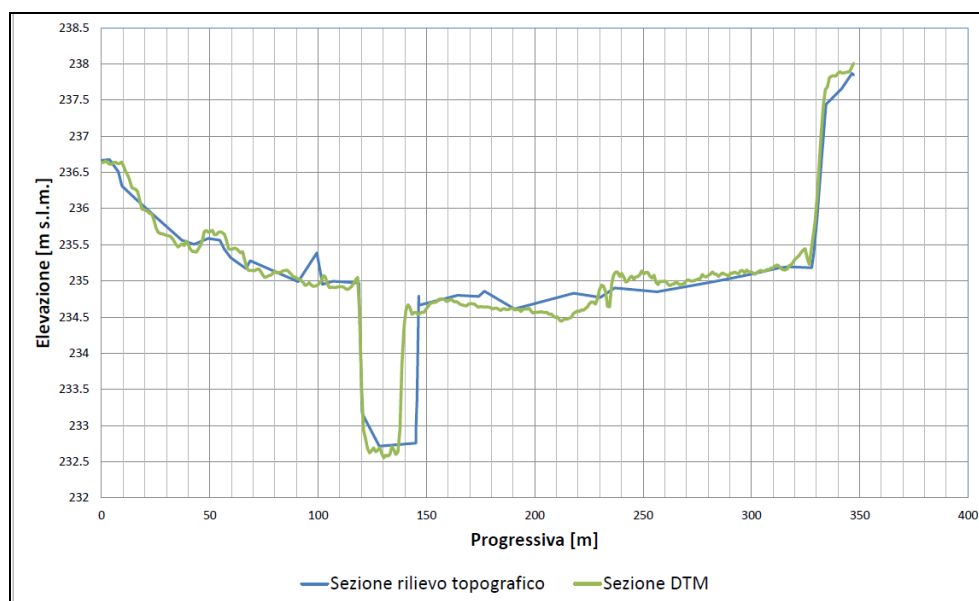


Figura 17 – Sezione n. 26: confronto tra la geometria tratta dal rilievo topografico e quella del DTM

A titolo di esempio nelle precedenti figure si è riportato il confronto tra le sezioni d'alveo n.12, 19 e 26 (secondo la numerazione adottata nella restituzione del rilievo topografico) collocate lungo l'intero tratto indagato del fiume Lambro: a fronte di un'ottima corrispondenza delle quote nelle aree golenali, si registrano alcune variazioni del profilo delle sezioni nell'alveo attivo. Ciò è perfettamente compatibile con la normale evoluzione morfologica di un corso d'acqua a fondo mobile, che si esplica con fenomeni di spostamento del canale principale di flusso, etc. e con le differenze di precisione e densità di punti rilevati legate alle differenti modalità di esecuzione dei rilievi.

Si fa presente che l'utilizzo dei dati geometrici desunti dal Modello Digitale del Terreno, stante la precisione e la densità dei punti quotati (1 pt/m²) fornisce implicitamente riscontro alla richiesta pervenuta dalla Regione Lombardia la quale, nella lettera già citata, prescrive di "tenere anche conto degli ostacoli e delle interferenze al deflusso che nel tempo hanno limitato la capacità di espansione del corso d'acqua".

5.4 DESCRIZIONE DEI RISULTATI

5.4.1 Scenario "A" – Stato attuale

Il primo scenario simulato con il supporto del modello numerico è stato quello relativo alla condizione attuale del tratto di corso d'acqua indagato in riferimento alle portate di verifica (TR = 200 anni) ed alla configurazione morfologica esistente.

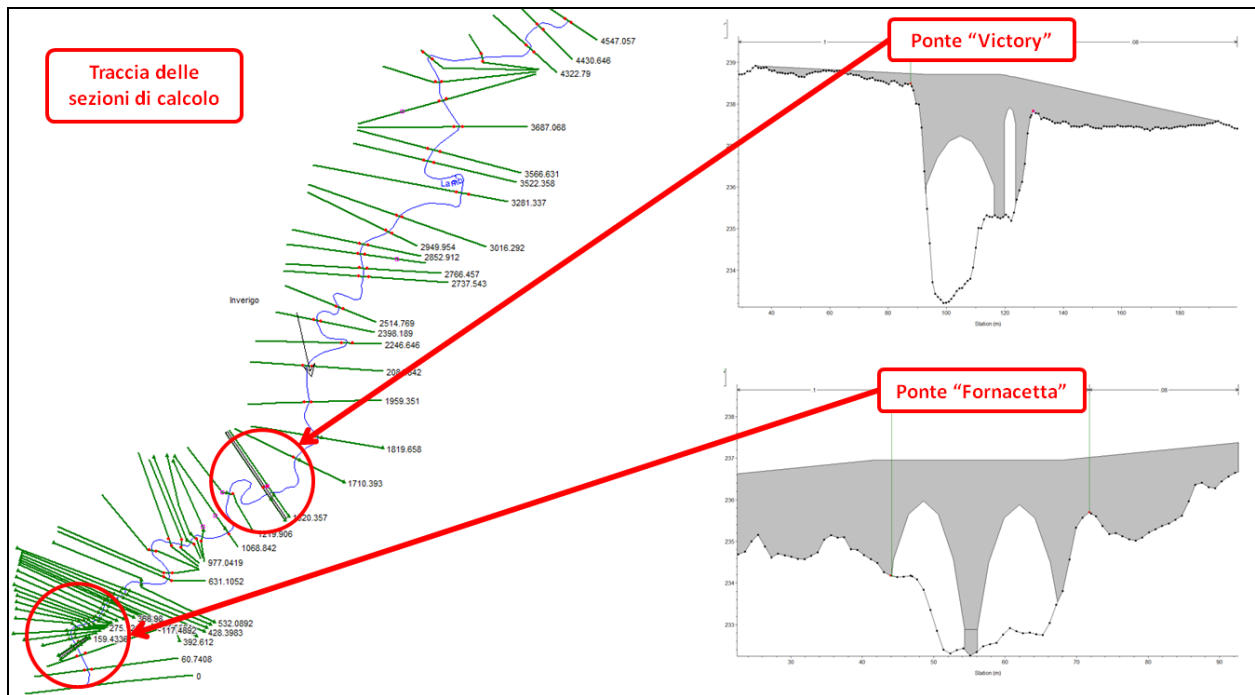


Figura 18 – Geometria di calcolo per la situazione attuale (Scenario "A")

Per quanto riguarda le portate defluenti utilizzate per il calcolo del profilo di moto si è fatto riferimento ai seguenti contributi:

- Idrogramma in ingresso alla sezione di monte caratterizzato da un picco di portata pari a $115 \text{ m}^3/\text{s}$, così come previsto nel P.A.I.;
- Contributi di portata uniformemente distribuiti lungo il tratto d'interesse (bacini sottesi LAM 6 e 7);
- Contributo di portata localizzato alla confluenza con la Bevera di Veduggio.

Inoltre, quale condizione al contorno di valle è stata imposta la pendenza media dell'alveo.

La simulazione numerica ha quindi consentito di calcolare i livelli idrici massimi raggiunti in ciascuna sezione di calcolo, la loro evoluzione nel tempo, l'idrogramma di piena in uscita dal sistema ($Q_{\text{MAX}} = 135 \text{ m}^3/\text{s}$) e la delimitazione delle aree allagabili secondo quanto specificatamente richiesto nella più volte citata nota della Regione Lombardia.

Rinviando allo specifico elaborato grafico per la rappresentazione dettagliata delle aree allagabili, di seguito si riporta il confronto tra l'idrogramma in ingresso da monte e quello in uscita a valle del sistema.

Si evidenzia che le aree allagabili sono sostanzialmente contenute entro le fasce fluviali del P.A.I., confermandone l'attendibilità nonostante le informazioni geometriche ad oggi disponibili siano molto più precise e dettagliate di quelle a suo tempo utilizzate dall'A.d.B.Po.

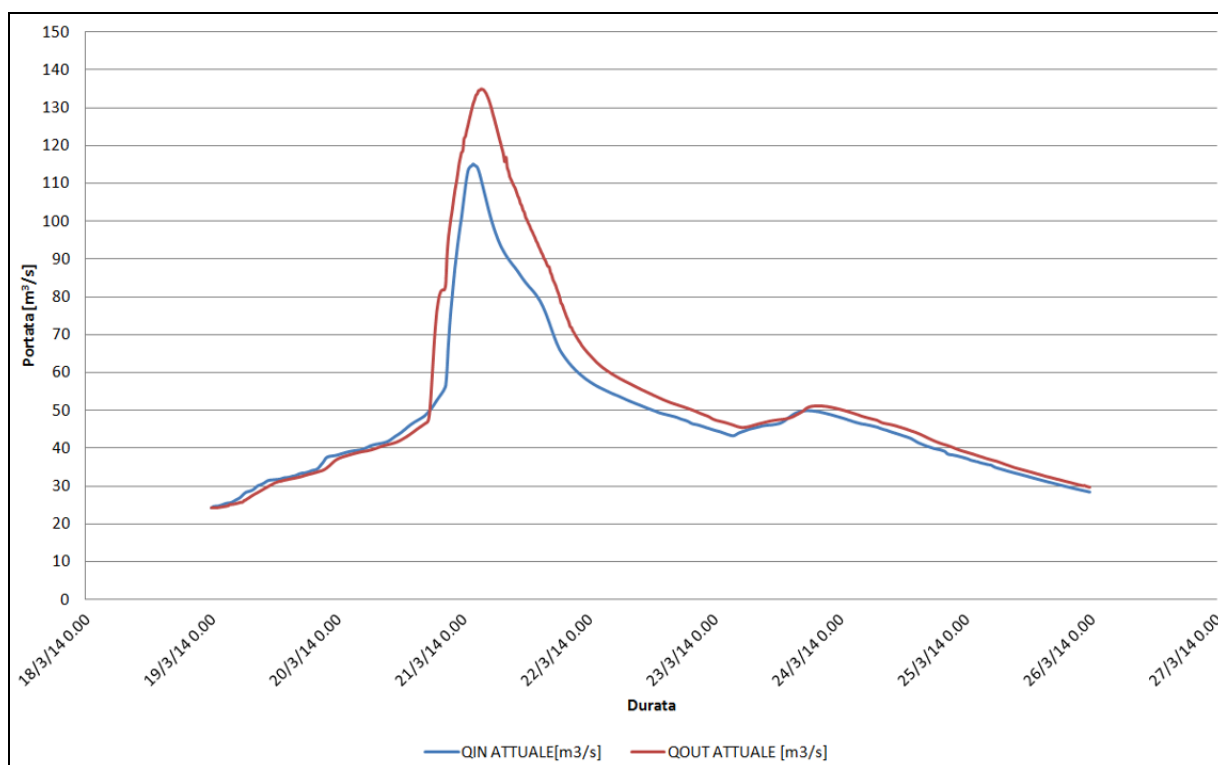


Figura 19 – Scenario A: condizione attuale – Confronto tra l'idrogramma in ingresso e quello in uscita nel tratto di fiume Lambro oggetto d'indagine

In ALLEGATO 2 sono inoltre riportati gli output completi ottenuti dal modello di calcolo in termini di sintesi delle principali grandezze idrauliche, profilo di piena ottenuto quale involucro dei massimi livelli raggiunti nel tratto di corso d'acqua d'interesse e massimi livelli idrici raggiunti per ciascuna sezione di calcolo con rappresentazione grafica della distribuzione della velocità di deflusso.

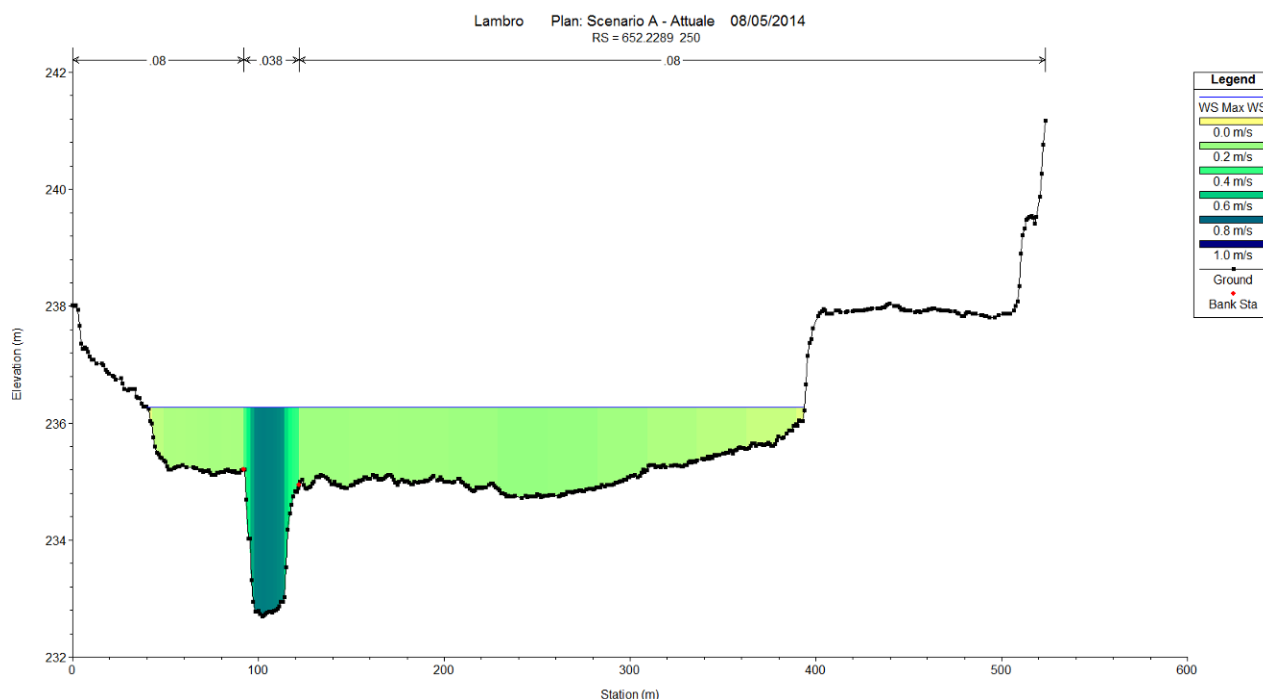


Figura 20 – Scenario "A": sezione di calcolo n.250

A titolo di esempio in Figura 20 si riporta la rappresentazione della sezione di calcolo n.250. E' possibile trovare conferma a ciò che è del tutto evidente osservando la morfologia meandriforme del fiume Lambro nel tratto d'interesse: le ridottissime pendenze motrici determinano velocità di deflusso decisamente modeste (circa 1 m/s) anche per portate di piena caratterizzate da tempi di ritorno duecentennali.

5.4.2 Scenario "B" – Portate attuali con intervento di laminazione di Inverigo

Il secondo scenario considerato per le verifiche idrauliche è stato quello caratterizzato dall'inserimento dell'opera di regolazione delle portate per la laminazione delle stesse. Nello scenario "B" le portate di verifica assunte sono quelle relative al tempo di ritorno duecentennale in assenza degli interventi di laminazione delle portate la cui realizzazione, come già detto, è prevista dal P.A.I. a monte dell'area d'interesse. Per questa ragione il secondo scenario è quello che presenta condizioni idrauliche più critiche.

La nuova opera sarà realizzata in corrispondenza di un nuovo attraversamento del fiume Lambro, che sarà destinato ad uso ciclopeditone, a monte del ponte di via Fornacetta. La regolazione sarà attuata mediante realizzazione di due luci ciascuna delle quali avente larghezza 6,0 m, altezza 5,1 m. Ogni luce sarà servita da una paratoia a doppio battente in grado di parzializzarne gradualmente e progressivamente la sezione sino a ridurla ad un'altezza massima di 1,6 m misurata dal fondo scorrevole (luce sottobattente). Pertanto, non è prevista una completa interruzione del deflusso del fiume Lambro, anche nella configurazione di massima regolazione.

In Figura 21 è mostrato lo schema grafico della luce, così come implementate nel modello numerico idraulico, nella configurazione di massima regolazione.

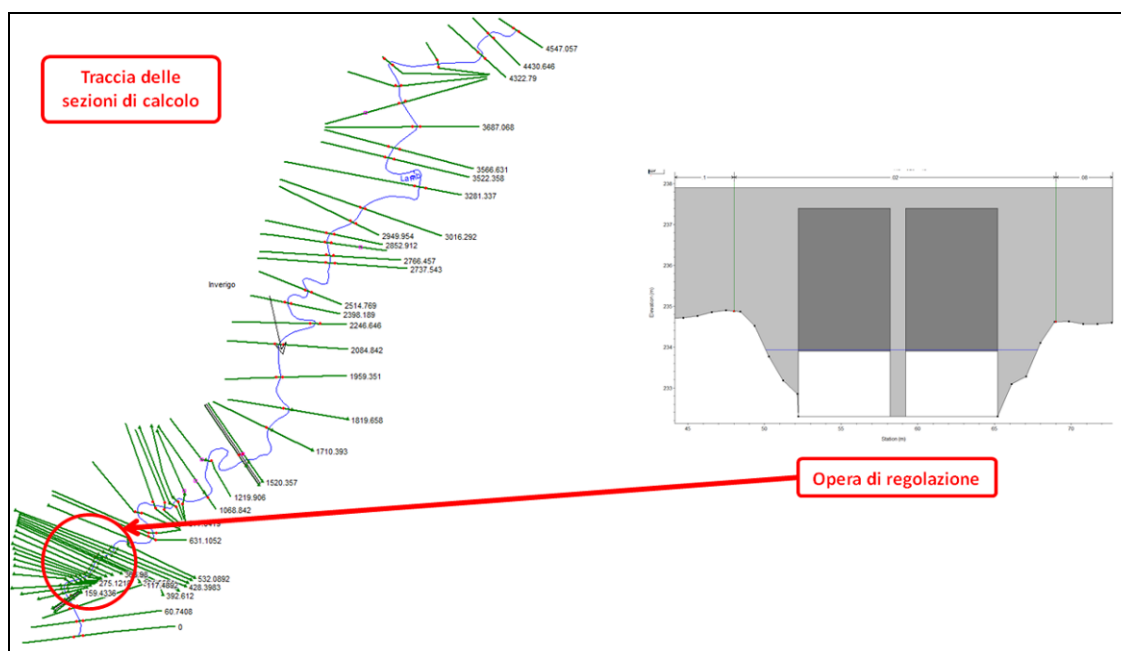


Figura 21 – Geometria di calcolo per la situazione attuale (Scenario "B"): oltre agli attraversamenti di via Fornacetta e "ex-Victory" è stata inserita anche l'opera di regolazione schematizzata in figura

Il dimensionamento dell'opera è avvenuto per passi, imponendo una graduale variazione delle principali caratteristiche della stessa: numero e dimensioni geometriche delle luci, tipologia delle paratoie, quota di intradosso dell'attraversamento, quota di massima regolazione dell'invaso, modalità di funzionamento, etc. Ciò al fine di massimizzare la funzionalità dell'intervento in termini di efficienza di laminazione del colmo della portata di piena di progetto. Le luci sono state dimensionate anche per assicurare che il deflusso della piena duecentennale, qualora si decida di non attivare l'opera di regolazione, possa avvenire senza alcuna interferenza da parte di quest'ultima garantendo un franco idraulico di 1 m rispetto all'intradosso del nuovo attraversamento.

Gli scriventi hanno anche valutato l'influenza dell'opera e delle sue principali caratteristiche sull'ampiezza dell'area allagabile a monte, in modo da minimizzare il rapporto tra l'impatto territoriale ed i benefici attesi. Già in questa sede si ritiene importante sottolineare che la frequenza di attivazione dell'opera sarà relativamente ridotta, poiché avverrà soltanto in occasione di eventi idrologici parossistici. Per questa ragione sarà necessario movimentare le paratoie con cadenza almeno semestrale in modo da verificarne e assicurarne con continuità l'efficienza e la funzionalità. Rinviamo all'ALLEGATO 3 per il dettaglio analitico e integrale dei risultati ottenuti con la simulazione numerica idraulica, è utile osservare il profilo di piena mostrato in Figura 22. E' evidente il fenomeno di rigurgito indotto dalla presenza della nuova opera: l'incremento dei livelli consente un maggiore interessamento delle aree golenali al deflusso della portata di piena (cfr. Figura 23).

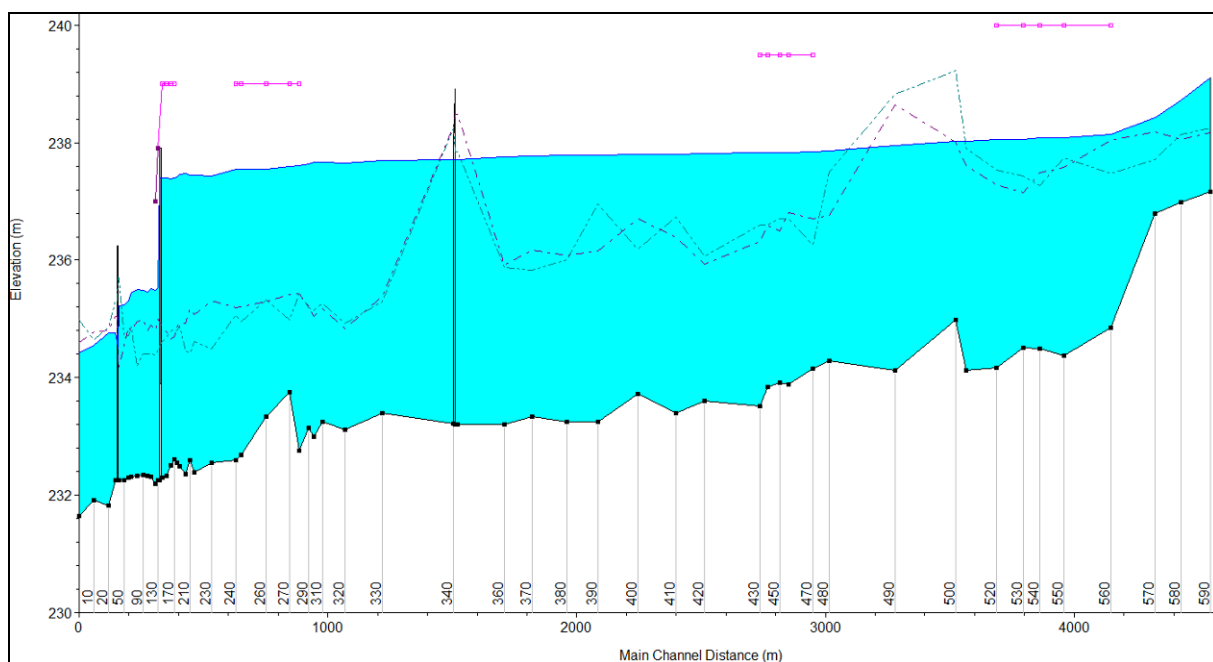


Figura 22 – Profilo di piena relativo allo scenario "B": è evidente il fenomeno di rigurgito dei livelli indotto dalla realizzazione dell'opera di regolazione delle portate



Figura 23 – Sezione di calcolo n.290: confronto tra il livello idrico in condizioni attuali (scenario "A", linea rossa) e in condizioni di progetto (scenario "B", linea rossa). E' evidente l'incremento di circa 1 m dovuto al fenomeno di rigurgito delle portate indotto dalla presenza dell'opera di regolazione.



Il connesso aumento della sezione idraulica e il rallentamento della velocità media di deflusso consentono proprio il raggiungimento dell'obiettivo prefissato con la realizzazione di casse di laminazione "in linea" (cfr. §3.1), ossia un ritardo nella traslazione dell'onda di piena e una riduzione dell'entità del suo colmo.

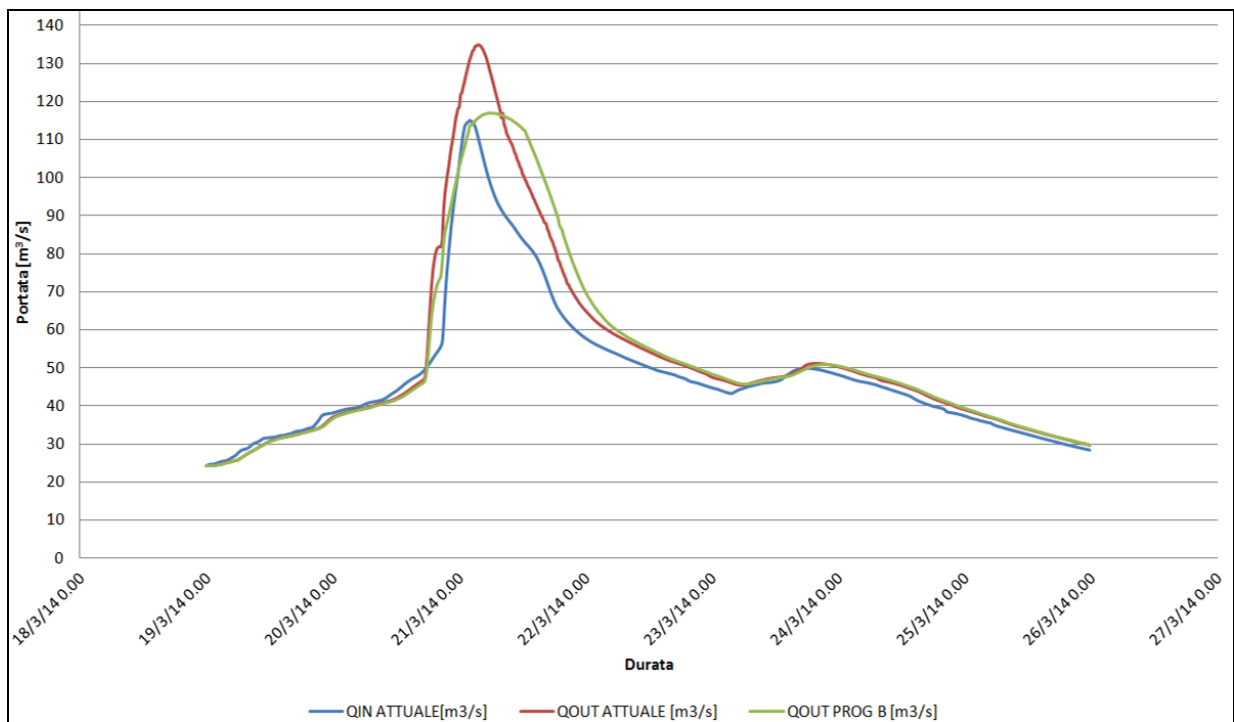


Figura 24 – Confronto tra l'idrogramma in ingresso e quelli in uscita (scenari "A" e "B") nel tratto di fiume Lambro oggetto d'indagine: è evidente il beneficio offerto dall'opera di regolazione in termini di riduzione del picco di piena e ritardo nella traslazione dell'onda.

In particolare, facendo riferimento alla precedente Figura 24 e al fatto che la portata in uscita dal sistema si riduce da 135 m³/s (scenario "A", condizioni attuali) a 116 m³/s, è possibile calcolare l'"efficienza di laminazione" dell'opera con la formulazione seguente:

$$\varepsilon = 1 - \max(Q_u) / \max(Q_i)$$

Il risultato è pari al 13%, che rappresenta un risultato significativo per casse di laminazione appartenenti alla tipologia "in linea".

Si sottolinea che l'opera di regolazione consente di laminare il complesso dei contributi diretti (bacini LAM 6 e 7) e concentrati (Bevera di Veduggio) che il fiume Lambro riceve nel tratto d'interesse compreso tra il ponte della "Briantea" e quello di via Fornacetta in comune d'Inverigo.

Inoltre, così come chiesto dalla Regione Lombardia nella nota più volte citata, anche in questo caso si è provveduto al tracciamento delle aree allagabili mostrate nello specifico elaborato grafico. L'osservazione dello stesso consente di apprezzare come, nonostante l'incremento dei livelli indotto dall'opera di regolazione,



le aree allagabili si mantengano sostanzialmente ricomprese all'interno delle vigenti fasce fluviali, a meno di zone molto localizzate ove i limiti delle stesse vengono superati (es. in destra idrografica in corrispondenza del ponte "ex-Victory", cfr. Figura 25).

A questo proposito giova sottolineare che la maggiore estensione degli allagamenti è estremamente circoscritta, caratterizzata da battenti e velocità di deflusso molto ridotte e, soprattutto, la sua manifestazione è attesa solo per eventi parossistici con tempi di ritorno duecentennali in configurazione di massima regolazione dell'invaso, ossia molto raramente, e soltanto facendo riferimento allo scenario più gravoso ("B").

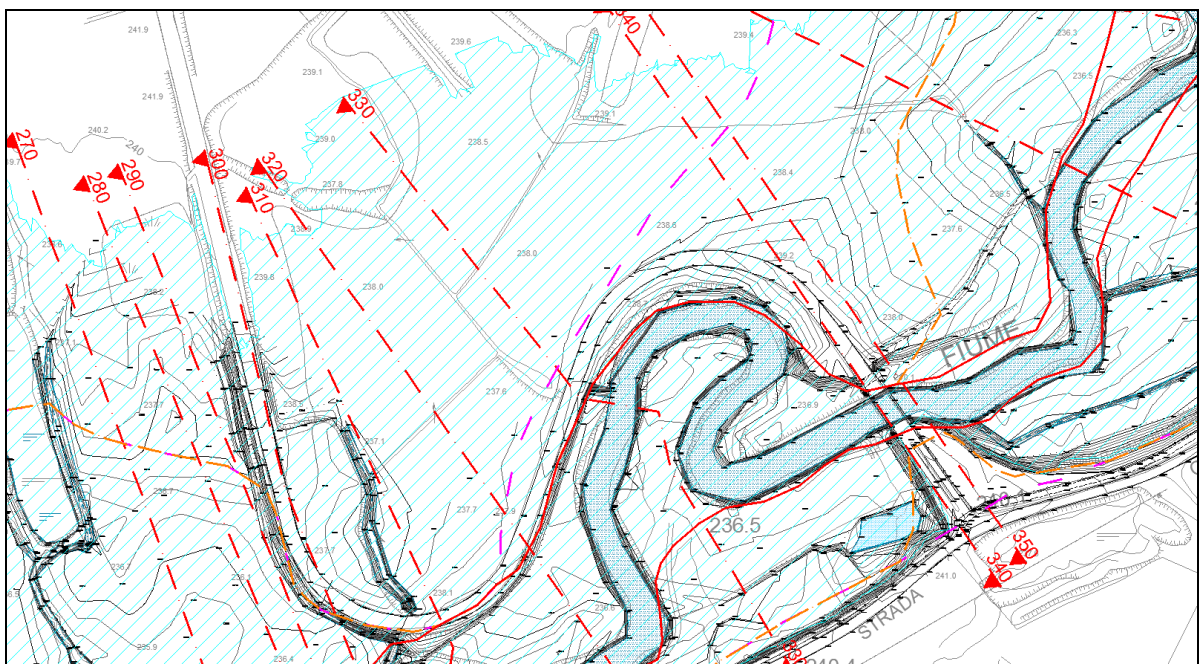


Figura 25 – Locale incongruenza tra l'andamento delle fasce fluviali e i limiti delle aree allagabili tracciati in riferimento allo scenario "B" (il più gravoso)

D'altro canto, la delimitazione delle aree allagabili ha consentito di confermare la necessità di realizzare alcune opere di contenimento dei livelli, già previste nel P.A.I., a protezione di alcuni insediamenti. In particolare:

- Linea arginale a protezione della cascina "Cattafame" in comune di Inverigo;
- Linea arginale in località "Fornace Consonni" in comune di Nibionno;
- Linea arginale in località "Molino Nuovo" in comune di Nibionno.

Oltre alle suddette opere di difesa, un'ulteriore linea arginale sarà realizzata quale prolungamento in destra e sinistra idrografica del rilevato di accesso al nuovo attraversamento dell'opera di regolazione per garantire il contenimento dei livelli idrici da valle.

I risultati della simulazione idraulica mostrerebbero la necessità di prolungare verso valle, a difesa dell'impianto di depurazione comunale, la linea arginale prevista in località "Molino Nuovo". Tuttavia, il



Committente ha comunicato agli scriventi che è già prevista la realizzazione di specifici interventi di protezione idraulica dell'impianto e, pertanto, la nuova linea arginale dovrà essere raccordata con questi ultimi.

La quota di coronamento delle linee arginali è stata determinata imponendo sezione per sezione la quota massima tra quelle ottenute in riferimento ai seguenti vincoli:

- Franco idraulico minimo pari ad 1 m sul profilo della portata di piena duecentennale in condizioni attuali;
- Franco idraulico minimo pari a 0,5 m sul profilo di piena in condizioni di massima regolazione dell'opera di sbarramento in progetto.

Rinviamo al capitolo §6 e agli specifici elaborati grafici progettuali per la descrizione di dettaglio delle opere, nella successiva Figura 26 è mostrata a titolo d'esempio la sezione di calcolo n.250 posta in corrispondenza della cascina "Cattafame". E' possibile osservare l'inserimento nella geometria del modello numerico del vincolo all'espansione laterale del flusso ("levee") per considerare l'influenza delle opere di contenimento dei livelli sul deflusso di piena e consentire il dimensionamento delle stesse.

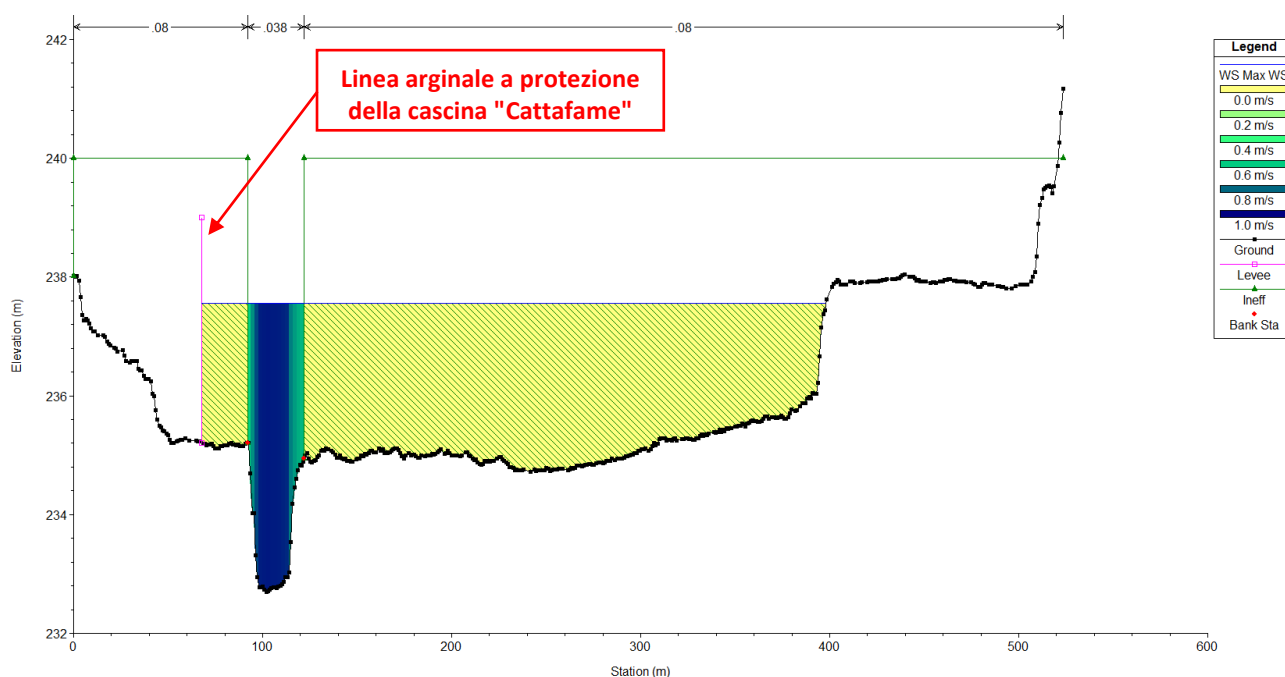


Figura 26 – Scenario "B": sezione di calcolo n.250. Il confronto con la stessa sezione riportata in Figura 20 mostra l'incremento dei livelli dovuto al fenomeno di rigurgito e l'inserimento della linea arginale in sinistra a protezione di cascina "Cattafame"



5.4.3 Scenario "C" – Portate di progetto P.A.I. con intervento di laminazione di Inverigo

Il terzo ed ultimo scenario considerato è quello simulato al fine di verificare la funzionalità dell'opera di regolazione delle portate con riferimento alle portate di progetto indicate nel P.A.I. al momento in cui tutte le opere di laminazione pianificate a monte dell'area d'interesse saranno realizzate.

Il precedente scenario "B" si pone dunque quale configurazione transitoria nel progresso dallo stato attuale a quello di definitiva sistemazione del corso d'acqua.

Considerando il fatto che gli interventi di laminazione delle portate previsti nel P.A.I. consentiranno un consistente abbattimento del colmo di portata proveniente da monte anche per il tempo di ritorno duecentennale (dai 115 m³/s attuali ai futuri 65 m³/s), questo scenario si presenta molto meno gravoso del precedente in termini di impatto sul territorio. Pertanto, l'intervento di regolazione in progetto oltre a consentire il conseguimento degli obiettivi del P.A.I., ossia l'invarianza della portata in ingresso e uscita dall'area di laminazione di Inverigo laminando i contributi idrici che il Lambro ivi riceve (cfr. Figura 27), potrà consentire ulteriori benefici in termini di riduzione del picco di portata in uscita a valle grazie al volume d'invaso che comunque resterà disponibile a monte.

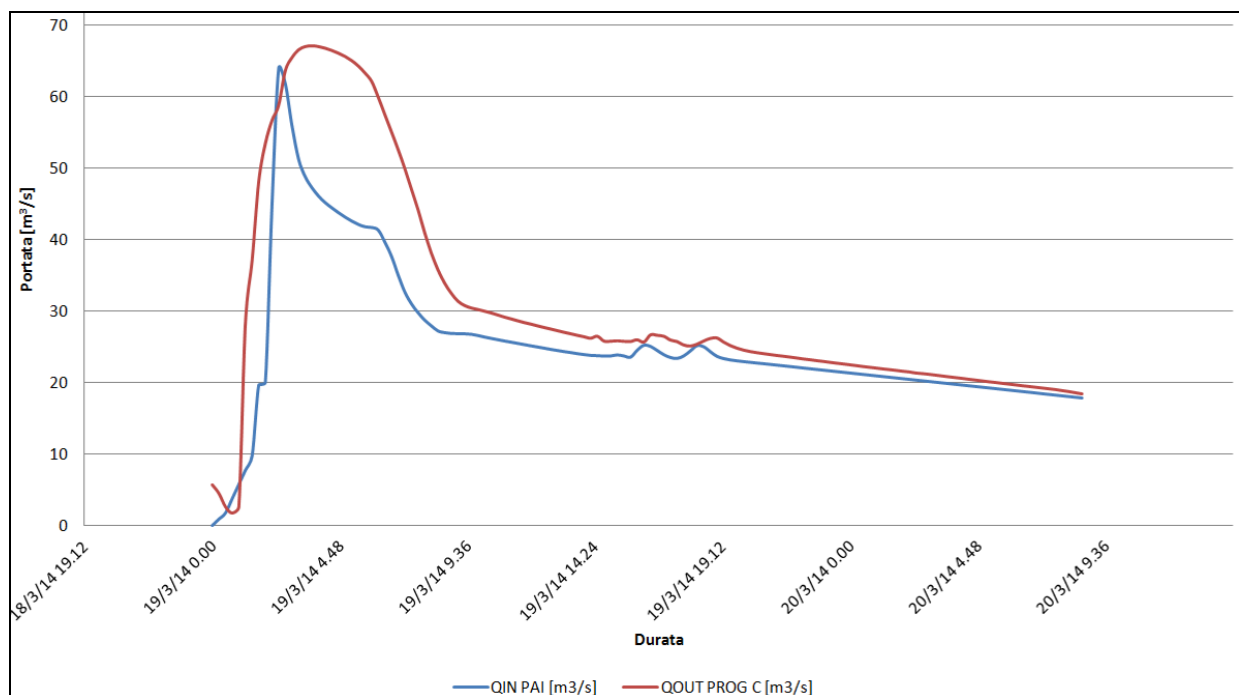


Figura 27 – Scenario C: configurazione di progetto relativa al momento in cui tutti gli interventi di laminazione delle portate previsti nel P.A.I. saranno realizzati – Confronto tra l'idrogramma in ingresso e quello in uscita nel tratto di fiume Lambro oggetto d'indagine

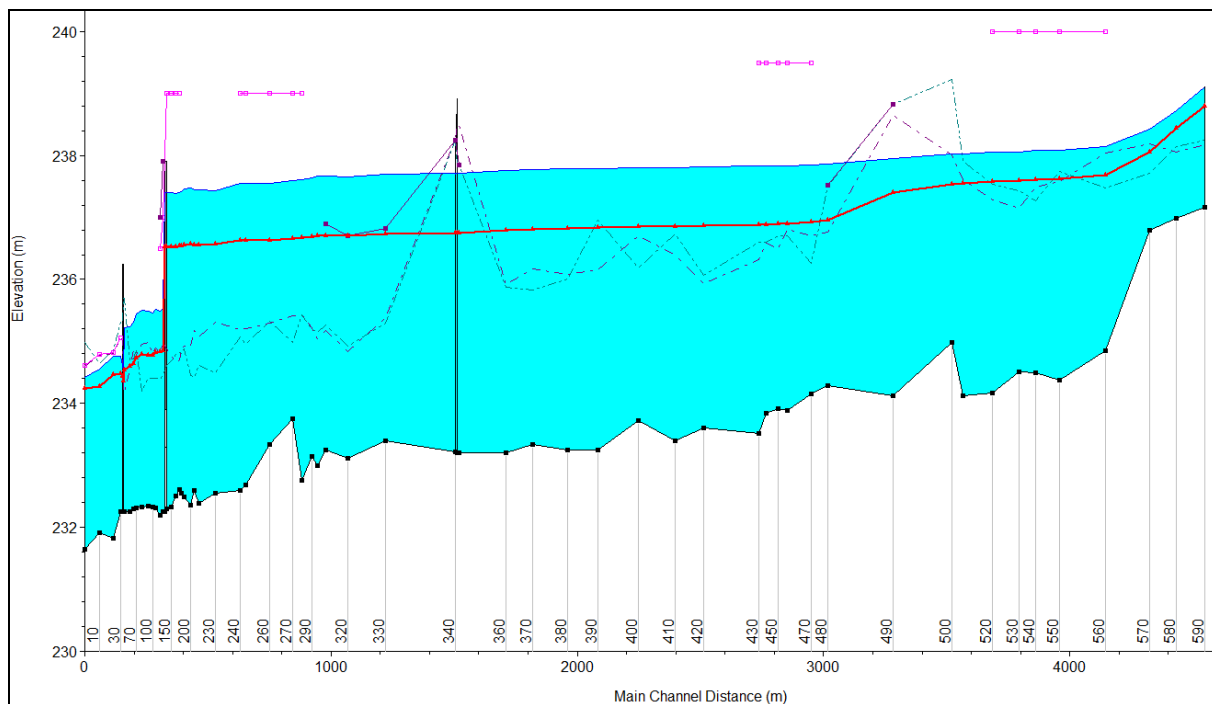


Figura 28 – Confronto tra i profili di piena previsti negli scenari "B" (più gravoso, linea blu) e "C" (meno gravoso, linea rossa). Le nuove opere idrauliche sono state dimensionate rispetto al primo per garantire maggiore sicurezza ai territori di monte e valle.

Infatti, come detto in precedenza, tutte le opere nuove idrauliche sono dimensionate facendo riferimento al più gravoso scenario "B" (cfr. Figura 28), sia per garantire un maggior grado di sicurezza idraulica ai territori posti a monte e valle, sia perché non è dato sapere quando le opere di laminazione previste a monte dal P.A.I. saranno realizzate e garantiranno il loro effetto benefico sulle portate in ingresso al sistema di laminazione d'Inverigo.



6. DESCRIZIONE DELLE OPERE IN PROGETTO

Gli obiettivi di sistemazione idraulica previsti nel P.A.I. per il tratto d'interesse di fiume Lambro, ossia quello compreso tra il ponte della S.S. 342 "Briantea" e quello di via Fornacetta in comune d'Inverigo, saranno conseguiti mediante la realizzazione delle opere oggetto della presente attività di progettazione definitiva e descritte nel presente capitolo e nelle tavole grafiche appositamente predisposte.

Il dimensionamento delle stesse è stato condotto grazie alla predisposizione di un modello numerico idraulico in moto vario, così come descritto nelle pagine precedenti.

Nel dettaglio si tratta dei seguenti quattro interventi:

- Opera di regolazione delle portate collocata a monte del ponte di via Fornacetta in comune di Inverigo;
- Linea arginale a protezione della cascina "Cattafame" in comune di Inverigo;
- Linea arginale in località "Fornace Consonni" in comune di Nibionno;
- Linea arginale in località "Molino Nuovo" in comune di Nibionno.

6.1 OPERA DI REGOLAZIONE DELLE PORTATE A MONTE DEL PONTE DI VIA FORNACETTA IN COMUNE DI INVERIGO

La nuova opera di regolazione delle portate di piena del fiume Lambro sarà realizzata grazie alla predisposizione di un nuovo attraversamento del corso d'acqua, che sarà destinato anche all'uso ciclopeditone e sarà collocato poche decine di metri a monte del ponte di via Fornacetta in Comune di Inverigo.

La regolazione sarà attuata mediante realizzazione di due luci ciascuna delle quali avente larghezza 6,0 m e altezza 5,1 m. Ogni luce sarà servita da una paratoia a doppio battente in grado di parzializzarne gradualmente e progressivamente la sezione sino a ridurla ad un'altezza massima di 1,6 m misurata dal fondo scorrevole (luce sottobattente). Anche nella configurazione di massima regolazione non è prevista una completa interruzione del deflusso naturale del fiume Lambro.

Ciascun battente di ogni paratoia sarà in grado di scorrere verticalmente al fine di potersi perfettamente sovrapporre all'altro in condizioni di riposo in modo da minimizzare l'ingombro e l'impatto visivo. Quest'ultimo accorgimento sarà ottenuto grazie al mascheramento offerto dall'impalcato dell'attraversamento e dal parapetto di cui lo stesso sarà equipaggiato (cfr. Figura 29).

Le due luci saranno separate da una pila fondata in corrispondenza dell'asse dell'alveo attivo: la scelta di realizzare due distinte luci risponde all'esigenza di garantire comunque l'officiosità di almeno una delle due in caso di guasto/malfunzionamento dell'altra.



A monte e valle del nuovo attraversamento saranno realizzate delle opere di protezione sponale aventi il duplice obiettivo di indirizzare correttamente la corrente di piena ed evitare rischiosi fenomeni erosivi in grado di determinare l'aggrimento della nuova opera e/o minarne la stabilità (cfr. Figura 30).

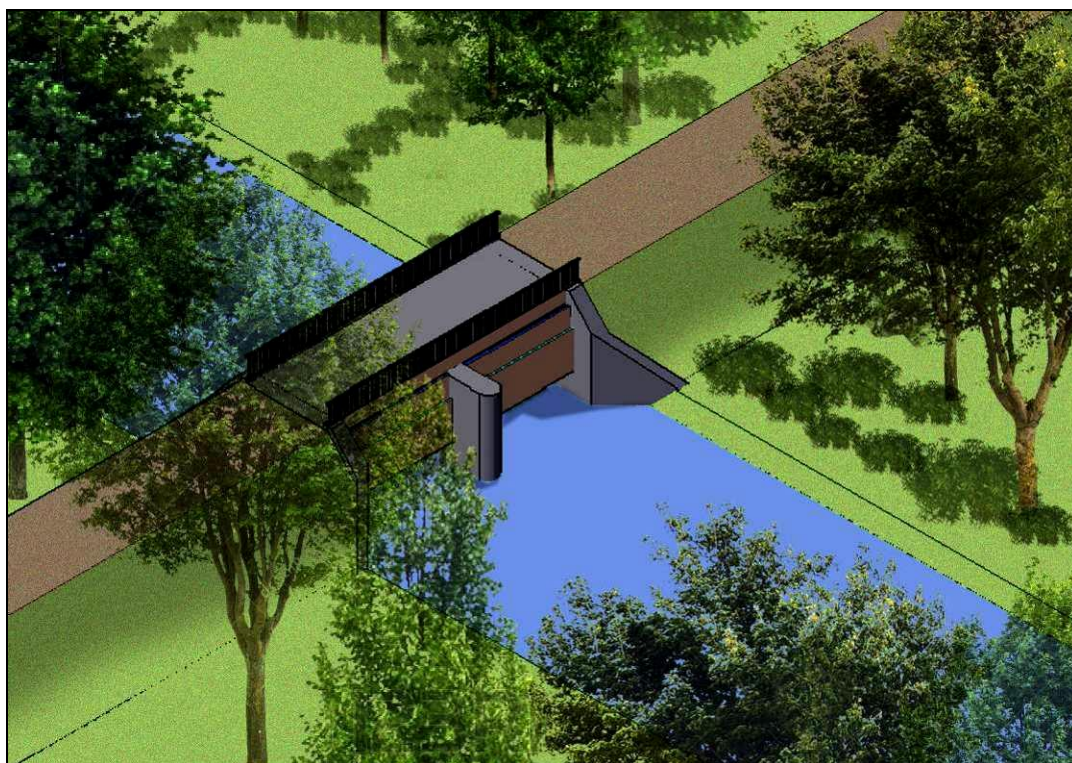


Figura 29 – Rappresentazione 3D della nuova opera di regolazione delle portate.

Inoltre, il fondo scorrevole sarà rivestito in massi ciclopici per evitare fenomeni di scalzamento delle fondazioni. Si fa presente che entrambi gli accorgimenti sopra descritti sono stati progettati per offrire ulteriori margini di sicurezza e durabilità dell'opera, a fronte di velocità di deflusso molto ridotte anche per portate di piena caratterizzate da tempi di ritorno plurisecolari.

L'azione dell'opera idraulica sarà coadiuvata grazie alla realizzazione di una serie di ulteriori opere complementari (cfr specifico elaborato grafico).

In primis i rilevati di accesso al nuovo attraversamento saranno prolungati in destra e sinistra idrografica, rispettivamente per circa 240 m e 450 m al fine di garantire il contenimento dei livelli a monte dell'opera di sbarramento. I rilevati arginali avranno un'altezza massima di 3,5 m sul piano campagna in corrispondenza dell'opera di regolazione che digraderà progressivamente, finché il coronamento si raccorderà con il piano golenale ai margini esterni di quest'ultimo, al di fuori dei limiti dell'area allagabile.



I rilevati di contenimento dovranno essere realizzati in materiale di matrice limoso-argillosa in grado di garantire l'impermeabilità dell'opera. La costruzione degli stessi dovrà avvenire secondo le più recenti norme tecniche volte a garantirne efficienza, affidabilità e durabilità secondo quanto stabilito nel capitolato d'appalto.

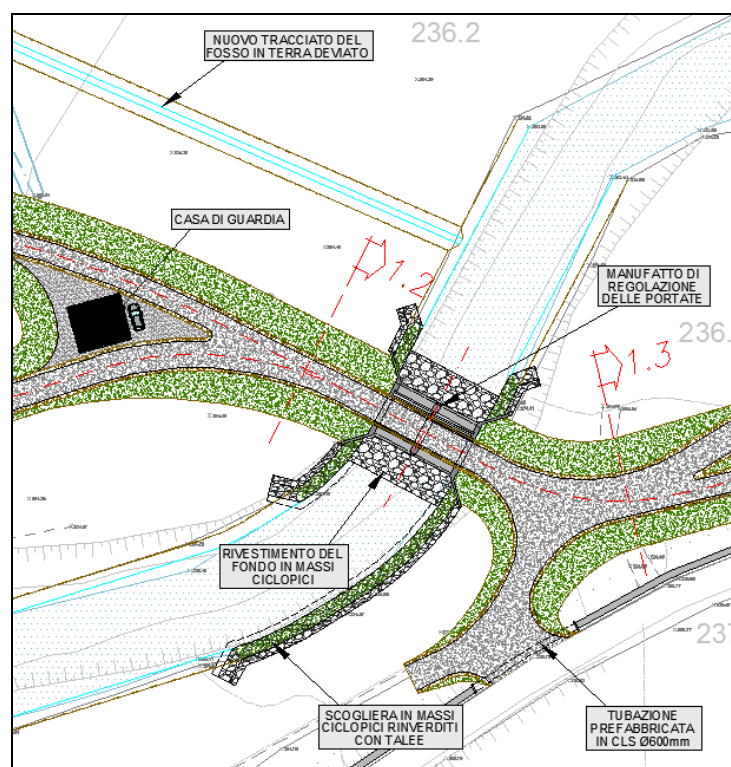


Figura 30 – Stralcio planimetrico della nuova opera di regolazione delle portate

Inoltre saranno realizzate delle rampe in grado di garantire il conseguimento dei seguenti scopi (cfr. Figura 31):

- Accesso alla pista di coronamento del rilevato arginale per consentire la manutenzione dell'opera idraulica, l'azione di polizia idraulica ed eventuali interventi in somma urgenza;
- Accesso alle aree intercluse ed alle proprietà private;
- Utilizzo per fini ricreativi (pista ciclopedonale) di una quota parte del nuovo rilevato arginale;
- Accesso alla casa di guardia.

Oltre a quanto detto si provvederà anche alla realizzazione dei seguenti interventi aggiuntivi:

- Opera di protezione spondale in destra idrografica in corrispondenza dell'estradosso dell'ansa fluviale collocata circa 200 m a valle dell'opera di regolazione;
- Ripristino dell'efficienza idraulica della luce sinistra del ponte di via Fornacetta, mediante riprofilatura della sezione, e realizzazione di una soglia di protezione in massi ciclopici a raso per la protezione delle spalle e della pila in alveo da potenziali fenomeni erosivi.



Figura 31 – Inserimento paesaggistico dell'intervento in progetto: manufatto di regolazione e opere accessorie.

6.2 LINEA ARGINALE A PROTEZIONE DELLA CASCINA "CATTAFAME" IN COMUNE DI INVERIGO

Come accennato in precedenza, le simulazioni idrauliche eseguite nell'ambito della presente attività di progettazione definitiva hanno confermato l'esigenza di realizzare alcune opere di contenimento dei livelli a protezione di insediamenti collocati nell'area golenale sinistra del fiume Lambro. Si sottolinea che la realizzazione di dette opere era già stata prevista nel P.A.I. indipendentemente dagli effetti che si genereranno una volta realizzato il nuovo manufatto di regolazione delle portate.

Procedendo da valle verso monte, la prima opera di difesa idraulica sarà realizzata a protezione della cascina "Cattafame" in comune di Inverigo.

Si tratta di una linea arginale a sezione trapezia avente lunghezza di circa 180 m e altezza massima sul piano campagna di 3 m. La linea arginale si raccorda a monte e valle con via Cascina Cattafame dalla quale sarà possibile accedere alla pista di coronamento del rilevato per le necessarie attività di manutenzione e protezione idraulica. I paramenti arginali saranno rinverditi con l'esecuzione di semina a spaglio.



Figura 32 – Inserimento paesaggistico dell'intervento in progetto: argine a difesa della cascina "Cattafame"

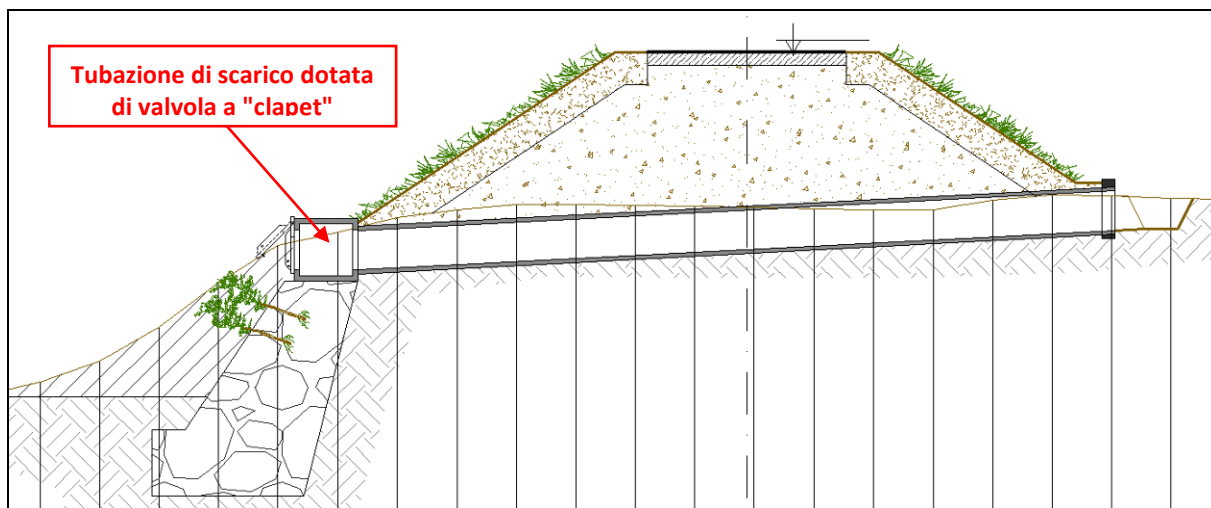


Figura 33 – Sezione tipo dell'argine di Cascina Cattafame: è evidente la protezione contro l'azione erosiva delle acque della Bevera di Veduggio e la tubazione di scarico dotata di "clapet" per il drenaggio delle acque meteoriche che si riverseranno nell'area interclusa generata dall'argine e dal rilevato di via Cascina Cattafame.

Come si può osservare nello specifico elaborato grafico, l'accesso alle proprietà comprese tra il Lambro e la nuova linea arginale sarà garantito mediante realizzazione di un'apposita rampa. Inoltre, laddove il tracciato



della nuova opera si svilupperà in adiacenza alla Bevera di Veduggio è prevista la realizzazione di opere di difesa a protezione del paramento arginale.

E' prevista anche la realizzazione di un fosso per la regimazione delle acque meteoriche al piede del rilevato, lato campagna. Inoltre, saranno realizzati alcuni scarichi di fondo, mediante la posa di tubazioni, per il drenaggio delle acque raccolte da detto fosso. Lo sbocco lato fiume delle condotte sarà equipaggiato con una valvola unidirezionale antiriflusso del tipo "a clapet". L'ente gestore dell'opera dovrà garantire la funzionalità degli scarichi eseguendo le necessarie operazioni di manutenzione periodica.

6.3 LINEA ARGINALE IN LOCALITÀ "FORNACE CONSONNI" IN COMUNE DI NIBIONNO

In comune di Nibionno, località "Fornace Consonni", è prevista la realizzazione di una seconda opera di contenimento dei livelli.

Sia le modalità costruttive, sia gli accorgimenti tecnici da adottare per la realizzazione della stessa saranno analoghi a quanto descritto nel precedente paragrafo (regimazione acque meteoriche, etc.).

La nuova opera si dipartirà a monte dalla strada di accesso all'insediamento e si svilupperà verso valle per circa 200 m, raggiungendo una quota di coronamento di 238,35 m s.l.m.: ciò determina un'altezza massima della stessa di 2 m sul piano campagna.

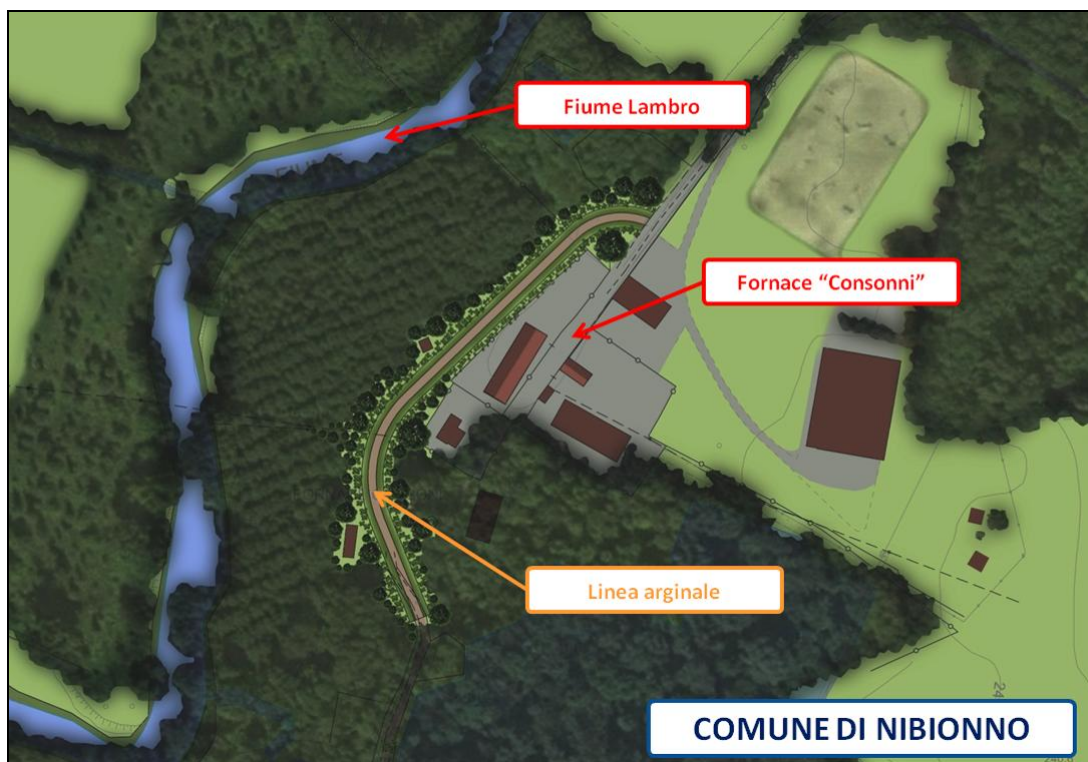


Figura 34 – Inserimento paesaggistico dell'intervento in progetto: argine a difesa della "Fornace Consonni"



6.4 LINEA ARGINALE IN LOCALITÀ "MOLINO NUOVO" IN COMUNE DI NIBIONNO

In comune di Nibionno, località "Molino Nuovo", è prevista anche la realizzazione della terza ed ultima opera di difesa idraulica.

Come accennato in precedenza, le simulazioni idrauliche condotte dagli scriventi mostrano l'esigenza di estendere l'intervento di protezione idraulica anche a difesa del depuratore collocato a valle del Molino Nuovo. Tuttavia, il Committente ha comunicato ai sottoscritti che sono già previste delle opere specificamente realizzate per garantire la sicurezza idraulica dell'impianto di trattamento e, pertanto, l'opera descritta nel presente paragrafo andrà a raccordarsi con esse.

Facendo riferimento allo specifico elaborato grafico progettuale, si nota come anche nel presente caso si renda necessario realizzare una protezione sponale al piede del rilevato arginale laddove quest'ultimo si svilupperà in frodo lungo la sponda sinistra del fiume Lambro (tratto terminale di valle).

L'opera avrà uno sviluppo lineare di circa 350 m e un'altezza massima sul piano campagna di poco inferiore a 2 m.

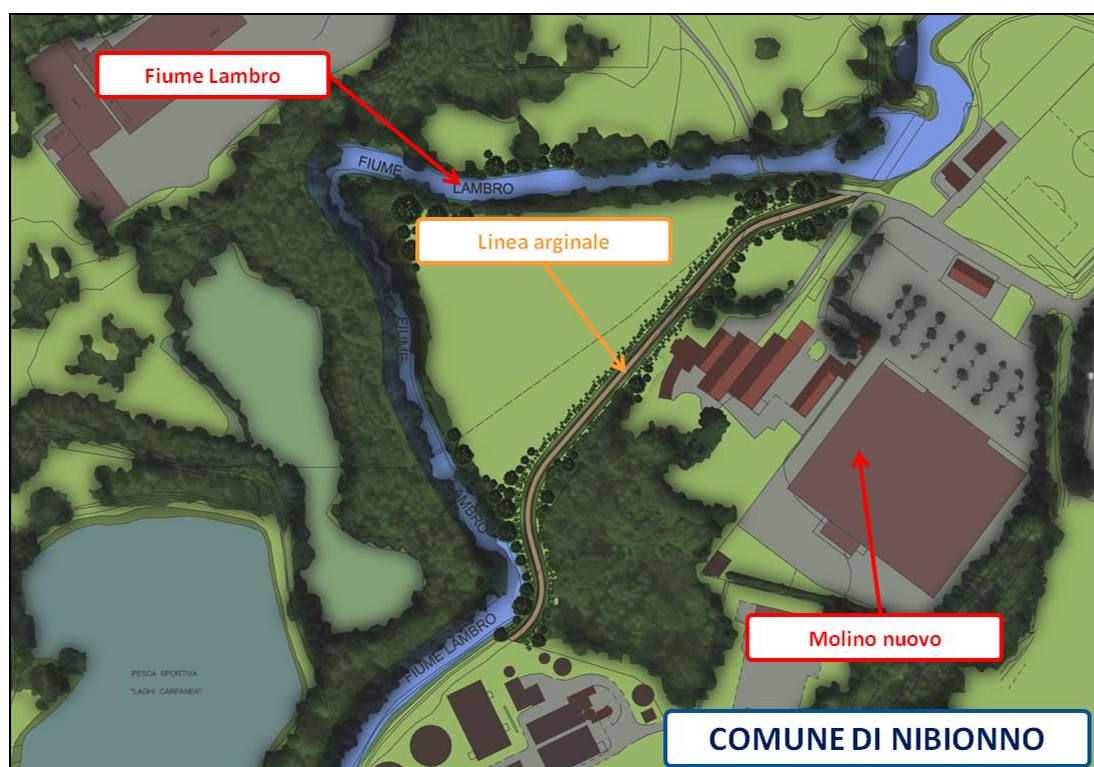


Figura 35 – Inserimento paesaggistico dell'intervento in progetto: argine a difesa del "Molino Nuovo"



7. VERIFICHE DI STABILITA' DEI RILEVATI ARGINALI

7.1 FENOMENO DI SIFONAMENTO

Nell'ambito del presente studio è stata eseguita la verifica semplificata al sifonamento degli argini secondo i metodi empirici generalmente più utilizzati, ossia quelli di Bligh e di Lane. Inoltre, è stata effettuata la verifica approfondita mediante l'utilizzo di un codice di modellazione agli elementi finiti per valutare il fenomeno con maggiore dettaglio, effettuando anche alcune analisi di sensitività su diversi parametri.

Per quanto riguarda i livelli idraulici adottati per le verifiche si è fatto riferimento ai risultati più gravosi dello scenario "B" descritti in precedenza.

Invece, il modello geologico di riferimento è stato desunto dalla Relazione Geologica prodotta nel marzo 2014 dal geol. Alborghetti, sempre nell'ambito delle attività specialistiche di supporto alla presente progettazione definitiva delle opere.

L'interpretazione dei sondaggi geognostici appositamente realizzati ha consentito di ricostruire la stratigrafia del terreno riportata in Figura 36: dall'immagine si può desumere come la permeabilità degli orizzonti decresca con l'aumento della profondità passando dalle più superficiali sabbie limose alle argille viepiù cementate.

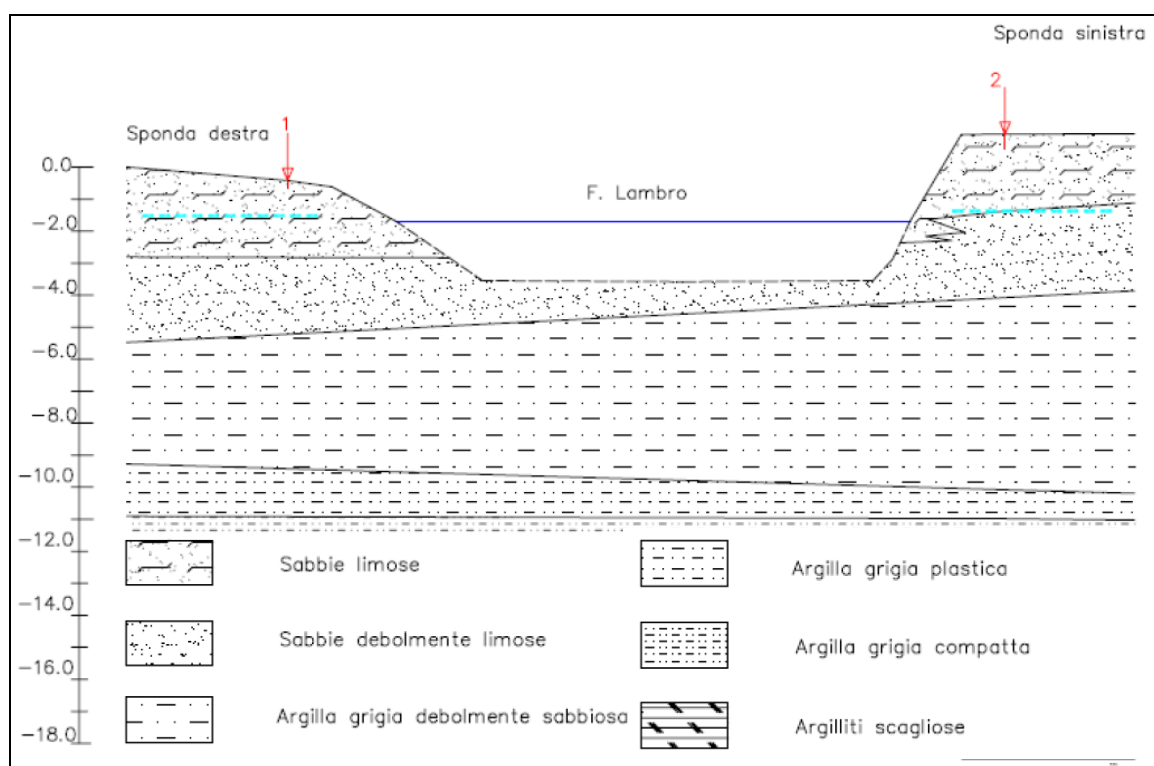


Figura 36 – Stratigrafia del terreno tratta dalla Relazione Geologica del geol. Alborghetti (marzo 2014)



7.1.1 Metodo di Bligh

Il metodo di Bligh consiste nel calcolo del fattore di sicurezza al sifonamento dell'intero tratto interessato dalla filtrazione. La relazione di Bligh permette di determinare il valore del fattore di sicurezza a sifonamento, secondo la relazione:

$$F_s = \frac{L}{h_1 - h_2}$$

dove L è la lunghezza del percorso più breve compiuto dal moto di filtrazione, mentre $h_1 - h_2$ è la differenza di carico tra monte e valle.

Il fattore di sicurezza, così valutato, va confrontato con una serie di valori tabulati, che esprimono il fattore di sicurezza consigliato F^* per tale tipologia di terreno. Nel presente caso, si è assunto, in via cautelativa, un valore pari a 15 (sabbia fine).

Per eseguire una corretta verifica è stato necessario ipotizzare percorsi per il moto di filtrazione il più possibile corrispondenti alla realtà: il percorso sul quale valutare il fattore di sicurezza non è il più breve dal punto di vista della distanza, ma il più breve dal punto di vista idraulico.

Per quanto riguarda i possibili effetti sugli argini si osserva che si prevede di realizzare le opere, per la quasi totalità, a notevole distanza dal canale principale del fiume Lambro; di conseguenza i livelli idrici e le velocità presenti in condizioni di piena ragionevolmente non risulteranno tali da causare effetti erosivi sul paramento di monte del rilevato arginale. Laddove il rischio è stato reputato reale sono state predisposte apposite opere di difesa.

Si riportano di seguito, in Tabella 2, i risultati delle verifiche condotte mediante tale metodo.

Tabella 2 – Verifica al sifonamento con il metodo di Bligh

Opera	Sezione idraulica di riferimento [#]	Livello di piena [m s.l.m.]	Quota p.c. [m s.l.m.]	L_{eq} [m]	F_s	F^*
Opera di contenimento di valle (dx)	140	237.40	234.50	15	5.2	15
Opera di contenimento di valle (sx)	160	237.40	234.50	12	4.1	15
Argine "Cascina Cattafame"	250	237.55	235.40	14	6.5	15
Argine "Fornace Consonni"	440	237.83	236.35	10	6.8	15
Argine "Molino Nuovo"	530	238.06	237.04	10	9.8	15

Come è possibile notare la verifica non è soddisfatta in alcun caso, a causa degli elevati coefficienti di sicurezza fissati per la sabbia fine, dovuti alla facilità di asportazione della frazione più fine in corrispondenza dell'unghia di valle. Nella realtà, durante il deflusso dell'onda di piena il moto di filtrazione non ha tempo sufficiente per raggiungere il regime stazionario, poiché il livello idrico a monte del rilevato arginale non è costante nel tempo ma varia, impedendo quindi l'instaurarsi di condizioni al contorno stazionarie che garantiscano una perdita di carico tra monte e valle costante nel tempo. In sostanza il tempo di permanenza di livelli molto elevati in alveo



è di gran lunga superiore a quello necessario affinché il moto di filtrazione raggiunga le condizioni di stazionarietà, ossia si espliciti lungo l'intero percorso. Anche nell'ipotesi che il corpo arginale sia permeabile e che contribuisca alla filtrazione, la linea di imbibizione risale lungo il corpo del rilevato arginale con tempi più lunghi rispetto a quelli dell'evento stesso.

7.1.2 Metodo di Lane

Il metodo di Lane rappresenta un affinamento del metodo di Bligh e tiene conto del fatto che la resistenza al moto della filtrazione è nettamente minore lungo il confine tra la base (orizzontale) della costruzione ed il terreno, rispetto alle linee di confine tra le strutture verticali ed il terreno. In particolare, osservazioni empiriche dello stesso Lane hanno evidenziato l'opportunità di assegnare ai percorsi verticali un peso triplo rispetto ai percorsi orizzontali o inclinati di un angolo minore di 45°. La formulazione di Lane è così espressa:

$$F_s = \frac{\frac{1}{3}L_h + L_v}{h_1 - h_2}$$

Anche il metodo in questione prevede il confronto tra il fattore di sicurezza calcolato e un fattore di sicurezza consigliato, pari a 7 per *sabbie fini*.

I risultati della verifica sono riportati in Tabella 3.

Tabella 3 – Verifica al sifonamento con il metodo di Lane

Opera	Sezione idraulica di riferimento [#]	Livello di piena [m s.l.m.]	Quota p.c. [m s.l.m.]	L_h [m]	L_v [m]	F_s	F^*
Opera di contenimento di valle (dx)	140	237.40	234.50	14	1	2.0	7
Opera di contenimento di valle (sx)	160	237.40	234.50	11	1	1.6	7
Argine "Cascina Cattafame"	250	237.55	235.40	13	1	2.5	7
Argine "Fornace Consonni"	440	237.83	236.35	9	1	2.7	7
Argine "Molino Nuovo"	530	238.06	237.04	9	1	3.9	7

Anche l'applicazione di tale metodo non si rileva esaustiva a descrivere la situazione reale, mostrando che gli argini non sono verificati a sifonamento, in situazione di filtrazione stazionaria della frazione più fine in corrispondenza dell'unghia di valle.

Si ritiene, tuttavia, che i precedenti risultati siano da ascrivere alla scarsa capacità dei metodi precedenti di descrivere la realtà fisica per eccesso di semplificazione. Pertanto, si ritiene indispensabile approfondire la trattazione con l'utilizzo di metodi numerici, così come descritto nel successivo paragrafo.

7.1.3 Verifiche con metodi numerici

Le verifiche speditive effettuate con i metodi precedentemente analizzati hanno permesso di evidenziare che in regime stazionario possono verificarsi, in taluni casi, le condizioni predisponenti un fenomeno di



sifonamento. Tali soluzioni si basano su assunzioni teoriche semplificate e non tengono conto della geometria completa dell'opera della quale si effettua la verifica.

L'analisi con metodi numerici ha lo scopo di valutare gli effettivi moti di filtrazione che si instaurano sotto il rilevato arginale nella condizione di moto transitorio (situazione reale), evidenziando eventuali difformità rispetto a quanto determinato dai metodi classici di verifica al sifonamento. Si presuppone, infatti, che, data la permeabilità ridotta, non si raggiungano le condizioni di regime stazionario (ipotesi confermata dai risultati della modellazione, come di seguito descritto).

Per ottenere risultati caratterizzati da un maggior grado di verosimiglianza, si è effettuata la schematizzazione del reticolo di flusso ipotizzando alcuni scenari che tengano conto della variabilità delle condizioni del terreno (moto transitorio), sul quale gli argini sono realizzati.

La verifica del moto di filtrazione, eseguita con un modulo numerico di calcolo, ha previsto l'inserimento, quali parametri in ingresso, dei coefficienti di conducibilità idraulica, in base alla tipologia di terreno presenti in sito, e dei livelli di carico idraulico di progetto in funzione della sezione considerata, nonché l'inserimento del parametro di carico iniziale in corpo argine e nel terreno sottostante, il quale definisce la presenza di celle sature o insature e quindi influisce pesantemente sul regime di filtrazione.

Le simulazioni sono state condotte per la sezione arginale più critica, ossia quella soggetta alla maggior differenza di carico idraulico tra monte e valle. La verifica si ritiene pertanto esaustiva per tutte le altre sezioni.

7.1.3.1 Descrizione del codice di calcolo

Il codice di calcolo, Visual MODFLOW v. 4.1, permette di realizzare modelli bidimensionali del flusso di base per applicazioni pratiche legate ai problemi della filtrazione idrica e al trasporto di inquinanti. I parametri in input, così come gli output grafici, possono essere facilmente visualizzati in proiezioni tridimensionali o in sezioni bidimensionali.

Il modello incorpora in sé una serie di codici di calcolo, ognuno realizzato per una funzione differente. In particolare, l'analisi effettuata ha visto l'utilizzo del codice, il quale permette di simulare efficacemente la filtrazione idrica nel terreno, prevedendo la possibilità di inserire quali parametri in ingresso:

- geometria del terreno;
- conducibilità idraulica del terreno.

Le condizioni al contorno applicabili, necessarie perché si verifichi la filtrazione, possono essere innumerevoli; le più importanti sono:

- carico iniziale di ogni cella a $t=0$;
- carico idraulico;
- eventuale presenza di superfici impermeabili o di celle inattive;
- presenza di fiumi o canali;



- presenza di opere di drenaggio;
- precipitazioni;
- evapotraspirazione del terreno;
- presenza di pozzi con relative misure piezometriche;
- zone di ricarica acquifera.

Vi è, inoltre, la possibilità di impostare la tipologia dell'acquifero, così da determinarne l'esatto comportamento idraulico. Il numero delle celle di calcolo può essere agevolmente incrementato o diradato, così da permettere di velocizzare o affinare i risultati, che vengono stampati su video e permettono di visualizzare il reticolo di flusso, le linee equipotenziali della filtrazione, la velocità di filtrazione e una serie di ulteriori parametri.

E' stata effettuata una verifica in moto transitorio, dal momento che l'argine poggia su uno strato di terreno caratterizzato da bassi livelli di permeabilità, dando luogo ad un drenaggio molto lento. Nei casi esposti si è fatto riferimento alla presenza di un completo stato di saturazione del terreno; tale accorgimento è stato necessario sia per porsi in condizioni cautelative rispetto ai moti di filtrazione, sia per limitare l'insorgenza di fenomeni di instabilità numerica dovuti alla suddivisione dell'argine in microelementi.

Il software utilizzato, infatti, fornisce risultati tanto più precisi e accurati quanto maggiore è la definizione di ogni cella che lo compone, ma è da tenere presente che all'aumentare del numero di celle corrisponde un incremento del tempo di calcolo del processore, oltre che un incremento delle possibilità di errore dovute alla mancata precisione nella definizione delle condizioni al contorno.

7.1.3.2 Descrizione della simulazione e dei risultati ottenuti

Le condizioni di saturazione sono indispensabili per l'innescò del moto di filtrazione stesso; se non vi fosse tale condizione (e non è da escludere), il superamento di uno strato avente conducibilità idraulica $K=1 \cdot 10^{-6}$ m/s, spessore pari a 1 m e lunghezza pari a 15 m (base della fondazione arginale tipo), avverrebbe, secondo la legge di Darcy, in

$$v = K \cdot i = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 0.1 = 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s} \rightarrow 1736 \text{ giorni}$$

Alla luce di tali osservazioni, emerge che nel caso in cui lo strato di terreno fosse insaturo le condizioni per l'innescò di un moto di filtrazione sarebbero difficilmente verificabili e quindi gli argini sarebbero preservati a priori dal rischio di sifonamento; solo in caso contrario, all'innescò di un moto di filtrazione consegue la possibilità di un sifonamento all'unghia di valle e il fenomeno necessita di essere verificato, come di seguito esposto.

La scelta dell'argine tipo e delle condizioni al contorno che possono influenzare la filtrazione idrica sotto le opere è stata effettuata tenendo conto di tutte le condizioni che possono verificarsi. Nel caso specifico, la configurazione più gravosa tra tutte quelle possibili corrisponde a quella relativa al raggiungimento del livello di massima regolazione dell'invaso che si formerà a monte del manufatto di sbarramento per chiusura delle



paratoie, in condizioni di completa saturazione del terreno di fondazione. In questa configurazione non si ha la presenza di un battente idrico a valle dell'opera.

Per quanto concerne il primo scenario di verifica è stato allestito un modello in cui si considera un rilevato arginale avente base pari a 15 m e altezza dal coronamento pari a 3,5 m. La conducibilità idraulica fa riferimento alla stratigrafia rilevata dal sondaggio precedentemente eseguito che ha permesso di definire dettagliatamente i valori di k fino ad una profondità sufficiente dal piano di coronamento dell'argine esistente. Si è ipotizzato un elevato livello di saturazione del terreno sottostante l'opera arginale, in modo tale da porsi nelle condizioni più cautelative dal punto di vista del fenomeno di filtrazione. Il livello del carico a monte dell'argine da realizzare è stato determinato mediante il modello idraulico precedentemente allestito, facendo riferimento allo scenario più gravoso ("B").

Nel caso in esame esso fa riferimento al livello di massima piena raggiunto, pari a 237.40 m s.l.m., corrispondente ad un carico pari a circa 3 m dal piano campagna ed è assunto costante per un intervallo di tempo pari a 4 giorni. Tale ipotesi è fortemente cautelativa dal momento che nella realtà è ragionevolmente plausibile ipotizzare una durata del picco di piena inferiore alle 24 ore, come è possibile appurare osservando gli idrogrammi riportati in Figura 24.

Si riportano di seguito i risultati più rilevanti della simulazione in regime transitorio, effettuata con una scansione temporale di 1 h (Figura 37, Figura 38, Figura 39, Figura 40, Figura 41).

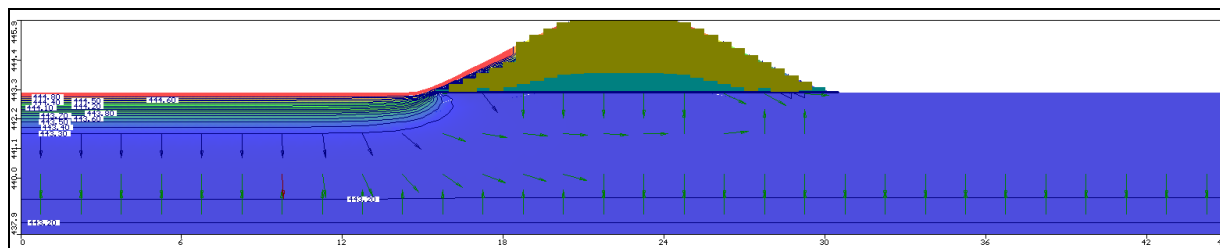


Figura 37 – Istante iniziale I_1 del fenomeno filtrazione

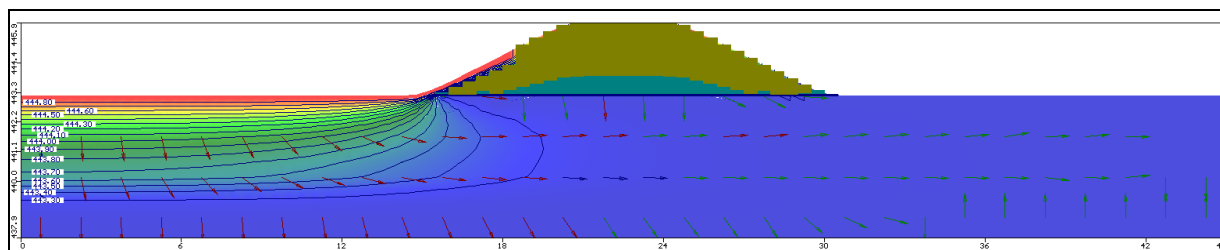


Figura 38 – Istante I_2 del fenomeno filtrazione

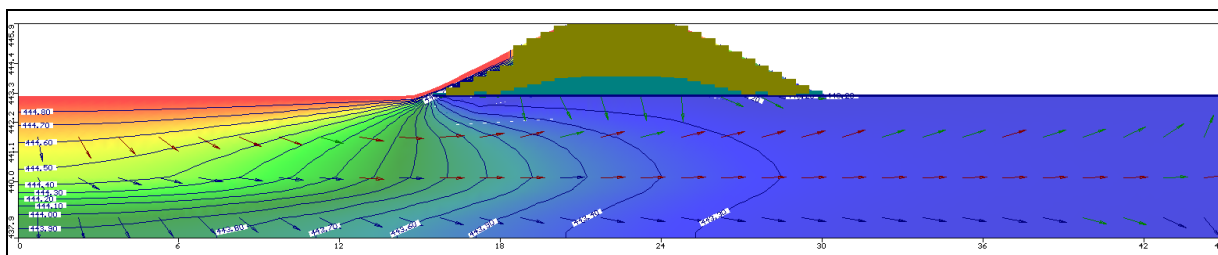


Figura 39 – Istante I_3 del fenomeno filtrazione. Il fenomeno filtrazione ha già raggiunto lo strato più profondo. Le sottopressioni in corrispondenza del paramento di valle sono limitate perché gran parte del gradiente idraulico è dissipato nel primo tratto di monte

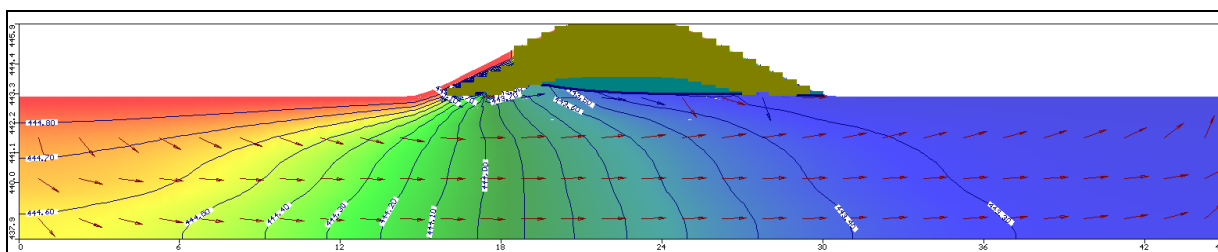


Figura 40 – 48 h dall'inizio del fenomeno. La filtrazione diretta verso l'alto è caratterizzata da uniformità lungo tutto il percorso

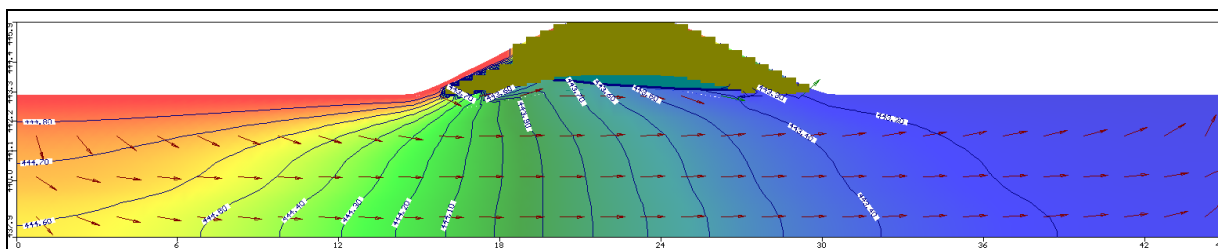


Figura 41 – 96 h dall'inizio del fenomeno. La filtrazione diretta verso l'alto è caratterizzata da uniformità lungo tutto il percorso.

Si riportano di seguito delle immagini di dettaglio (Figura 42, Figura 11, Figura 12) che illustrano la fase iniziale della filtrazione nei pressi del piede del paramento di monte.

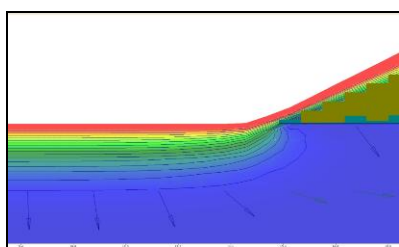


Figura 42 – Istante iniziale I_1

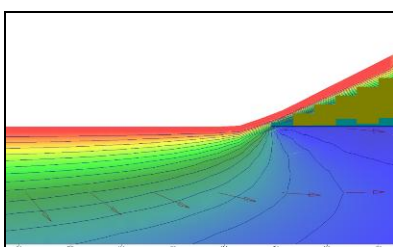


Figura 43 – Istante iniziale I_2

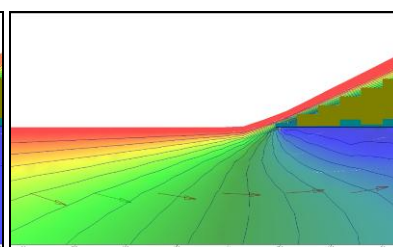


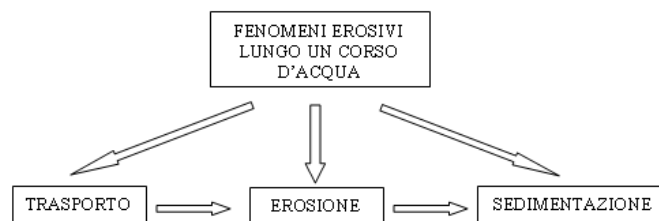
Figura 44 – Istante iniziale I_3



L'analisi in condizioni transitorie evidenzia pertanto che, in base alle ipotesi assunte, l'argine non è soggetto a fenomeni di sifonamento, così come è ragionevole attendersi considerando la differenza di tempo esistente tra quello necessario all'innesco di un fenomeno di filtrazione stazionario e la permanenza di elevati livelli idrici in alveo.

7.2 VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI INDOTTI SULLE STRUTTURE DA FENOMENI EROSIVI IN CONDIZIONI DI PIENA

L'interazione della corrente nelle condizioni di massima piena con le strutture arginali potrebbe indurre un'azione erosiva potenzialmente in grado di movimentare le particelle costituenti lo strato superficiale del terreno. La valutazione del fenomeno erosivo indotto può essere condotta con ragionevole approssimazione adottando la trattazione teorica relativa al trasporto solido in condizioni di moto uniforme. In via del tutto generale, il fenomeno può essere ricondotto alla successione di tre eventi distinti, secondo la seguente schematizzazione:



I fattori predominanti che caratterizzano ciascuno dei tre equilibri idrodinamici sono costituiti dalle caratteristiche cinematiche della corrente impattante e dalla granulometria del materiale costituente il rilevato arginale. Il regime idrodinamico della corrente può essere espresso attraverso il valore della velocità media della stessa nella sezione di deflusso, mentre la granulometria del materiale sottoposto all'azione erosiva viene caratterizzata con il valore del diametro medio delle particelle.

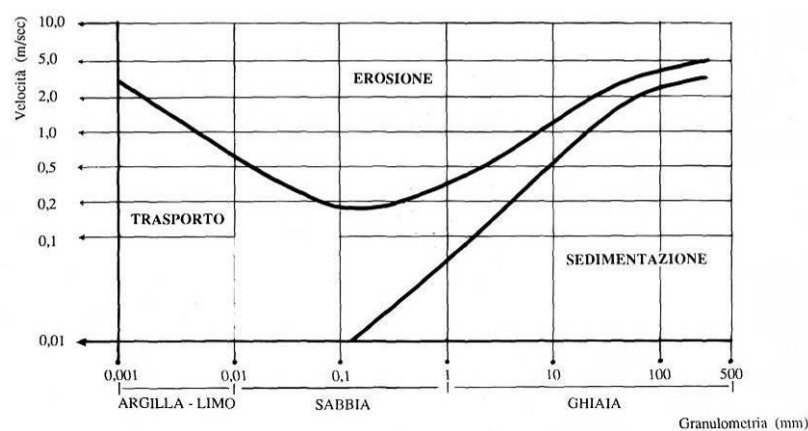


Figura 45 – Diagramma di Hjulström.



Nella Figura 45 viene riportato il grafico proposto da *Hjulström* che descrive il fenomeno erosivo di fondo per un corso d'acqua in funzione della velocità media della corrente e del diametro medio delle particelle costituenti l'alveo.

7.2.1 Metodi per la valutazione dei fenomeni di trasporto solido di fondo

Per la determinazione della dimensione del materiale che caratterizza il corpo arginale, occorre considerare l'azione di trascinamento della corrente e verificare la capacità di resistenza al deflusso del medesimo. La determinazione quantitativa del fenomeno erosivo lungo l'alveo di un corso d'acqua può essere affrontata facendo riferimento allo studio della condizione di moto incipiente, ossia della condizione di equilibrio limite di una particella solida sottoposta all'azione di trascinamento di una corrente. Tale condizione può essere risolta ricorrendo a equazioni di equilibrio, in cui compaiono i valori critici delle variabili del moto: in particolare, si fa riferimento alla velocità critica della corrente V_c , definita come il valore medio della velocità della corrente che discrimina lo stato fisico di moto delle particelle solide costituenti l'alveo fluviale.

In letteratura sono presenti diversi approcci per la valutazione della velocità critica di trascinamento, sostanzialmente riconducibili a due tipologie: la prima indaga la relazione diretta tra la velocità e la granulometria dell'alveo o della sponda in esame, basandosi su una vasta gamma di risultati sperimentali, mentre la seconda, seguendo un approccio teorico, fornisce una relazione analitica che, sebbene semplificata, permette di tenere in considerazione anche le caratteristiche idrodinamiche della corrente.

Seguendo l'approccio analitico, è possibile ottenere un legame funzionale tra la velocità critica della corrente, le caratteristiche fisiche del materiale costituente il fondo (peso specifico dei grani, diametro medio caratteristico) e le caratteristiche idrodinamiche (viscosità dell'acqua, altezza della corrente). Tralasciando la trattazione analitica del problema, l'espressione finale della velocità critica della corrente V_c può essere espressa mediante la seguente espressione analitica (*Neill*, 1967):

$$V_c = \left[2,5g \frac{(\gamma_s - \gamma)}{\gamma} \right]^{0,5} h^{0,1} d^{0,4}$$

dove:

- γ_s = peso specifico delle particelle costituenti il fondo alveo;
- γ = peso specifico dell'acqua;
- h = altezza idrica della corrente in moto uniforme;
- d = diametro medio delle particelle costituenti il fondo alveo.

Una seconda formulazione per il calcolo della velocità critica della corrente V_c è quella proposta da *Bogardi*, sintetizzando le esperienze condotte da differenti autori:

$$V_c = 6.84 \cdot h^{0.095} \cdot d^{0.405}$$



Ambedue le formulazioni restituiscono un valore di velocità medio valutato su tutta la sezione di deflusso, che risulta essere maggiore (circa del 40%) del valore di velocità di trascinamento esercitata dalla corrente sul fondo dell'alveo (Figura 46). Pertanto i valori calcolati con tali leggi sono cautelativi per l'interpretazione del fenomeno di trasporto di fondo.

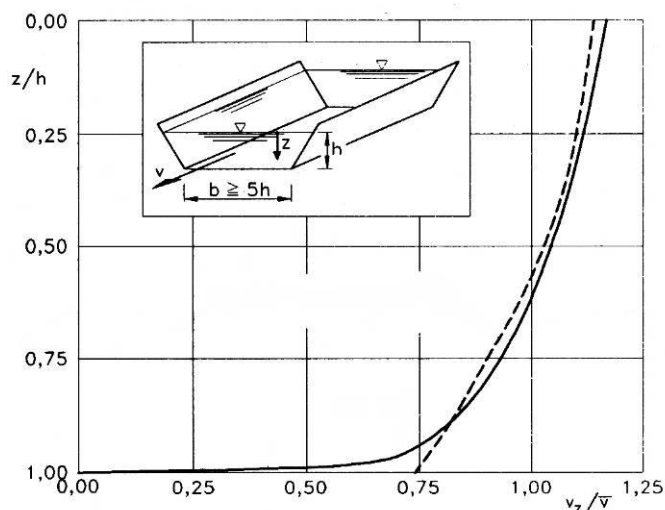


Figura 46 – Distribuzione delle velocità v_z in funzione della velocità media v al variare della profondità z/h .

Per la valutazione della velocità critica per il trasporto di fondo di un corso d'acqua risultano di particolare utilità nelle applicazioni progettuali le velocità limite proposte da *Fortier e Scobey* (1926), in relazione alla natura del materiale costituente l'alveo ed al grado di torbidità della corrente idrica.

L'analisi della condizione di moto incipiente può essere affrontata anche sotto l'aspetto dinamico, prendendo in considerazione l'azione di trascinamento esercitata dalla corrente sulle sponde dell'alveo. In particolare, la movimentazione del materiale sul fondo, come sulle sponde, è considerato un fenomeno dipendente dalla tensione di trascinamento τ , il cui valore minimo τ_c perché abbia inizio il suo moto, individua appunto la *condizione critica*. Lo sforzo tangenziale τ_0 esercitato dalla corrente sul materiale costituente il fondo dell'alveo può essere espresso come:

$$\tau_0 = \gamma \cdot h \cdot i$$

dove:

- γ : peso specifico dell'acqua;
- h : altezza idrica della corrente in moto uniforme;
- i : pendenza del fondo alveo.



Il valore di τ_0 deve essere confrontato con lo sforzo tangenziale critico τ_c (condizione di equilibrio limite per il moto delle particelle solide costituenti il fondo): nel caso in cui $\tau_0 \geq \tau_c$ si instaura la condizione di moto incipiente e le particelle costituenti il fondo alveo vengono movimentate.

Nella condizione idraulica di microscabrezza (ovvero per tiranti idrici molto maggiori del diametro caratteristico delle particelle costituenti il fondo alveo), il legame funzionale che esprime la tensione τ_c è:

$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) \cdot d} = f(Re^*)$$

dove Re^* rappresenta il *numero di Reynolds* della corrente di fondo. La relazione precedente è stata ricavata da *Shields* (1936) ed è stata esplicitata dallo stesso autore attraverso un abaco (*abaco di Shields*). La funzione $f(Re^*)$ rappresenta un parametro adimensionale (*parametro di Shields*) dipendente dalle caratteristiche dei granuli e del fondo alveo, nonché ovviamente dal valore del numero di Re^* relativo alla velocità di attrito u^* .

In letteratura sono disponibili diverse formulazioni per la valutazione del parametro τ_c :

- *Shields-Krey* (1936), sviluppata per regimi di moto turbolento e in condizioni di $d \ll h$:

$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) \cdot d} = 0,06$$

- *Zeller* (1963), relativa a miscugli omogenei esclusivamente in regime turbolento:

$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) \cdot d} = 0,047$$

- *Armanini* (1990), applicabile per valori del diametro d confrontabili con il tirante idrico della corrente h (condizioni di sommergezza bassa):

$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) \cdot d} = 0,06 \cdot \left[1 + 0,67 \left(\frac{d}{h} \right)^{0,5} \right]$$

- *Egiazaroff* (1950), applicabile per miscugli non omogenei in regime esclusivamente turbolento:

$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) \cdot d} = \frac{0,1}{\left[\text{Log} \left(19 \frac{d}{d_{50}} \right) \right]^2}$$

7.2.2 Analisi dei fenomeni di erosione per le opere in progetto

La valutazione degli effetti indotti dai fenomeni di trasporto solido in occasione di eventi di piena nel sito di interesse è stata condotta sulla base delle metodologie analitiche e delle formulazioni empiriche reperibili in letteratura. Nel caso specifico, è stato utilizzato l'approccio cinematico, in quanto la trattazione sperimentale del fenomeno è riferita a regimi di moto uniforme, che bene si adattano alle condizioni idrodinamiche della corrente di piena simulata in moto permanente.



Il materiale potenzialmente erodibile dalla corrente di massima piena è costituito dal materiale costituente i rilevati, oltre a quello disponibile in alveo che contribuisce a saturare la capacità di trasporto solido della corrente. Nella valutazione dell'azione erosiva esercitata dalla stessa nelle condizioni di piena è stata adottata una granulometria caratteristica del materiale costituente il rilevato esistente compreso tra 10 mm e 1 mm, con una piccola percentuale limosa del diametro di 0.1 mm.

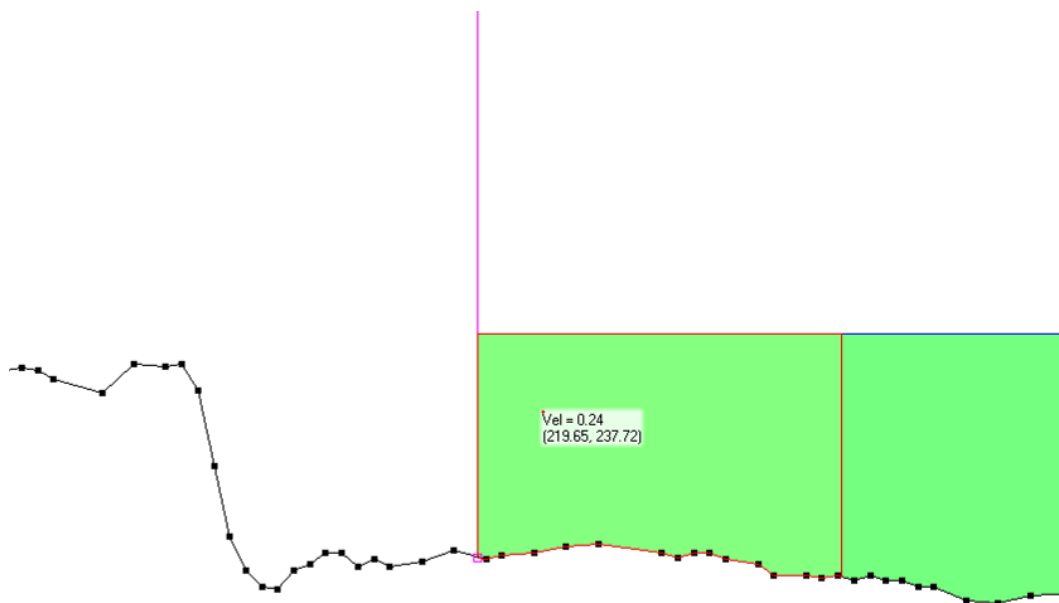


Figura 47 – Stralcio della sezione n.530 del modello numerico idraulico per lo scenario più gravoso ("B")

Le caratteristiche idrauliche della corrente che interessa le opere sono quelle ottenute con l'applicazione del modello idraulico descritto diffusamente in precedenza, caratterizzate, nella sezione maggiormente soggetta alle azioni tangenziali (sez. 530) da una velocità trascurabile (0,24 m/s) e da un battente idrico pari a 1.0 m dal piano campagna. In via cautelativa si è tuttavia assunta una velocità maggiore, pari a 0.7 m/s, per porsi in condizioni di sicurezza. Si osserva inoltre che secondo le formulazioni che restituiscono i valori di velocità critica di trascinamento in funzione delle caratteristiche della corrente e della granulometria del materiale, la situazione più cautelativa per la valutazione dell'effetto erosivo è quella in cui si ha la massima velocità in corrispondenza del minimo battente idrico.

In Tabella 4 sono stati riportati i risultati delle elaborazioni condotte, secondo le formulazioni di Neill e Bogardi. È stata condotta un'analisi di sensitività sulla granulometria del materiale erodibile, facendo variare il diametro medio caratteristico tra 0,001 m e 0,015 m (range di valori in cui rientra il materiale soggetto all'azione della corrente).

Dall'esame dei risultati ottenuti emerge che la velocità media della corrente risulta essere inferiore al valore minimo di velocità critica, calcolato per le due metodologie in esame, a partire da un diametro pari a 0.007 m per Neil e 0,001 per Bogardi, attestando la stabilità del materiale soggetto all'azione erosiva.



Essendo l'argine costituito da materiale con matrice limosa-argillosa, ben costipata e rinverdita, occorre considerare l'incremento di sicurezza dovuto al grado di costipamento del materiale, la coesione e l'azione favorevole delle radici del rinverdimento.

Dalle analisi numeriche condotte, utilizzando la formula di Neill e quella di Bogardi, per la sezione maggiormente critica (sez. 530, $v_{MAX} = 0.7$ m/s), si evidenzia come sia stabile al trascinamento un elemento lapideo teoricamente sciolto, dotato di diametro pari o superiore a 0.007 m.

Le azioni favorevoli di coesione e costipamento, menzionate in precedenza, e il diametro medio caratteristico dei grani del materiale scelto per la realizzazione dell'opera permettono di asserire come le opere arginali in progetto saranno stabili all'erosione di una portata di piena con $T_r = 200$ anni; tuttavia, per scongiurare eventuali fenomeni erosivi localizzati, in particolare per la parte più fine limosa e per la parte di copertura con terra vegetale dell'argine, la sponda arginale sarà rinverdita.

Tabella 4 – Verifica all'erosione del paramento con i metodi di Neil e Bogardi

Intervento	Sezione di riferimento	h_{MAX} [m]	d [m]	v_{media} [m/s]	NEIL		BOGARDI	
					v_c [m/s]	stato	v_c [m/s]	stato
Linee arginali	530	1.0	0.001	0.7	0.2	EROSIONE	0.4	EROSIONE
			0.002	0.7	0.3	EROSIONE	0.6	STABILE
			0.003	0.7	0.4	EROSIONE	0.7	STABILE
			0.004	0.7	0.4	EROSIONE	0.7	STABILE
			0.005	0.7	0.5	EROSIONE	0.8	STABILE
			0.006	0.7	0.5	EROSIONE	0.9	STABILE
			0.007	0.7	0.5	STABILE	0.9	STABILE
			0.008	0.7	0.6	STABILE	1.0	STABILE
			0.009	0.7	0.6	STABILE	1.0	STABILE
			0.010	0.7	0.6	STABILE	1.1	STABILE
			0.011	0.7	0.6	STABILE	1.1	STABILE
			0.012	0.7	0.7	STABILE	1.1	STABILE
			0.013	0.7	0.7	STABILE	1.2	STABILE
			0.014	0.7	0.7	STABILE	1.2	STABILE
			0.015	0.7	0.7	STABILE	1.2	STABILE



8. VERIFICHE RELATIVE AL RISCHIO DI COLLASSO DELLA NUOVA OPERA DI REGOLAZIONE DELLE PORTATE

Lo studio di dam-break (collasso sbarramento) rappresenta un elemento essenziale nella caratterizzazione degli aspetti legati alla pubblica incolumità, con riferimento alla realizzazione delle opere di regolazione delle portate previste dall'intervento di laminazione delle piene di Inverigo, oggetto del presente progetto.

Lo studio consente di valutare gli effetti potenzialmente indotti dall'ipotetico collasso dello sbarramento, in questo caso rappresentato dal manufatto di regolazione e dai rilevati arginali annessi, che, nel caso in cui si dovesse manifestare, comporterebbe la formazione di un'onda di piena impulsiva in evoluzione verso valle.

Lo studio ha la finalità di definire, date le ipotesi iniziali, l'entità dell'onda e la sua velocità di propagazione, individuando anche l'eventuale estensione del tratto interessato dai suoi effetti.

L'analisi ha previsto una prima valutazione del valore del picco di piena derivante dal collasso del rilevato mediante l'applicazione di formulazioni di tipo empirico, per valutare l'entità del fenomeno, e successivamente l'implementazione di un modello di simulazione numerica appositamente sviluppato per lo studio di casi analoghi.

In particolare l'attività è stata avviata con l'esecuzione di uno studio delle modalità con le quali potrebbe avvenire il collasso dell'opera, assimilabile ad un nuovo sbarramento in alveo, ivi compresi i rilevati arginali che confineranno a valle il nuovo invaso. Infatti, l'eventuale fenomeno di dam-break potrebbe manifestarsi sia puntualmente in corrispondenza dell'opera di regolazione per collasso degli organi mobili della stessa (effetto di repentina apertura delle paratoie), sia per cedimento di porzioni più o meno ampie dei nuovi rilevati sopra citati.

Per ciascuno scenario considerato sono stati definiti gli idrogrammi di piena attesi, i quali sono stati confrontati con quello di progetto utilizzato per la definizione delle fasce fluviali del P.A.I. (condizioni attuali). La procedura ha consentito di verificare il possibile aggravio delle condizioni di deflusso a valle del nuovo sbarramento rispetto alla condizione attuale relativa alla piena di progetto duecentennale.

Poiché la verifica, come dettagliatamente descritto nel presente capitolo e negli allegati tecnici (cfr. ALLEGATO 5) ha dato esito negativo (picchi di portata inferiori alla portata "idrologica" naturale con TR 200 anni), non è stato necessario effettuare la successiva analisi di propagazione dell'onda lungo l'asta di valle essendo gli effetti compresi in quelli valutati nell'ambito della stesura del P.A.I. per portate di piena di entità superiore.

Il capitolo contiene nella prima parte una descrizione della metodologia seguita e del codice di calcolo utilizzato per l'analisi. La seconda parte definisce gli scenari di verifica e predispone le informazioni necessarie all'implementazione dei codici di calcolo, mentre la terza ed ultima parte descrive l'applicazione dei modelli al caso in studio e i principali risultati ottenuti.



8.1 ANALISI PRELIMINARE

Considerando un approccio estremamente cautelativo, è possibile valutare preliminarmente la portata di picco nell'ipotesi di collasso istantaneo di uno sbarramento applicando la classica soluzione di Ritter (1892), di seguito riportata:

$$Q_p = \frac{8}{27} h_0 b \alpha (g h_0)^{1/2}$$

dove b è la larghezza dello sbarramento, h_0 l'altezza della breccia e α è un parametro empirico.

Il calcolo è stato effettuato in via del tutto preliminare per determinare l'ordine di grandezza degli effetti di dam-break nel caso in studio al fine di valutare in modo opportuno il successivo approccio modellistico numerico da applicare.

Per la definizione preliminare dell'idrogramma di dam-break si è fatto riferimento a quanto trattato nell'ambito del XXX° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche – IDRA 2006 (DICATA, Università degli Studi di Brescia): *"Ricostruzione dell'idrogramma conseguente al collasso della diga del Gleno e proposta di un metodo semplificato per la stima delle onde conseguenti al crollo parziale di uno sbarramento"* (B. Bacchi, F. Oberto, M. Pilotti, M. Tomirotti, 2006).

Il valore di Q_p , salvo oscillazioni dovute a propagazioni secondarie, si mantiene costante fino all'istante t_0 : tale tempo è quindi stimabile mediante l'equazione:

$$t_0 (g h)^{1/2} L^{-1} = 1 + [\alpha 8/27 b/B + 1]^{-1}$$

dove L = lunghezza invaso, b = larghezza breccia e B = larghezza sbarramento.

Secondo il lavoro svolto dall'Università degli Studi di Brescia, i valori stimati con la relazione precedente sono in sostanziale accordo con quelli dedotti dalle ricostruzioni numeriche delle onde di crollo dei casi esaminati.

L'esaurimento della piena, per la ricostruzione dell'idrogramma, è stato assimilato allo svuotamento con legge a stramazzo di un serbatoio di volume pari a quello invasato alla fine del primo tratto orizzontale dell'idrogramma:

$$Q(t) = Q_0 [1 + Q_0 (2W_0)^{-1} (t - t_0)]^{-3}$$

Anche questa legge di esaurimento ha mostrato un ottimo accordo con le ricostruzioni numeriche.

Applicando le formulazioni sopra riportate al caso in studio, facendo variare entro un range stabilito la dimensione della breccia e l'altezza dello sbarramento soggetto al collasso, si ottengono valori di Q_p compresi tra $40 \text{ m}^3/\text{s}$ e $120 \text{ m}^3/\text{s}$.



Assumendo il volume d'invaso quale dato noto di input, si è proceduto alla ricostruzione dell'idrogramma di piena che successivamente è stato confrontato con i risultati numerici ottenuti mediante l'applicazione del codice di calcolo descritto al paragrafo successivo.

8.2 ANALISI DELL'ONDA DI PIENA ARTIFICIALE: DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO

Il calcolo delle onde di piena conseguenti alla rottura di uno sbarramento è un problema non risolvibile analiticamente ma solo per via numerica, in quanto le onde sono caratterizzate da forti accelerazioni ed elevate velocità di propagazione. E' quindi necessario affidarsi ad un codice di calcolo numerico che, in funzione delle diverse variabili in gioco ed a seguito di un adeguato numero di iterazioni, garantisca la convergenza del calcolo di simulazione ad uno schema rappresentativo del fenomeno fisico.

Al fine di quantificare le grandezze idrauliche (massimi tiranti idrici, massima velocità di propagazione, tempi di arrivo del picco d'onda, ecc.) conseguenti ad un evento di rottura dello sbarramento oggetto di studio e verificare la reale situazione di rischio cui potrebbero essere soggette le aree di valle adiacenti al corso d'acqua, si è utilizzato il codice di calcolo BOSS DAMBRK, prodotto dalla BOSS INTERNATIONAL.

BOSS DAMBRK è un software realizzato sulla base degli studi condotti dal Prof. D.L. Fread dell'Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service (USA).

Il programma esegue le elaborazioni numeriche, basandosi sulle attuali conoscenze nel campo della "Rottura Dighe" e della relativa idrodinamica che si instaura nel corso d'acqua, e può essere utilizzato per simulare la formazione e gli effetti di un'onda di "dam-break", conseguenti alla sua propagazione verso valle in un alveo naturale. Possono essere studiati simultaneamente gli effetti di più sbarramenti, serbatoi e ponti presenti lungo il corso d'acqua.

Il modello ha numerose applicazioni e consente l'introduzione di diversi livelli di input, con un ampio intervallo di valori. DAMBRK è inoltre utilizzato dalle più importanti agenzie degli Stati Uniti ed è riconosciuto a livello internazionale. Durante gli ultimi anni sono state condotte diverse analisi su casi reali con il codice di calcolo per la validazione del modello: Land (1980) con U.S. Geological Survey; Mc Maon (1981) con U.S. Corps of Engineers; Tschantz e Mojib (1981) con l'Università del Tennessee; Singh e Snorranson (1982) on Illinois State Water Survey; Keefer e Peck (1982), Binnie & Patners (1986) con una sfera di consulenti privati ed infine Wurbs (1985, 1986) con Texas A & M University. Tutti i citati studi hanno appurato che la modellistica proposta è affidabile e preferibile ad altri modelli in circolazione, in particolare per la sua teoria di base ed il range di applicabilità.

Il modello è sostanzialmente costituito da tre parti:

- descrizione del modo in avviene il collasso dello sbarramento, con la descrizione dell'evoluzione temporale e geometrica della breccia che si è aperta;
- calcolo dell'idrogramma in uscita dalla breccia in funzione del tipo di rottura, della portata di ingresso nell'invaso a monte delle caratteristiche dell'invaso;



- evoluzione dell'idrogramma risultante attraverso l'alveo naturale a valle dello sbarramento, considerando l'effetto di invaso, la resistenza al moto, la presenza di infrastrutture idrauliche, determinando le quote del pelo libero, i tempi di spostamento e gli effetti di laminazione.

La portata uscente, in ogni istante, è data dalla somma di:

- portata che sormonta la sommità;
- portata che attraversa la breccia.

Ognuna di queste portate è calcolata utilizzando le opportune equazioni; i dati di ingresso sono sempre completati con alcune condizioni al contorno di tipo idraulico. La procedura di calcolo è basata sulla soluzione monodimensionale del moto delle correnti a pelo libero in canali aperti. Questo implica che tutte le sezioni sono orientate perpendicolarmente alla corrente ed il pelo libero è assunto orizzontale in ogni sezione.

Le variazioni del coefficiente di Manning conseguenti al passaggio della prima onda di piena non sono considerate, in quanto non esiste la possibilità di rendere questo parametro funzione del tempo, pur potendo immettere differenti valori al variare della quota.

Le equazioni che governano il modello sono le equazioni di De Saint Venant in forma monodimensionale, associate ad altre equazioni che rappresentano la variazione della corrente attraverso lo sbarramento e/o le altre infrastrutture presenti lungo il corso d'acqua naturale, in funzione della breccia che si crea nello sbarramento. Ulteriori equazioni sono utilizzate per controllare quanto avviene a monte e a valle. Il sistema di equazioni è risolto con un metodo alle differenze finite implicito, sulla base di quattro punti pesati in modo non lineare. Il moto può essere sia in corrente veloce che lenta o una combinazione di esse, variabile nello spazio e nel tempo; le proprietà del fluido possono essere quelle dell'acqua (fluido Newtoniano) oppure con forte presenza di trasporto solido (fluido non Newtoniano, tipo debris flow). L'idrogramma è specificato in ogni istante e tutti i risultati del calcolo sono noti in qualsiasi sezione.

La propagazione dell'onda di piena viene simulata dal modello matematico integrando le equazioni della corrente a pelo libero, in condizioni di moto vario scritte in forma completa.

Le equazioni utilizzate dal modello sono quindi:

- equazione di continuità

$$(1) \quad \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial(A + A_0)}{\partial t} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial(A + A_0)}{\partial x} - q = 0$$

- equazione di conservazione della quantità di moto

$$(2) \quad \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial \left[\beta \cdot \left(\frac{Q^2}{A} \right) \right]}{\partial x} + g \cdot A \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e + S_i \right) + L = 0$$



dove:

- Q : portata fluente;
- h : livello idrico;
- A : sezione attiva di deflusso;
- A₀ : sezione non attiva di deflusso;
- q : portata specifica in ingresso o uscita;
- β: coefficiente di ragguaglio della quantità di moto;
- S_f : pendenza della linea dei carichi totali (valutata con l'equazione di Manning di moto uniforme stazionario).
- S_e : pendenza della linea dei carichi per variazioni di forma della sezione (resistenze localizzate);
- S_i : pendenza della linea dei carichi conseguente a dissipazioni interne di tipo viscoso per fluidi di tipo non Newtoniano;
- L: effetto delle immissioni o emissioni laterali.

In particolare:

$$(3) \quad S_f = \frac{|Q| \cdot Q}{K^2}$$

$$(4) \quad S_e = \frac{k \cdot \Delta \left(\frac{Q}{A} \right)^2}{2g \cdot \Delta x}$$

$$(5) \quad S_i = \frac{\kappa}{\gamma} \cdot \left[\frac{(b+2) \cdot Q}{A \cdot D^{b+1}} + \frac{(b+2) \cdot \left(\frac{\tau_0}{\kappa} \right)^b}{2D^b} \right]^{\frac{1}{b}}$$

dove:

- K: conveyance factor
- κ: viscosità apparente del fluido



- γ : peso specifico del fluido
- τ_0 : tensione tangenziale del fluido
- b : $1/m$ con m : esponente della legge reologica
- D : A/B altezza idraulica, con A : area bagnata
- B : massima larghezza della sezione attiva

Le equazioni (1) e (2) vengono integrate secondo uno schema alle differenze finite simile a quello impiegato da Preismann (1961) e Chaudhry Contractor (1973) che utilizza le seguenti approssimazioni:

$$(6) \quad \frac{\partial K}{\partial t} = \frac{K_i^{j+1} K_{i+1}^{j+1} - K_i^j - K_{i+1}^j}{2\Delta t_j}$$

$$(7) \quad \frac{\partial K}{\partial x} = \theta \left(\frac{K_{i+1}^{j+1} - K_i^{j+1}}{\Delta x_i} \right) + (1 - \theta) \frac{K_{i+1}^j - K_i^j}{\Delta x_i}$$

$$(8) \quad K = \theta \left(\frac{K_i^{j+1} - K_{i+1}^{j+1}}{2} \right) + (1 - \theta) \frac{K_i^j + K_{i+1}^j}{2}$$

con θ che assume generalmente il valore 0,6 e per valori tendenti ad uno rende il metodo implicito.

La soluzione del sistema numerico non lineare sopra presentato è ottenuta con il metodo risolutivo di Newton-Raphson. Le equazioni (1) e (2), utilizzate nel calcolo idrodinamico, sono di tipo iperbolico e richiedono la definizione di condizioni iniziali e condizioni al contorno.

Le condizioni iniziali ($t=0$) sono valutate automaticamente dal modello attraverso un profilo di moto permanente calcolato sulla base del valore di Q all'istante iniziale fornito dall'utente.

Le condizioni al contorno sono funzione dello stato della corrente (subcritico e supercritico):

- a monte $Q = Q(t)$ $h = h(t)$
- a valle $Q = Q(h)$, di moto permanente o vario; stato critico $h = k(t)$

Il modello matematico offre la possibilità di condurre in modo automatico la ricerca delle transizioni di regime della corrente, e nel caso in questione il metodo utilizzato è quello proposto da Molisana e Yang, che consiste nel calcolare in tutti i punti del dominio di calcolo, sia l'altezza critica sia l'altezza di moto uniforme (quella che deriva dalla scala di deflusso locale), a partire dalla condizione iniziale. Ciò permette di distinguere i tratti dell'alveo in cui la corrente è tendenzialmente lenta o veloce. Le sezioni estreme di questi rami svolgono la funzione di sezioni di controllo nell'algoritmo di soluzione del sistema di equazioni alle derivate parziali di tipo



iperbolico che caratterizzano la corrente a pelo libero in condizioni di moto vario. La posizione delle sezioni di controllo varia durante tutto il transitorio. Nei tratti di passaggio da corrente veloce a corrente lenta la sezione di controllo è quella per cui sono soddisfatte le equazioni del risalto idraulico. Le suddette equazioni sono valide per una corrente strettamente stazionaria, poiché trascurano i termini di celerità del risalto quando questo è mobile. Questa approssimazione è comunque accettabile sul piano pratico, ed il modello DAMBRK rappresenta uno dei codici più affidabili per il calcolo dell'onda di piena, ed è stato testato per cinque onde di piena provocate da collasso dei seguenti sbarramenti: *Teton Dam* (1976), *Buffalo Creek Coal-Waste Dam* (1972), *Johonstown Dam* (1889), *Toccoa Dam* (1977) e *Laurel Dam* (1977).

8.2.1 Dati in ingresso

In primo luogo è necessario definire le **caratteristiche dell'invaso** (cfr. Figura 48): la determinazione del volume di invasore in condizioni di normale ritenuta è stata effettuata utilizzando tutte le informazioni geometriche di progetto. Con riferimento alla quota di massimo invasore (cfr. § 5.4.2), è stata definita la curva altezze-volumi elaborando le informazioni geometriche di dettaglio fornite dal DTM. Si precisa che per tutte le analisi è stato fatto riferimento allo scenario più gravoso (scenario B).

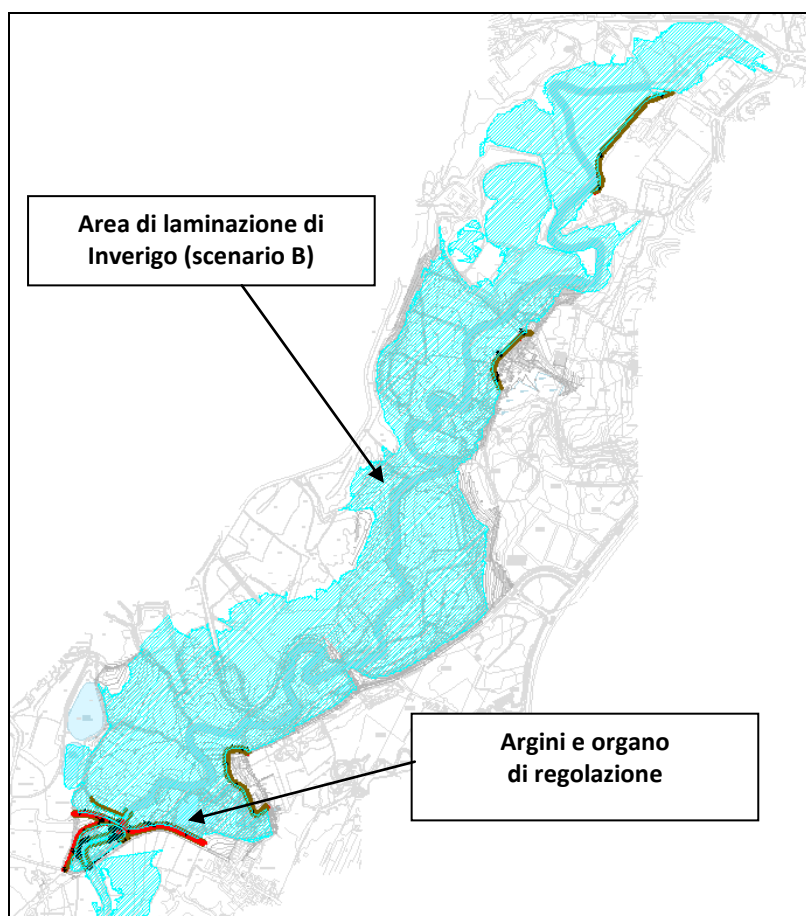
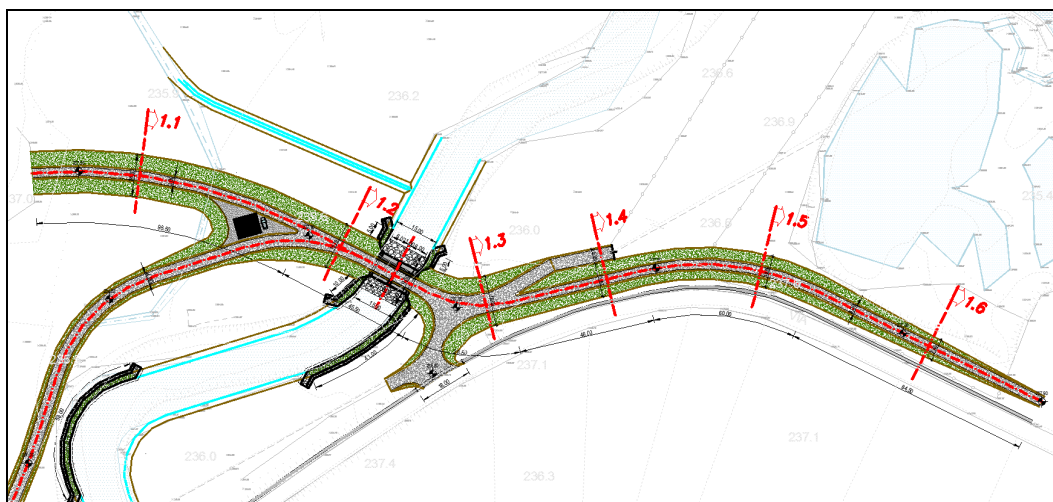


Figura 48 – Planimetria dell'invaso (aree allagabili – scenario B).



Il passo successivo consiste nella definizione delle **caratteristiche dei manufatti** che si ritiene possano essere soggetti al collasso. Nel caso in esame non si tratta di una diga nel senso classico del termine, tuttavia la natura dell'intervento presuppone che il funzionamento dell'opera di regolazione produca, in concomitanza di un evento idrologico significativo, un volume idrico invasato a monte del manufatto di regolazione e degli argini sui quali il manufatto è impostato.

Rimandando agli elaborati grafici per approfondimenti di dettaglio, si riportano di seguito le principali grandezze geometriche di interesse ai fini dell'analisi in corso. Il rilevato arginale presenta sezione trapezia con base maggiore (sviluppo longitudinale) variabile, che nella parte centrale raggiunge il valore massimo di circa 15 m; il coronamento ha uno sviluppo non rettilineo, di altezza variabile rispetto al piano campagna lato monte e lato valle. Lo sviluppo dei tratti arginali che potrebbero subire cedimenti è complessivamente pari a circa 80 m, avendo considerato la sezione trasversale più gravosa (cfr. sez. 1.2 in Figura 49 e Figura 50).



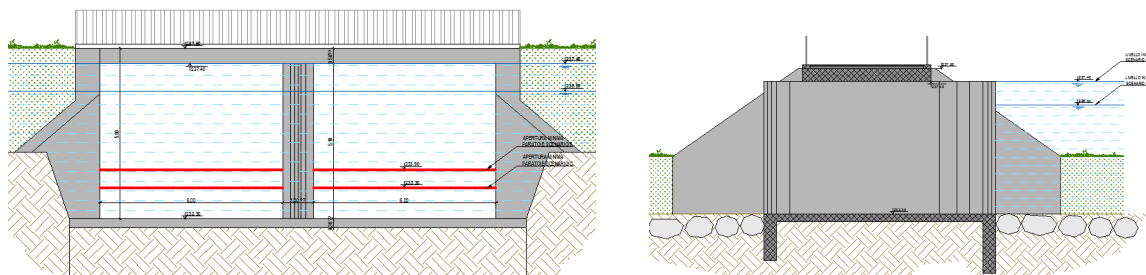


Figura 51 – Prospetto e sezione trasversale dell'organo di regolazione.

Il tratto di alveo indagato a valle è di circa 300 m, lunghezza necessaria alla stabilizzazione del transitorio in seguito alla rottura. I risultati saranno pertanto riferiti alla sezione 0 (cfr. Figura 52). Le sezioni inserite nel modello sono complessivamente 3, più le interpolate generate automaticamente.

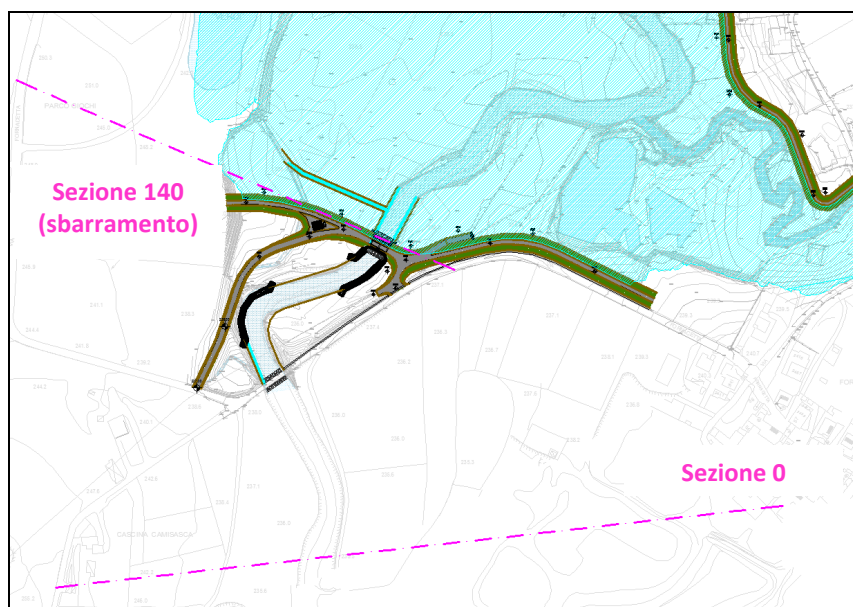


Figura 52 – Sezioni di riferimento per gli output del modello numerico di Dam-break.

Con riferimento agli schemi grafici riportati, si sono pertanto assunte le seguenti **ipotesi di calcolo**:

- quota coronamento dello sbarramento 237,90 m s.l.m.
- livello idrico all'istante t_0 (massimo invaso) 237,40 m s.l.m.
- quota p.c. alla base del rilevato 234,40 m s.l.m.
- lunghezza tratto di alveo studiato circa 300 m



8.2.2 Allestimento del modello di simulazione

Il modello di simulazione allestito è stato sviluppato secondo le seguenti fasi principali:

- definizione dell'invaso, mediante l'analisi delle caratteristiche morfologiche del tratto di monte;
- definizione del meccanismo di rottura dello sbarramento o dell'efflusso di portata dallo stesso, attraverso la descrizione temporale e geometrica della breccia;
- ipotesi idrologiche di base: assunzione di un idrogramma di piena in ingresso al bacino di invaso;
- calcolo dell'idrogramma conseguente alla formazione della breccia in funzione del tipo di rottura, della portata in ingresso a monte dell'invaso, delle caratteristiche dell'invaso.

8.2.3 Geometria dell'alveo

La geometria del tratto indagato è stata ottenuta dalla base DTM, già utilizzata per la definizione del volume di invaso. Come anticipato il numero totale delle sezioni implementate nel modello di calcolo è pari a 3, successivamente interpolate. Le sezioni idrauliche complessivamente considerate consentono la suddivisione dell'alveo in un adeguato numero di tronchi, nei quali le caratteristiche geometriche risultano gradualmente variabili.

8.2.4 Costituzione fisica dell'alveo

I parametri di scabrezza adottati per rappresentare la resistenza al moto dell'alveo sono espressi in termini di coefficiente n di Manning ($s\ m^{-1/3}$). Per tutte le sezioni analizzate il valore assunto è stato $n = 0.040$, ($K_s = 25$), considerando le condizioni morfologiche del corso d'acqua.

8.2.5 Ipotesi di base: dinamiche evolutive e approccio modellistico

L'analisi effettuata per valutare gli effetti generati dall'ipotetica onda impulsiva generata dalla rottura dello sbarramento artificiale di futura realizzazione è stata condotta valutando i possibili scenari che si potrebbero verificare, considerando cautelativamente le ipotesi più sfavorevoli, pur tuttavia realistiche.

Il collasso arginale, anche alla luce del comportamento che comunemente avviene in casi reali, può avvenire come cedimento repentino (pochi minuti) di una porzione limitata del rilevato (5-6 m di larghezza della breccia) che successivamente evolve con progressivo allargamento della falla mediante processi erosivi, fino ad un'ampiezza massima di equilibrio. Si ritiene realistico, in funzione dei volumi e delle altezze di sbarramento, ipotizzare che la massima ampiezza della rottura progressiva possa essere pari a 30 m. Tale progressivo fenomeno, sempre con riferimento a casi reali, può avvenire nell'arco temporale di alcune ore.

Il tempo di evoluzione del fenomeno è un parametro che va definito con cura in quanto influenza in modo significativo il risultato dello studio di dam break.



Alla luce delle considerazioni esposte al precedente capoverso, alle due fasi corrispondono due differenti tempi di formazione della breccia di rottura, assunti in modo ampiamente cautelativo, pari a:

- collasso semi-istantaneo di una porzione di rilavato arginale: $T_r = 0,08 \text{ h}$ (5 minuti)
- progressivo allargamento fino alla massima ampiezza: $T_r = 4 \text{ h}$

8.2.6 Idrogramma in ingresso all'invaso

La simulazione numerica effettuata prevede che si definisca l'idrogramma in ingresso al bacino di invaso.

In questo caso si assume che l'idrogramma in arrivo a monte sia quello necessario a costituire l'invaso; poiché cautelativamente il dam-break viene ipotizzato quando il livello è al massimo invaso, l'idrogramma in ingresso a monte può essere assunto pari alla propria curva di esaurimento.

8.3 PROSPETTO SINTETICO DEGLI SCENARI IPOTIZZATI

Con riferimento alle ipotesi descritte ai paragrafi precedenti, sono stati ipotizzati due differenti scenari, secondo il prospetto sintetico riportato in Tabella 5.

Tabella 5 – Schema sintetico degli scenari di verifica.

SIMULAZIONE	PARAMETRI DAMBREAK	
	t_r	
A) CEDIMENTO REPENTINO LOCALIZZATO		5'
	b	6 m
	B	7,4 m
B) PROGRESSIVA EROSIONE LATERALE	t_r	4 h
	b	30 m
	B	31,4 m

Secondo quanto descritto dalla normativa, occorrerebbe anche verificare gli effetti delle manovre repentine degli organi mobili (apertura istantanea delle paratoie). Tuttavia, date le caratteristiche geometriche dei manufatti e visti i risultati ottenuti con il precedente approccio, si ritiene tale scenario certamente trascurabile in termini di portate defluenti in alveo, in rapporto ai valori di portata idrologici del corso d'acqua.

8.4 APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA AL CASO IN STUDIO: ANALISI E RISULTATI

In accordo con le ipotesi adottate per il calcolo già illustrato in dettaglio nei precedenti paragrafi, è stata svolta l'analisi di dam-break per l'invaso di Inverigo, invaso temporaneo che si forma quando, in occasione di un



evento pluviometrico parossistico, le portate del Fiume Lambro sono tali da necessitare che venga attivata l'operazione di laminazione della portata. In ALLEGATO 5 si riportano tutti i risultati grafici e numerici.

8.4.1 Scenario 1: cedimento repentino localizzato

Il primo scenario rappresenta la simulazione della formazione di un'onda di piena conseguente ad un cedimento repentino (pochi minuti) di una limitata porzione di argine, con formazione di un varco di forma pressoché rettangolare che si genera a tutta altezza rispetto alla base del rilevato.

In questo caso, come si evince dalla Figura 53, il picco che si manifesta oltre il tratto di transitorio, quindi circa 300 m a valle dello sbarramento, è pari a $54 \text{ m}^3/\text{s}$ che si manifesta al tempo $t_p = 12,5'$

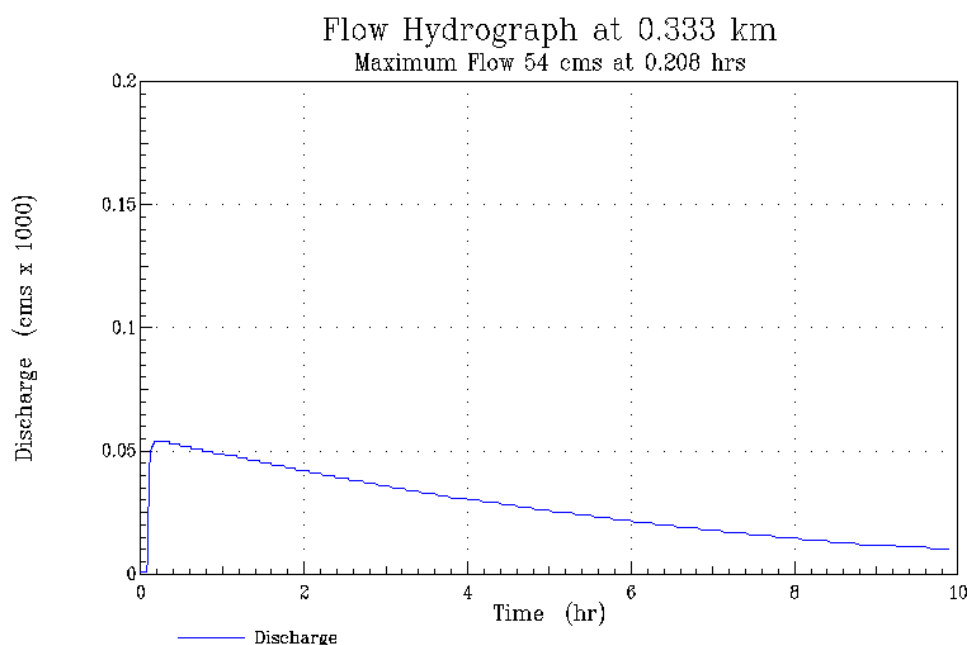


Figura 53 – Formazione onda di piena: collasso repentino di una porzione di argine (scenario 1).

8.4.2 Scenario 2: formazione breccia per progressiva erosione laterale

Il secondo scenario ipotizza che la breccia evolva per progressiva erosione laterale fino alla larghezza massima compatibile con le ipotesi assunte e con le caratteristiche geometriche del manufatto e del rilevato arginale.

In questo caso, assumendo che il fenomeno raggiunga il proprio apice in circa 4 ore (ampiezza 30 m), il corrispondente picco di portata è pari a $123 \text{ m}^3/\text{s}$ al tempo $t_p = 4 \text{ h}$.

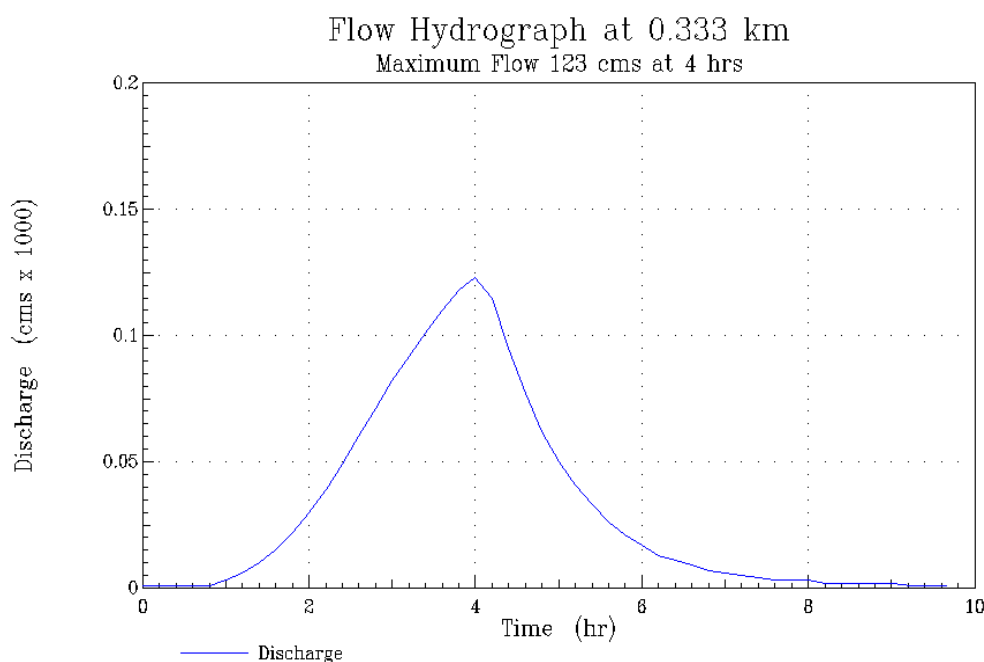


Figura 54 – Formazione onda di piena: erosione laterale progressiva e formazione breccia (scenario 2).

8.5 SINTESI DEI RISULTATI

I risultati ottenuti consentono di stabilire che gli effetti di un ipotetico collasso di parte dei manufatti arginali che costituiscono l'opera di regolazione in progetto possa comportare la formazione di un picco di portata di piena inferiore o al più dello stesso ordine di grandezza della portata al colmo corrispondente al tempo di ritorno di duecento anni in condizioni attuali, così come definita dal P.A.I. in corrispondenza del ponte di via Fornacetta ad Inverigo. Ovviamente nel caso in cui dovesse verificarsi l'ipotetico collasso, sarà necessario attuare una manovra di chiusura rapida delle paratoie.

Tabella 6 – Confronto tra la portata di piena del P.A.I. (condizioni attuali) e quelle che potrebbero originarsi nel caso di ipotetico collasso dell'opera di regolazione negli scenari descritti

Riferimento	Portata [m ³ /s]
P.A.I. – Condizioni attuali	135
Dambreak: scenario 1	54
Dambreak: scenario 2	123

Per questa ragione si ritiene che la realizzazione della nuova opera di sbarramento non aggravi le condizioni di rischio dei territori di valle, nemmeno nel caso in cui dovesse verificarsi un ipotetico collasso della stessa secondo le ipotesi descritte nel presente capitolo: l'onda di piena impulsiva sarebbe comunque contenuta entro i limiti delle fasce fluviali vigenti.



9. CONCLUSIONI

La presente relazione idrologico-idraulica è stata predisposta con l'intento di descrivere le approfondite attività svolte dagli scriventi al fine di selezionare e progettare le opere di regolazione delle portate, oltre a quelle accessorie, previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano".

In particolare, nel rispetto di quanto richiesto dal Committente in sede di conferimento dell'incarico, si è provveduto a fornire riscontro ai seguenti elementi:

- Verifica dei dati idrologici proposti dall'Autorità di Bacino nel Piano di Assetto Idrogeologico con particolare riferimento all'area di interesse ed in considerazione degli eventi meteorologici successivi alla pubblicazione del Piano di Assetto Idrogeologico;
- Modellazione idraulica dell'area di interesse;
- Determinazione delle geometrie di deflusso in corrispondenza sia della nuova passerella con paratoie sia nel ponte esistente attrezzato con elementi gonfiabili e restrizioni fisiche d'alveo;
- Determinazione delle quote di sommità arginali;
- Progettazione degli interventi in alveo e arginali, nonché supporto alla progettazione strutturale degli interventi sui ponti.

In particolare, si è provveduto a raccogliere e analizzare criticamente gli studi pregressi e i dati resi disponibili dal Committente. Ciò ha costituito la base sulla quale impostare il successivo studio idrologico volto alla verifica dell'attendibilità e aggiornamento dei dati ufficiali pubblicati nel P.A.I.

La selezione delle opere da realizzare è stata eseguita valutando attentamente una serie di alternative progettuali. In particolare:

- Ipotesi 0: mancata realizzazione delle opere;
- Ipotesi 1: regolazione delle portate di piena mediante realizzazione di una "bocca tarata";
- Ipotesi 2: realizzazione del volume d'invaso mediante ribassamento dei piani golenali;
- Ipotesi 3: realizzazione degli interventi di regolazione previsti in sede di progetto preliminare.

Ciascuna di esse è stata scartata per molteplici ragioni dettagliatamente descritte nel paragrafo §5.1.

La soluzione prescelta prevede la realizzazione di un'opera di regolazione delle portate da collocare a monte del ponte di via Fornacetta in comune di Inverigo e di una serie di interventi complementari tra i quali i principali sono:

- Linea arginale a protezione della cascina "Cattafame" in comune di Inverigo;
- Linea arginale in località "Fornace Consonni" in comune di Nibionno;
- Linea arginale in località "Molino Nuovo" in comune di Nibionno;



Il comportamento idrodinamico del fiume Lambro nel tratto d'interesse è stato approfonditamente studiato grazie all'allestimento di un modello numerico idraulico in moto vario che ha indagato i seguenti scenari di simulazione:

- Scenario "A" – Stato attuale;
- Scenario "B" – Portate attuali con intervento di laminazione di Inverigo;
- Scenario "C" – Portate di progetto P.A.I. con intervento di laminazione di Inverigo.

Il secondo si presenta come il più gravoso ed è rispetto ai suoi risultati che le opere in progetto sono state dimensionate e verificate idraulicamente, per garantire adeguate condizioni di sicurezza idraulica nell'attesa che tutti gli interventi di regolazione delle portate previsti dal P.A.I. a monte di Inverigo siano realizzati.

Le simulazioni numeriche idrauliche hanno consentito di stabilire con un ragionevole grado di certezza l'entità dei benefici attesi con la realizzazione degli interventi in progetto, soprattutto in riferimento agli effetti benefici di laminazione dovuti alla realizzazione della citata opera di regolazione delle portate: nello scenario più gravoso è stata calcolata un'efficienza di laminazione del colmo di piena del 13%.

Sono state condotte anche le dovute verifiche al sifonamento dei rilevati arginali e la resistenza di questi ultimi ai fenomeni erosivi legati all'azione idrodinamica della corrente di piena.

Infine, è stato condotto uno specifico studio volto a verificare il rischio dell'ipotetico collasso della nuova opera di regolazione, con particolare riferimento agli effetti che la propagazione dell'associata onda impulsiva di piena potrebbe determinare a valle dell'opera. I risultati ottenuti consentono di stabilire che gli effetti di un ipotetico collasso di parte dei manufatti arginali che costituiscono l'opera di regolazione in progetto possa comportare la formazione di un picco di portata di piena inferiore o al più dello stesso ordine di grandezza della portata al colmo corrispondente al tempo di ritorno di duecento anni in condizioni attuali, così come definita dal P.A.I. in corrispondenza del ponte di via Fornacetta ad Inverigo. Per questa ragione si ritiene che la realizzazione della nuova opera di sbarramento non aggravi le condizioni di rischio dei territori di valle, nemmeno nel caso in cui dovesse verificarsi un ipotetico collasso della stessa secondo le ipotesi descritte nello specifico capitolo: l'onda di piena impulsiva sarebbe comunque contenuta entro i limiti delle fasce fluviali vigenti.

9.1 RECEPIMENTO DELLE OSSERVAZIONI FORMULATE DALLA REGIONE LOMBARDIA

Come più volte dianzi accennato, la Regione Lombardia ha formulato una serie di osservazioni rispetto ai contenuti del Progetto Preliminare delle opere richiedendo che le stesse fossero tenute in considerazione in fase di progettazione definitiva. Gli scriventi ritengono di aver fornito adeguato riscontro alle richieste dell'Ente lombardo, così come descritto di seguito:

- *"aggiornamento delle informazioni idrologiche e idrauliche dello 'Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del fiume Lambro', redatto a cura dell'Autorità di Bacino del fiume Po"*



si è provveduto a realizzare un'approfondita analisi idrologica, descritta in dettaglio nel capitolo §4 della presente relazione, che ha consentito di **confermare la validità delle portate definite dallo Studio di Fattibilità in quanto gli eventi idrologici successivi, seppur non compresi nell'analisi statistica dello stesso, sono di entità inferiore e con caratteristiche molto differenti e meno gravose rispetto all'evento critico del 2002.** Si può pertanto ragionevolmente affermare che, da un punto di vista statistico, l'eventuale aggiornamento della serie storica dei dati non comporterebbe comunque modifiche apprezzabili in aumento rispetto alle portate di riferimento (vigenti), calcolate nelle sezioni di interesse, che comprendono anche quelle del 2002;

- *"individuazione delle aree effettivamente allagabili allo stato attuale e nello stato di progetto, tenendo anche conto degli ostacoli e delle interferenze al deflusso che nel tempo hanno limitato la capacità di espansione del corso d'acqua"*

L'individuazione delle aree allagabili è stata effettuata grazie alla predisposizione di un modello numerico idraulico in moto vario che ha consentito di simulare tre diversi scenari di riferimento. Gli esiti delle simulazioni condotte sono dettagliatamente descritti nel capitolo §5 e la rappresentazione delle aree allagabili per ciascuno scenario è riportata negli specifici elaborati grafici. Per quanto riguarda gli ostacoli e le interferenze al deflusso, esse sono state implicitamente considerate quale dato di input del modello idraulico, poiché la geometria di calcolo è stata costruita utilizzando un recente e dettagliatissimo DTM (1 pt/m²), oltre ad uno specifico piano quotato realizzato per conto del Committente nel 2013 (cfr. paragrafo §5.3);

- *"valutazione dell'efficacia della scelta di realizzare due opere di regolazione, invece di una sola opera in corrispondenza del ponte di Fornacetta, mediante il confronto tra diversi scenari di allagamento"*

Come diffusamente descritto nella presente relazione, ove sono presentate in dettaglio le relative motivazioni, gli scriventi ritengono assolutamente valida e condivisibile la proposta avanzata da Regione Lombardia e, pertanto, il presente progetto definitivo prevede la realizzazione di una sola opera di regolazione delle portate da collocare a monte del ponte di via Fornacetta anziché le due previste nel progetto preliminare;

- *"opportunità di realizzare opere di regolazione fisse, meno problematiche nella fase di gestione, in luogo delle soluzioni progettuali proposte in corrispondenza del ponte di Fornacette e del ponte ex Victory"*

Si ritiene che la proposta non possa essere accolta con particolare riferimento a quanto espresso nel paragrafo §5.1.1 rispetto ai consistenti vantaggi offerti dalla possibilità di governare la regolazione delle portate con opere mobili (paratoie) e ai rischi connessi all'assenza di regolazione o alla sua attuazione mediante opere fisse.



PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo

SRA
s.r.l.
STUDIO ROSSO
INGEGNERI ASSOCIATI s.r.l.

ALLEGATI



PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo

**S
RA**
s.r.l.
STUDIO ROSSO
INGEGNERI ASSOCIATI s.r.l.

ALLEGATO 1

– Dati e risultati studio idrologico



PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo

**S
RA**
s.r.l.
STUDIO ROSSO
INGEGNERI ASSOCIATI s.r.l.

ALLEGATO 1A

Andamento delle precipitazioni orarie nel periodo 2003 – 2013

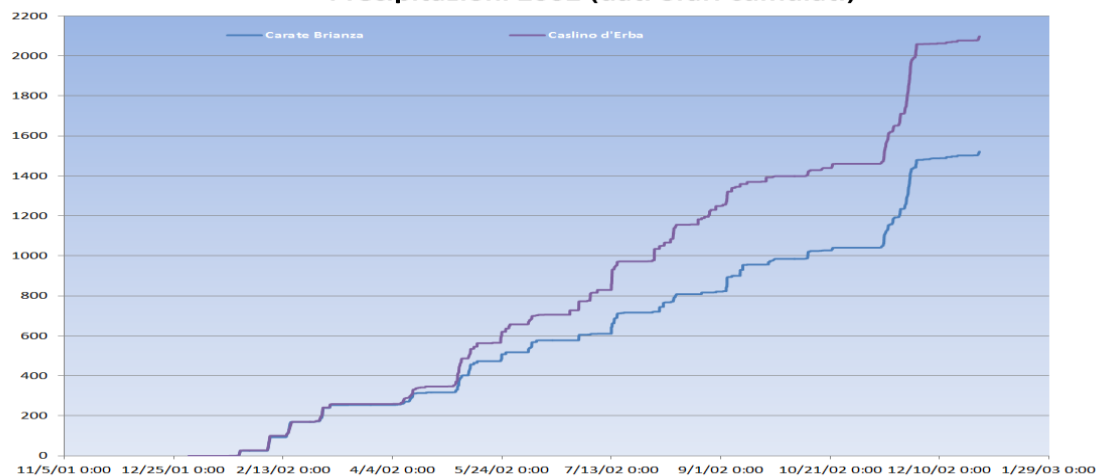


PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

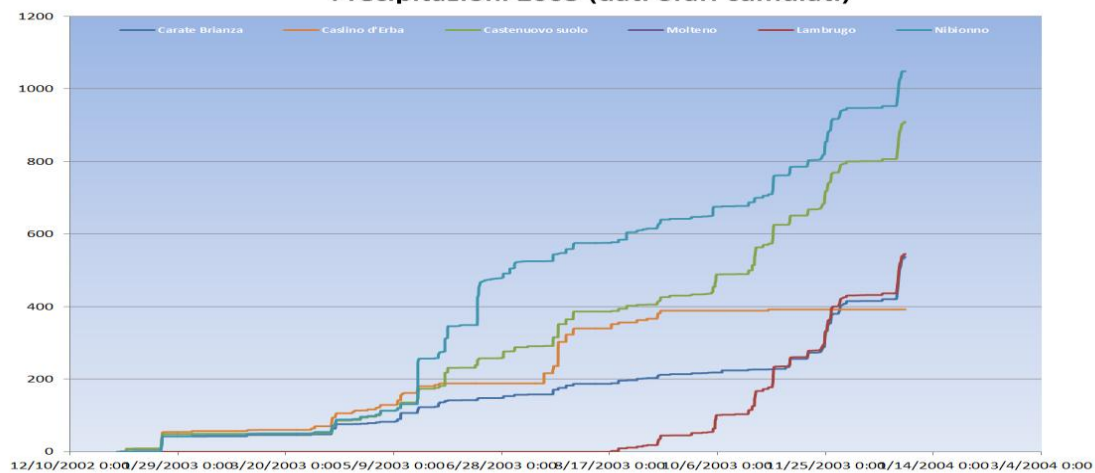
Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo

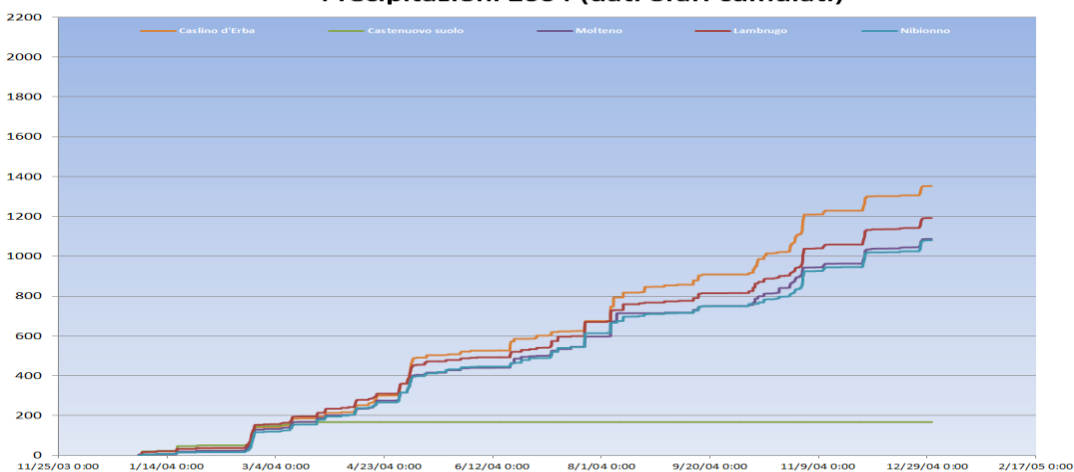
Precipitazioni 2002 (dati orari cumulati)



Precipitazioni 2003 (dati orari cumulati)



Precipitazioni 2004 (dati orari cumulati)



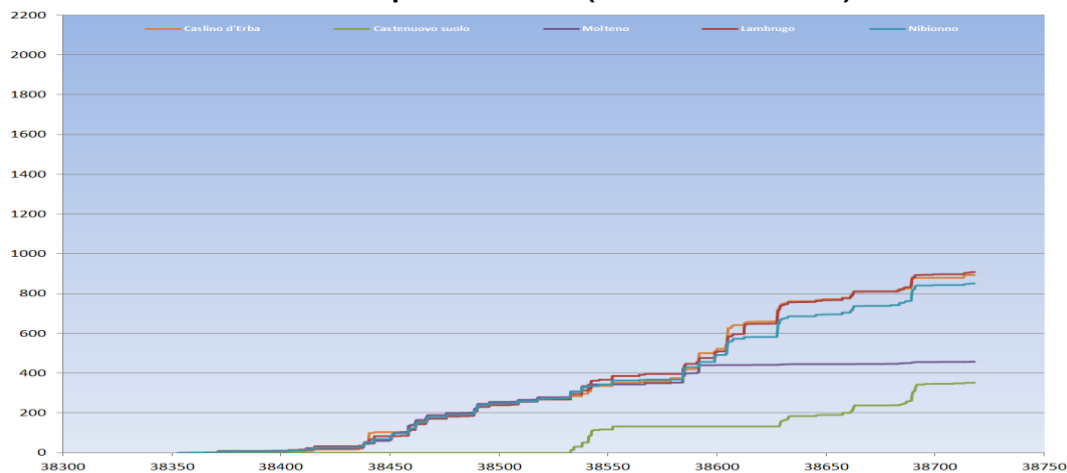


PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

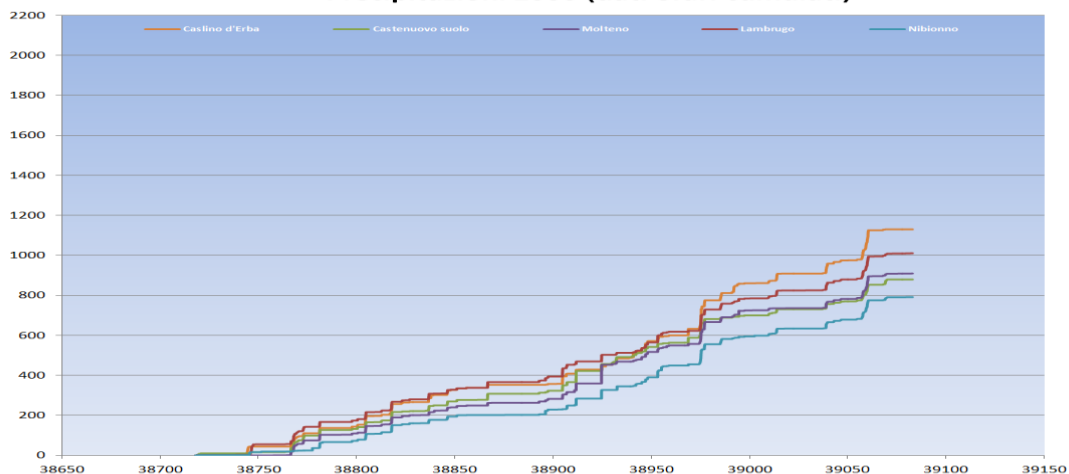
Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo

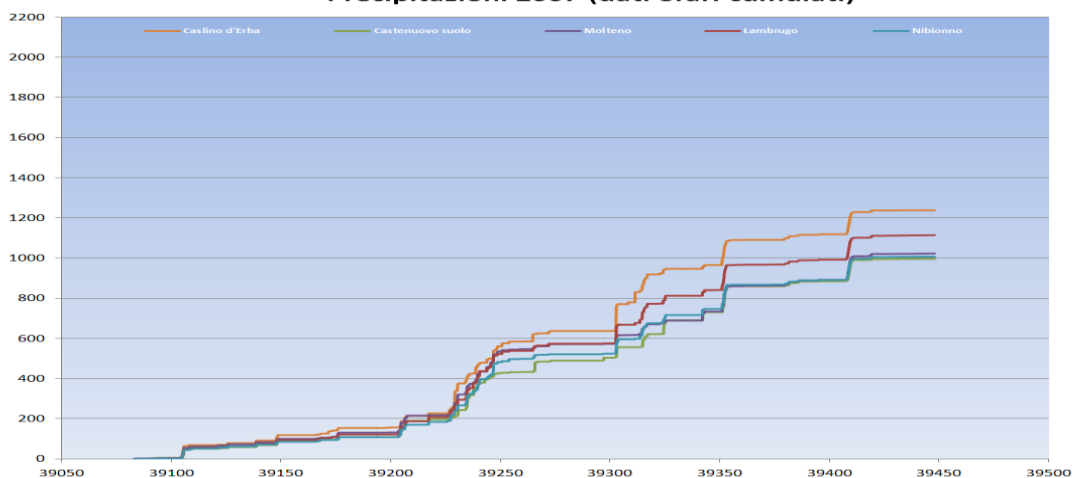
Precipitazioni 2005 (dati orari cumulati)



Precipitazioni 2006 (dati orari cumulati)



Precipitazioni 2007 (dati orari cumulati)



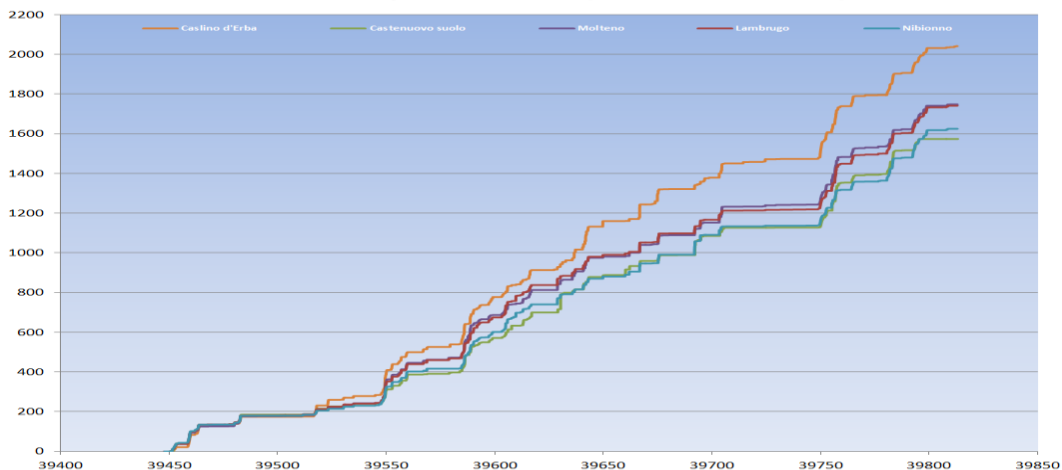


PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo

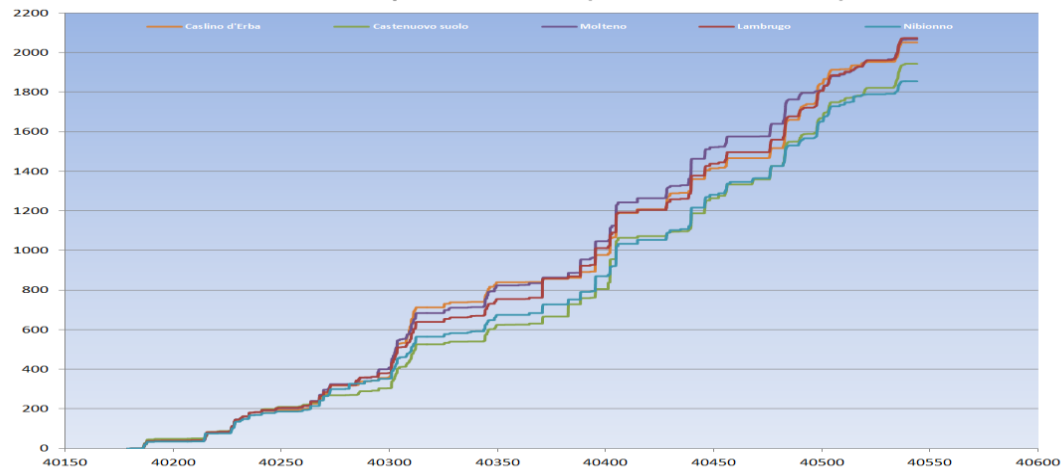
Precipitazioni 2008 (dati orari cumulati)



Precipitazioni 2009 (dati orari cumulati)



Precipitazioni 2010 (dati orari cumulati)



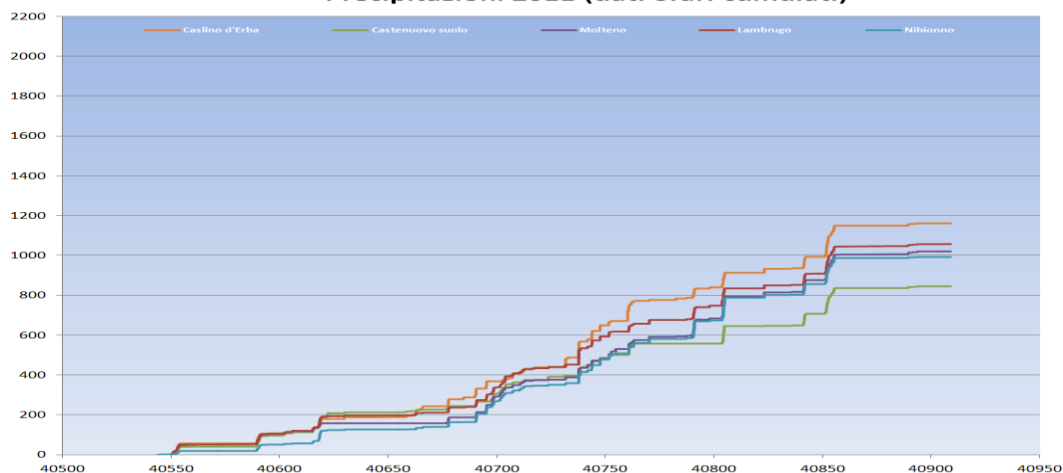


PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

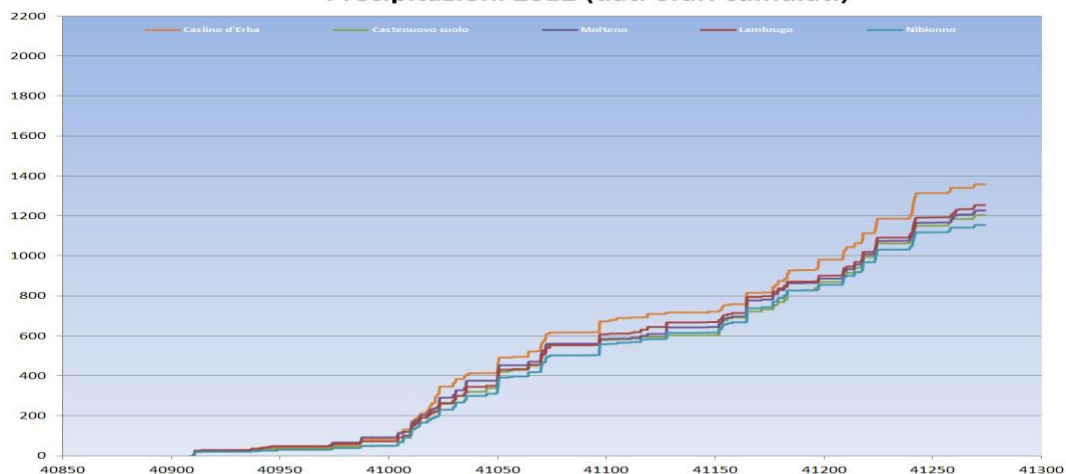
Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo

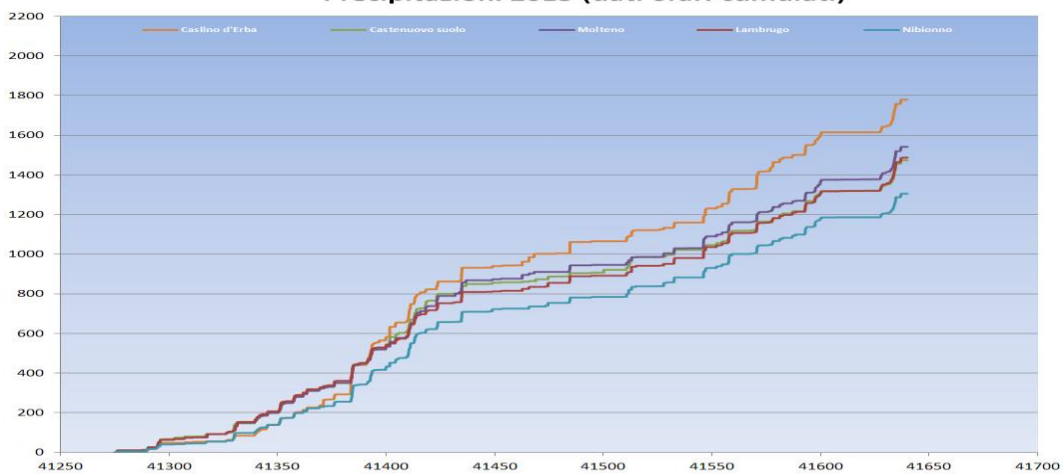
Precipitazioni 2011 (dati orari cumulati)



Precipitazioni 2012 (dati orari cumulati)



Precipitazioni 2013 (dati orari cumulati)





PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo

**S
RA**
s.r.l.
STUDIO ROSSO
INGEGNERI ASSOCIATI s.r.l.

ALLEGATO 1B

Andamento orario dei livelli F. Lambro nelle stazioni d'interesse suddiviso per anni di misura

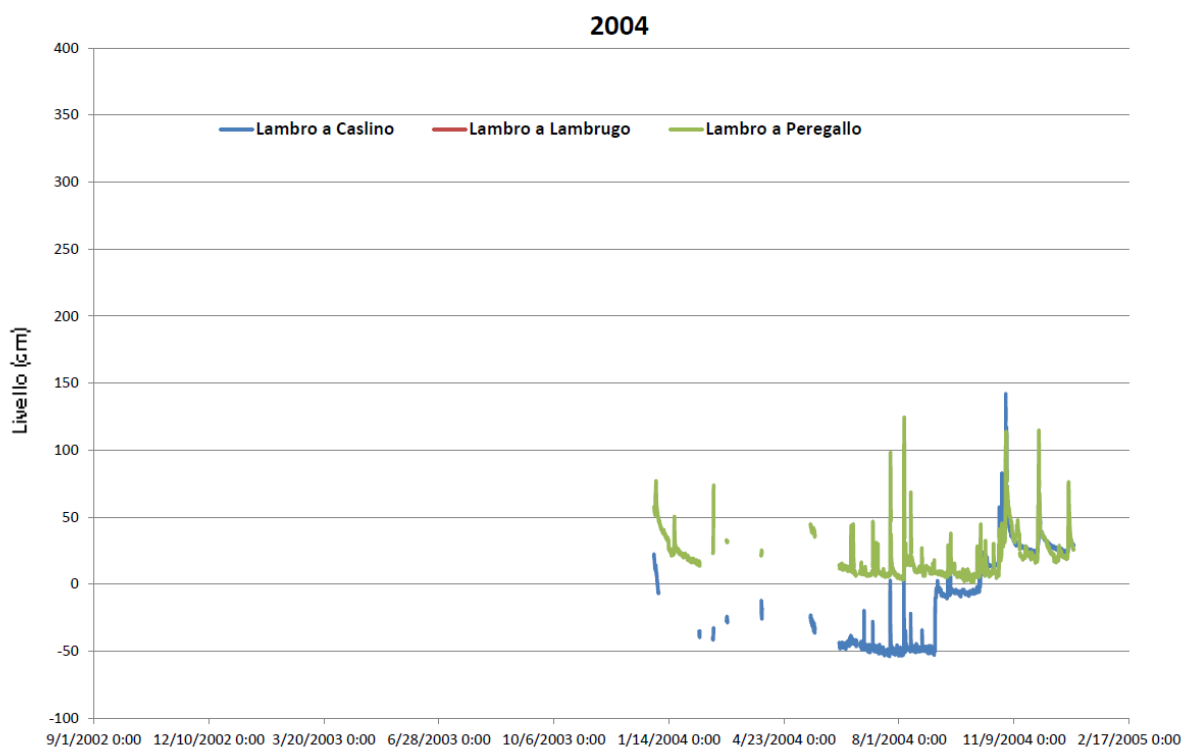
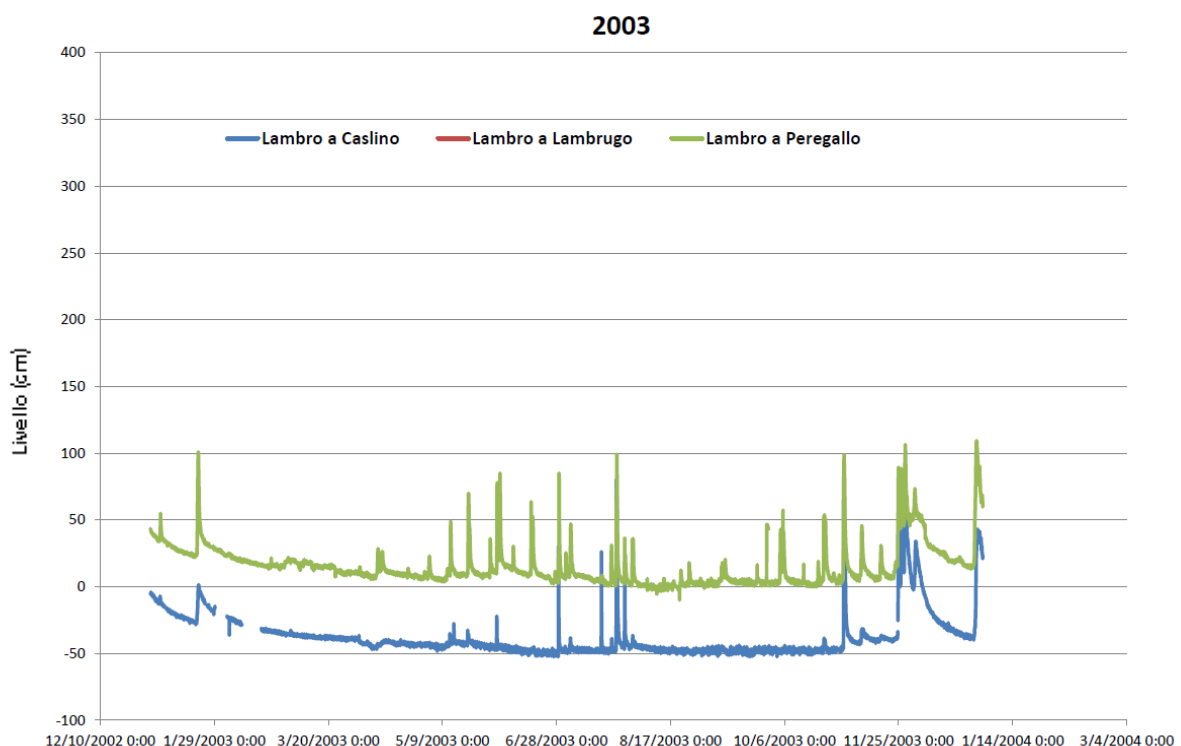


PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo

SRA
s.r.l.
STUDIO ROSSO
INGEGNERI ASSOCIATI s.r.l.

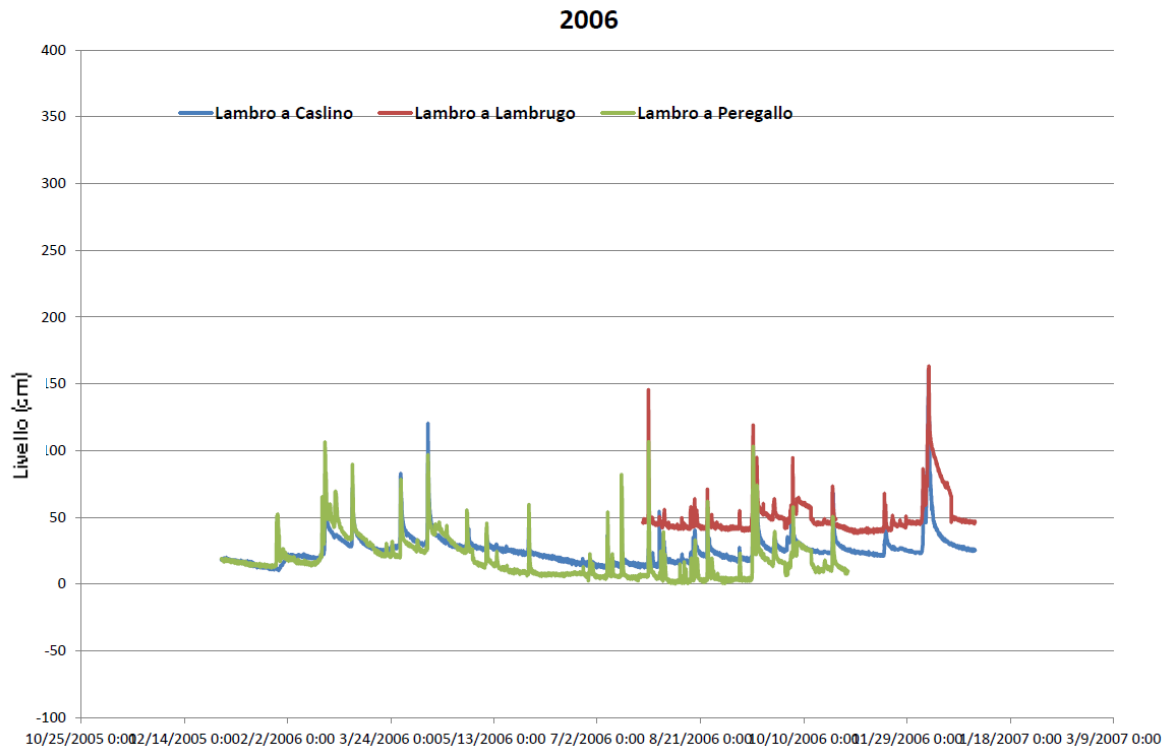
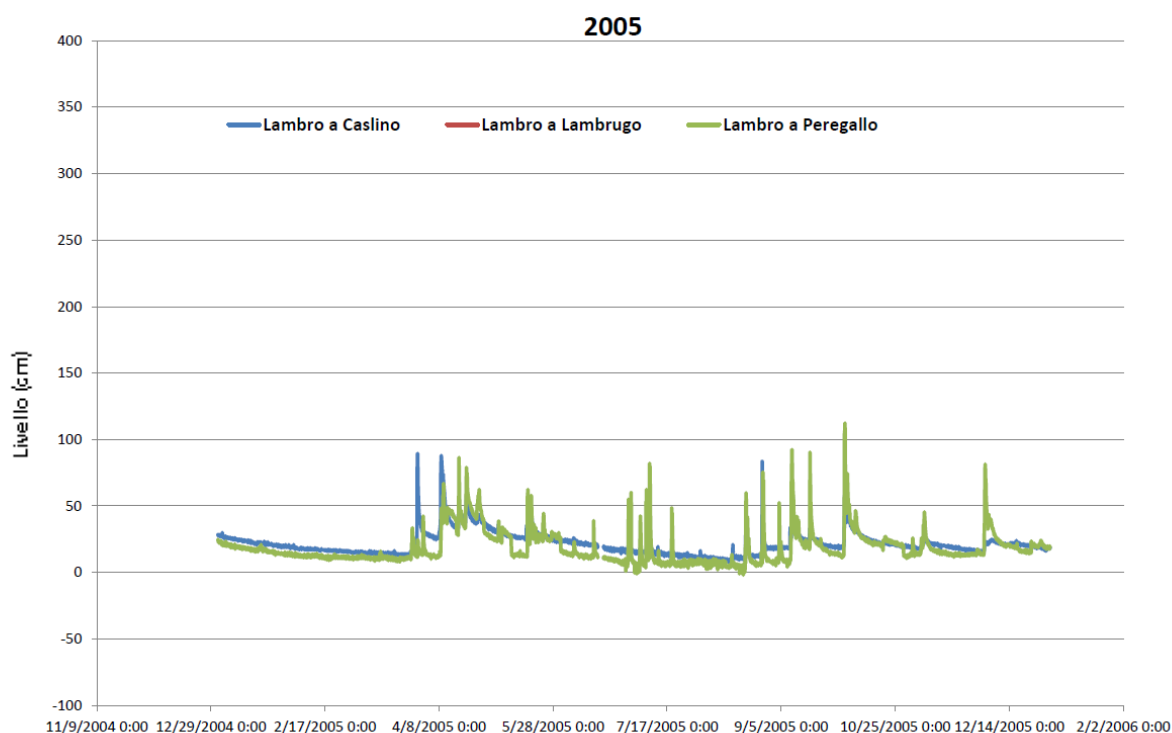




PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo



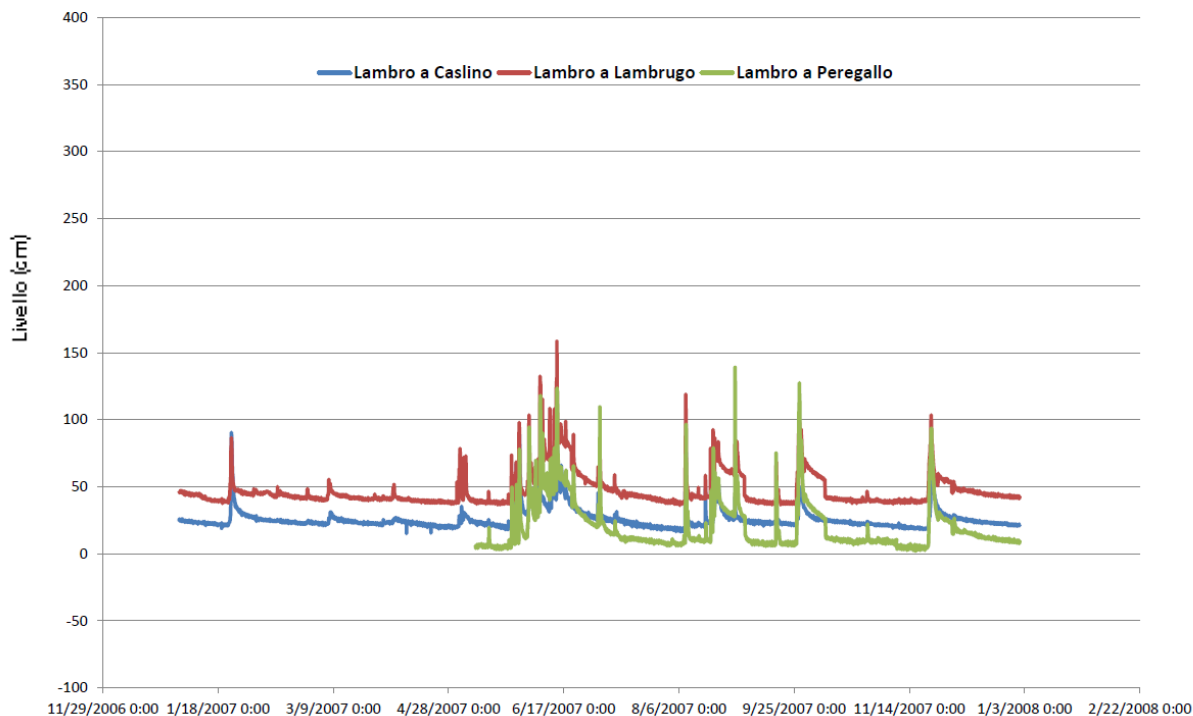


PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

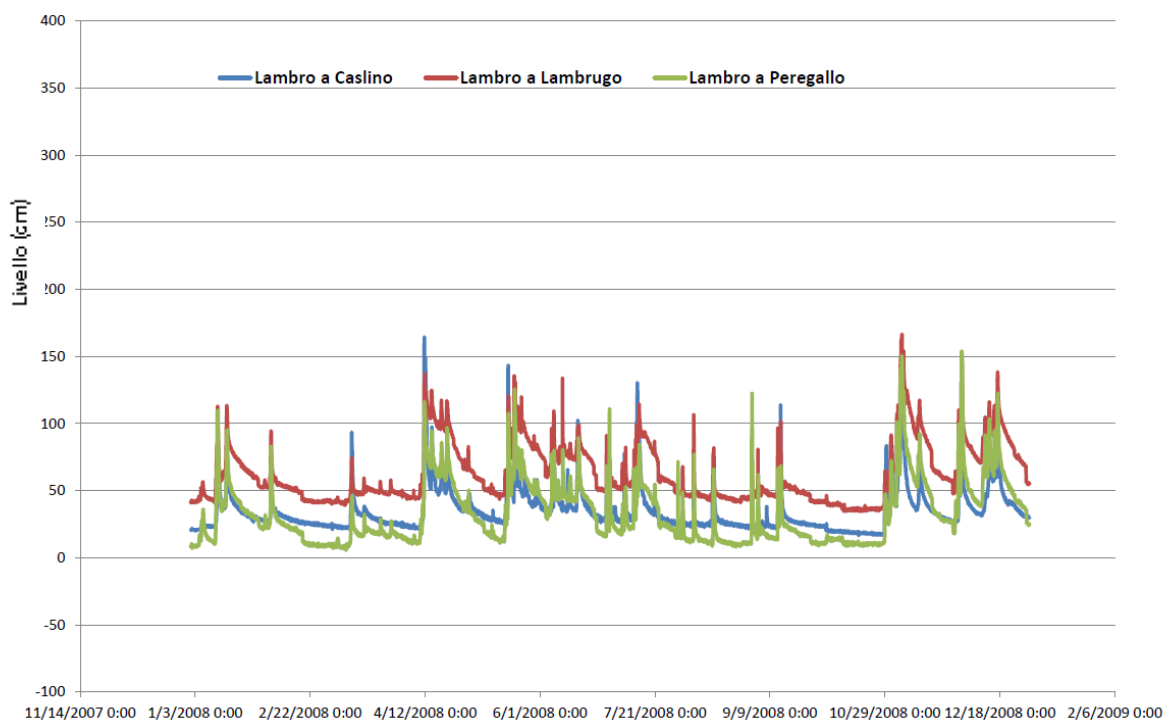
Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo

2007



2008



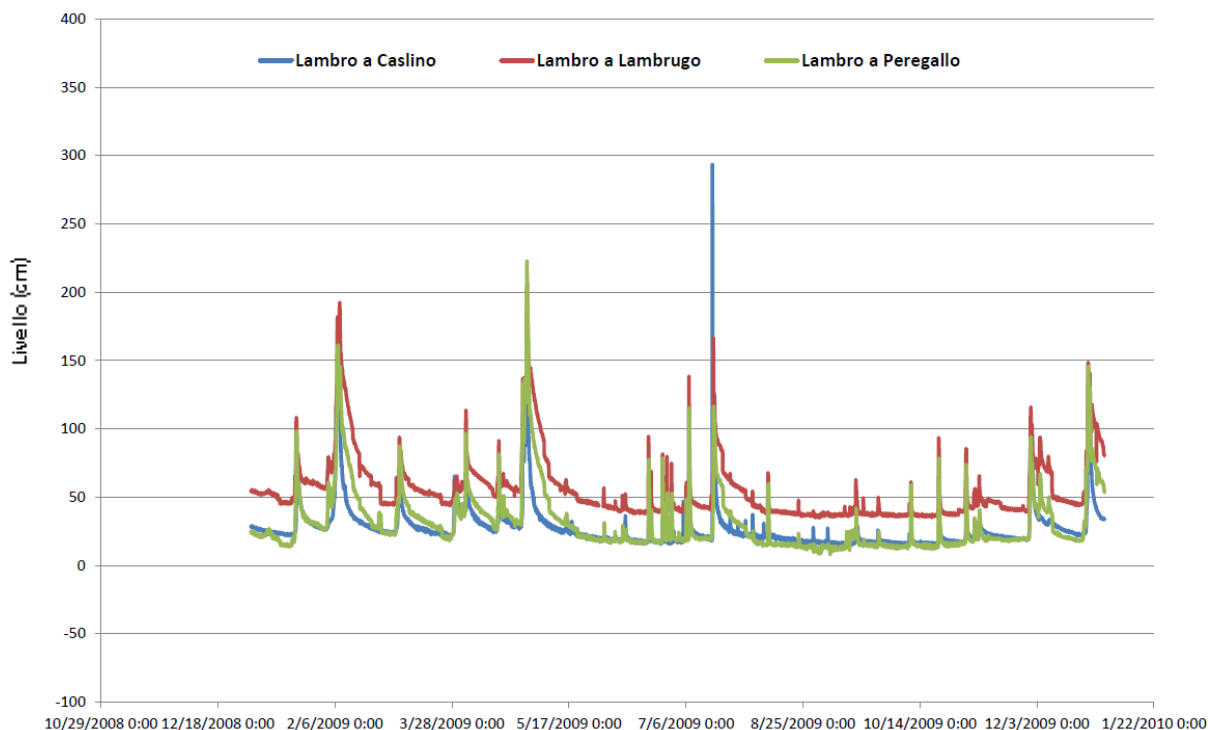


PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

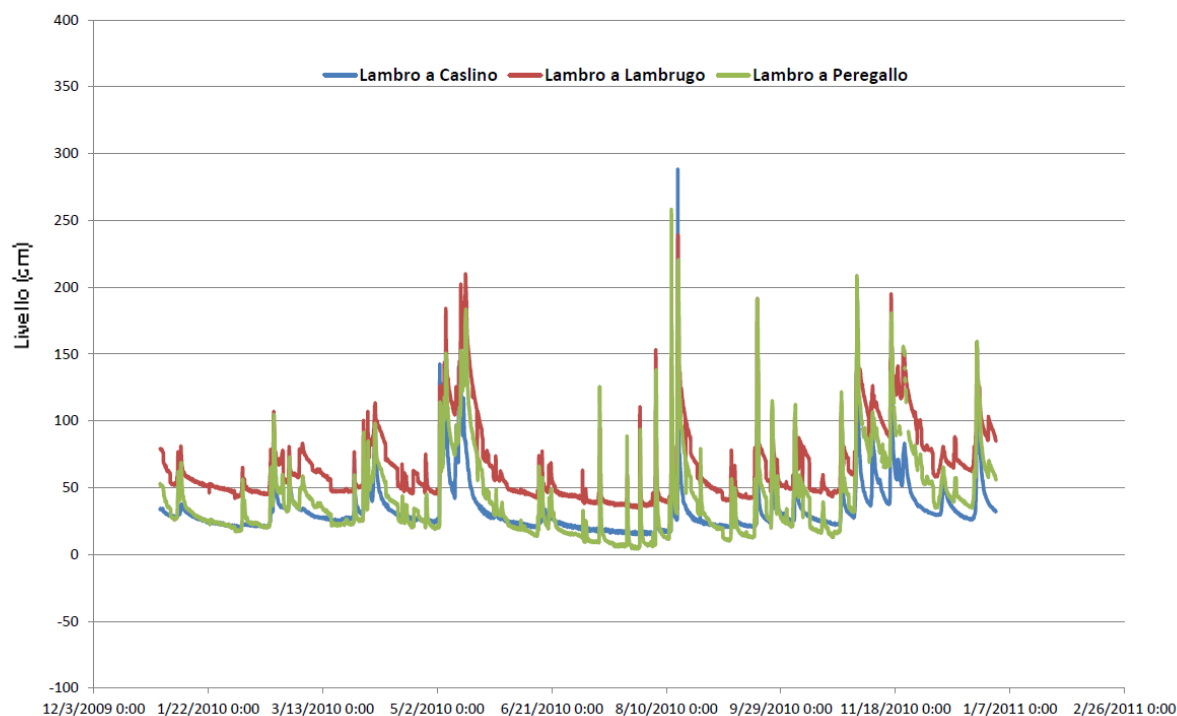
Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo

2009



2010



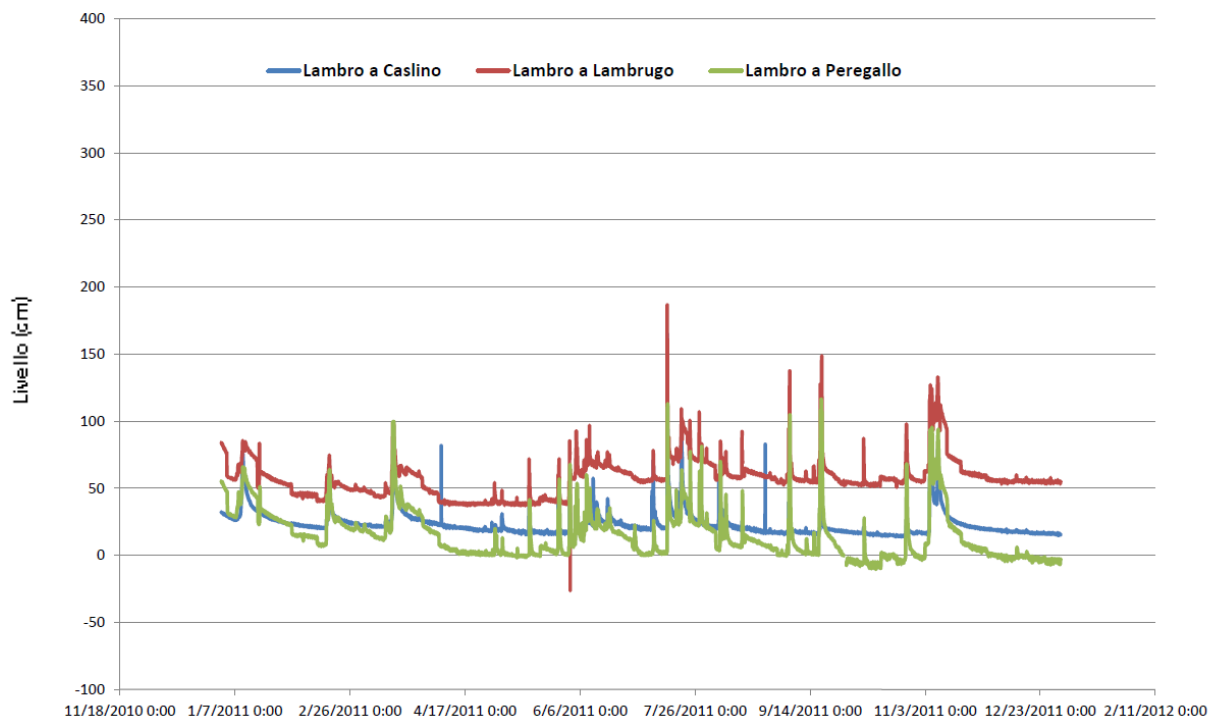


PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

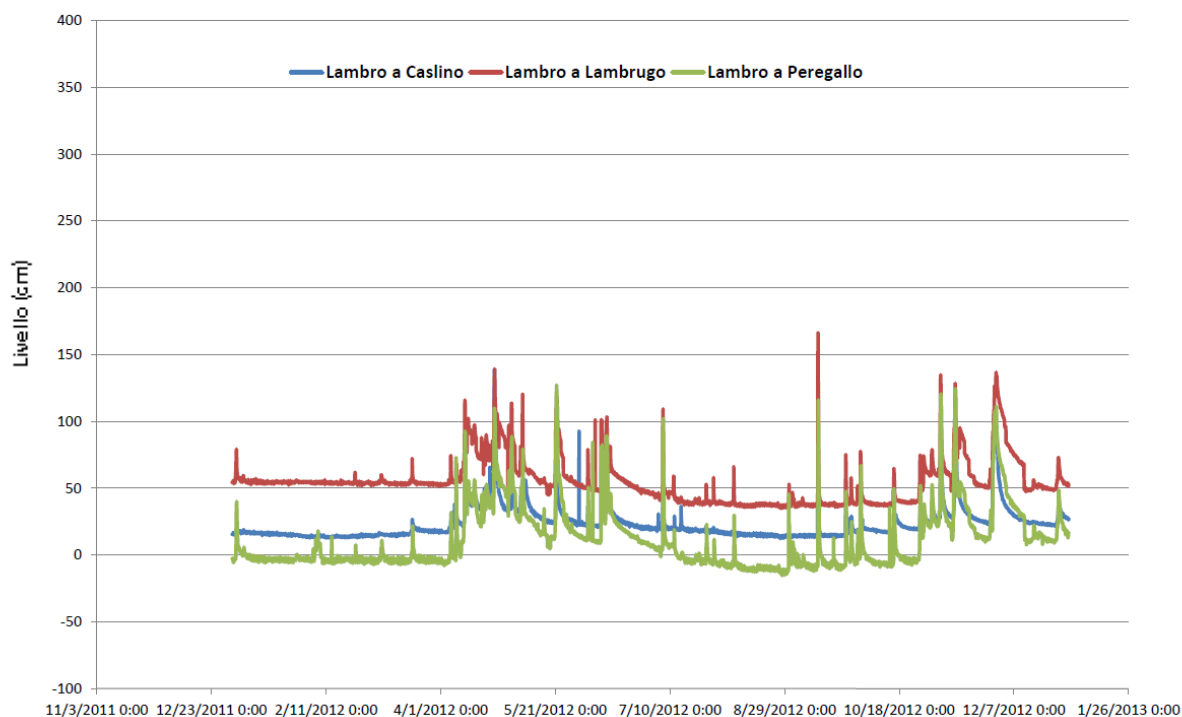
Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo

2011



2012



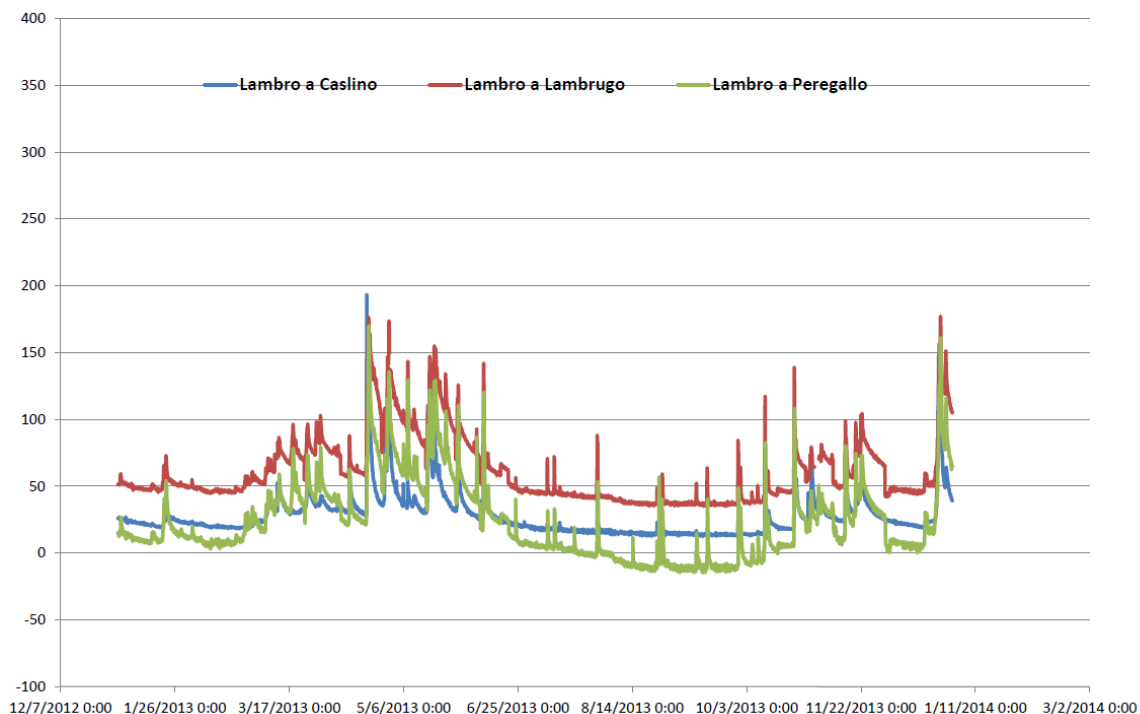


PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

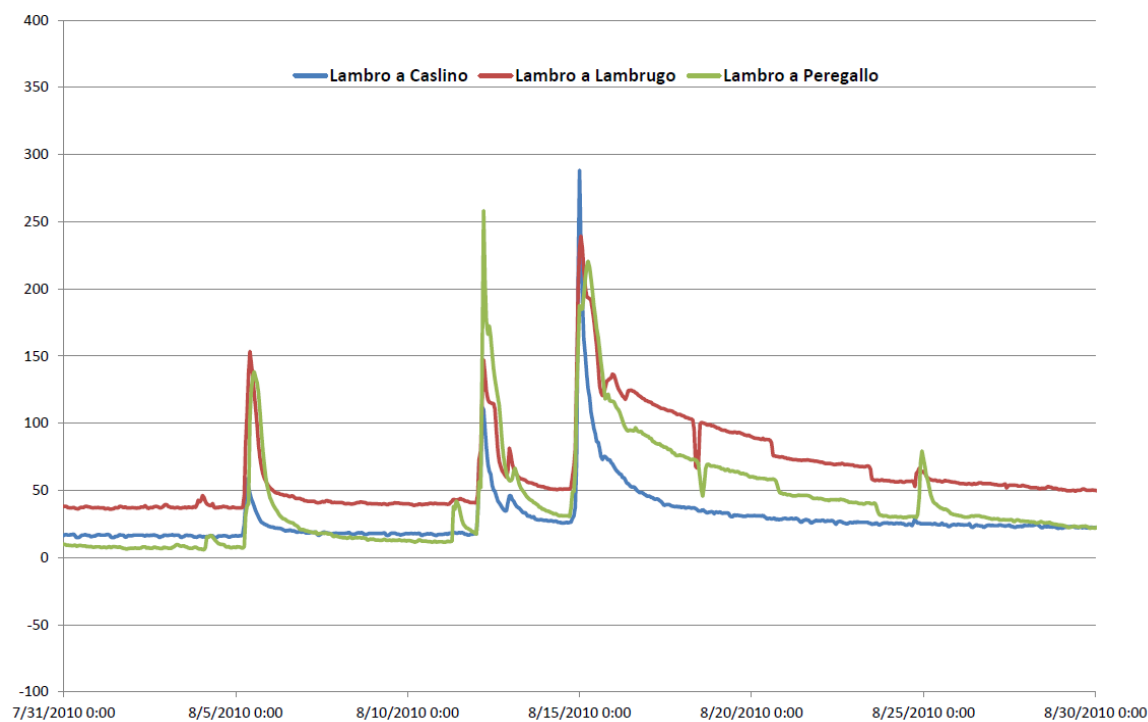
Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo

2013



AGOSTO 2010

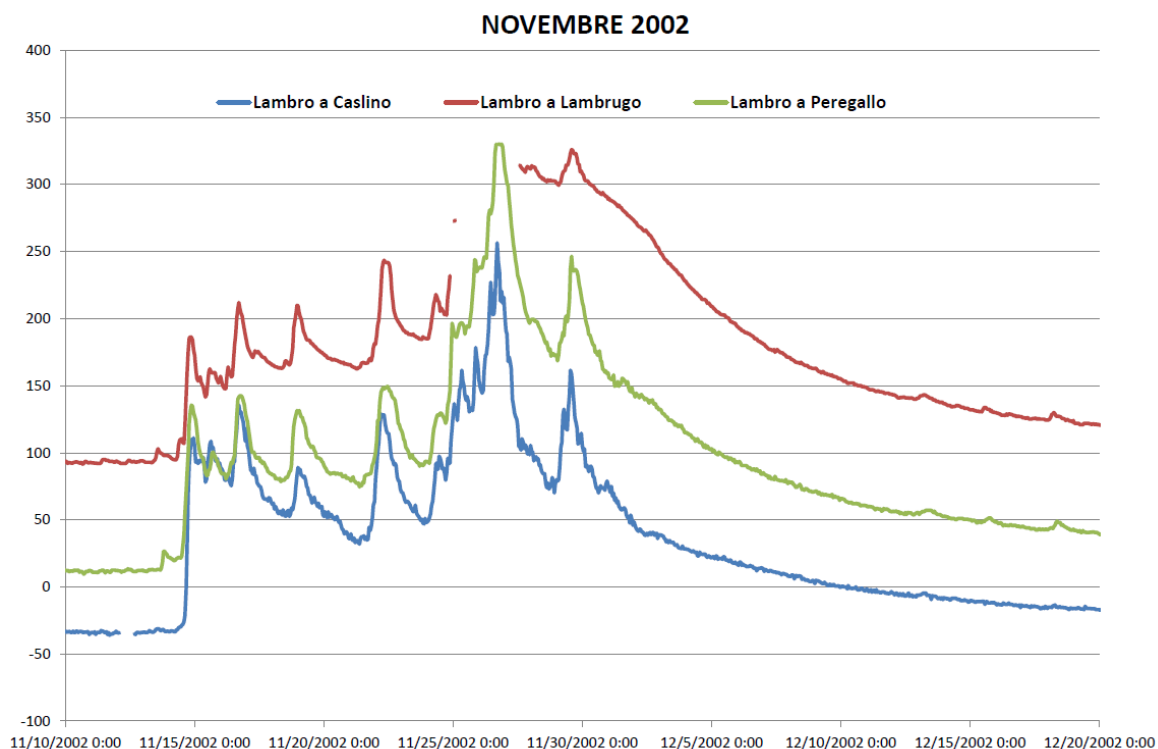




PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo





PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo

SRA
s.r.l.
STUDIO ROSSO
INGEGNERI ASSOCIATI s.r.l.

ALLEGATO 1C

Andamento dei livelli al lago di Pusiano per gli anni 2002 - 2013

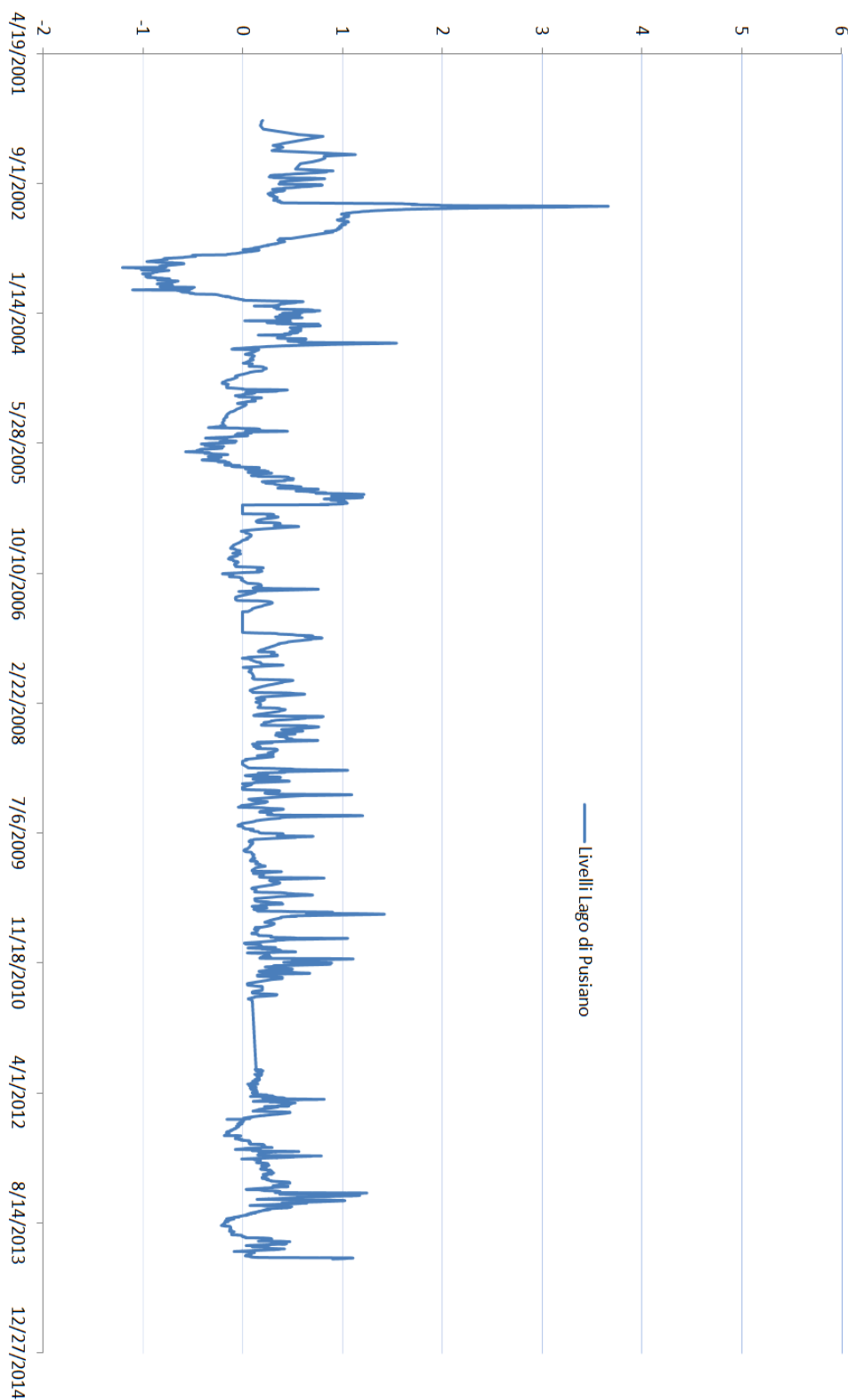


PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo

STUDIO ROSSO
INGEGNERI ASSOCIATI s.r.l.





PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo

SRA
s.r.l.
STUDIO ROSSO
INGEGNERI ASSOCIATI s.r.l.

ALLEGATO 1D

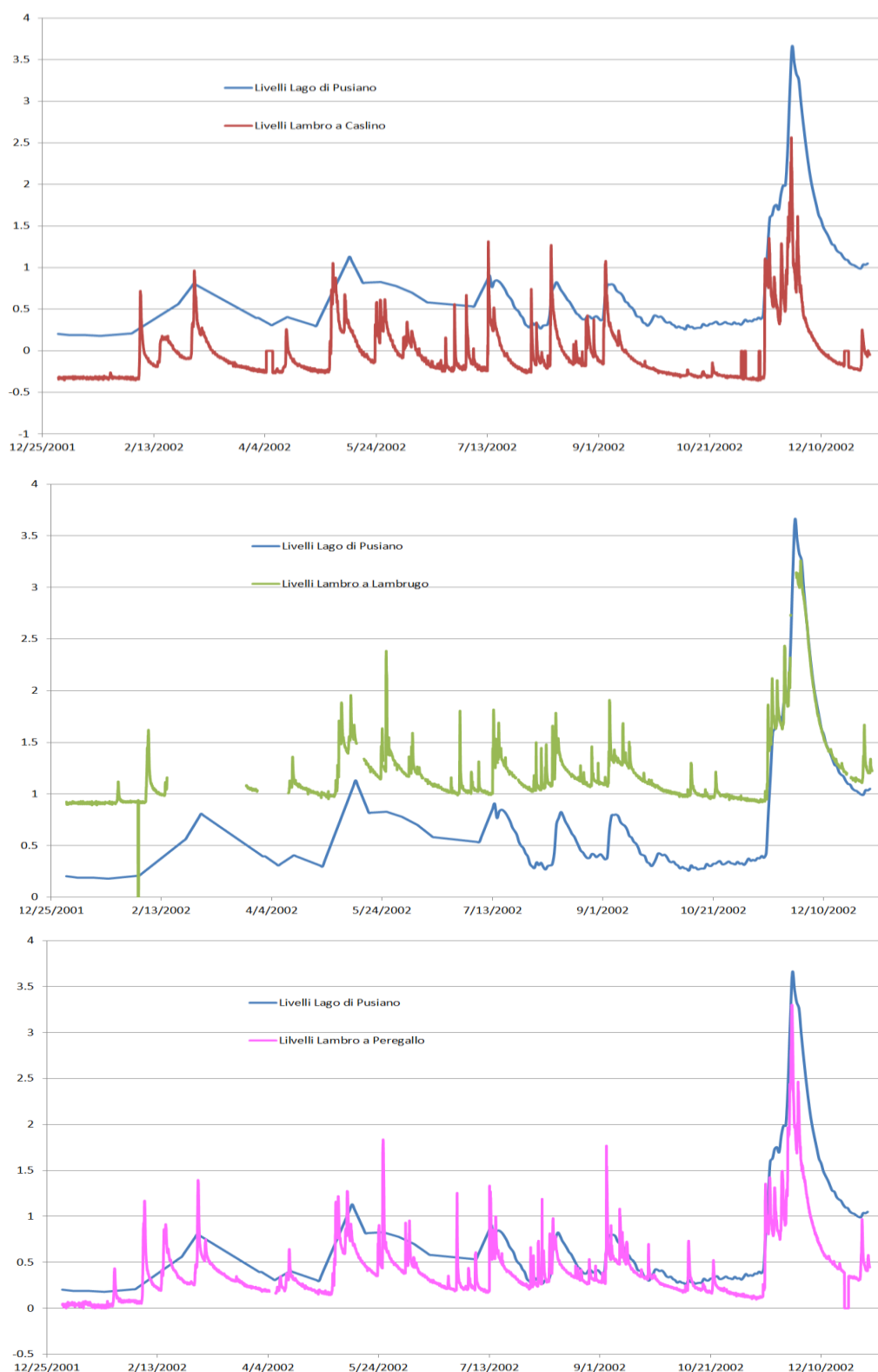
Evento 2002: confronto andamento livelli F. Lambro e Lago di Pusiano



PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo





PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo

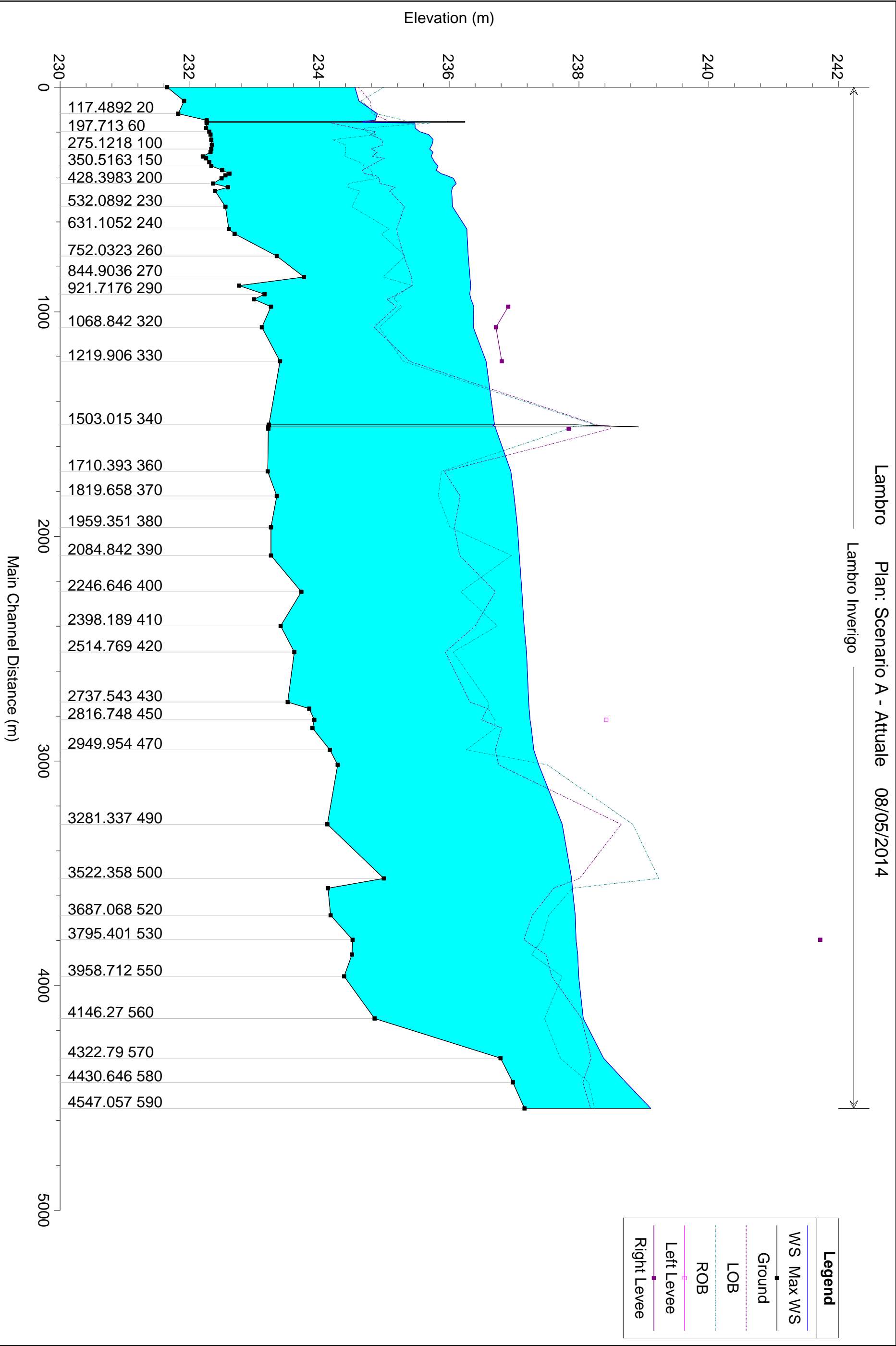
SRA
s.r.l.
STUDIO ROSSO
INGEGNERI ASSOCIATI s.r.l.

ALLEGATO 2

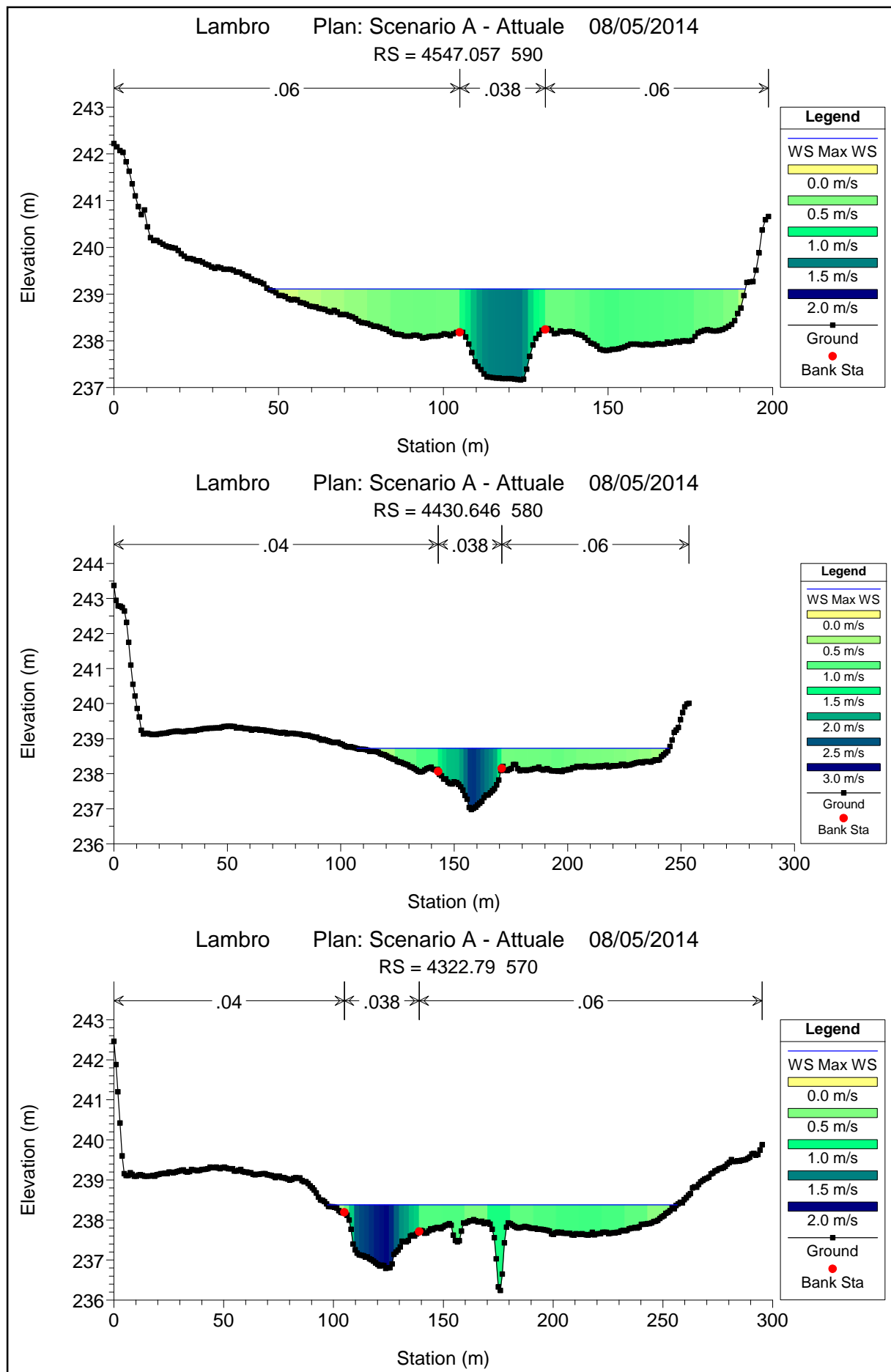
– Risultati simulazione idraulica: scenario A – Stato attuale

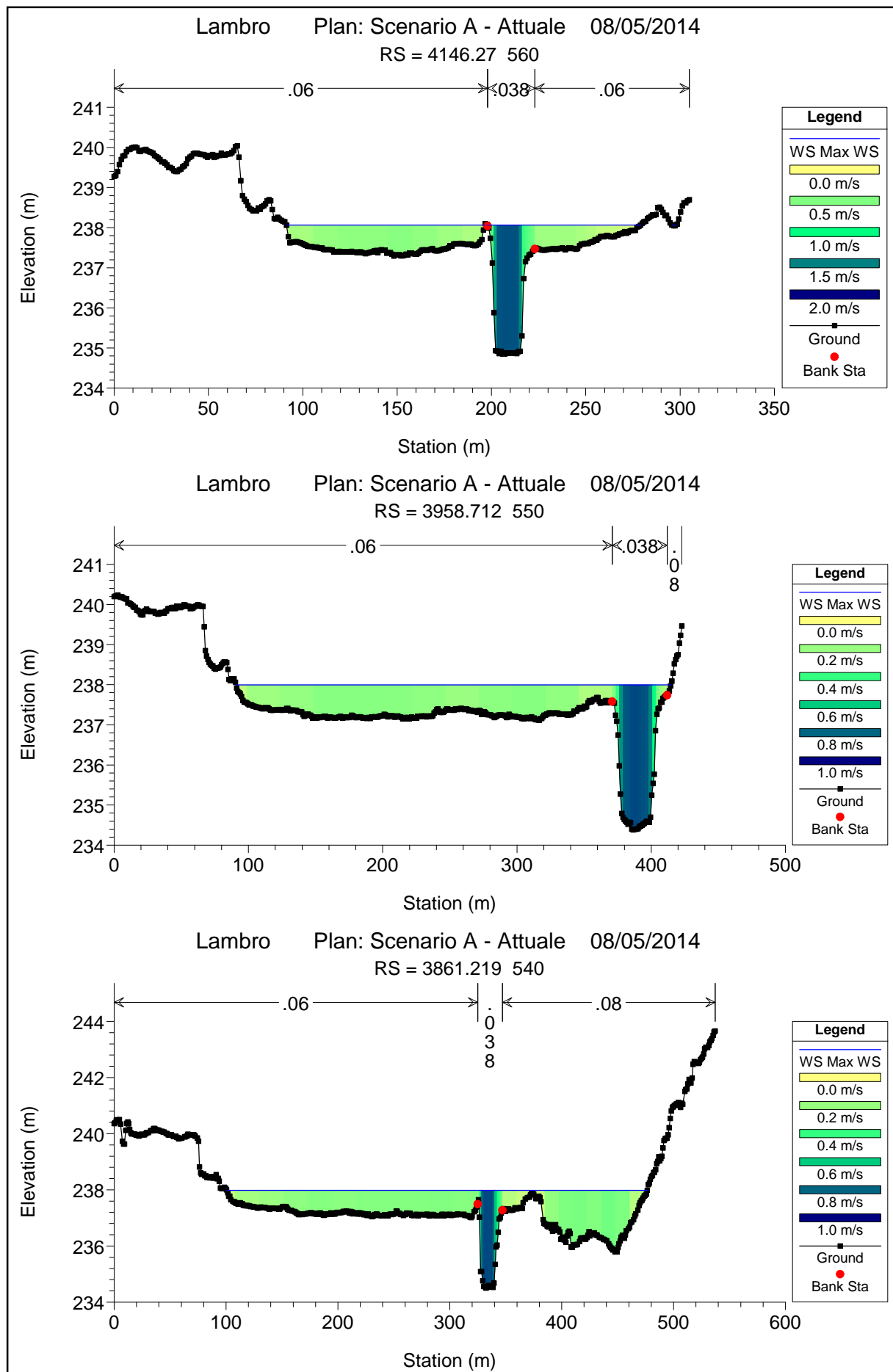
HEC-RAS Plan: A - Attuale River: Lambro Reach: Inverigo Profile: Max WS

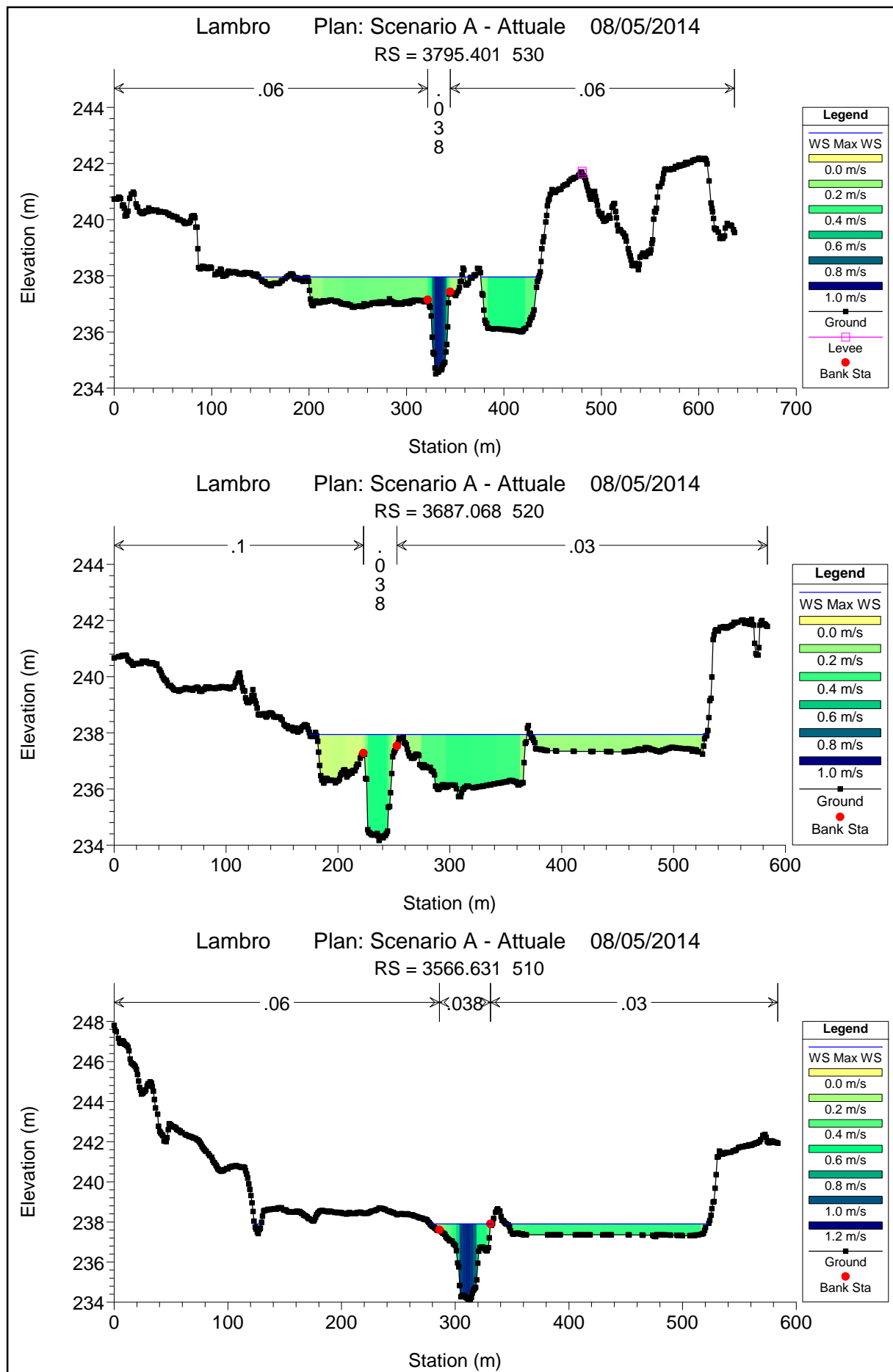
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Inverigo	4547.057 590	Max WS	115.10	237.16	239.11	238.54	239.16	0.001468	1.36	141.82	144.76	0.35
Inverigo	4430.646 580	Max WS	115.08	236.98	238.72	238.60	238.90	0.005583	2.21	83.22	137.62	0.64
Inverigo	4322.79 570	Max WS	115.31	236.79	238.38	238.12	238.47	0.003491	1.67	111.55	159.37	0.50
Inverigo	4146.27 560	Max WS	115.46	234.85	238.07	236.76	238.15	0.001236	1.49	140.81	188.50	0.32
Inverigo	3958.712 550	Max WS	115.74	234.38	238.00	235.93	238.02	0.000277	0.76	291.63	323.92	0.16
Inverigo	3861.219 540	Max WS	116.01	234.50	237.98	236.70	237.99	0.000265	0.74	383.54	375.87	0.15
Inverigo	3795.401 530	Max WS	116.21	234.51	237.95	236.68	237.97	0.000320	0.82	276.97	268.59	0.17
Inverigo	3687.068 520	Max WS	116.54	234.17	237.94	236.37	237.95	0.000069	0.40	397.17	350.37	0.08
Inverigo	3566.631 510	Max WS	116.84	234.13	237.90	236.22	237.93	0.000481	0.86	180.55	237.82	0.20
Inverigo	3522.358 500	Max WS	116.98	234.99	237.89	237.05	237.90	0.000453	0.78	243.77	279.91	0.19
Inverigo	3281.337 490	Max WS	117.21	234.12	237.74	236.24	237.83	0.001115	1.45	134.96	185.50	0.31
Inverigo	3016.292 480	Max WS	117.03	234.28	237.38	237.06	237.53	0.002500	2.02	125.19	198.64	0.45
Inverigo	2949.954 470	Max WS	117.09	234.16	237.30	236.02	237.35	0.000645	1.19	239.81	283.39	0.24
Inverigo	2852.912 460	Max WS	117.29	233.89	237.26	235.81	237.30	0.000533	1.04	275.78	284.28	0.22
Inverigo	2816.748 450	Max WS	117.20	233.92	237.25	236.11	237.28	0.000642	1.10	273.58	279.44	0.23
Inverigo	2766.457 440	Max WS	117.34	233.84	237.23	236.07	237.25	0.000289	0.77	385.99	392.25	0.16
Inverigo	2737.543 430	Max WS	117.43	233.51	237.23	235.25	237.24	0.000200	0.69	430.68	473.23	0.14
Inverigo	2514.769 420	Max WS	117.83	233.61	237.19	235.47	237.21	0.000223	0.77	389.21	284.58	0.14
Inverigo	2398.189 410	Max WS	117.99	233.40	237.15	235.67	237.19	0.000545	1.14	252.29	199.46	0.22
Inverigo	2246.646 400	Max WS	118.05	233.72	237.12	235.25	237.15	0.000322	0.85	256.72	203.75	0.17
Inverigo	2084.842 390	Max WS	118.29	233.25	237.08	235.41	237.11	0.000412	0.91	263.19	232.59	0.19
Inverigo	1959.351 380	Max WS	118.63	233.25	237.05	235.22	237.07	0.000192	0.72	390.00	272.88	0.13
Inverigo	1819.658 370	Max WS	118.98	233.34	237.00	235.49	237.03	0.000430	1.00	225.35	355.34	0.20
Inverigo	1710.393 360	Max WS	119.19	233.20	236.95	235.34	236.99	0.000474	1.12	213.92	298.39	0.21
Inverigo	1520.357 350	Max WS	119.64	233.21	236.72		236.85	0.001438	1.60	74.82	35.01	0.35
Inverigo	1511.685 345		Mult Open									
Inverigo	1503.015 340	Max WS	119.64	233.22	236.70	235.54	236.85	0.001752	1.72	69.62	34.18	0.38
Inverigo	1219.906 330	Max WS	119.90	233.39	236.57	235.58	236.60	0.000532	1.10	231.30	171.96	0.22
Inverigo	1068.842 320	Max WS	120.04	233.11	236.37	235.07	236.55	0.001455	1.89	66.56	84.22	0.37
Inverigo	977.0419 310	Max WS	120.24	233.25	236.38	234.88	236.44	0.000610	1.15	135.55	97.15	0.24
Inverigo	944.2654 300	Max WS	120.32	232.99	236.34	235.03	236.43	0.000913	1.48	124.66	128.30	0.29
Inverigo	921.7176 290	Max WS	120.36	233.15	236.32	234.82	236.41	0.000861	1.44	116.26	243.40	0.28
Inverigo	883.1097 280	Max WS	120.44	232.76	236.33	235.39	236.36	0.000540	1.05	296.98	279.92	0.22
Inverigo	844.9036 270	Max WS	120.51	233.76	236.32	235.41	236.34	0.000510	0.98	303.08	258.70	0.21
Inverigo	752.0323 260	Max WS	120.70	233.34	236.29	235.37	236.31	0.000336	0.85	361.52	308.18	0.17
Inverigo	652.2289 250	Max WS	120.89	232.69	236.27	234.47	236.29	0.000171	0.67	449.47	353.99	0.13
Inverigo	631.1052 240	Max WS	120.95	232.60	236.27	234.54	236.28	0.000155	0.63	488.79	391.06	0.12
Inverigo	532.0892 230	Max WS	120.94	232.55	236.05	235.07	236.44	0.003290	2.75	43.91	473.33	0.54
Inverigo	461.4436 220	Max WS	132.29	232.39	236.04	234.62	236.21	0.001412	1.86	70.95	440.35	0.36
Inverigo	444.964 210	Max WS	132.40	232.59	236.05	234.31	236.19	0.000985	1.67	79.12	422.37	0.31
Inverigo	428.3983 200	Max WS	132.51	232.36	236.11	233.92	236.18	0.000461	1.19	110.93	370.49	0.21
Inverigo	405.128 190	Max WS	132.64	232.49	236.06	234.22	236.17	0.000740	1.43	92.74	296.00	0.27
Inverigo	392.612 180	Max WS	132.71	232.55	235.95	234.44	236.16	0.001444	1.99	66.68	275.83	0.37
Inverigo	384.5591 170	Max WS	132.78	232.61	235.87	234.72	236.14	0.002149	2.29	57.95	277.23	0.44
Inverigo	368.98 160	Max WS	132.91	232.50	235.80	234.72	236.10	0.002475	2.44	54.41	227.52	0.47
Inverigo	350.5163 150	Max WS	133.07	232.33	235.83	234.61	236.06	0.001998	2.15	62.00	218.46	0.43
Inverigo	333.7652 140	Max WS	133.22	232.30	235.77	234.46	236.03	0.001941	2.24	59.57	193.72	0.42
Inverigo	316.6304 130	Max WS	133.39	232.25	235.74	234.40	235.99	0.001909	2.22	60.06	158.51	0.42
Inverigo	307.8002 120	Max WS	133.49	232.20	235.72	234.46	235.98	0.001985	2.25	59.42	150.84	0.43
Inverigo	288.6484 110	Max WS	133.60	232.32	235.75	234.42	235.94	0.001563	1.96	68.17	150.20	0.38
Inverigo	275.1218 100	Max WS	133.68	232.33	235.70	234.52	235.92	0.001868	2.08	64.14	146.52	0.42
Inverigo	256.351 90	Max WS	133.76	232.34	235.73	234.39	235.89	0.001323	1.75	76.52	136.16	0.35
Inverigo	233.2564 80	Max WS	133.83	232.33	235.75	233.96	235.86	0.000777	1.48	90.57	132.55	0.27
Inverigo	210.6123 70	Max WS	133.95	232.32	235.68	234.22	235.84	0.001298	1.76	76.20	121.00	0.35
Inverigo	197.713 60	Max WS	134.06	232.30	235.54	234.42	235.82	0.002457	2.32	57.75	109.22	0.47
Inverigo	181.8634 50	Max WS	134.20	232.25	235.48	234.51	235.78	0.002674	2.44	55.03	98.67	0.49
Inverigo	159.4336 40	Max WS	134.34	232.26	235.47	234.48	235.72	0.002483	2.22	60.61	69.37	0.47
Inverigo	153.24 35	Bridge										
Inverigo	147.0547 30	Max WS	134.34	232.26	234.86	234.08	235.18	0.003895	2.52	53.21	26.30	0.57
Inverigo	117.4892 20	Max WS	134.57	231.82	234.89	233.76	235.07	0.002292	1.96	102.72	181.72	0.44
Inverigo	60.7408 10	Max WS	134.88	231.91	234.61	234.53	234.96	0.005474	2.79	80.63	169.41	0.66
Inverigo	0 0	Max WS	135.04	231.65	234.54	233.91	234.60	0.001201	1.37	207.84	236.88	0.32

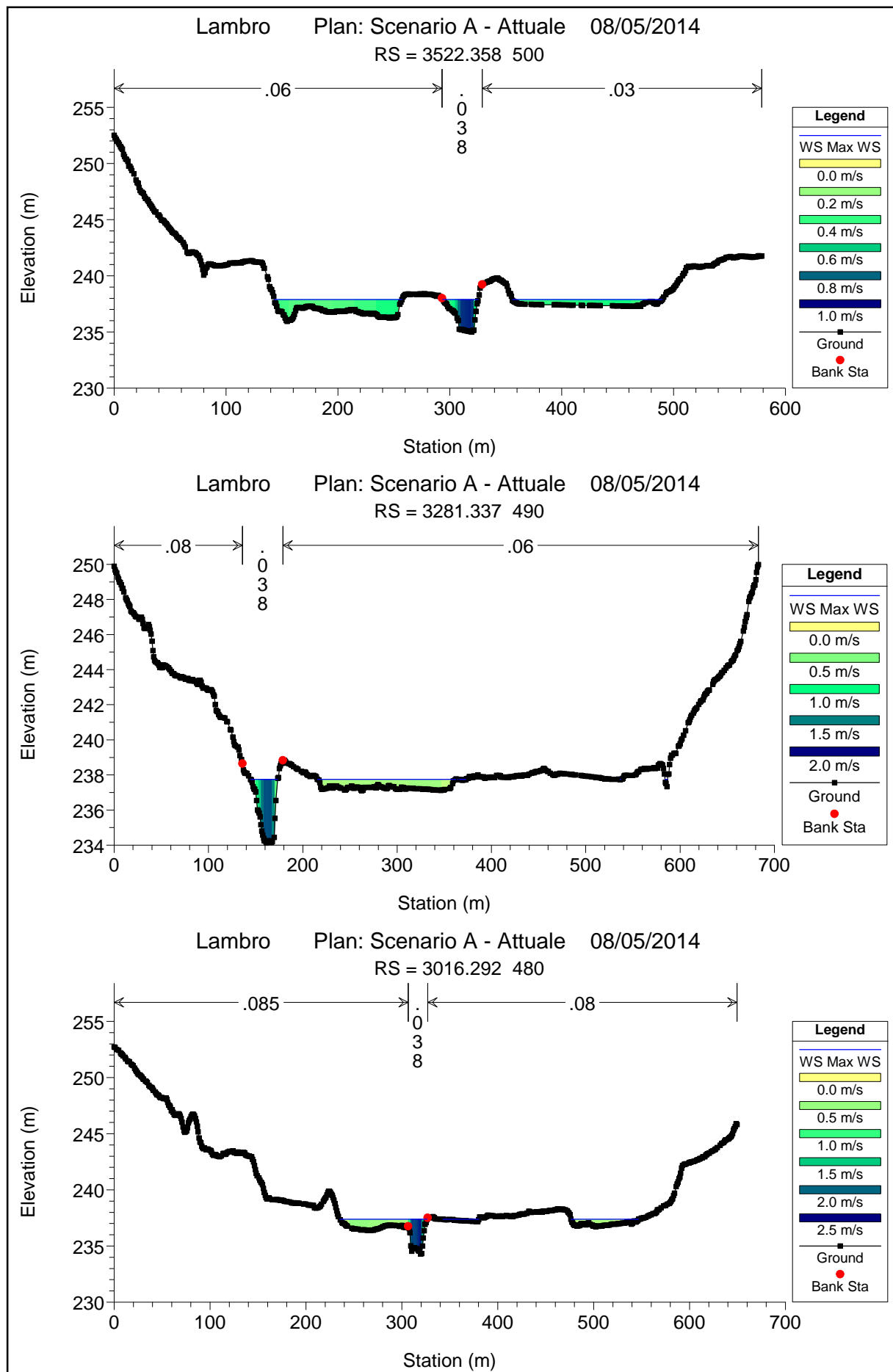


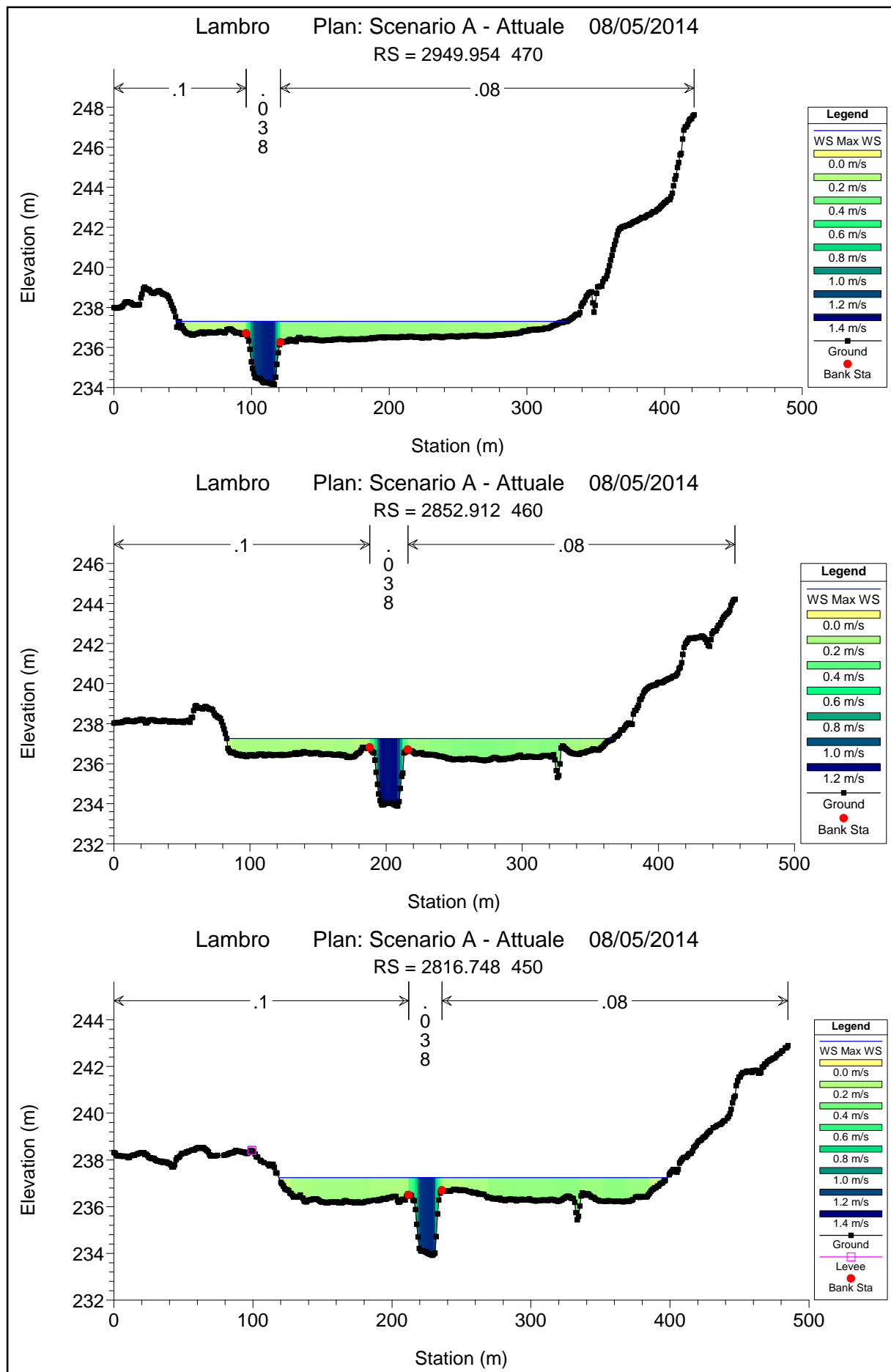
Main Channel Distance (m)

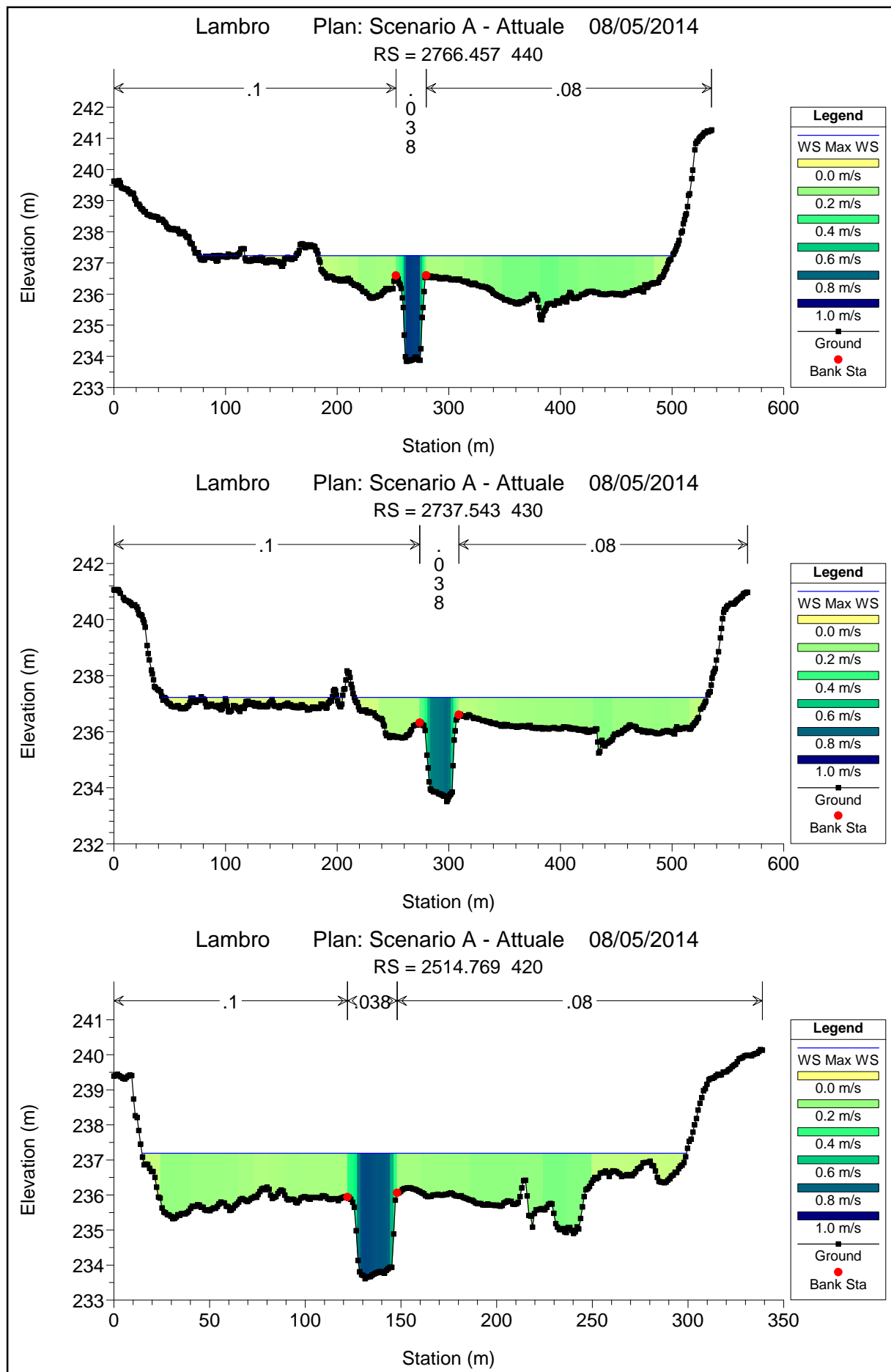


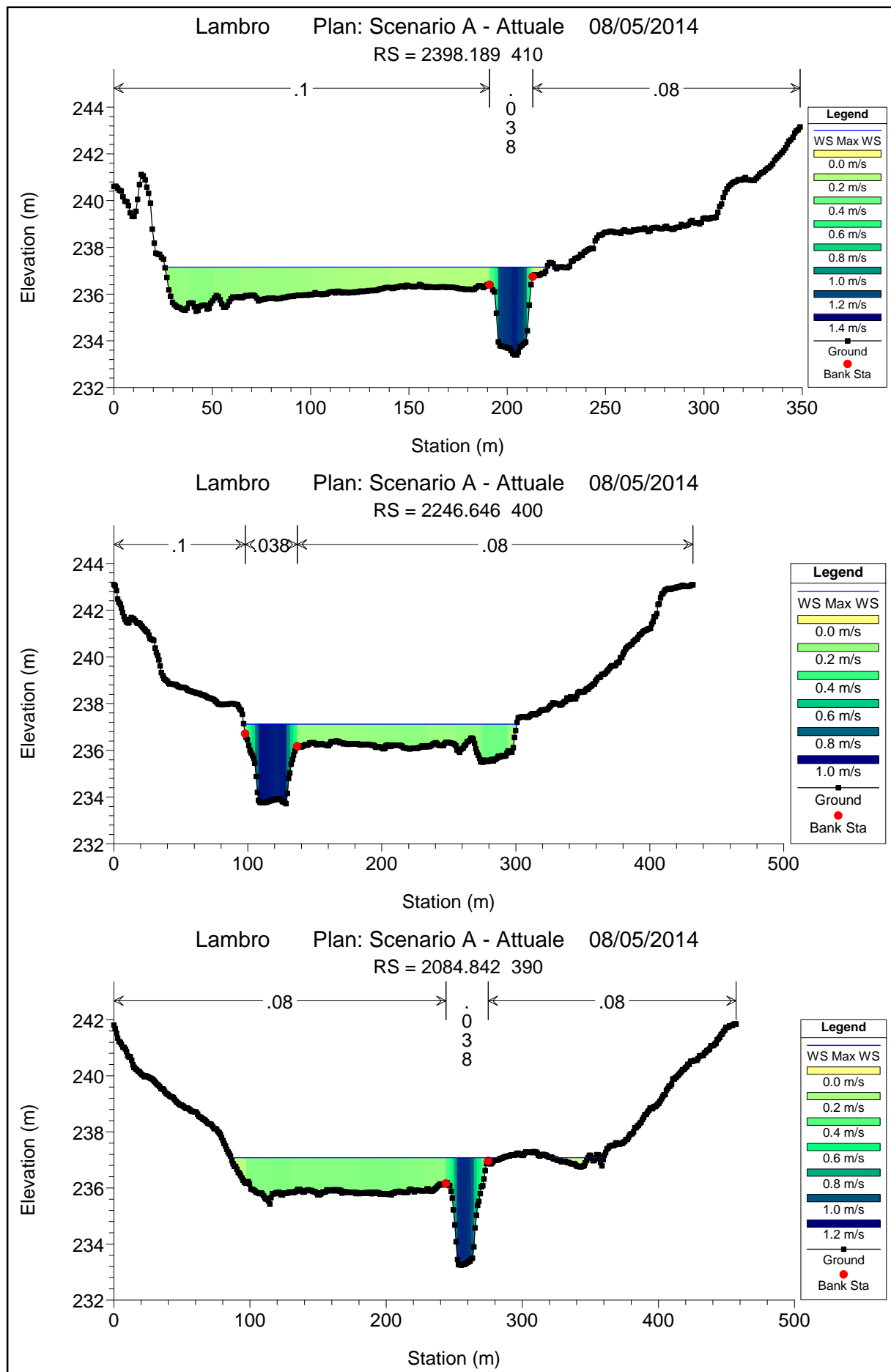


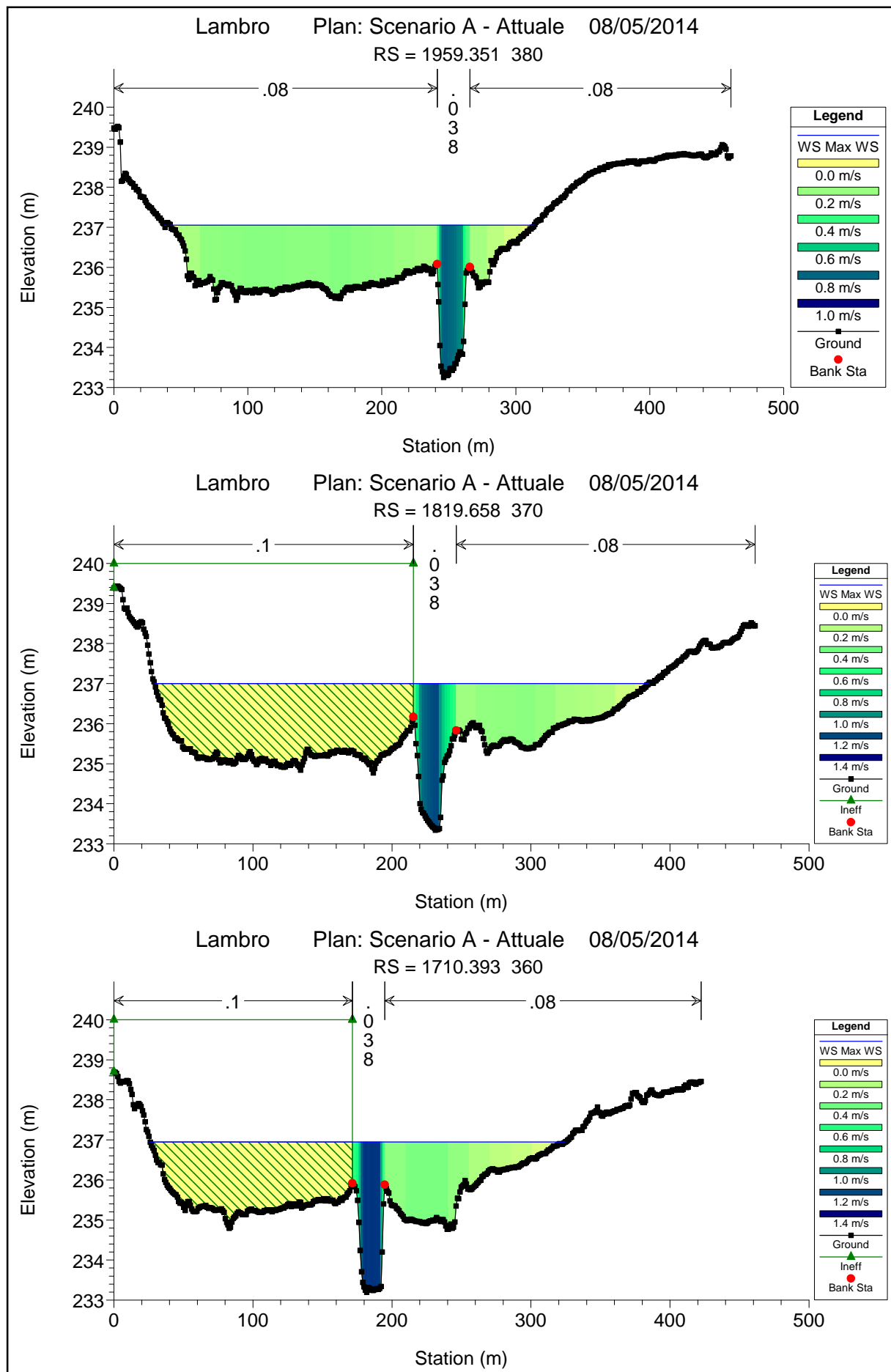


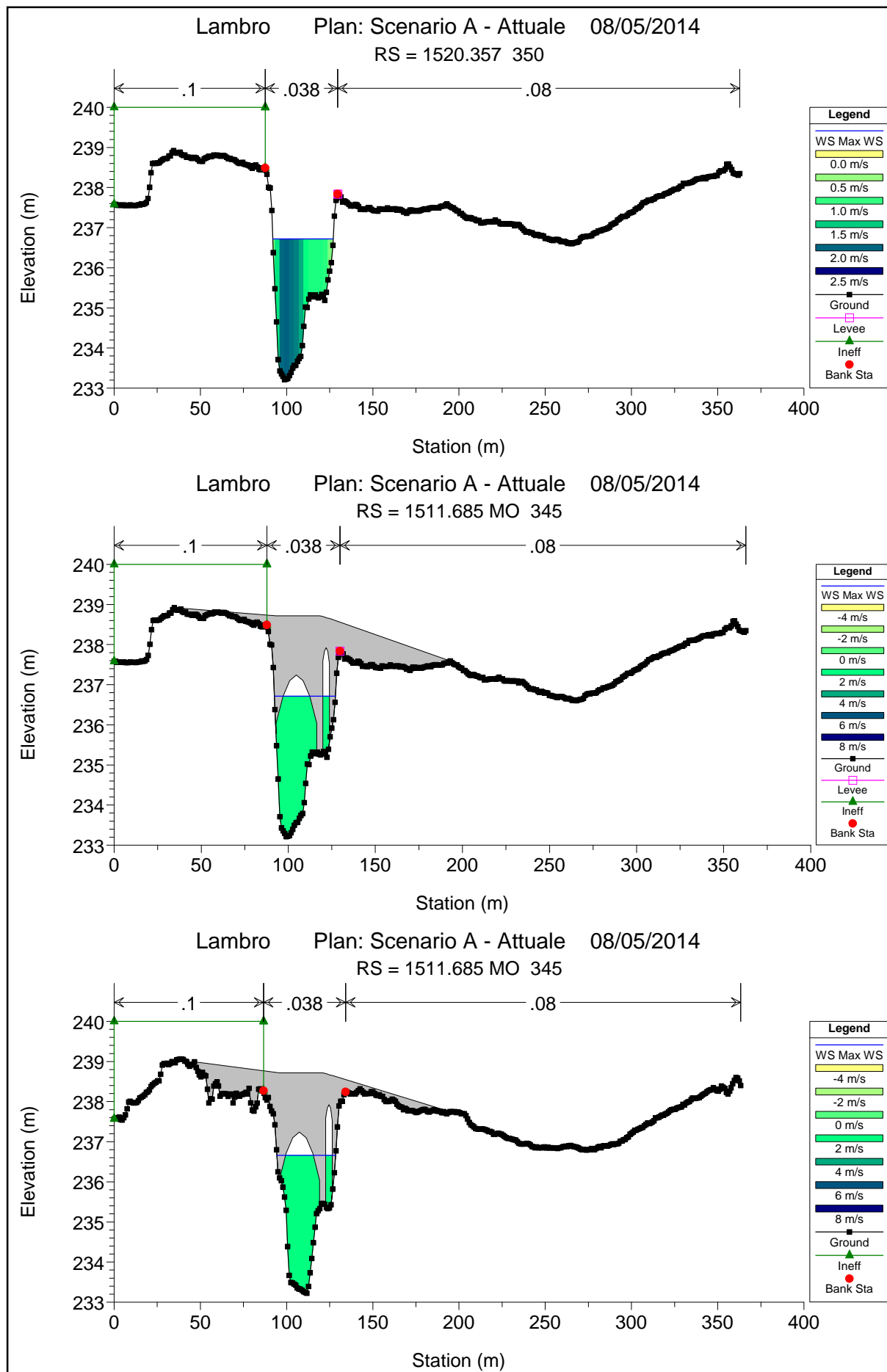


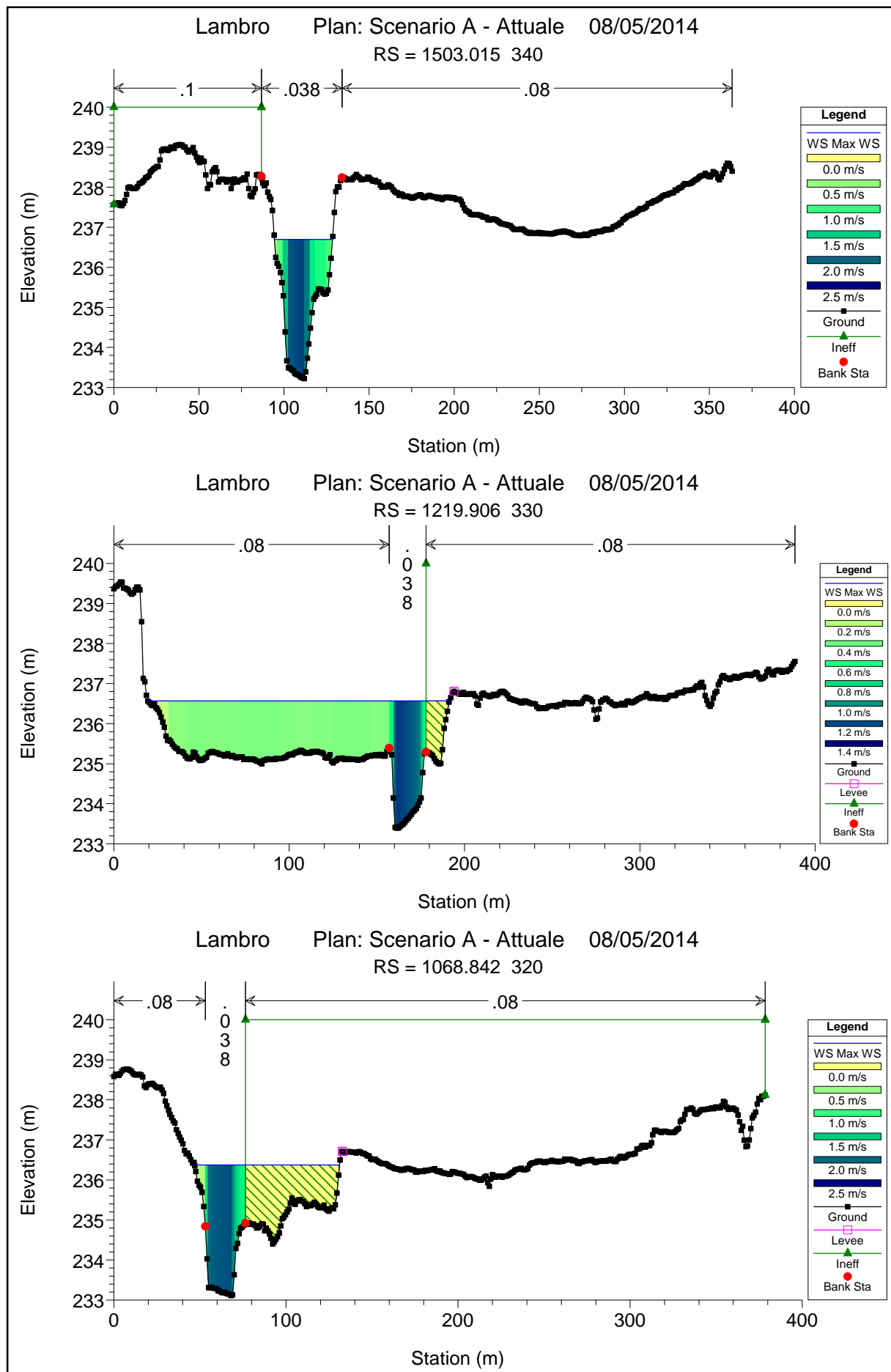


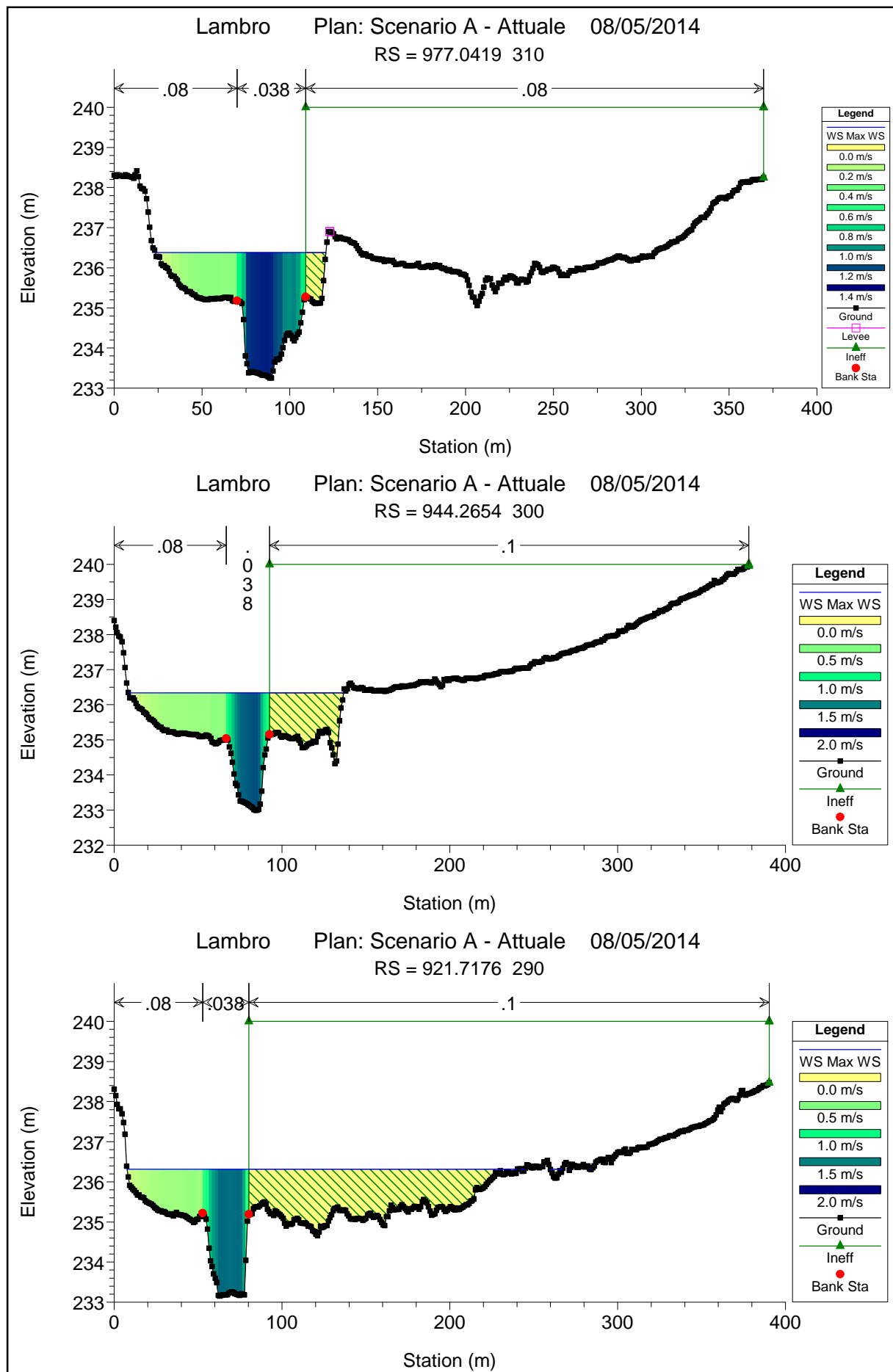


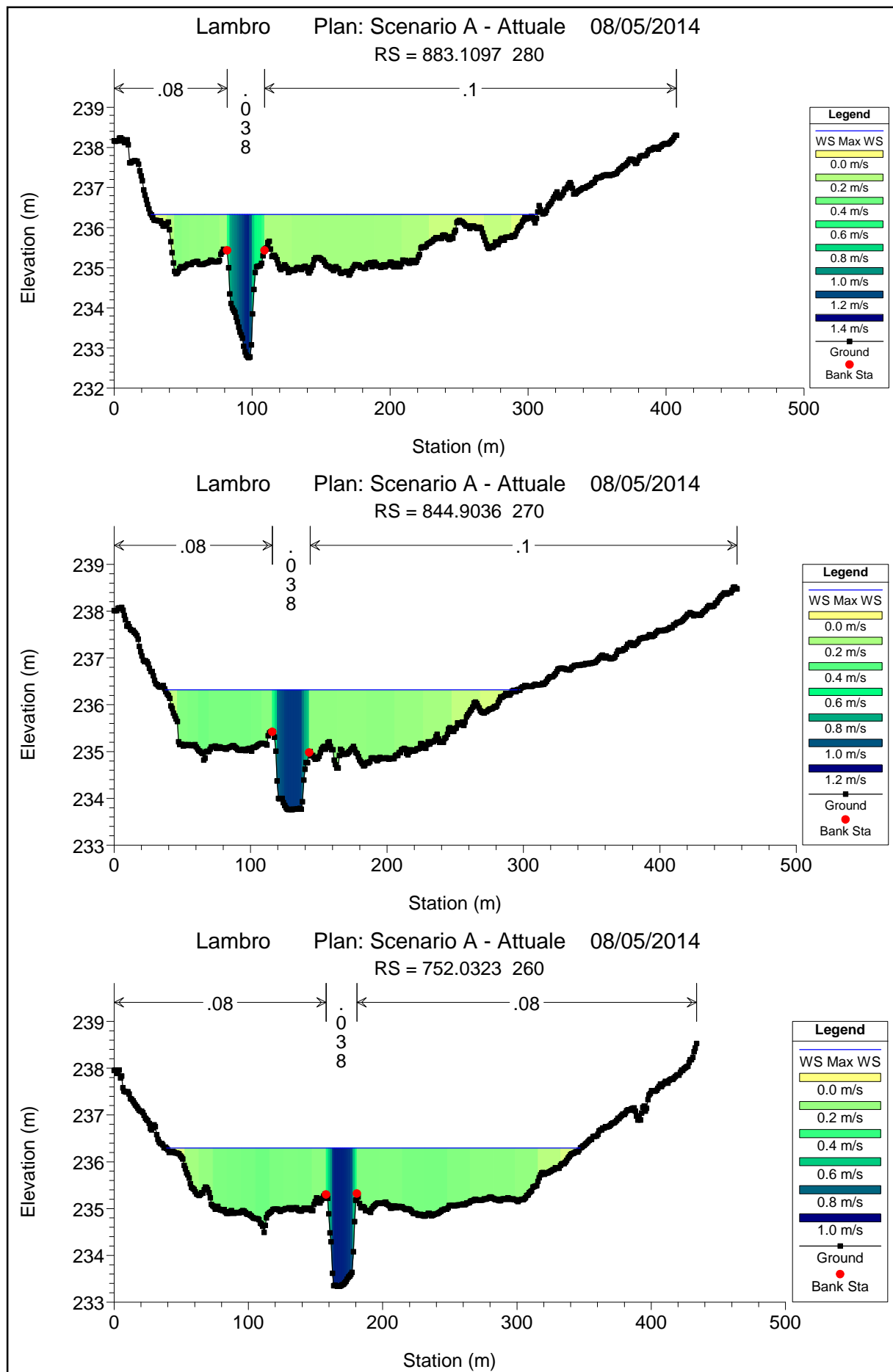


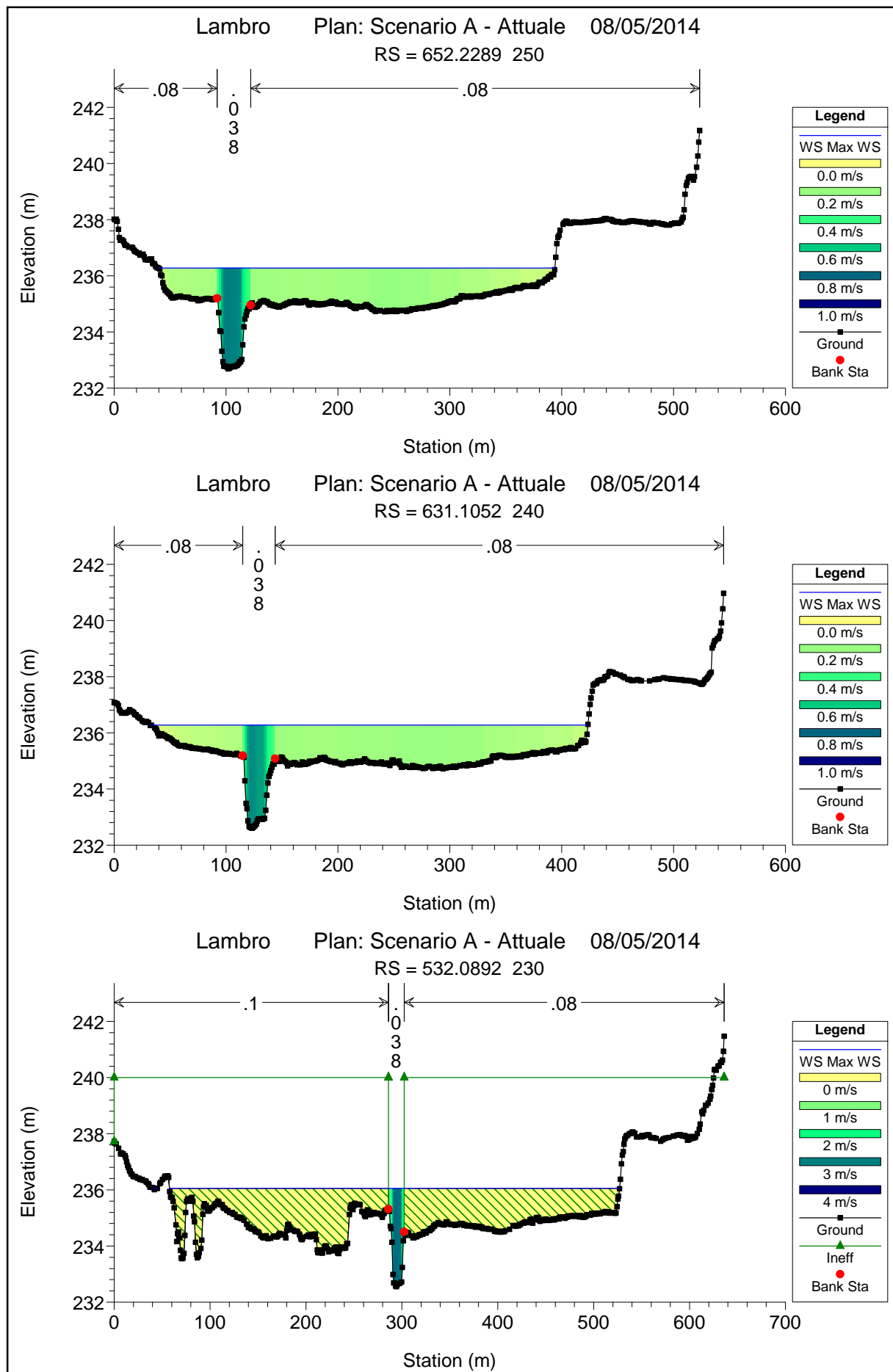


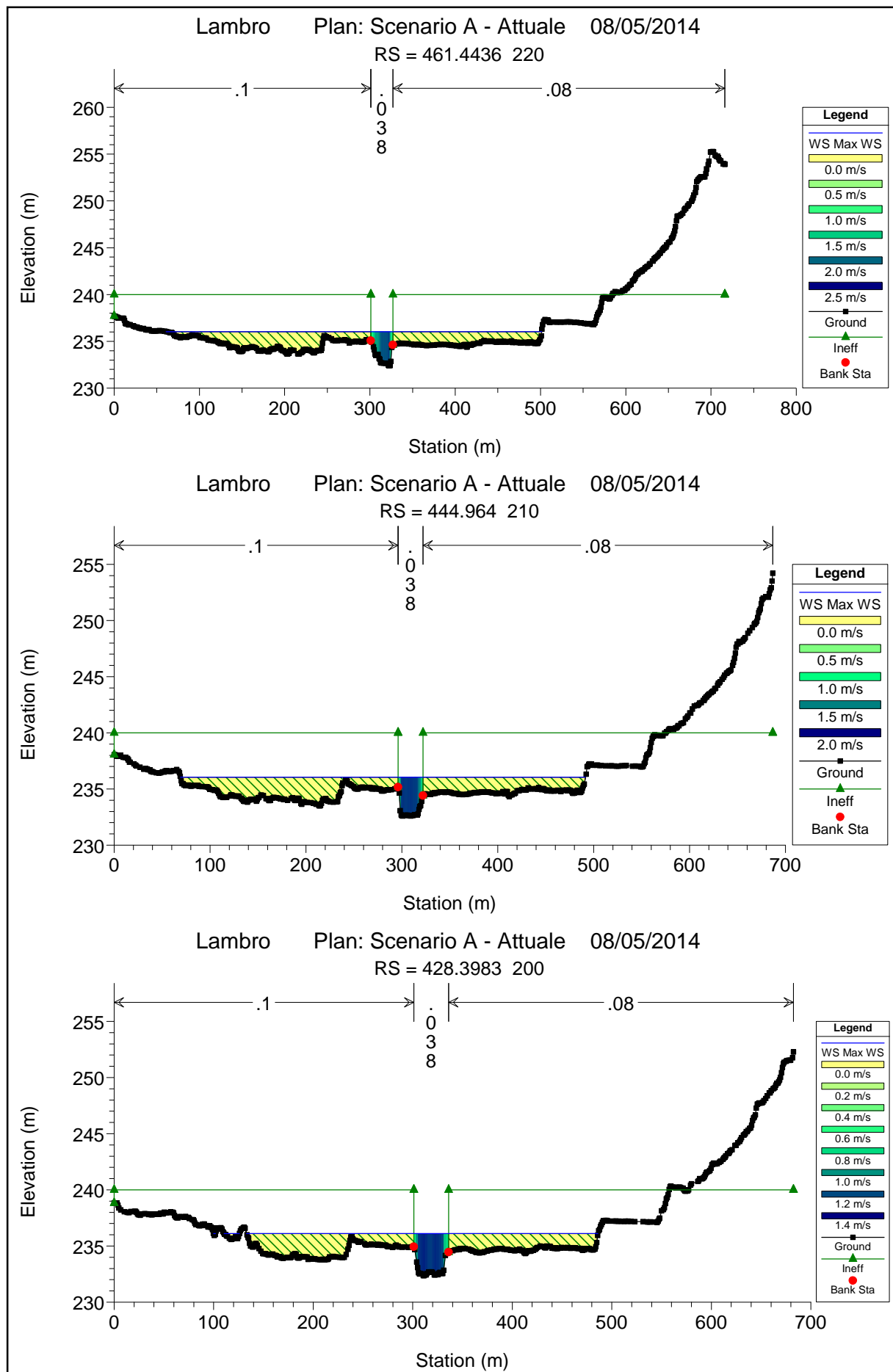


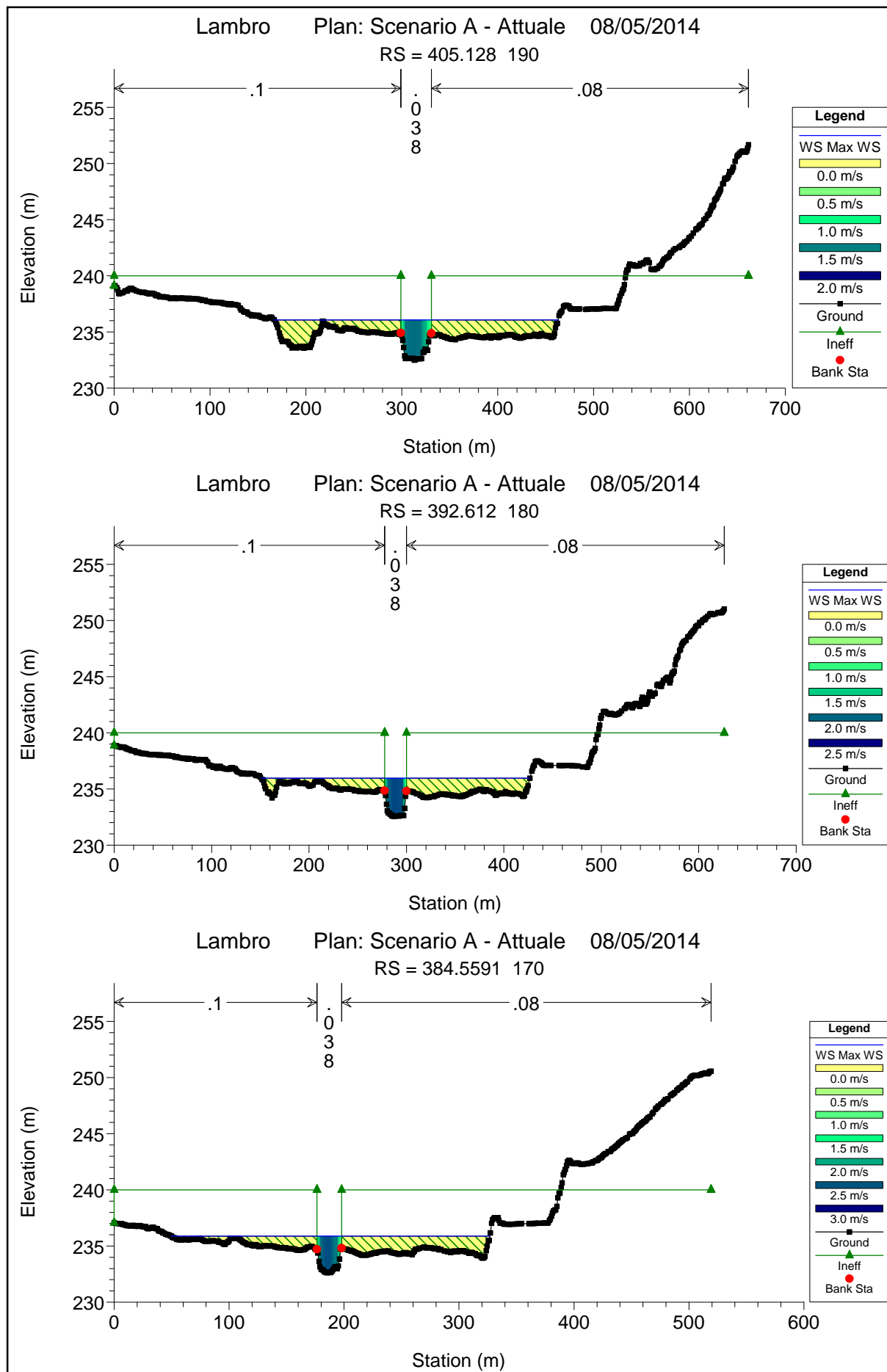


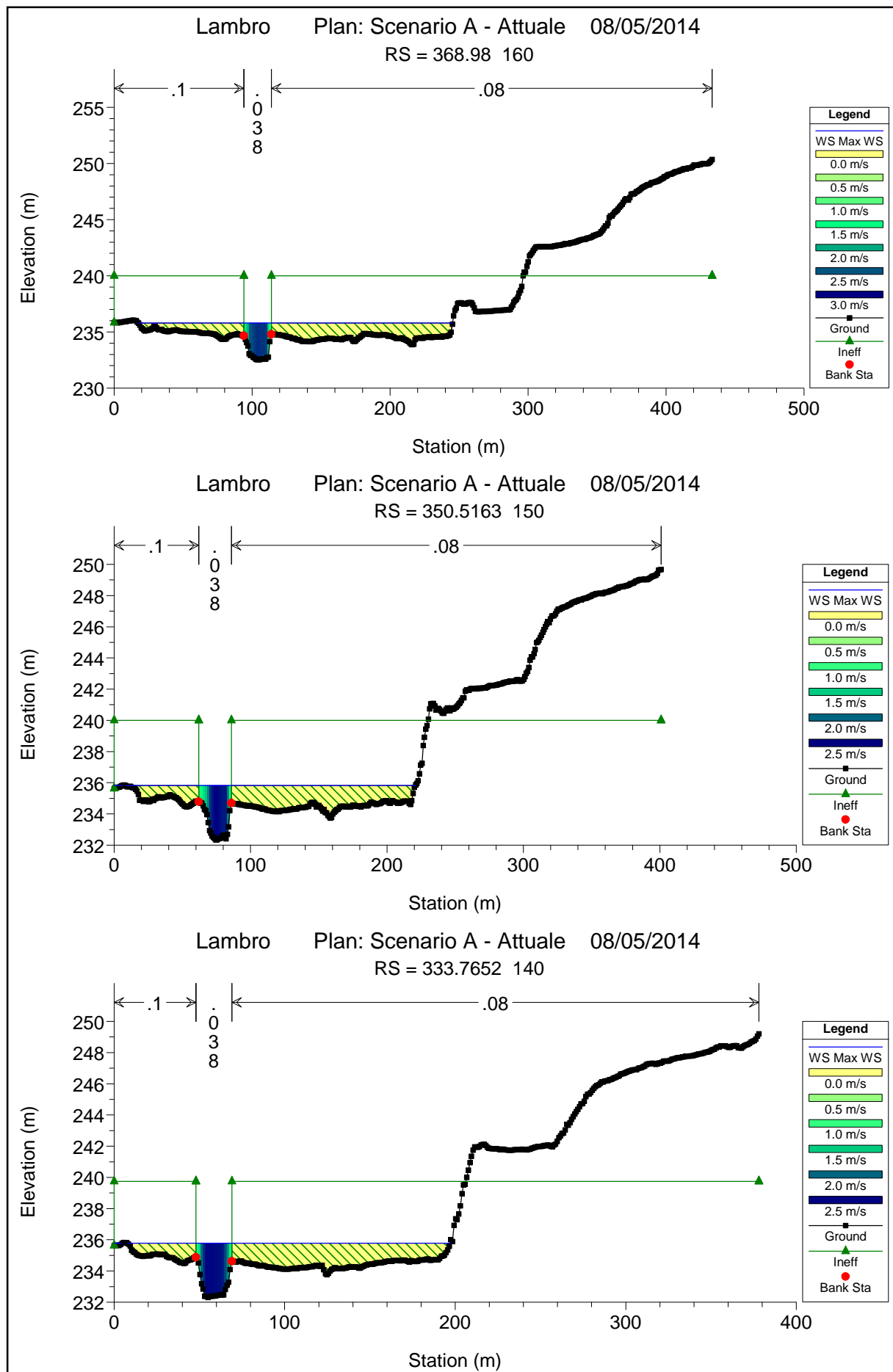


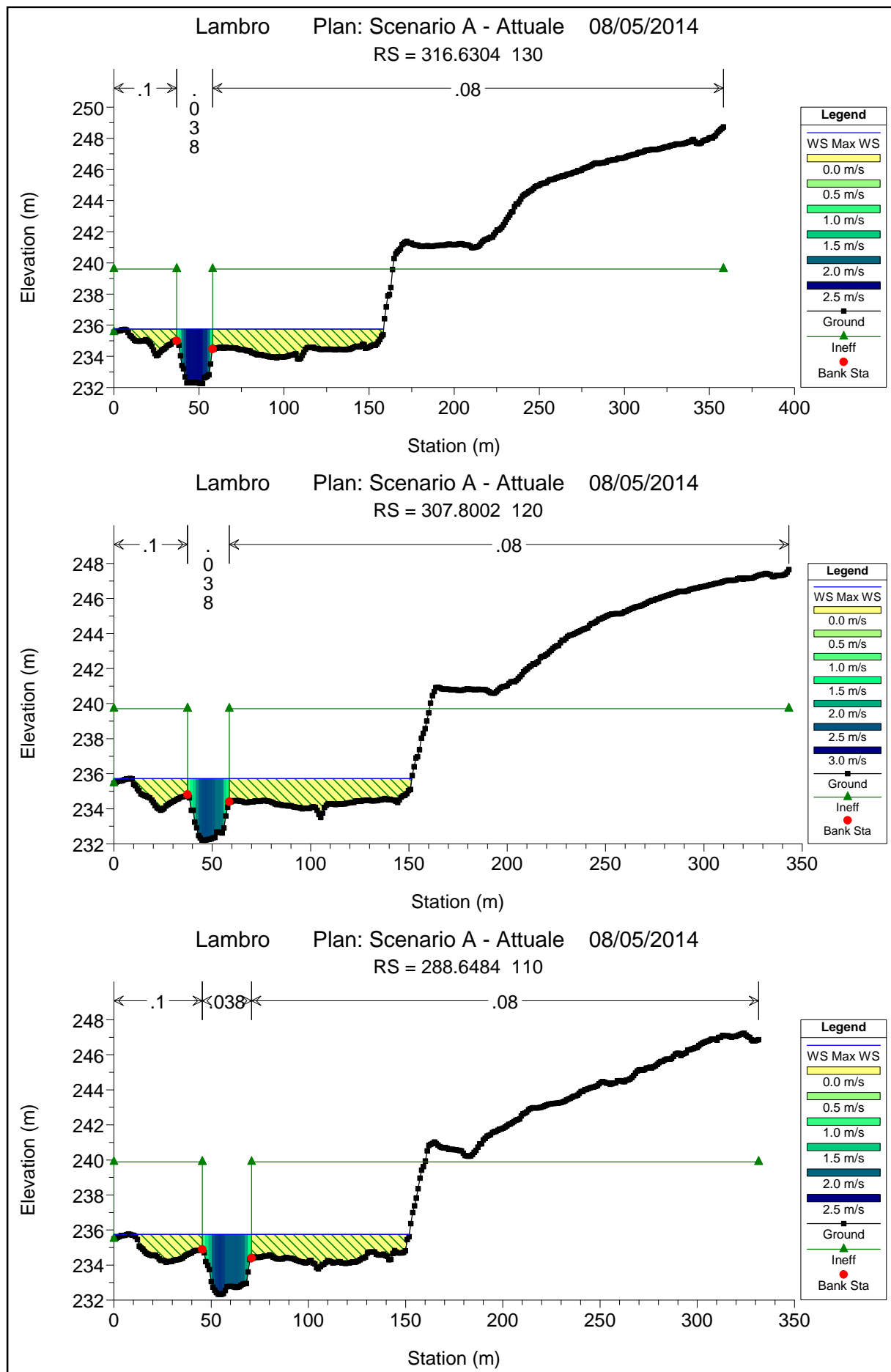


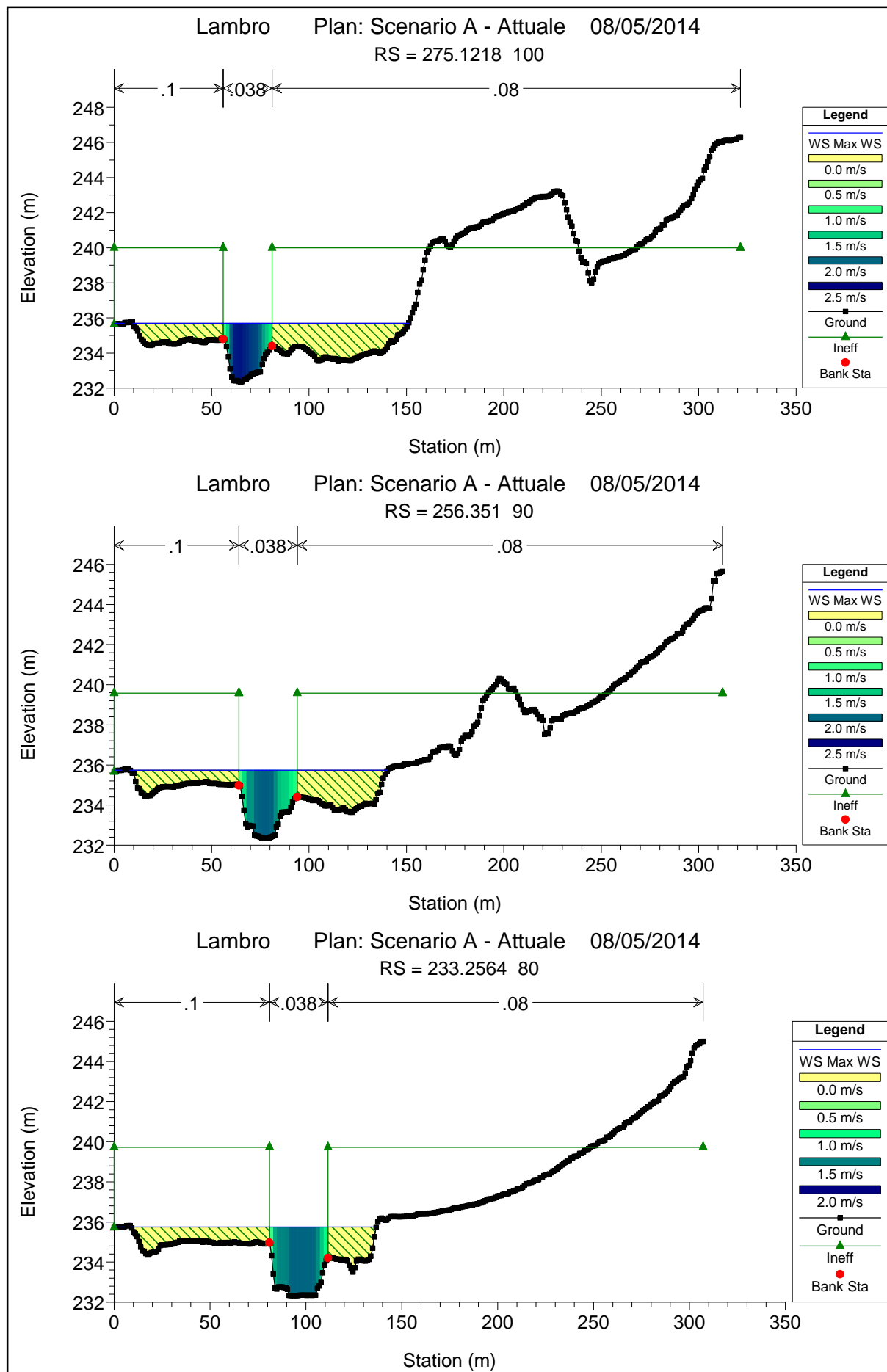


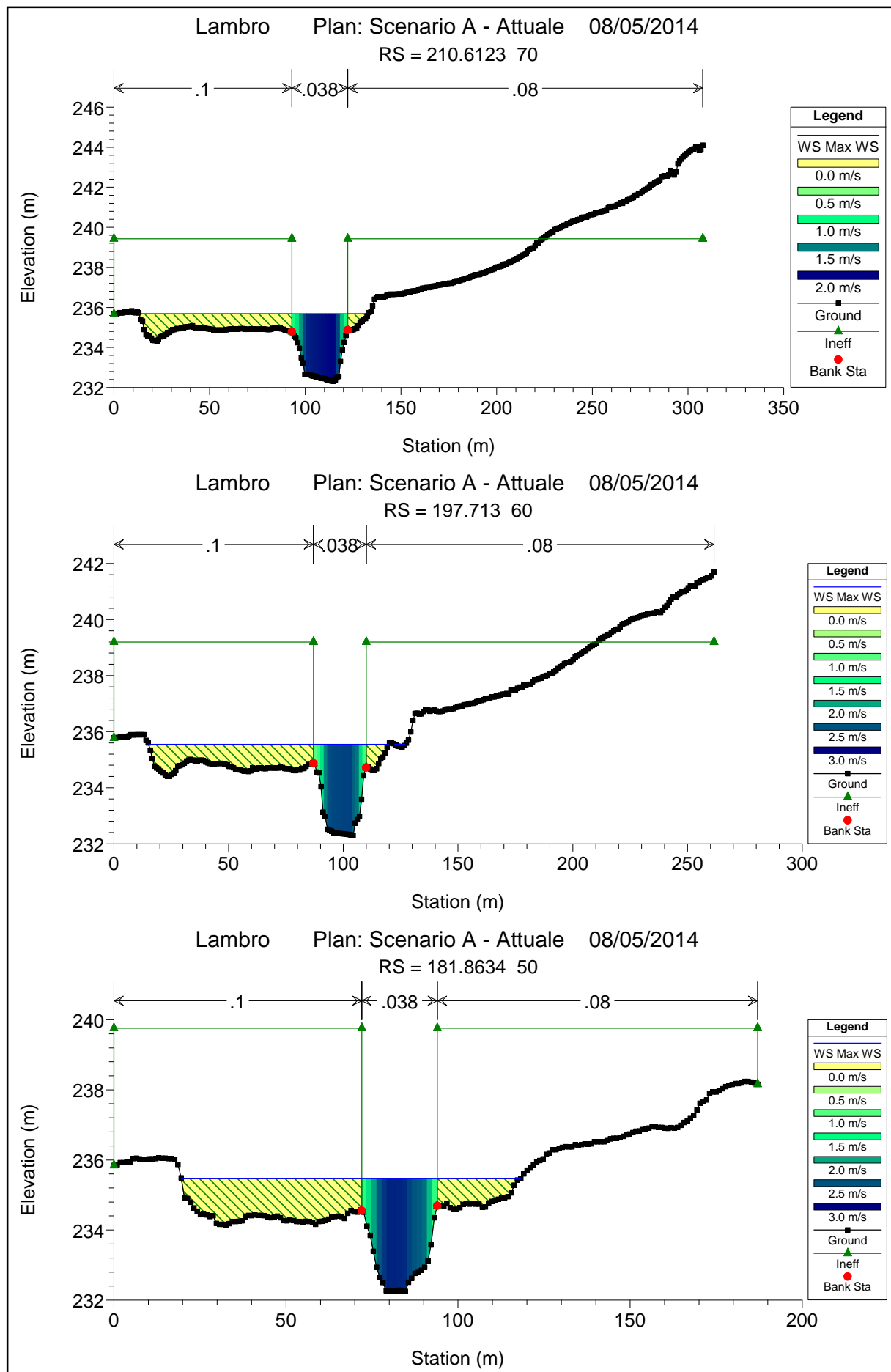


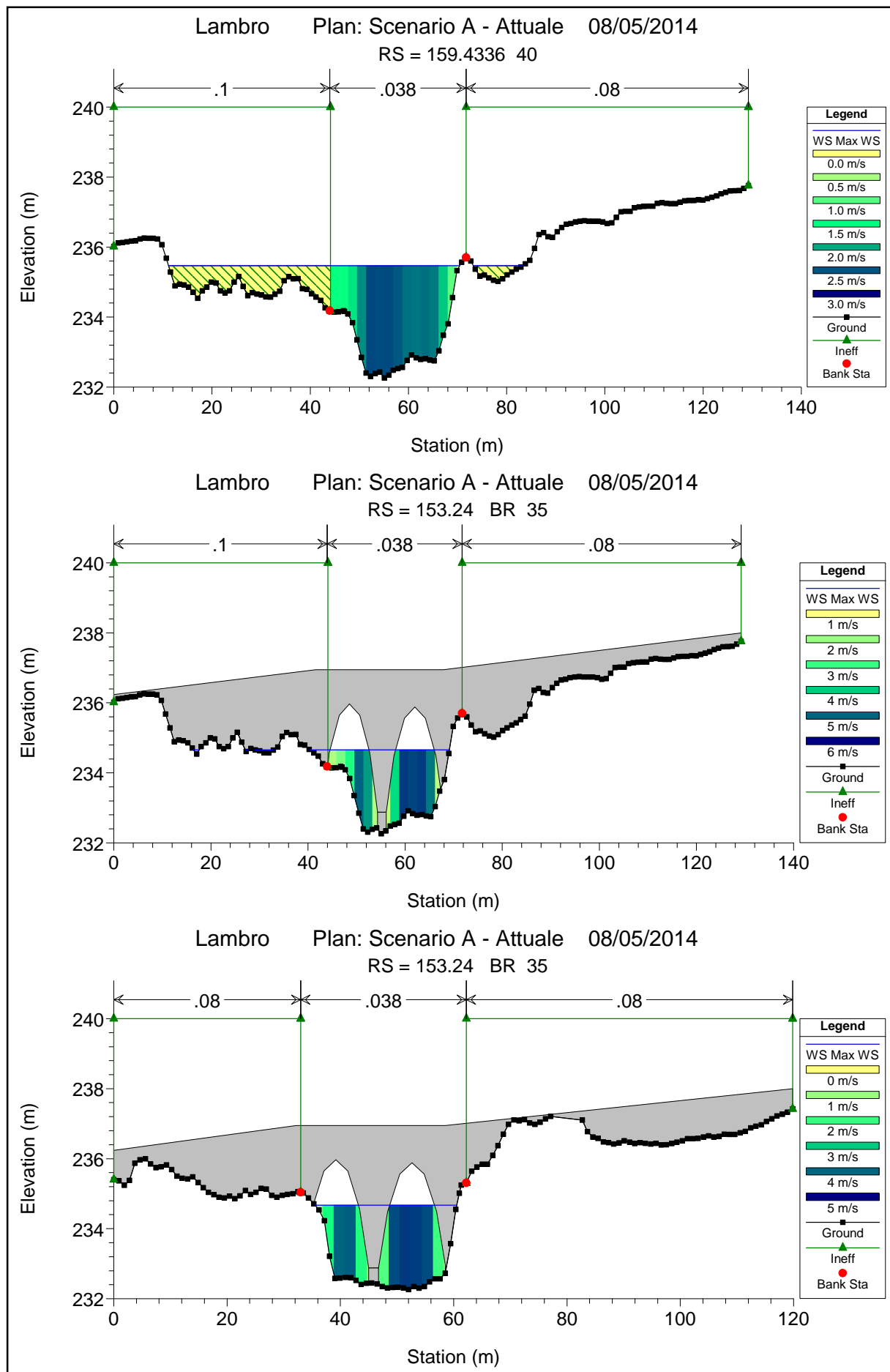


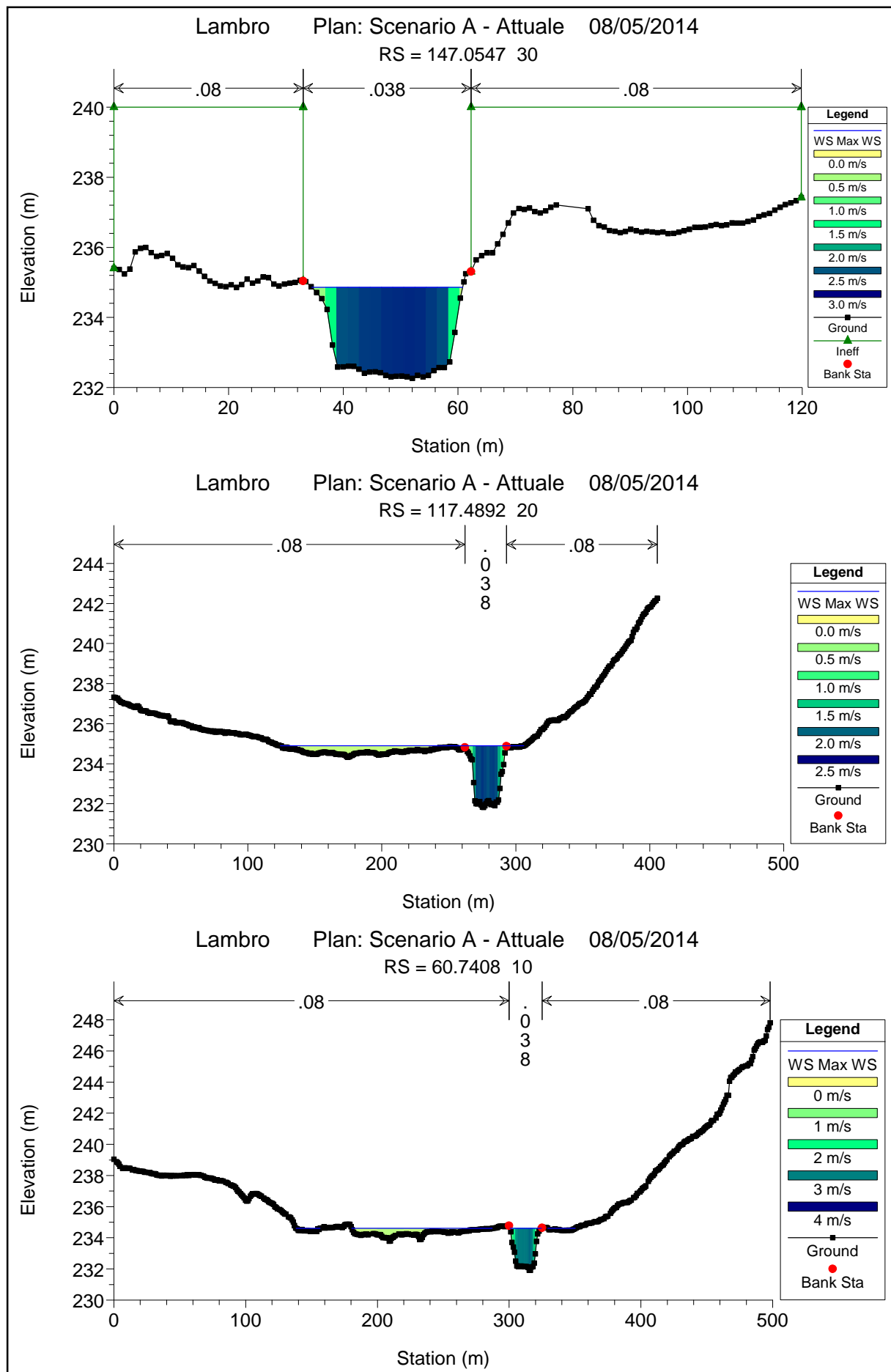


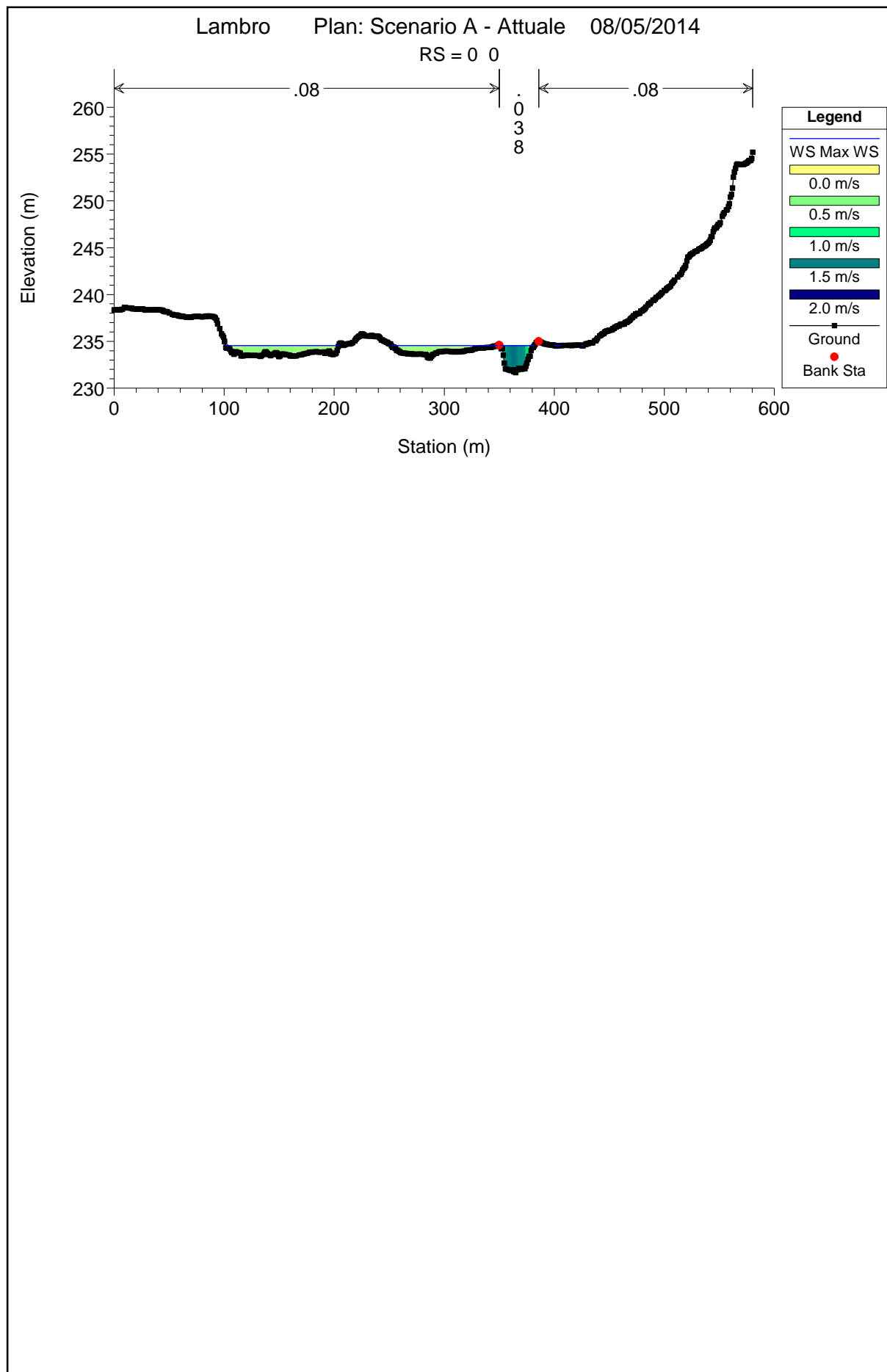














PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo

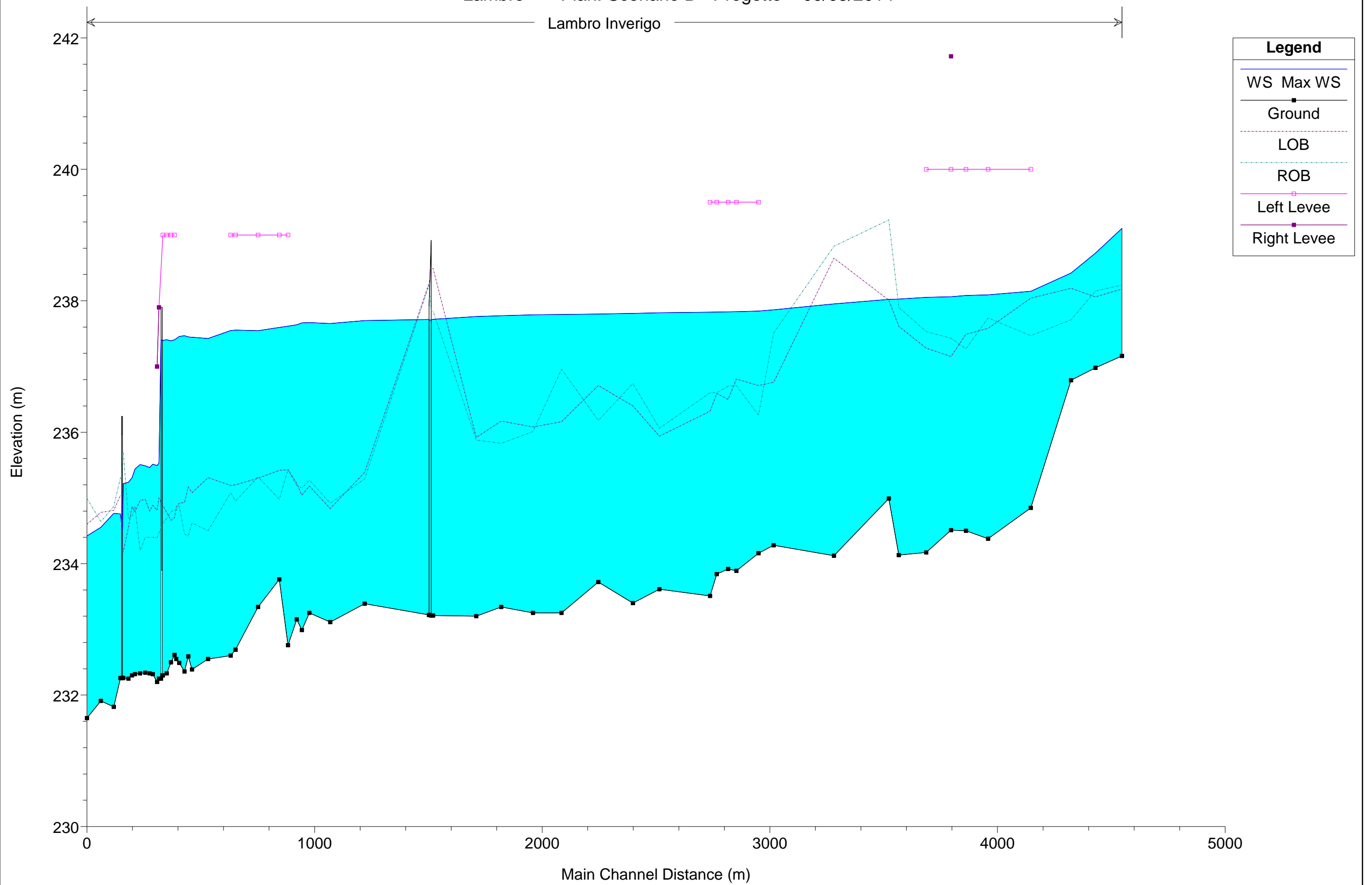
**S
RA**
s.r.l.
STUDIO ROSSO
INGEGNERI ASSOCIATI s.r.l.

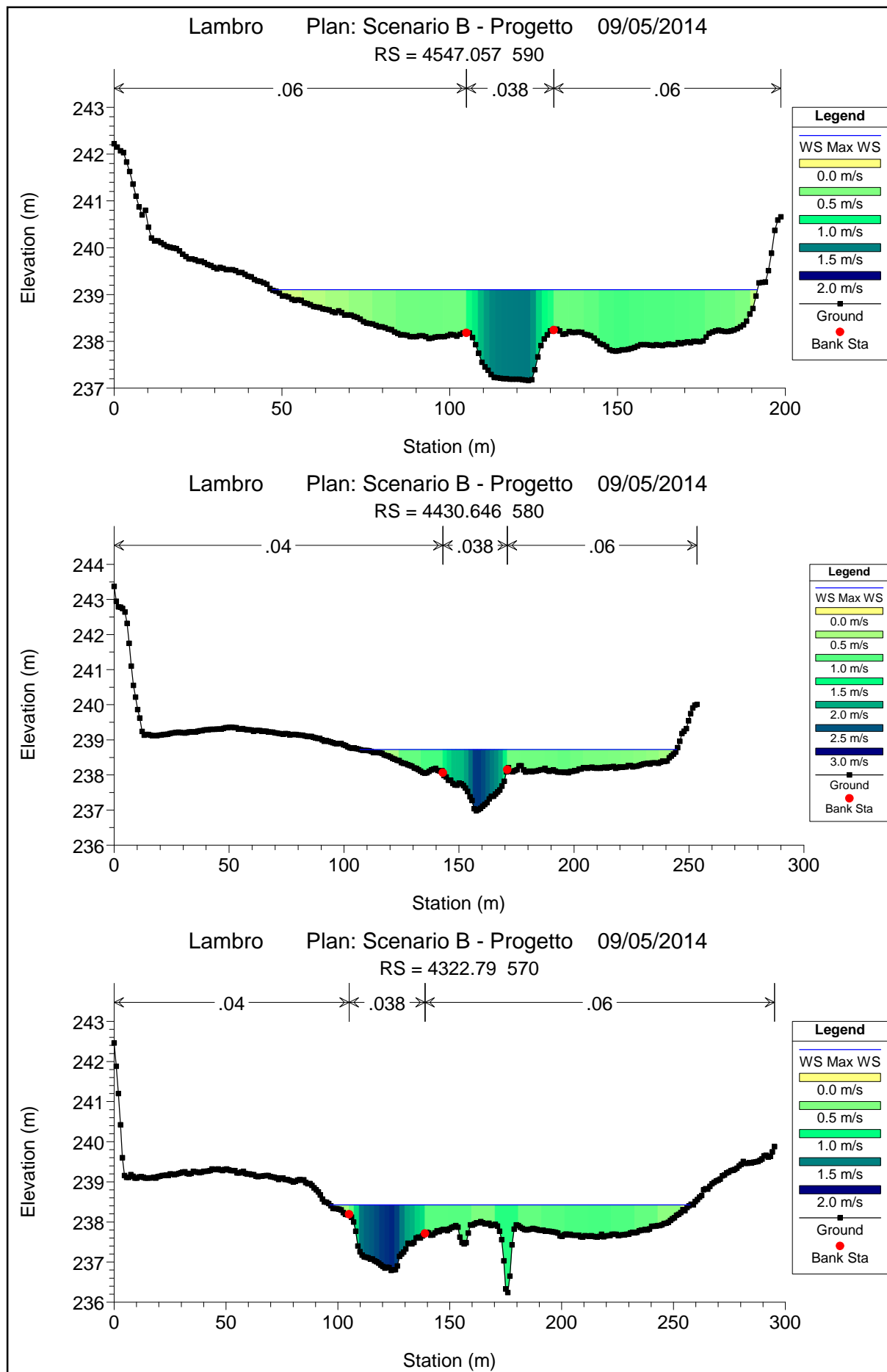
ALLEGATO 3

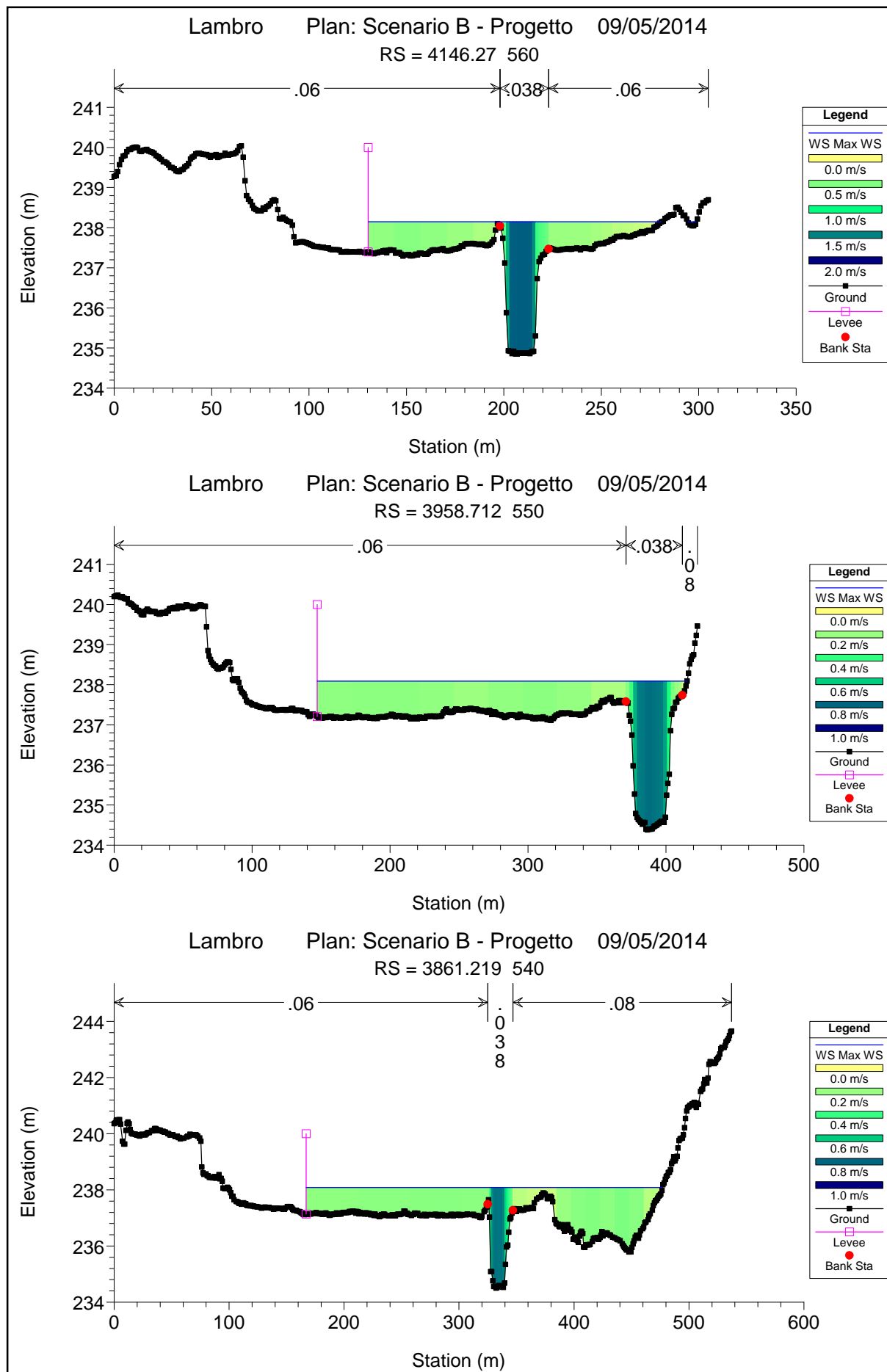
– Risultati simulazione idraulica: scenario B – Portate attuali con laminazione Inverigo

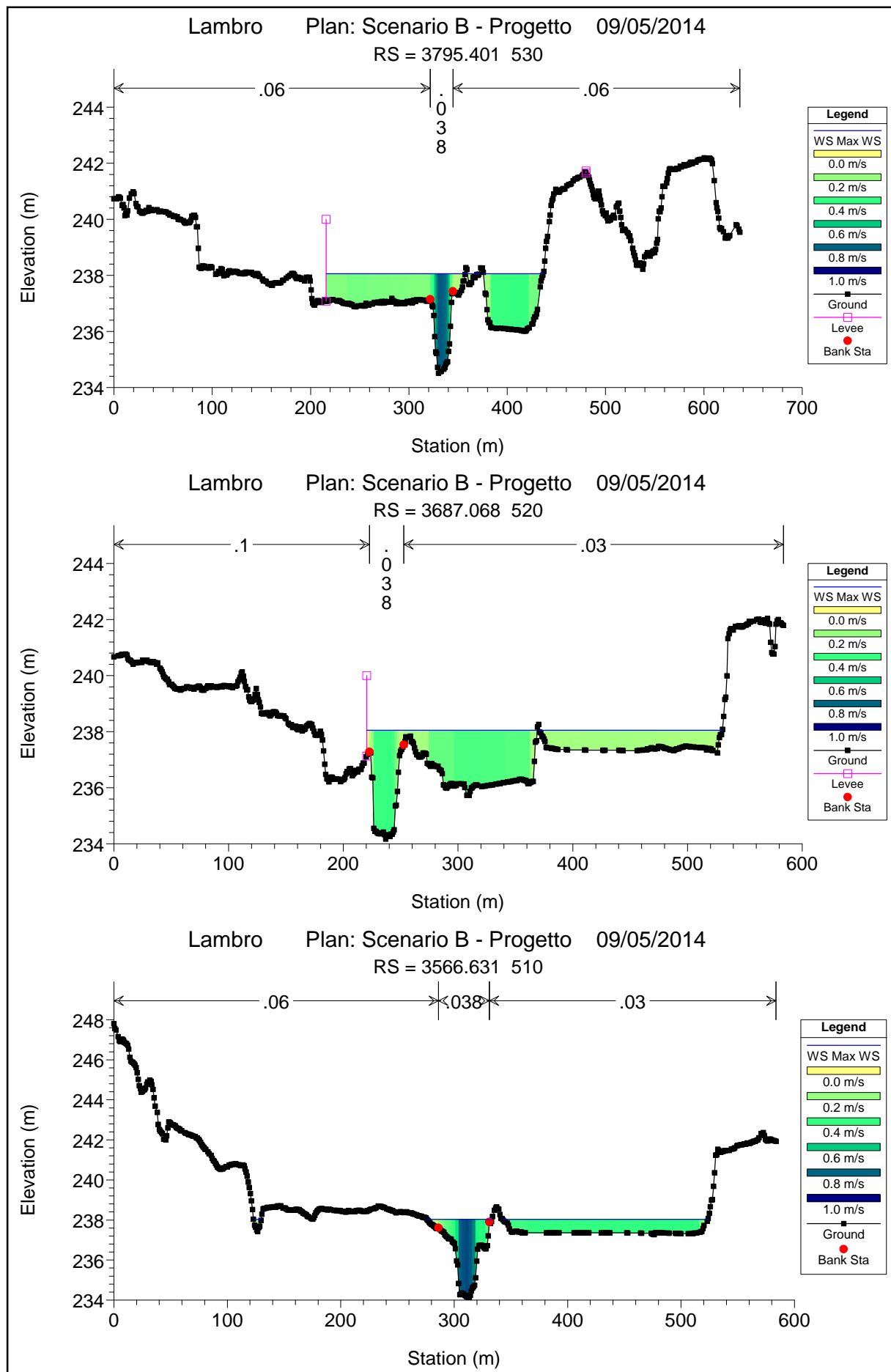
HEC-RAS Plan: B - Progetto River: Lambro Reach: Inverigo Profile: Max WS

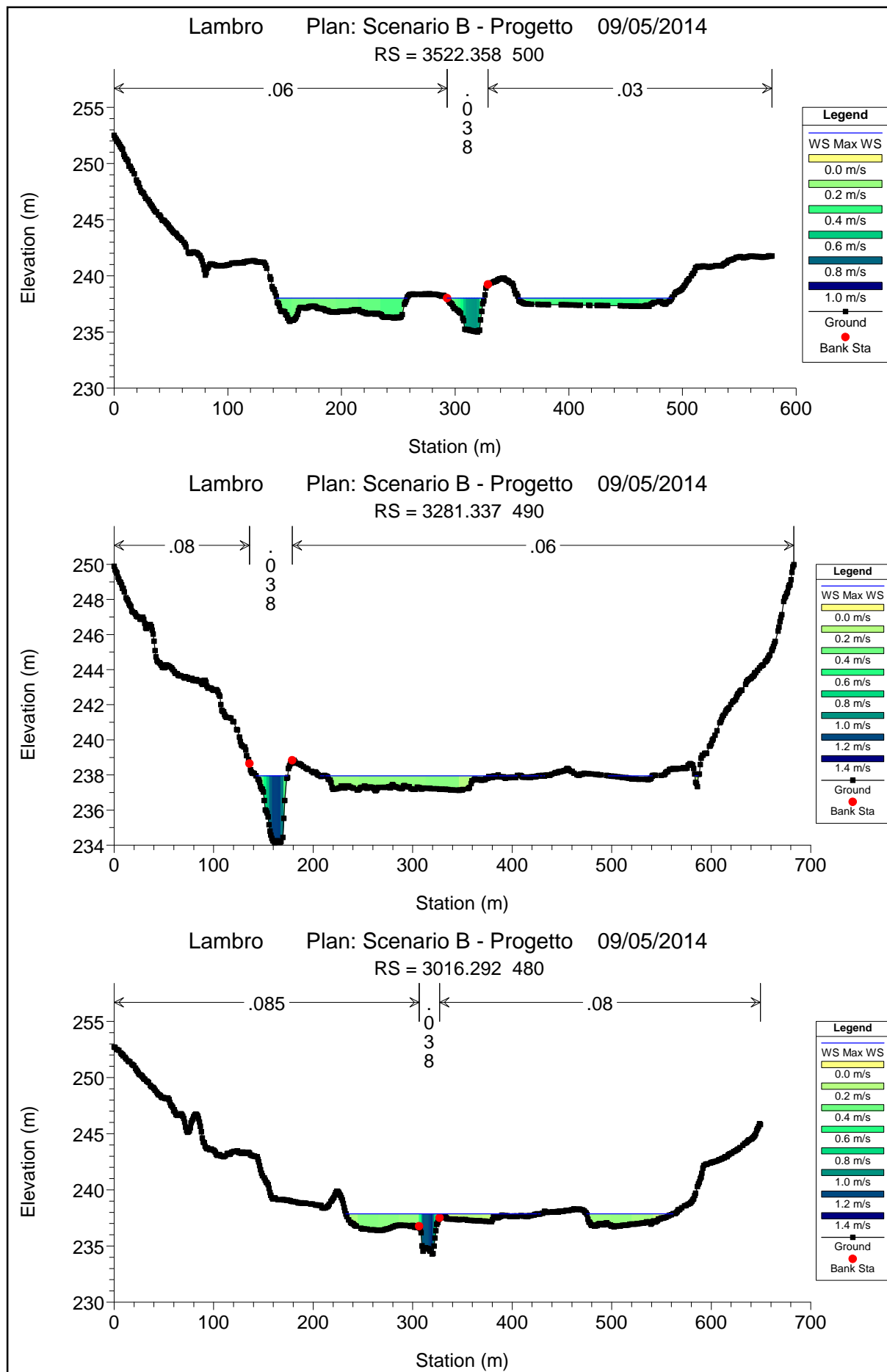
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Inverigo	4547.057 590	Max WS	115.10	237.16	239.10	238.54	239.16	0.001488	1.37	141.12	144.63	0.35
Inverigo	4430.646 580	Max WS	115.02	236.98	238.73	238.60	238.90	0.005485	2.20	83.77	137.84	0.64
Inverigo	4322.79 570	Max WS	114.56	236.79	238.42	238.13	238.50	0.002915	1.56	118.38	161.03	0.46
Inverigo	4146.27 560	Max WS	110.80	234.85	238.15	236.71	238.23	0.001098	1.43	130.94	154.66	0.30
Inverigo	3958.712 550	Max WS	108.34	234.38	238.09	235.88	238.11	0.000215	0.69	284.82	268.19	0.14
Inverigo	3861.219 540	Max WS	107.61	234.50	238.08	236.70	238.09	0.000202	0.67	375.37	310.00	0.13
Inverigo	3795.401 530	Max WS	106.90	234.51	238.06	236.64	238.07	0.000227	0.71	279.29	213.90	0.14
Inverigo	3687.068 520	Max WS	106.71	234.17	238.05	235.92	238.06	0.000049	0.35	376.40	308.25	0.07
Inverigo	3566.631 510	Max WS	106.10	234.13	238.03	236.11	238.04	0.000258	0.66	211.84	244.67	0.15
Inverigo	3522.358 500	Max WS	106.21	234.99	238.02	237.01	238.03	0.000241	0.59	281.78	282.92	0.14
Inverigo	3281.337 490	Max WS	104.32	234.12	237.95	236.12	237.99	0.000580	1.04	184.64	295.05	0.22
Inverigo	3016.292 480	Max WS	102.41	234.28	237.86	236.91	237.89	0.000547	1.06	241.65	280.98	0.22
Inverigo	2949.954 470	Max WS	102.31	234.16	237.84	235.89	237.86	0.000148	0.65	397.04	295.53	0.12
Inverigo	2852.912 460	Max WS	102.47	233.89	237.84	235.67	237.84	0.000126	0.58	427.92	282.64	0.11
Inverigo	2816.748 450	Max WS	102.54	233.92	237.83	235.95	237.84	0.000140	0.60	425.14	274.96	0.11
Inverigo	2766.457 440	Max WS	102.65	233.84	237.83	235.63	237.83	0.000073	0.45	536.88	298.57	0.08
Inverigo	2737.543 430	Max WS	102.72	233.51	237.83	235.13	237.83	0.000054	0.41	567.57	309.67	0.07
Inverigo	2514.769 420	Max WS	102.75	233.61	237.82	235.32	237.82	0.000059	0.45	568.61	289.56	0.08
Inverigo	2398.189 410	Max WS	102.88	233.40	237.81	235.41	237.82	0.000140	0.66	389.19	218.26	0.11
Inverigo	2246.646 400	Max WS	103.02	233.72	237.80	235.13	237.81	0.000082	0.51	401.91	230.59	0.09
Inverigo	2084.842 390	Max WS	103.22	233.25	237.79	235.23	237.80	0.000084	0.49	460.56	298.70	0.09
Inverigo	1959.351 380	Max WS	103.26	233.25	237.79	235.07	237.79	0.000047	0.41	606.34	317.02	0.07
Inverigo	1819.658 370	Max WS	103.57	233.34	237.77	235.28	237.78	0.000098	0.57	368.36	387.72	0.10
Inverigo	1710.393 360	Max WS	103.82	233.20	237.76	235.21	237.77	0.000109	0.63	349.20	342.48	0.10
Inverigo	1520.357 350	Max WS	104.11	233.21	237.72		237.75	0.000260	0.83	203.48	238.79	0.16
Inverigo	1511.685 345		Mult Open									
Inverigo	1503.015 340	Max WS	104.02	233.22	237.71	235.34	237.75	0.000301	0.87	179.39	165.90	0.17
Inverigo	1219.906 330	Max WS	104.42	233.39	237.70	235.52	237.71	0.000073	0.52	413.14	372.14	0.09
Inverigo	1068.842 320	Max WS	104.42	233.11	237.65	234.94	237.71	0.000280	1.08	114.46	310.36	0.17
Inverigo	977.0419 310	Max WS	104.59	233.25	237.67	234.77	237.68	0.000089	0.59	249.83	324.33	0.10
Inverigo	944.2654 300	Max WS	104.66	232.99	237.66	234.86	237.68	0.000123	0.71	238.63	275.66	0.12
Inverigo	921.7176 290	Max WS	104.70	233.15	237.64	234.68	237.68	0.000224	0.96	108.86	353.38	0.15
Inverigo	883.1097 280	Max WS	104.67	232.76	237.61	235.07	237.67	0.000315	1.07	97.60	334.95	0.18
Inverigo	844.9036 270	Max WS	104.73	233.76	237.59	235.27	237.66	0.000362	1.13	92.94	345.28	0.19
Inverigo	752.0323 260	Max WS	104.90	233.34	237.54	235.09	237.62	0.000414	1.25	84.25	352.27	0.21
Inverigo	652.2289 250	Max WS	105.07	232.69	237.55	234.34	237.59	0.000170	0.86	122.55	330.50	0.14
Inverigo	631.1052 240	Max WS	105.15	232.60	237.55	234.39	237.59	0.000190	0.90	117.26	352.67	0.14
Inverigo	532.0892 230	Max WS	105.15	232.55	237.43	234.89	237.55	0.000627	1.58	66.40	525.84	0.25
Inverigo	461.4436 220	Max WS	115.22	232.39	237.45	234.45	237.50	0.000267	1.07	107.57	554.90	0.17
Inverigo	444.964 210	Max WS	115.32	232.59	237.45	234.18	237.50	0.000212	1.00	115.45	538.19	0.15
Inverigo	428.3983 200	Max WS	115.42	232.36	237.47	233.80	237.50	0.000106	0.73	158.62	472.81	0.11
Inverigo	405.128 190	Max WS	115.53	232.49	237.46	234.09	237.49	0.000153	0.84	136.94	404.84	0.13
Inverigo	392.612 180	Max WS	115.59	232.55	237.42	234.29	237.49	0.000288	1.16	99.55	388.91	0.18
Inverigo	384.5591 170	Max WS	115.65	232.61	237.41	234.56	237.49	0.000365	1.27	90.79	353.85	0.20
Inverigo	368.98 160	Max WS	115.75	232.50	237.39	234.56	237.48	0.000405	1.34	86.22	246.91	0.21
Inverigo	350.5163 150	Max WS	115.89	232.33	237.41	234.46	237.48	0.000309	1.16	99.92	201.04	0.18
Inverigo	333.7652 140	Max WS	116.03	232.30	237.40	234.19	237.47	0.000087	1.21	95.64	169.22	0.18
Inverigo	325		Inl Struct									
Inverigo	316.6304 130	Max WS	116.02	232.25	235.53	234.12	235.74	0.000467	2.01	57.76	65.12	0.39
Inverigo	307.8002 120	Max WS	116.09	232.20	235.49	234.32	235.72	0.001987	2.13	54.62	75.50	0.42
Inverigo	288.6484 110	Max WS	116.17	232.32	235.51	234.26	235.69	0.001604	1.87	62.21	139.80	0.38
Inverigo	275.1218 100	Max WS	116.25	232.33	235.46	234.38	235.67	0.001947	2.00	58.25	139.19	0.42
Inverigo	256.351 90	Max WS	116.31	232.34	235.49	234.23	235.63	0.001398	1.68	69.21	128.50	0.35
Inverigo	233.2564 80	Max WS	116.37	232.33	235.51	233.83	235.61	0.000783	1.40	83.08	126.07	0.27
Inverigo	210.6123 70	Max WS	116.46	232.32	235.44	234.07	235.58	0.001362	1.69	69.07	117.51	0.35
Inverigo	197.713 60	Max WS	116.57	232.30	235.31	234.25	235.56	0.002587	2.23	52.29	102.55	0.47
Inverigo	181.8634 50	Max WS	116.68	232.25	235.24	234.33	235.52	0.002819	2.34	49.81	96.20	0.50
Inverigo	159.4336 40	Max WS	116.81	232.26	235.22	234.35	235.46	0.002647	2.16	54.08	63.92	0.47
Inverigo	153.24 35		Bridge									
Inverigo	147.0547 30	Max WS	113.35	232.26	234.76	233.91	235.01	0.003170	2.24	50.58	25.61	0.51
Inverigo	117.4892 20	Max WS	113.52	231.82	234.77	233.58	234.93	0.002071	1.83	81.78	146.47	0.41
Inverigo	60.7408 10	Max WS	112.42	231.91	234.55	233.96	234.83	0.004178	2.46	71.65	155.47	0.58
Inverigo	0 0	Max WS	117.67	231.65	234.42	233.76	234.49	0.001246	1.37	179.83	223.41	0.32

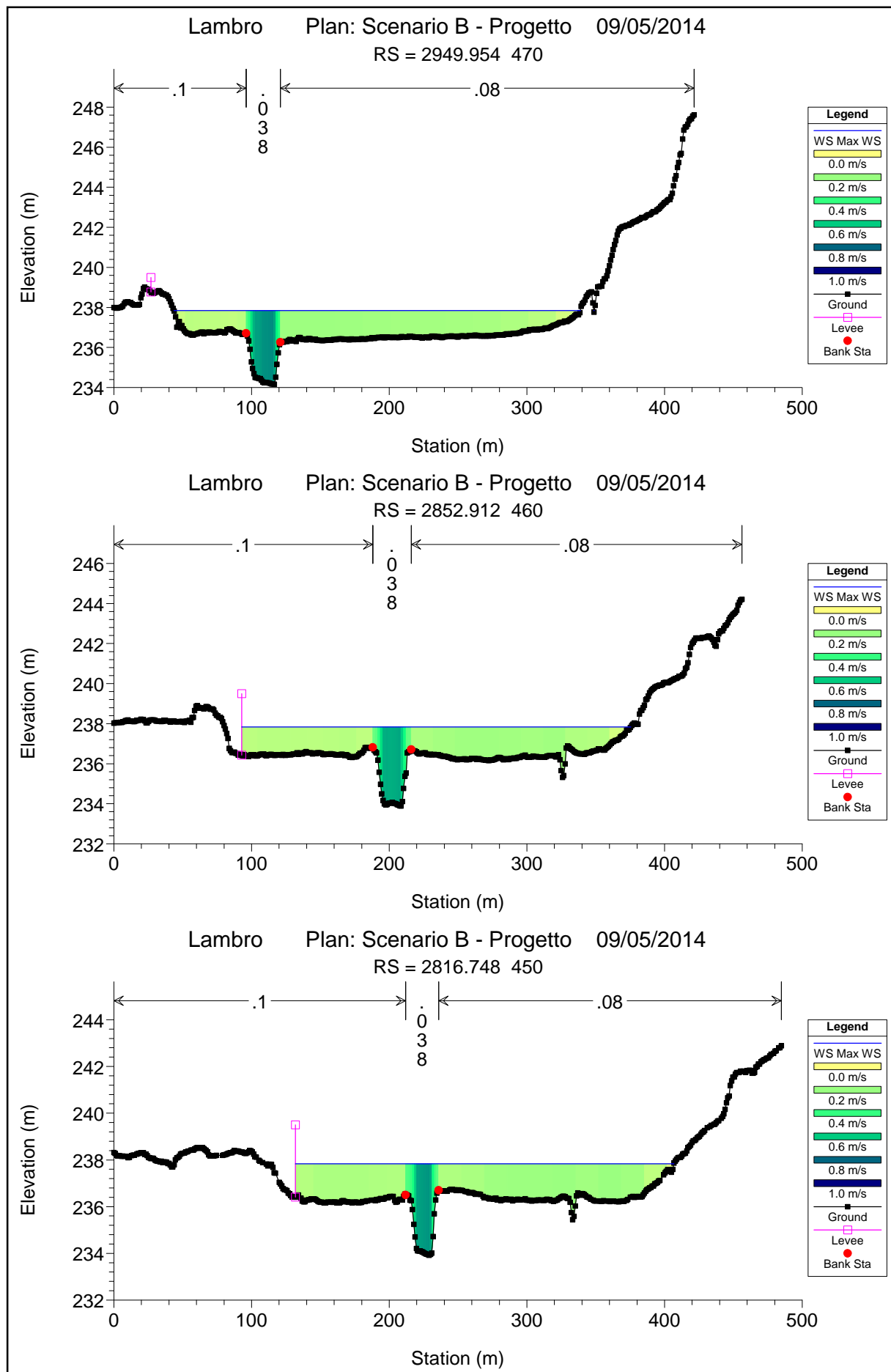


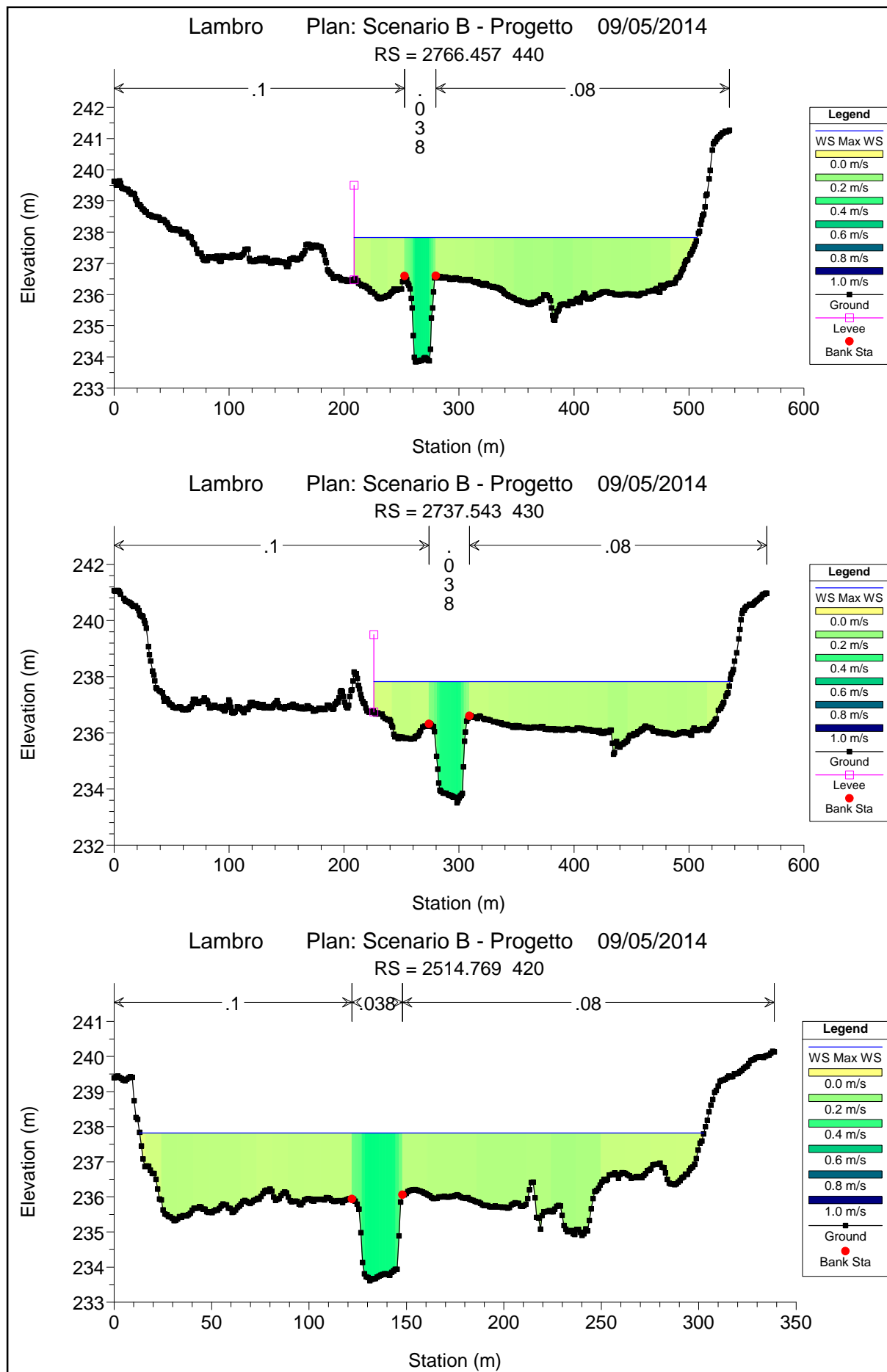


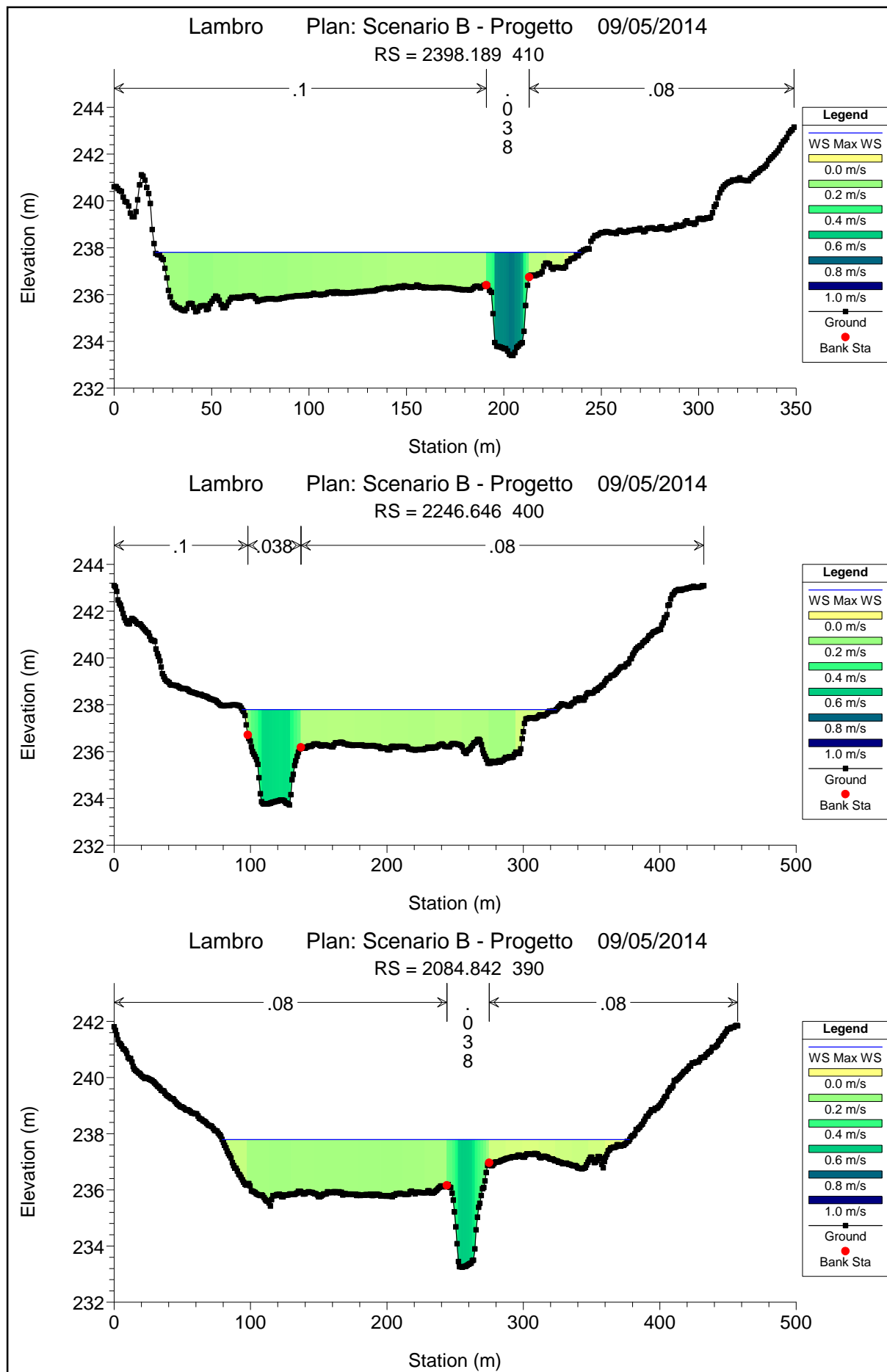


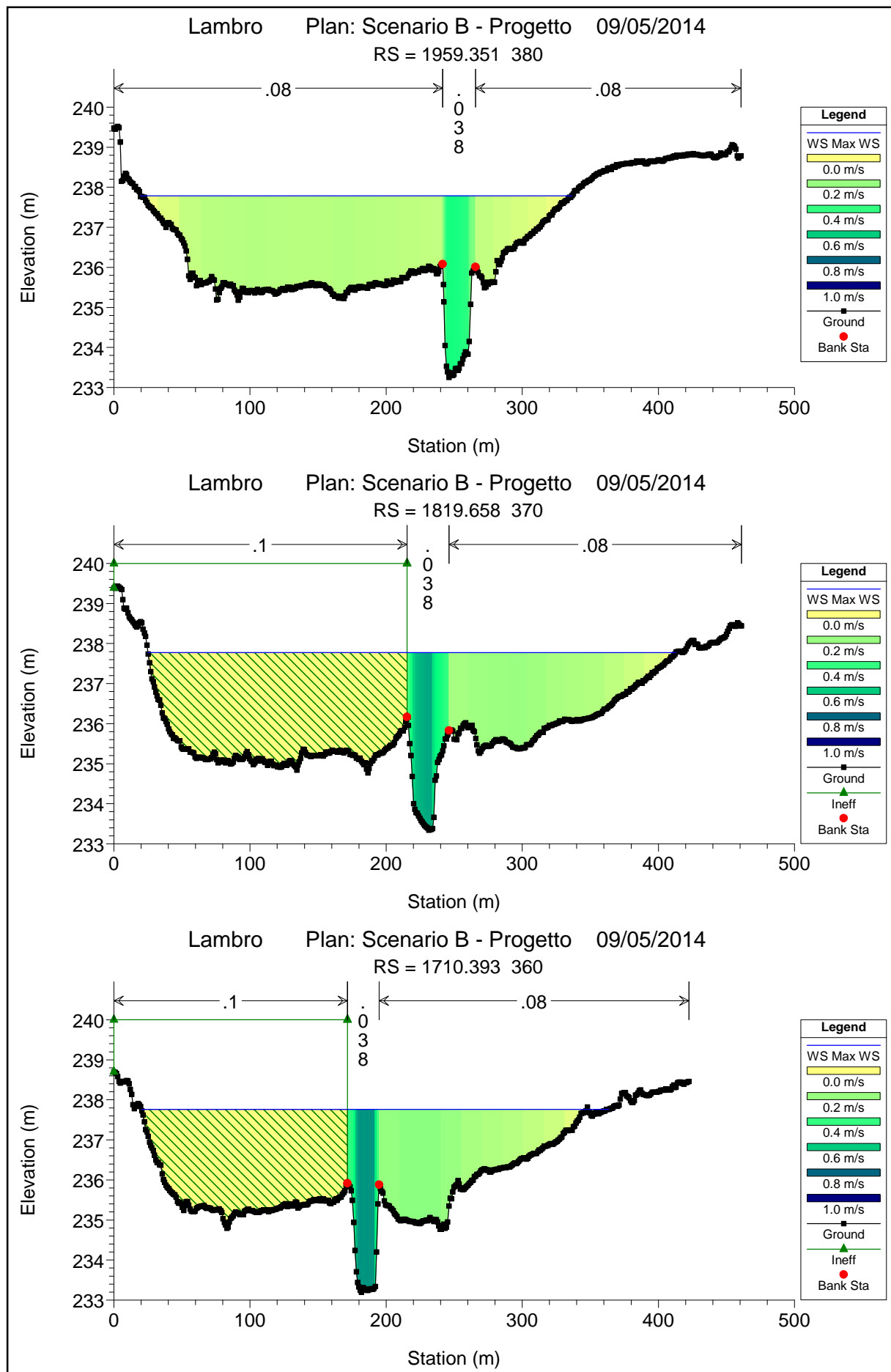


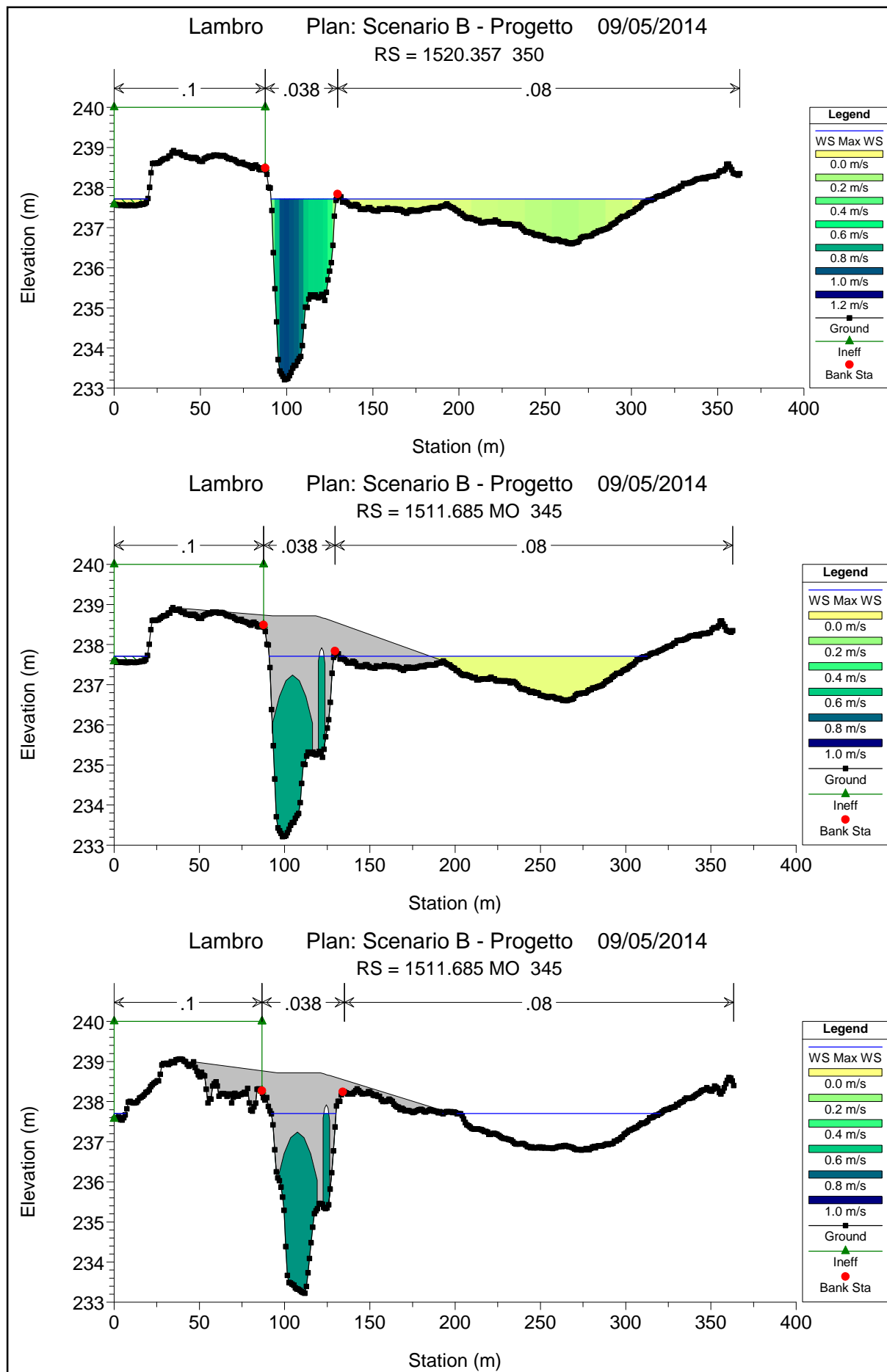


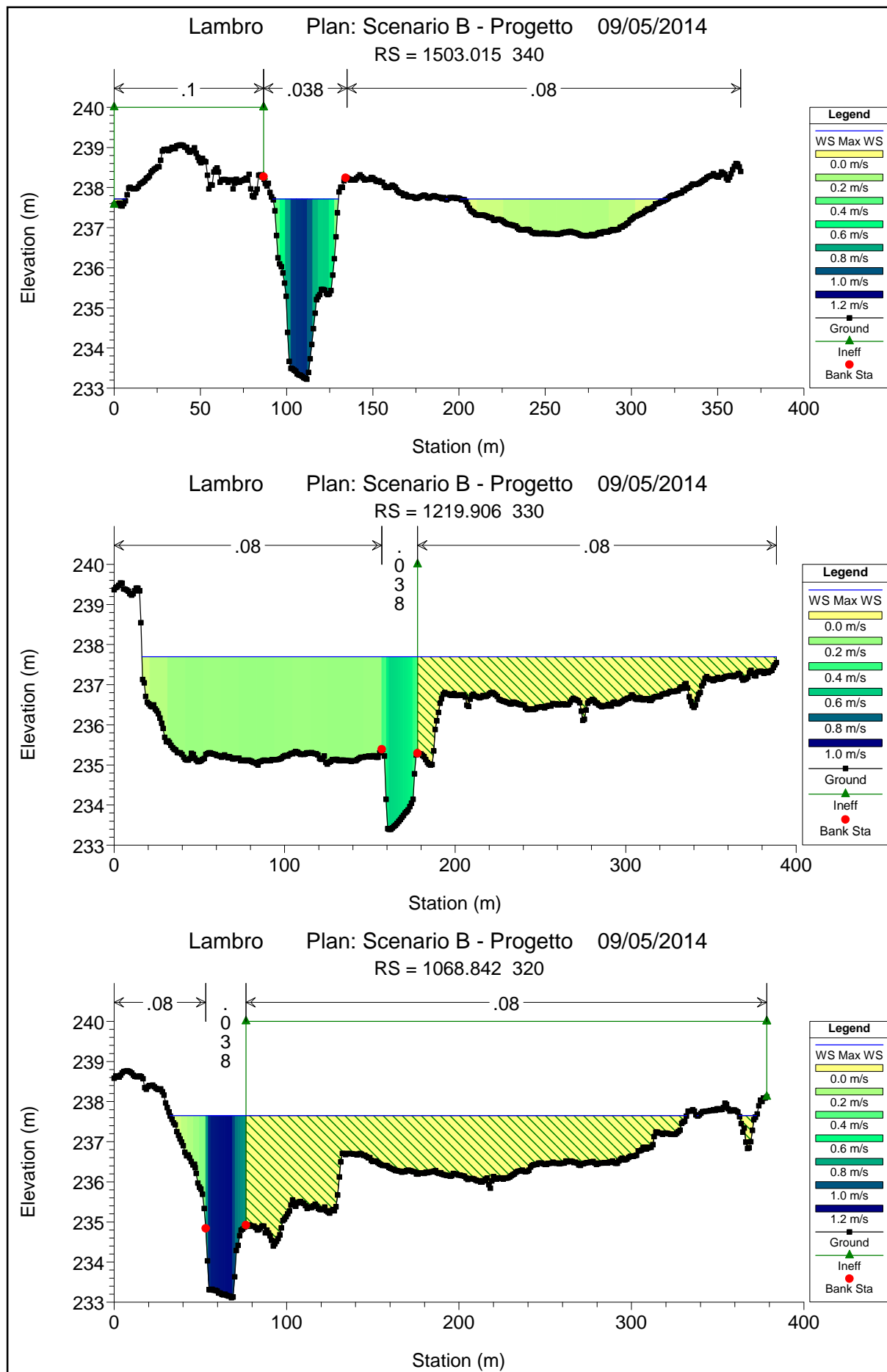


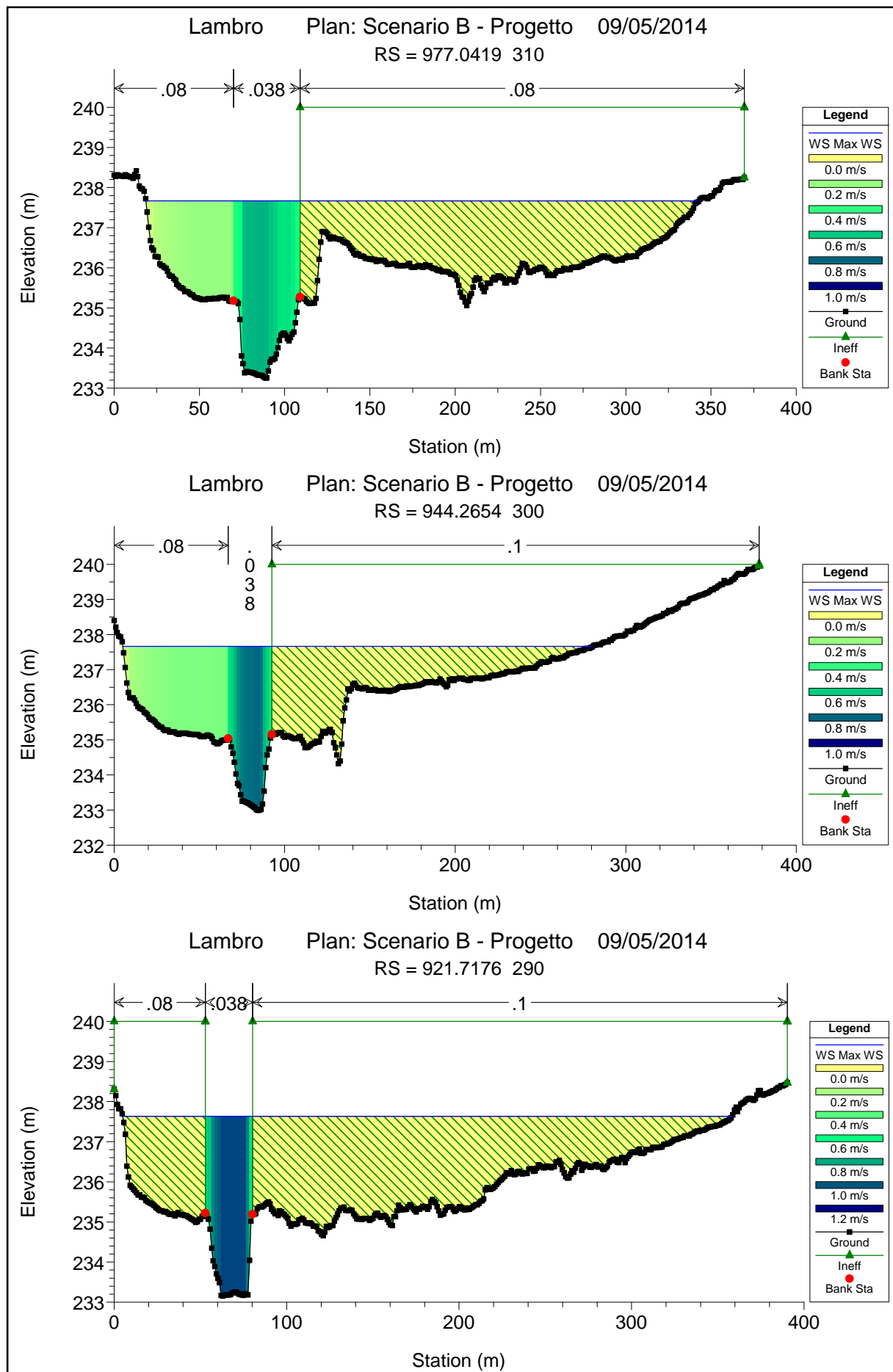


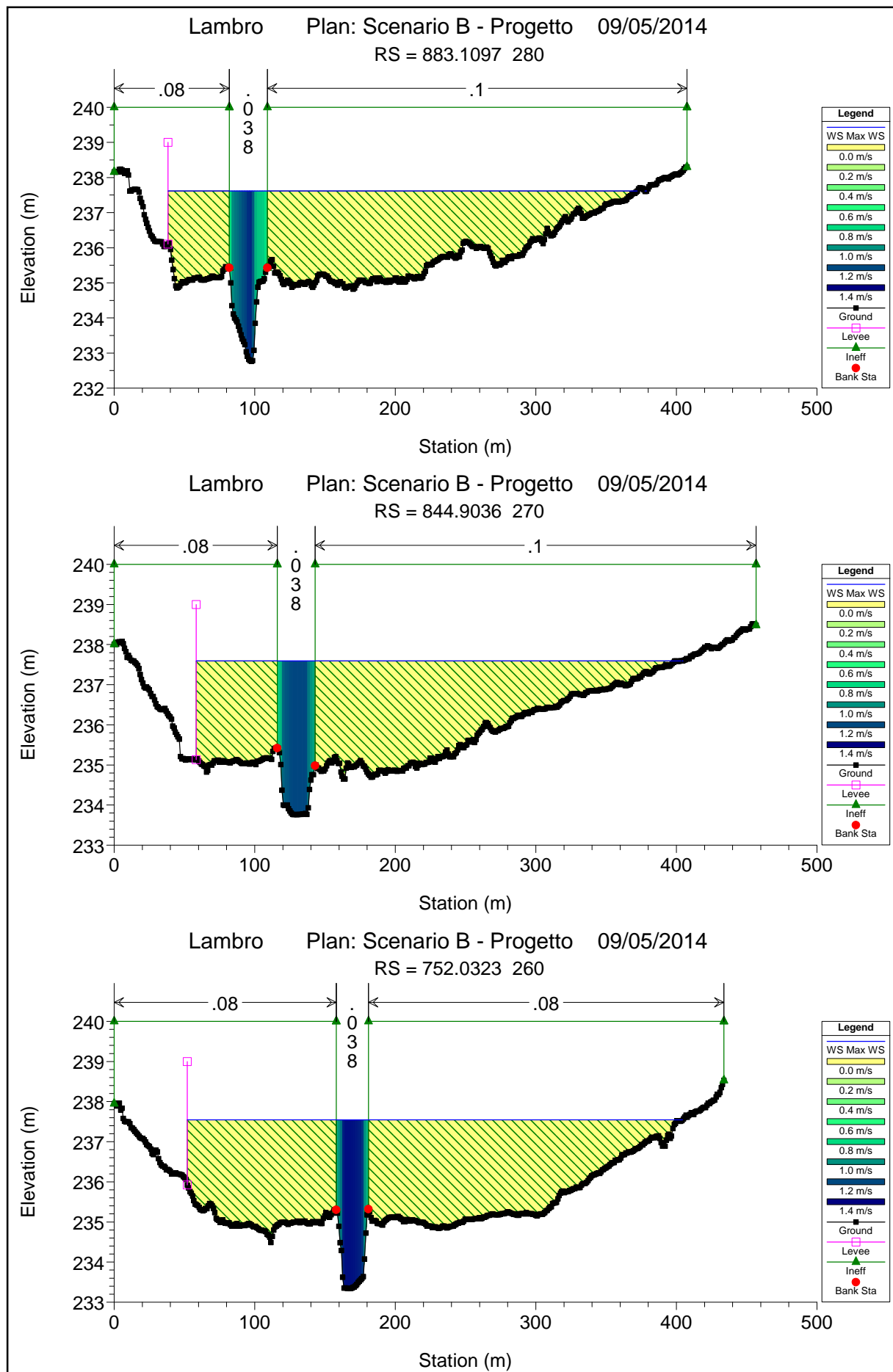


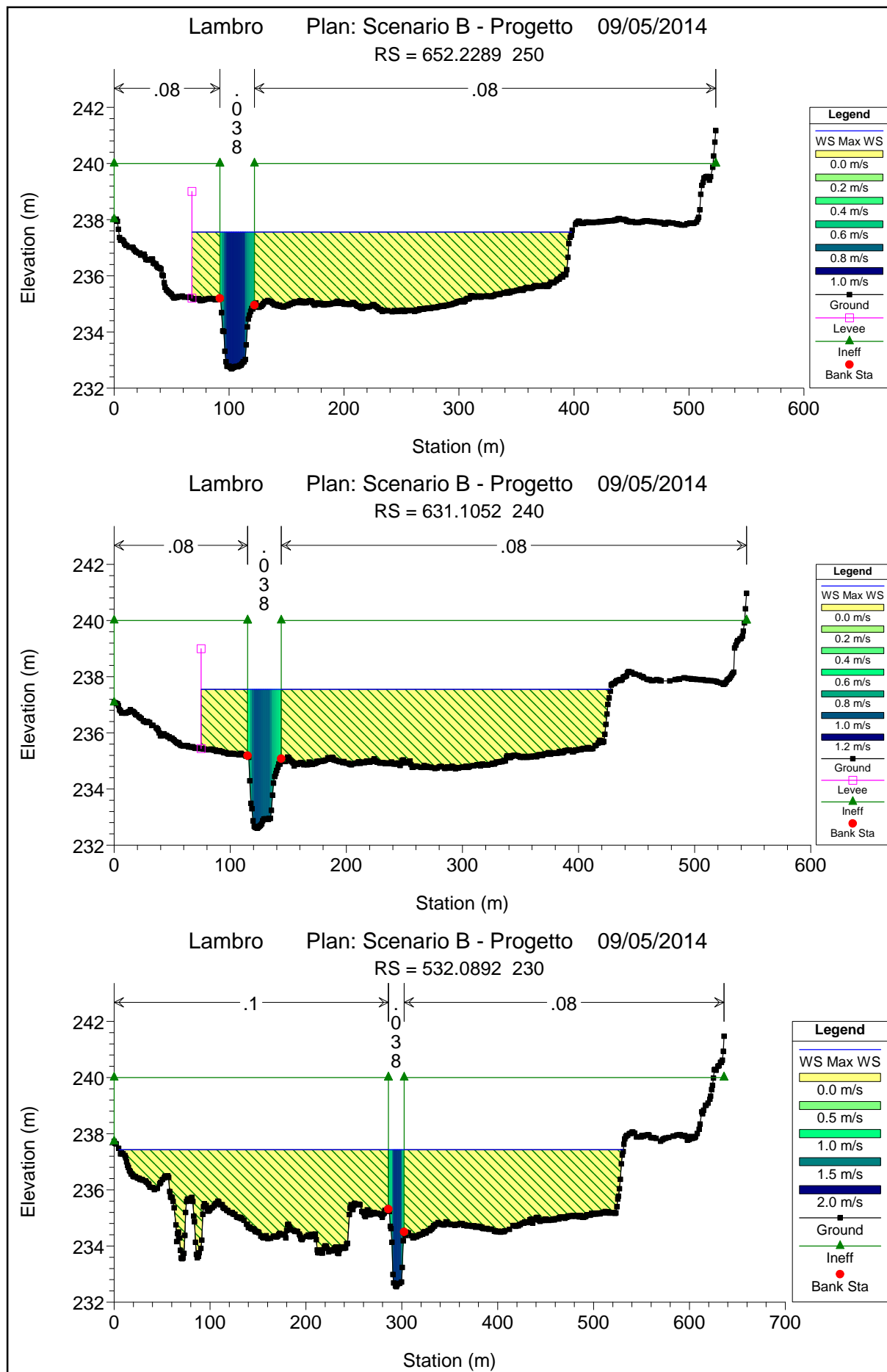


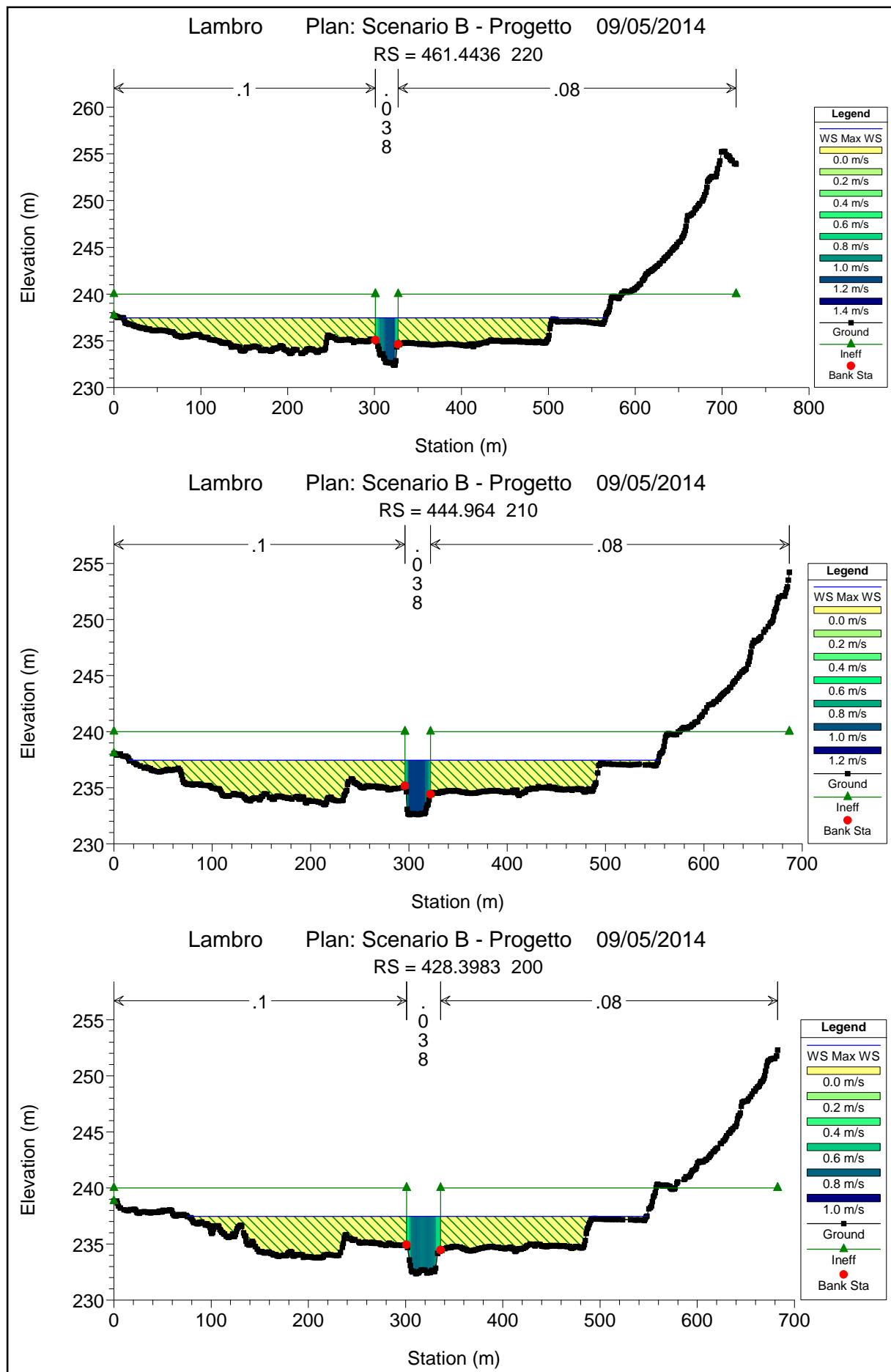


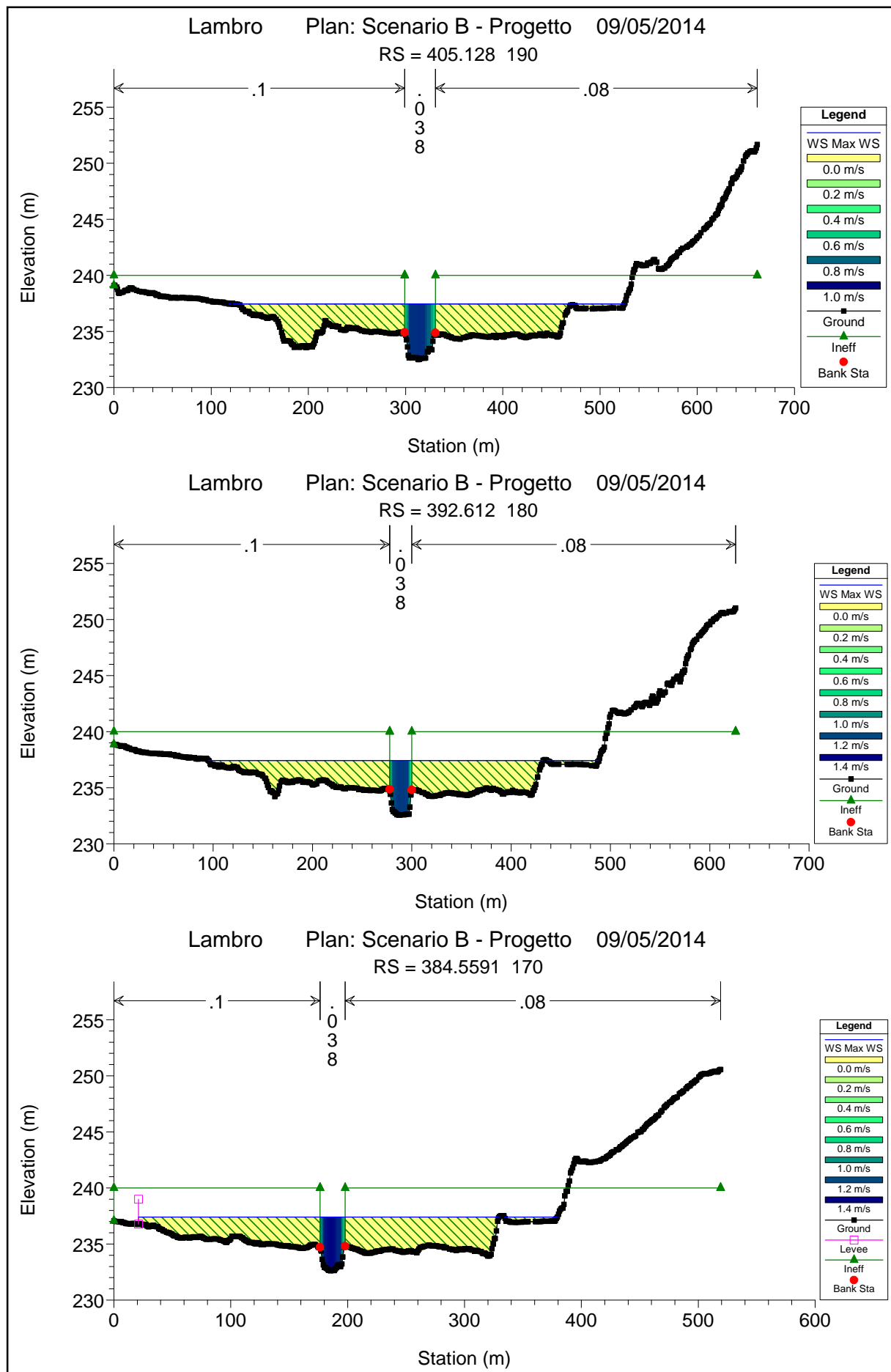


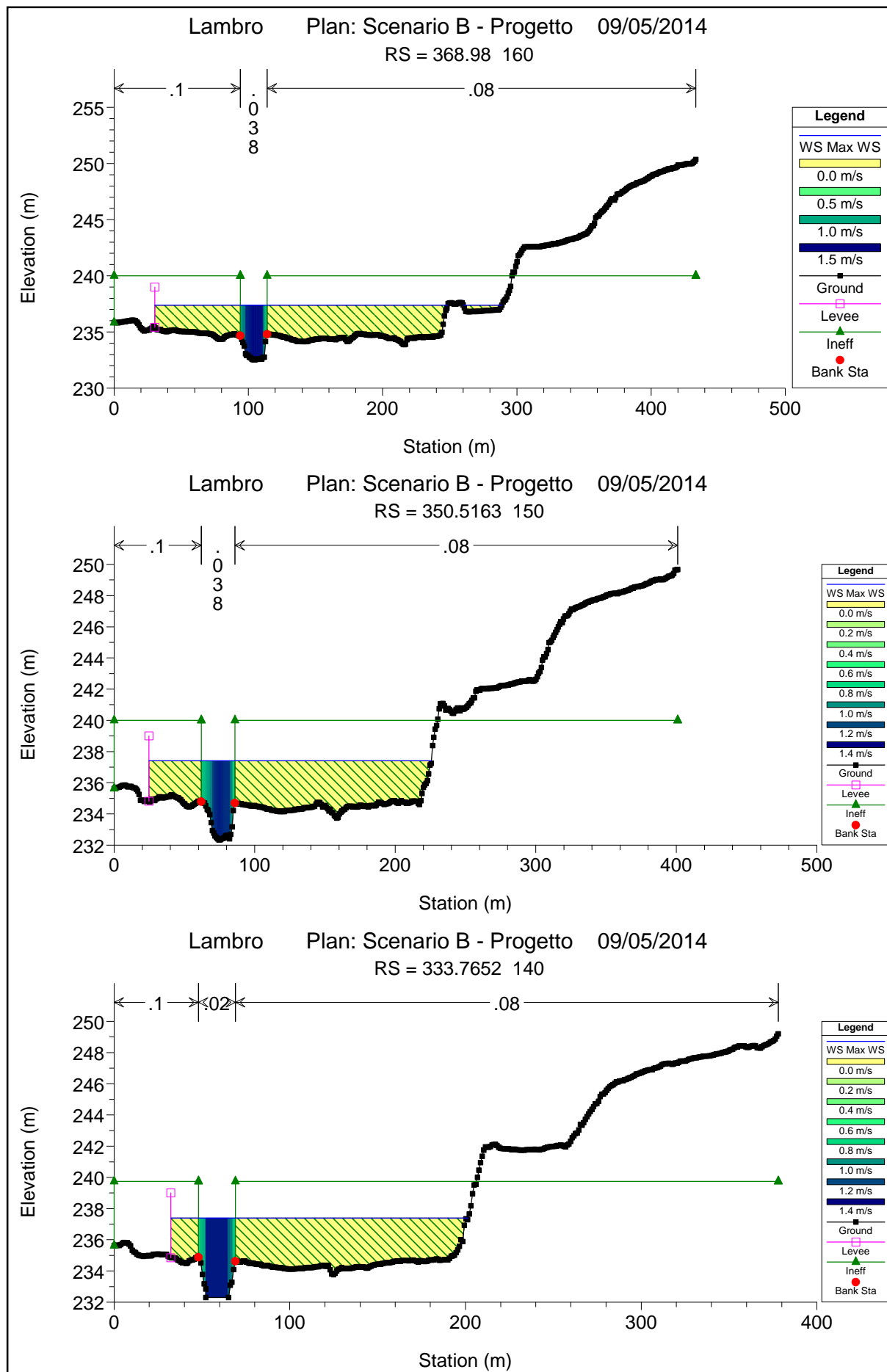


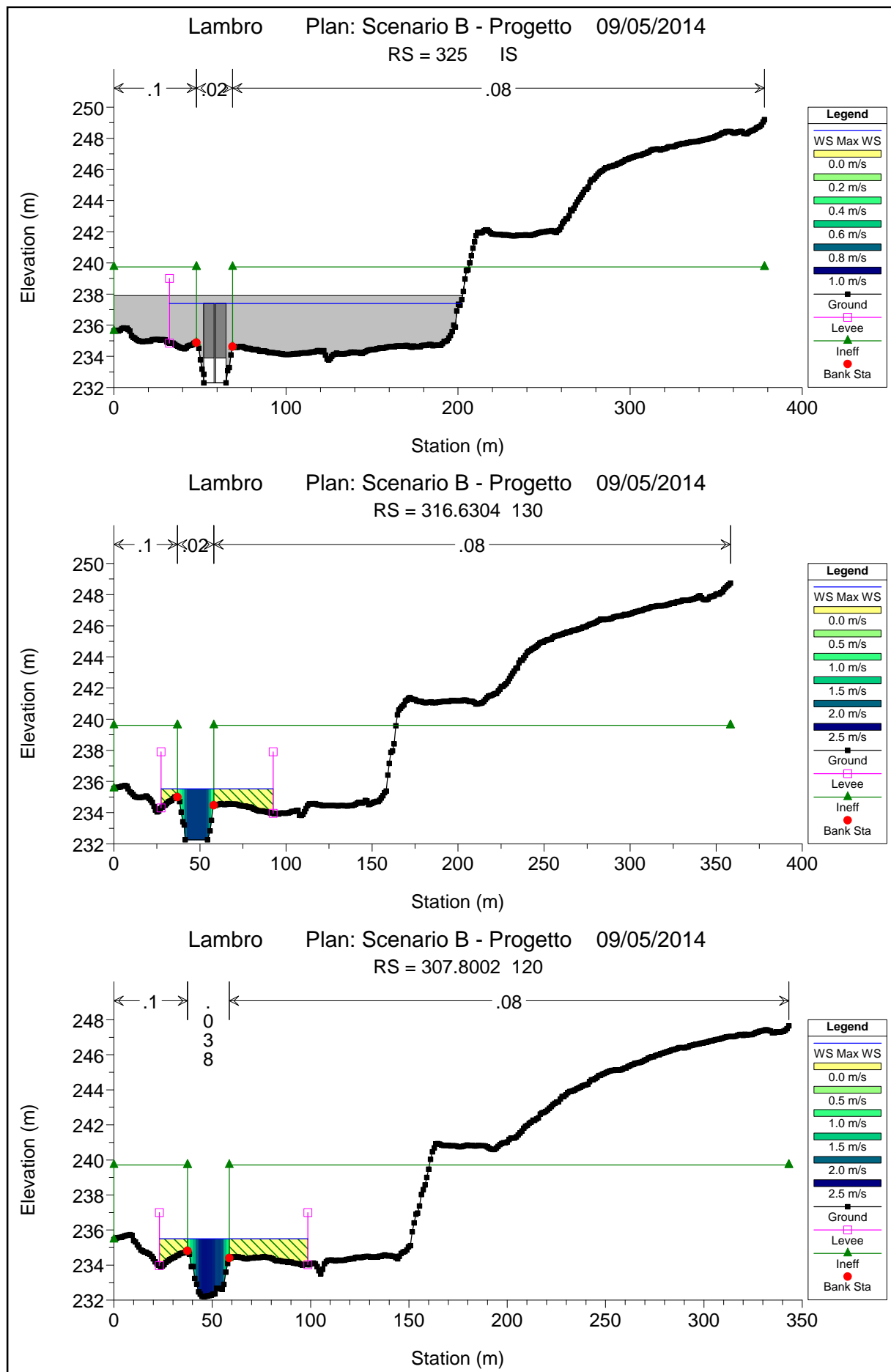


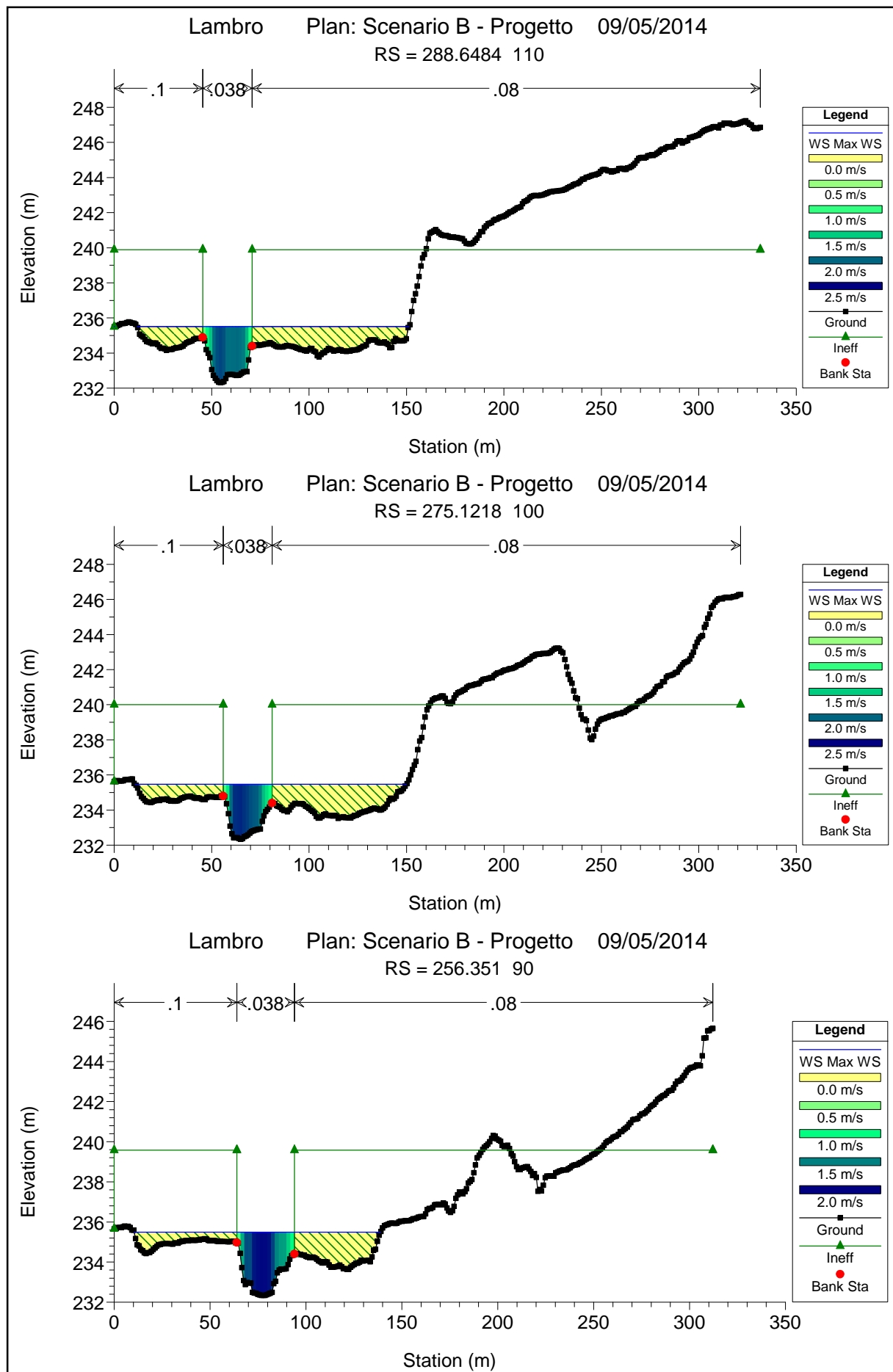


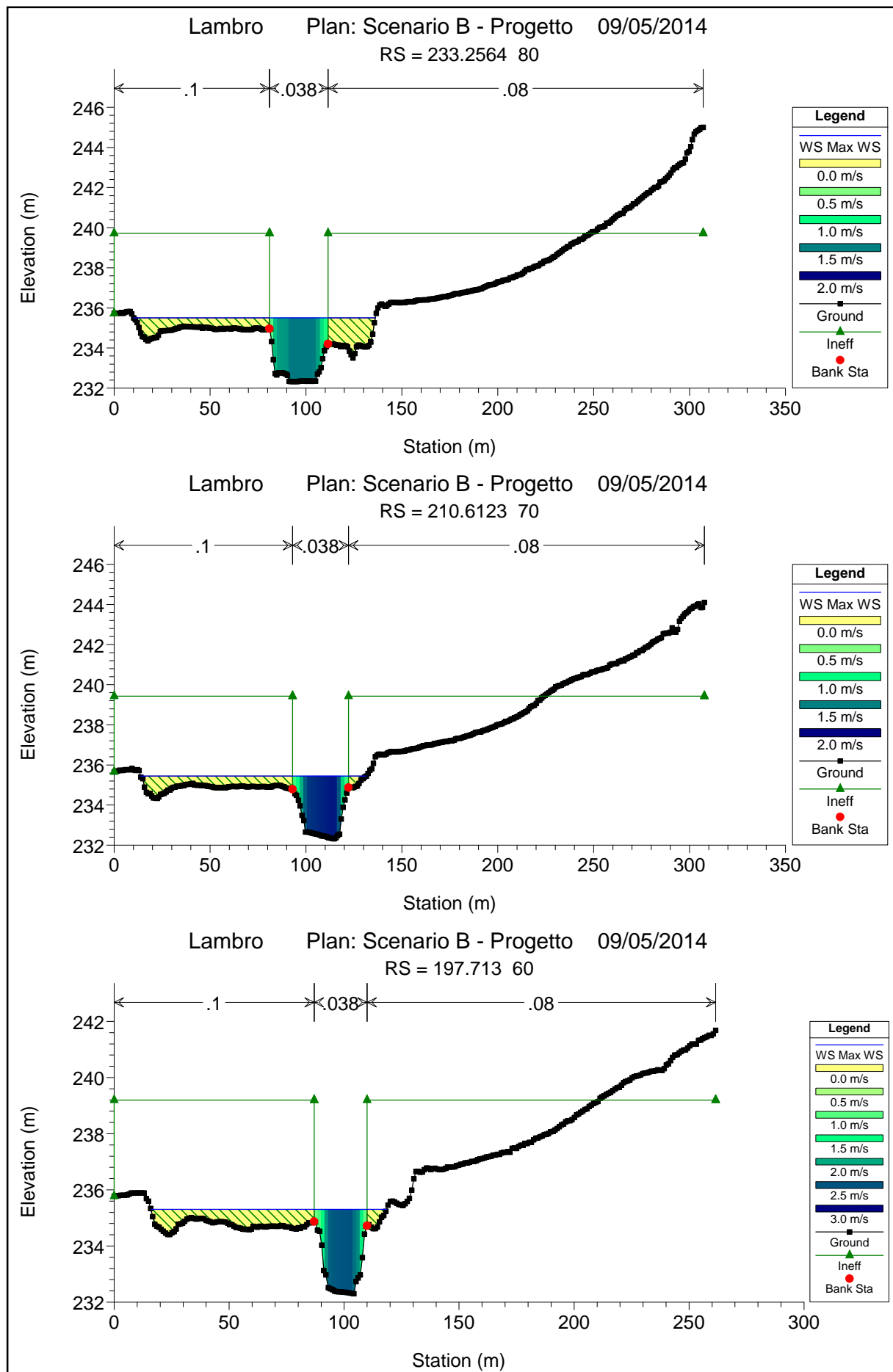


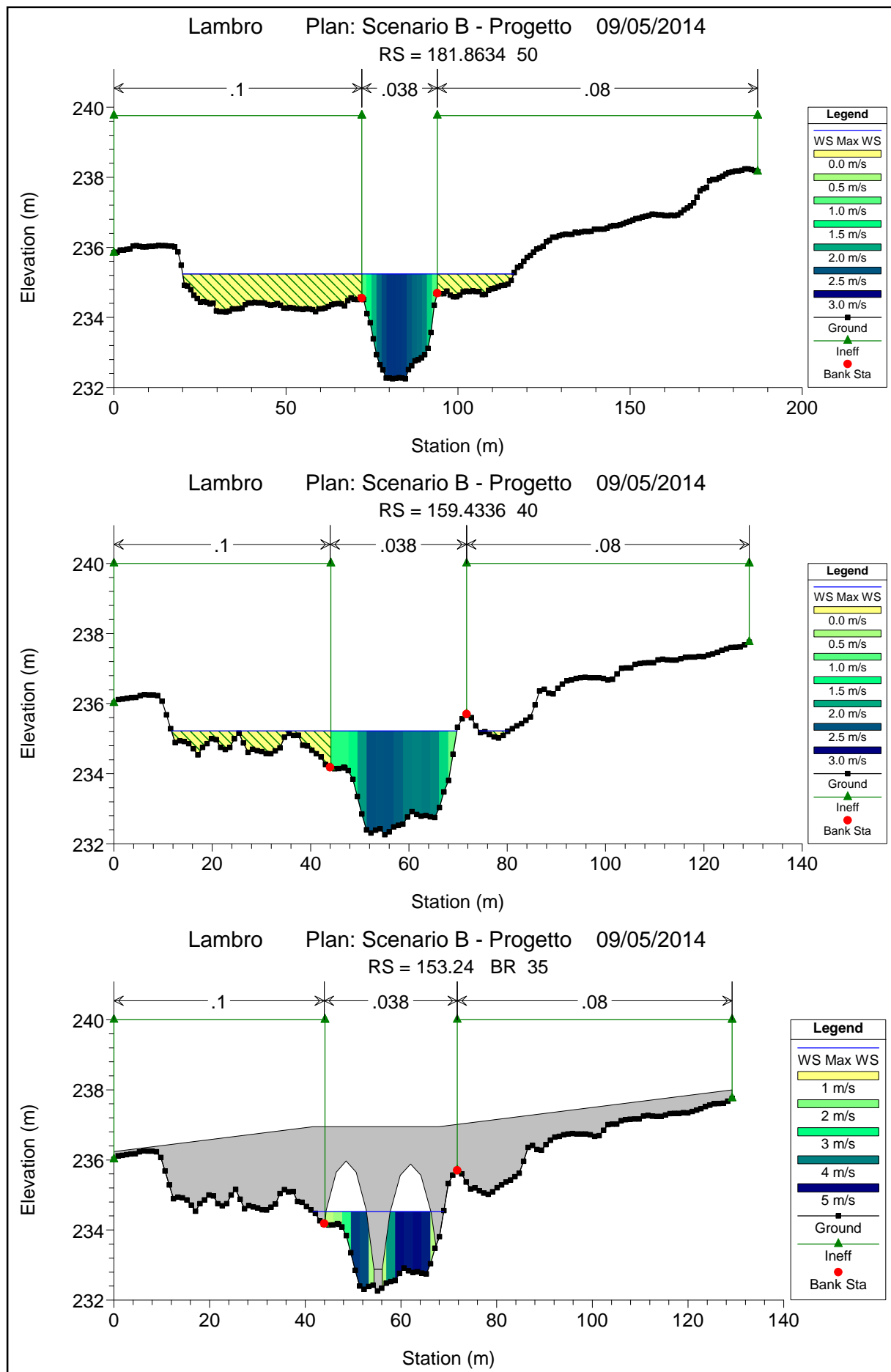


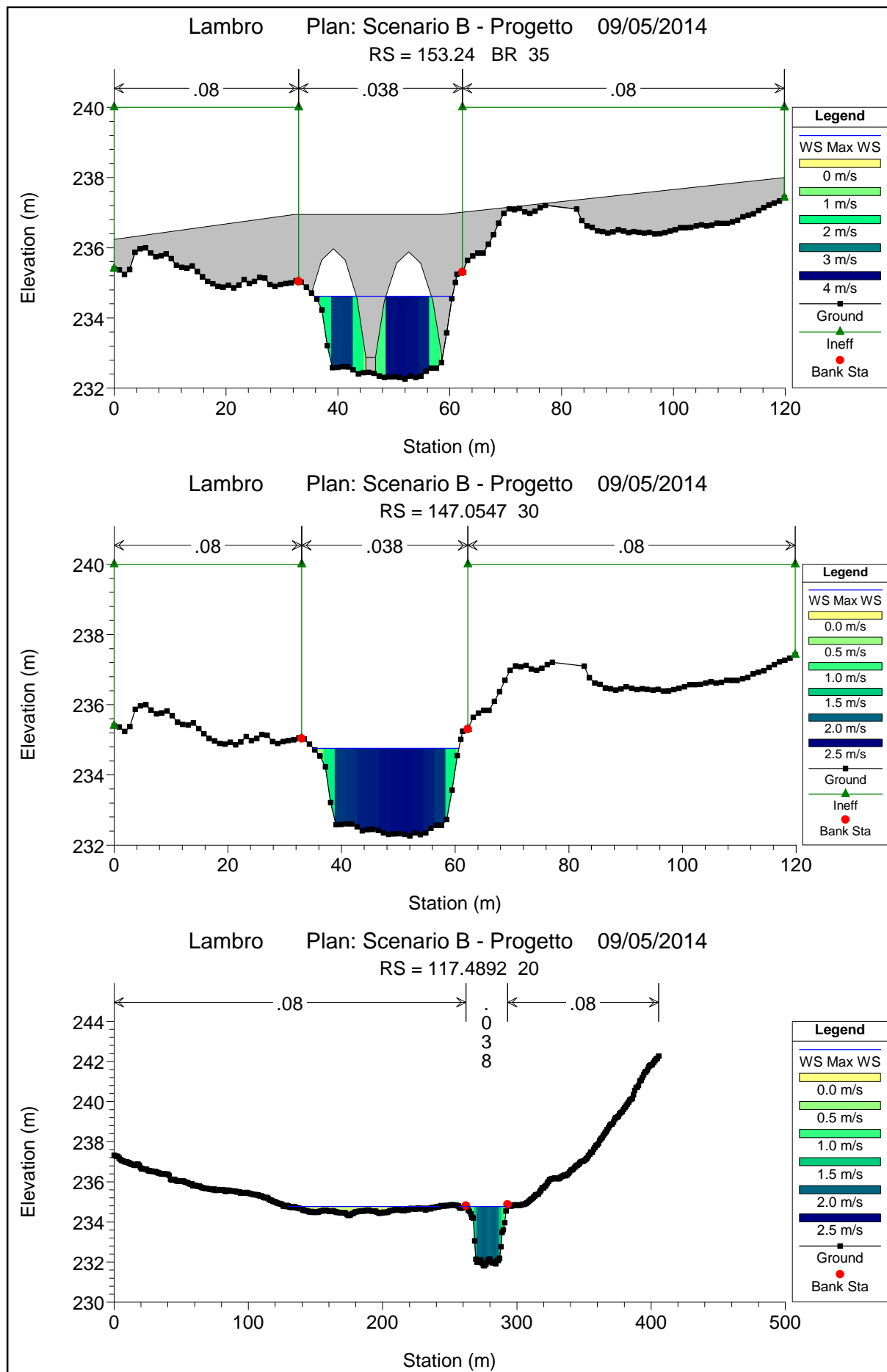


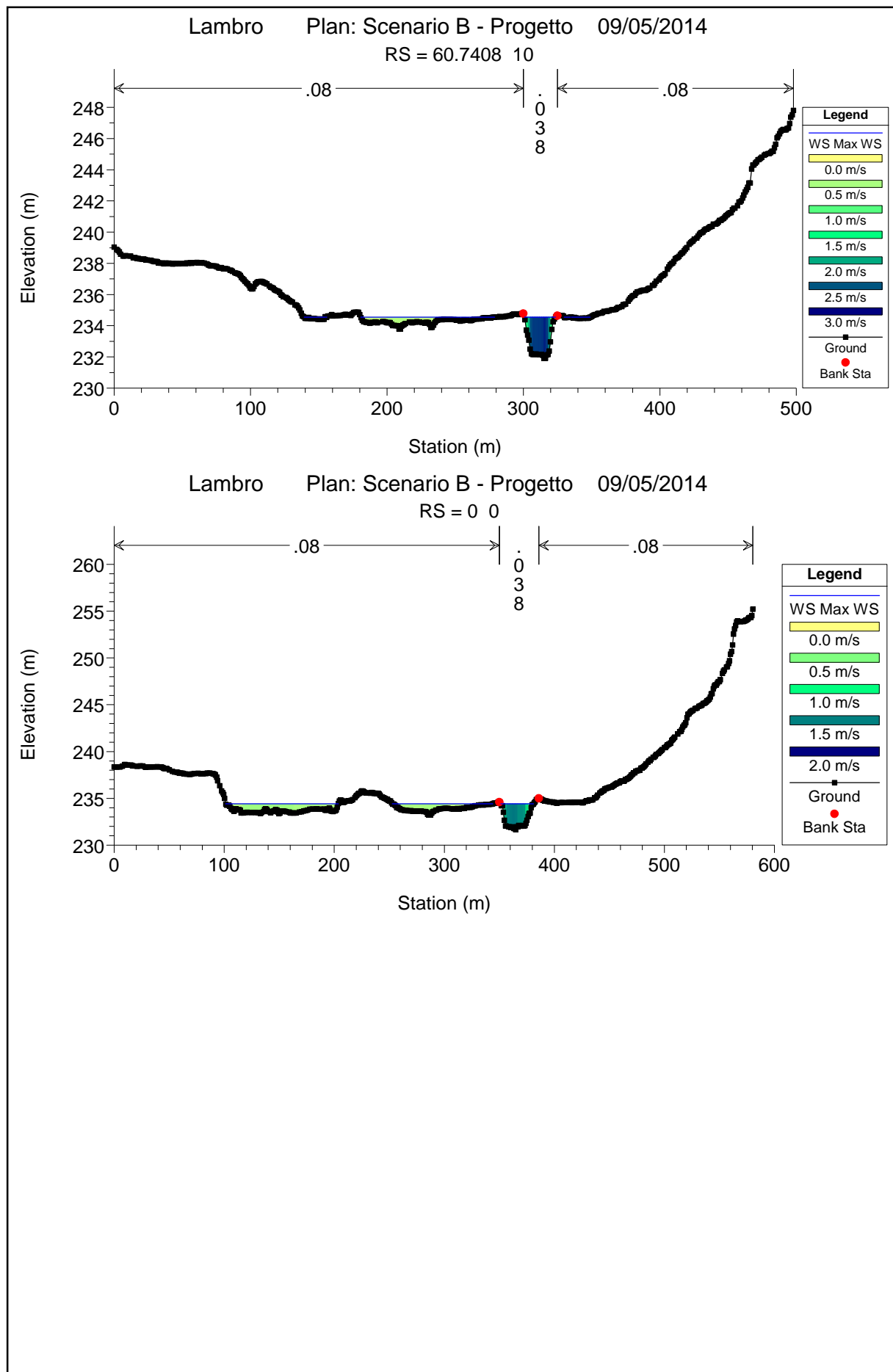














PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo

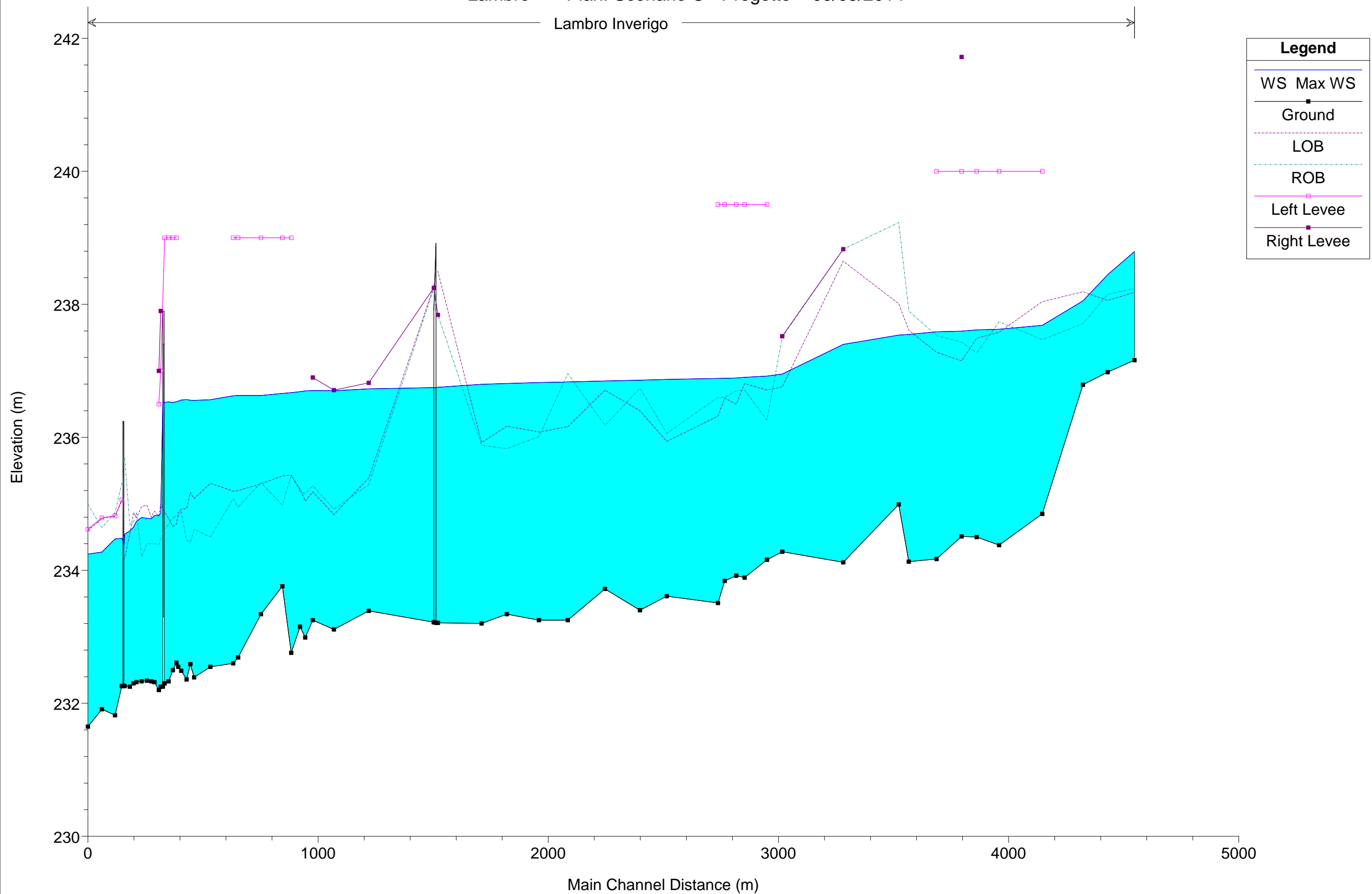
**S
RA**
s.r.l.
STUDIO ROSSO
INGEGNERI ASSOCIATI s.r.l.

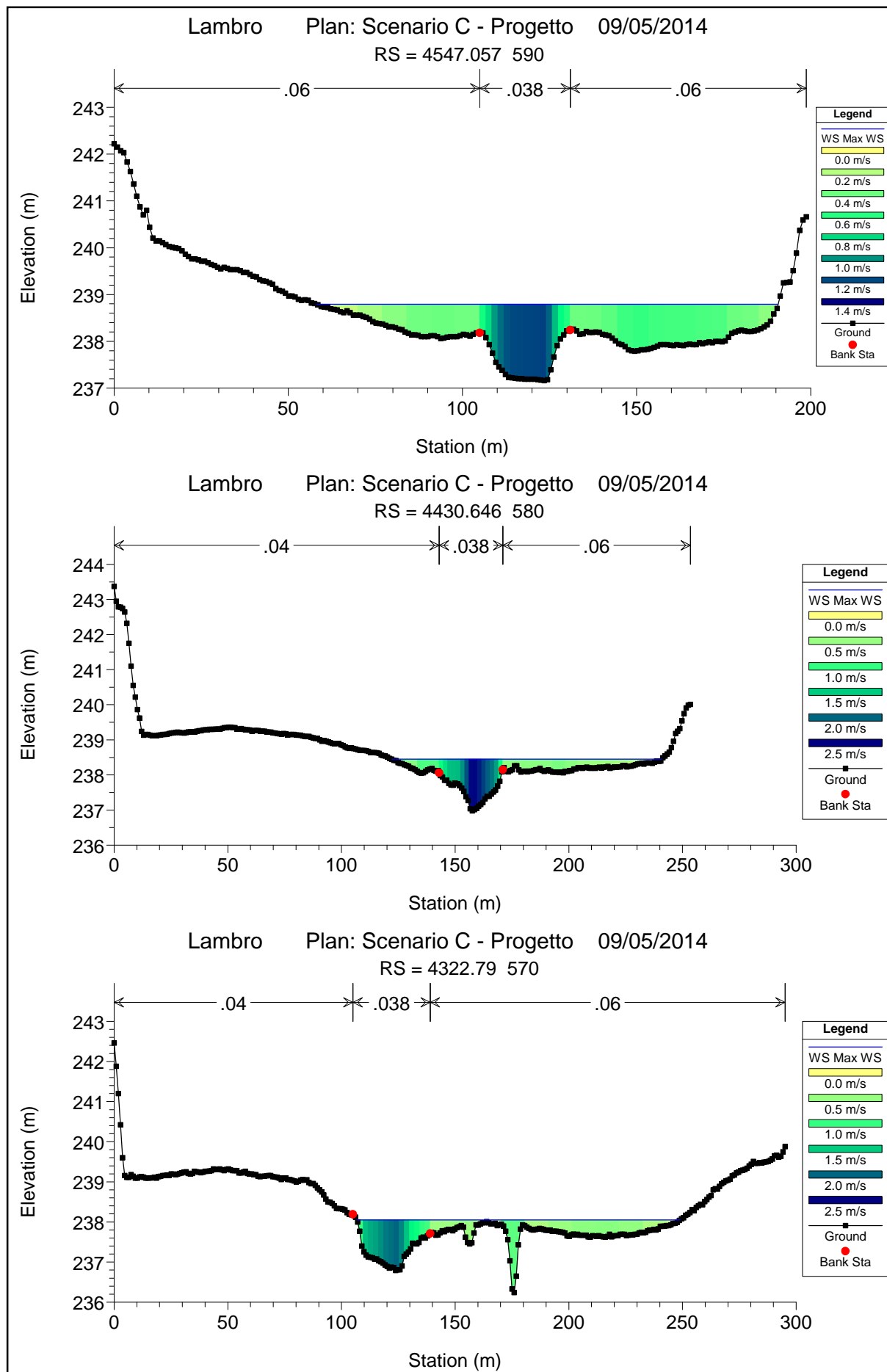
ALLEGATO 4

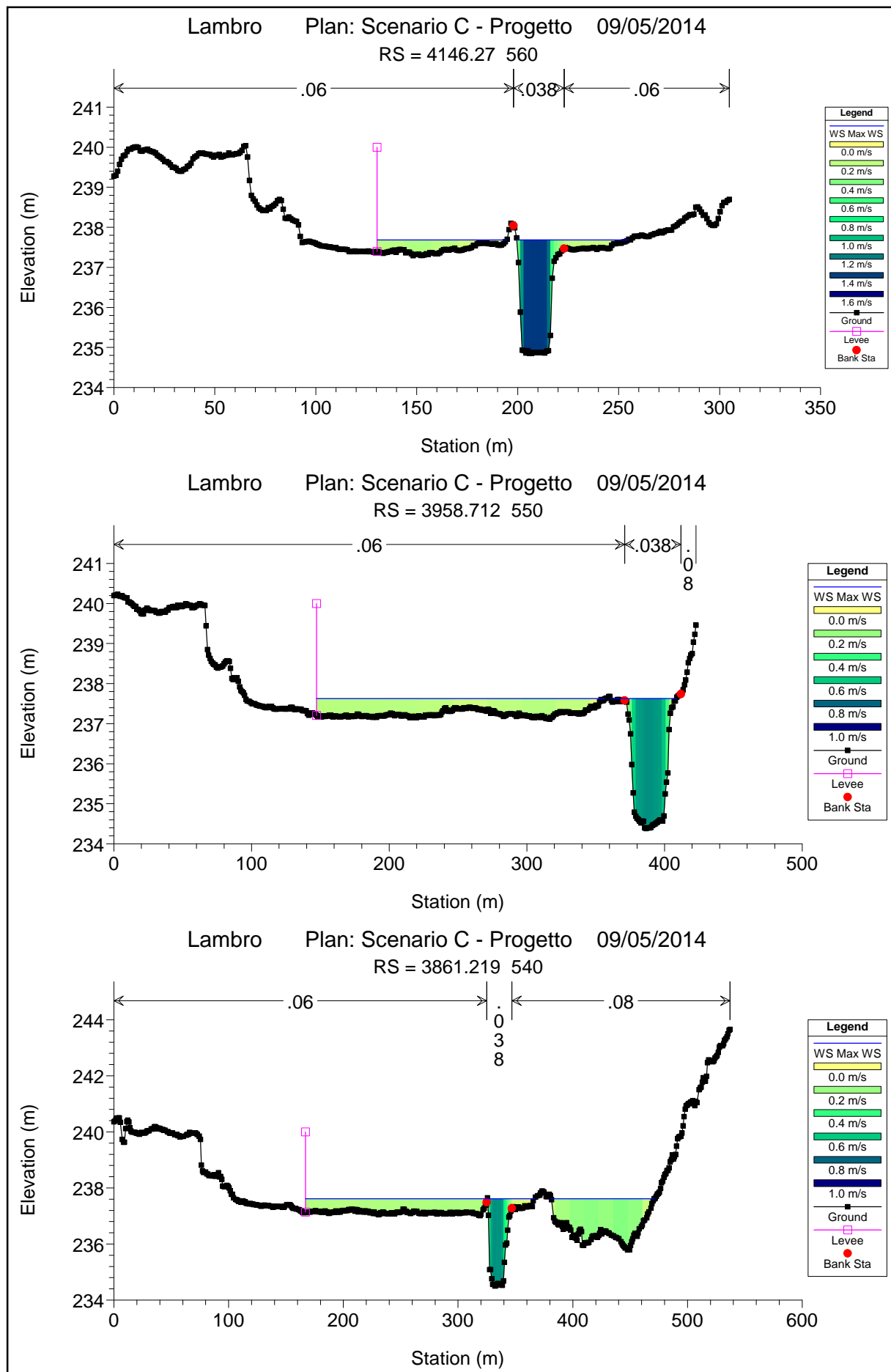
– Risultati simulazione idraulica: scenario C – Portate progetto con laminazione Inverigo

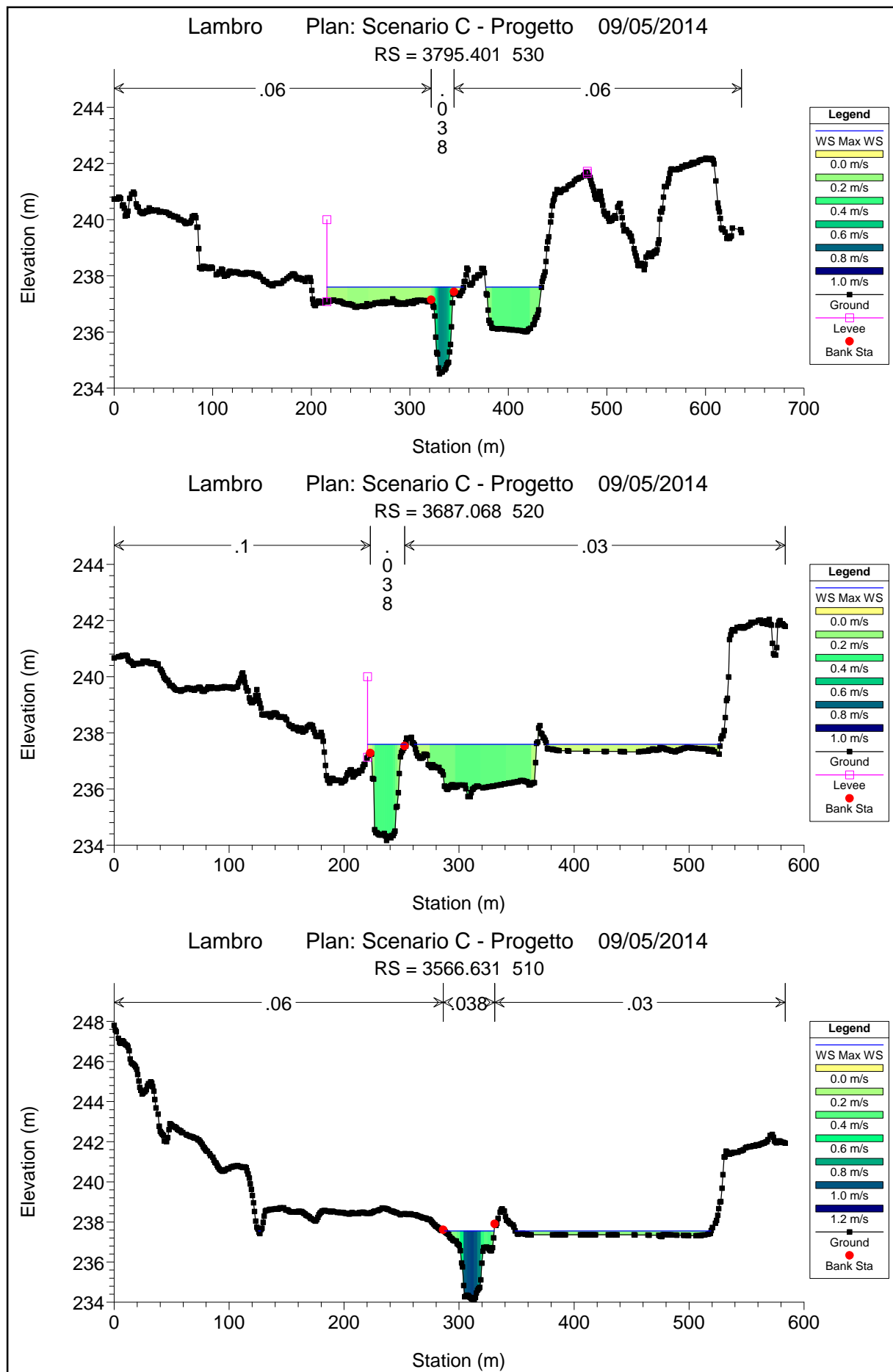
HEC-RAS Plan: C - Progetto River: Lambro Reach: Inverigo Profile: Max WS

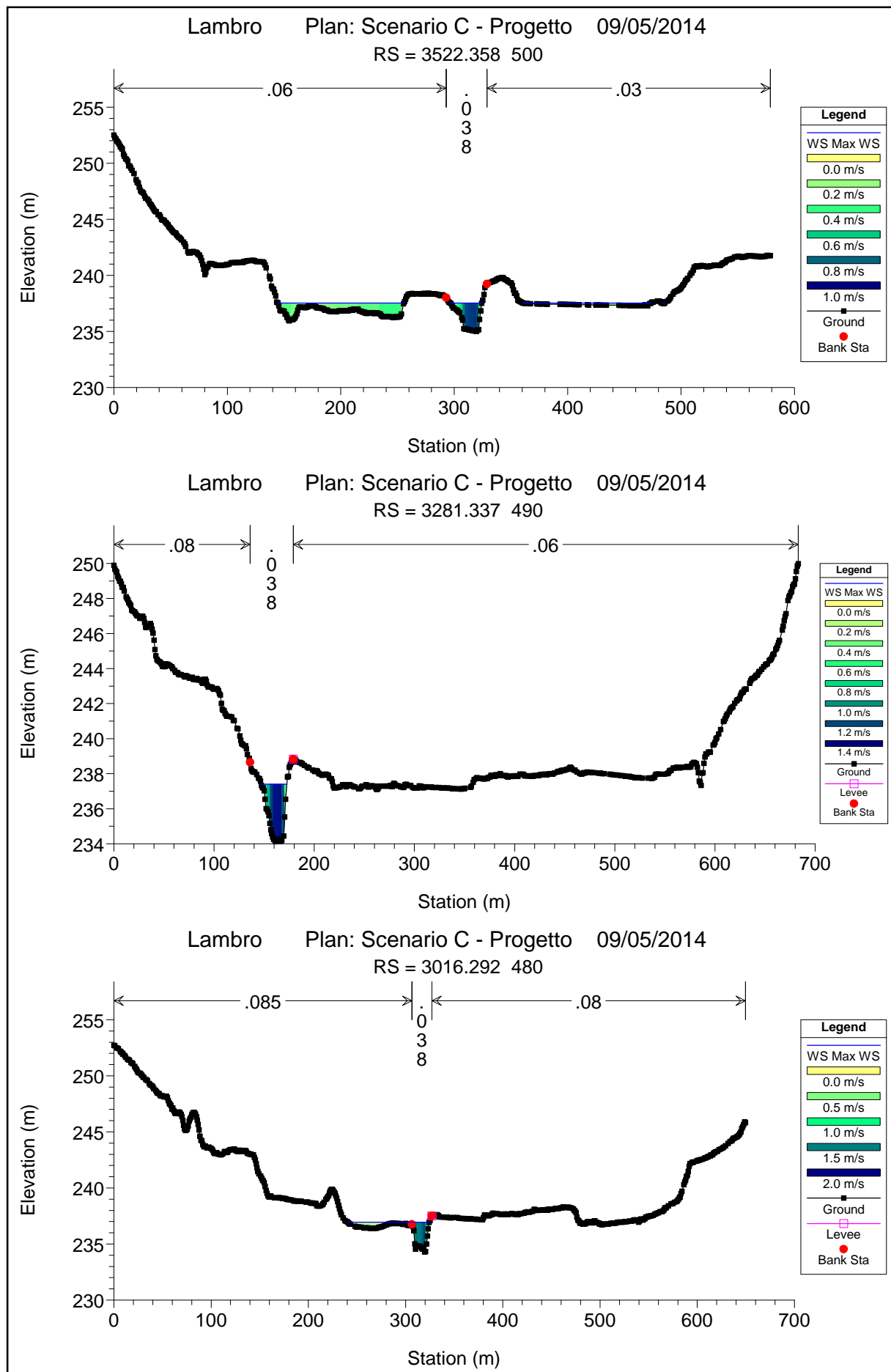
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Inverigo	4547.057 590	Max WS	64.26	237.16	238.79	238.33	238.83	0.001254	1.09	98.14	132.57	0.31
Inverigo	4430.646 580	Max WS	64.09	236.98	238.45	238.38	238.61	0.006289	1.97	48.37	118.76	0.66
Inverigo	4322.79 570	Max WS	63.99	236.79	238.05	237.86	238.15	0.005025	1.65	62.45	142.22	0.58
Inverigo	4146.27 560	Max WS	63.23	234.85	237.68	236.16	237.76	0.001075	1.28	67.10	119.24	0.29
Inverigo	3958.712 550	Max WS	63.30	234.38	237.63	235.48	237.64	0.000224	0.65	161.42	257.36	0.14
Inverigo	3861.219 540	Max WS	63.56	234.50	237.62	236.10	237.63	0.000228	0.62	234.28	289.47	0.14
Inverigo	3795.401 530	Max WS	63.86	234.51	237.60	236.30	237.61	0.000235	0.63	184.98	195.03	0.14
Inverigo	3687.068 520	Max WS	64.23	234.17	237.59	235.46	237.59	0.000055	0.33	236.53	290.84	0.07
Inverigo	3566.631 510	Max WS	64.59	234.13	237.55	235.62	237.58	0.000543	0.82	101.55	215.36	0.21
Inverigo	3522.358 500	Max WS	64.75	234.99	237.54	236.55	237.55	0.000491	0.76	149.14	254.28	0.19
Inverigo	3281.337 490	Max WS	65.00	234.12	237.40	235.63	237.47	0.000785	1.17	55.34	25.74	0.26
Inverigo	3016.292 480	Max WS	51.59	234.28	236.95	235.87	237.05	0.001531	1.45	53.41	83.95	0.34
Inverigo	2949.954 470	Max WS	51.25	234.16	236.92	235.33	236.95	0.000353	0.79	135.83	260.29	0.17
Inverigo	2852.912 460	Max WS	51.27	233.89	236.90	235.06	236.92	0.000278	0.67	171.15	267.01	0.15
Inverigo	2816.748 450	Max WS	51.19	233.92	236.89	235.25	236.91	0.000349	0.72	173.68	260.21	0.17
Inverigo	2766.457 440	Max WS	51.47	233.84	236.89	235.01	236.89	0.000138	0.48	261.08	286.92	0.11
Inverigo	2737.543 430	Max WS	51.39	233.51	236.88	234.64	236.89	0.000087	0.41	279.02	301.82	0.09
Inverigo	2514.769 420	Max WS	51.74	233.61	236.87	234.72	236.88	0.000082	0.43	298.71	275.49	0.09
Inverigo	2398.189 410	Max WS	51.74	233.40	236.86	234.78	236.87	0.000192	0.63	195.05	190.69	0.13
Inverigo	2246.646 400	Max WS	51.79	233.72	236.85	234.66	236.86	0.000109	0.46	201.26	202.39	0.10
Inverigo	2084.842 390	Max WS	51.99	233.25	236.83	234.57	236.84	0.000132	0.49	210.64	193.05	0.11
Inverigo	1959.351 380	Max WS	52.28	233.25	236.82	234.53	236.83	0.000057	0.37	329.56	259.20	0.07
Inverigo	1819.658 370	Max WS	52.51	233.34	236.81	234.63	236.82	0.000119	0.50	194.04	348.05	0.10
Inverigo	1710.393 360	Max WS	52.76	233.20	236.80	234.41	236.81	0.000118	0.54	191.59	287.09	0.10
Inverigo	1520.357 350	Max WS	53.14	233.21	236.75		236.78	0.000270	0.70	76.03	35.08	0.15
Inverigo	1511.685 345		Mult Open									
Inverigo	1503.015 340	Max WS	53.08	233.22	236.75	234.61	236.78	0.000320	0.74	71.37	34.36	0.16
Inverigo	1219.906 330	Max WS	53.36	233.39	236.73	234.73	236.73	0.000078	0.44	256.80	174.25	0.08
Inverigo	1068.842 320	Max WS	53.49	233.11	236.70	234.32	236.73	0.000195	0.75	77.06	90.90	0.14
Inverigo	977.0419 310	Max WS	53.67	233.25	236.70	234.39	236.71	0.000075	0.44	163.76	100.21	0.08
Inverigo	944.2654 300	Max WS	53.74	232.99	236.70	234.27	236.71	0.000105	0.55	155.37	190.23	0.10
Inverigo	921.7176 290	Max WS	53.77	233.15	236.69	234.19	236.71	0.000147	0.65	82.87	292.13	0.12
Inverigo	883.1097 280	Max WS	53.84	232.76	236.67	234.43	236.70	0.000228	0.75	72.22	279.25	0.15
Inverigo	844.9036 270	Max WS	53.91	233.76	236.66	234.81	236.69	0.000276	0.80	67.70	265.10	0.16
Inverigo	752.0323 260	Max WS	54.08	233.34	236.63	234.53	236.67	0.000285	0.85	63.28	308.74	0.16
Inverigo	652.2289 250	Max WS	54.26	232.69	236.63	233.80	236.65	0.000107	0.57	94.77	327.04	0.10
Inverigo	631.1052 240	Max WS	54.31	232.60	236.62	233.85	236.64	0.000120	0.60	90.51	349.49	0.11
Inverigo	532.0892 230	Max WS	54.30	232.55	236.57	234.12	236.62	0.000369	1.04	52.34	510.25	0.18
Inverigo	461.4436 220	Max WS	65.02	232.39	236.56	233.95	236.59	0.000191	0.77	84.44	477.97	0.14
Inverigo	444.964 210	Max WS	65.12	232.59	236.56	233.72	236.58	0.000143	0.71	92.29	438.52	0.12
Inverigo	428.3983 200	Max WS	65.22	232.36	236.57	233.41	236.58	0.000071	0.51	127.05	383.55	0.09
Inverigo	405.128 190	Max WS	65.35	232.49	236.56	233.69	236.58	0.000106	0.60	108.54	323.20	0.10
Inverigo	392.612 180	Max WS	65.41	232.55	236.54	233.79	236.58	0.000192	0.82	79.88	301.96	0.14
Inverigo	384.5591 170	Max WS	65.46	232.61	236.53	234.03	236.58	0.000252	0.91	72.10	290.00	0.16
Inverigo	368.98 160	Max WS	65.57	232.50	236.53	233.97	236.57	0.000274	0.95	68.91	215.81	0.16
Inverigo	350.5163 150	Max WS	65.71	232.33	236.53	233.85	236.57	0.000218	0.83	78.90	198.93	0.15
Inverigo	333.7652 140	Max WS	65.85	232.30	236.53	233.64	236.56	0.000057	0.85	77.37	166.70	0.14
Inverigo	325		Inl Struct									
Inverigo	316.6304 130	Max WS	65.84	232.25	234.86	233.57	234.97	0.000366	1.51	43.69	61.53	0.33
Inverigo	307.8002 120	Max WS	65.91	232.20	234.83	233.74	234.96	0.001741	1.63	40.47	75.50	0.38
Inverigo	288.6484 110	Max WS	66.00	232.32	234.82	233.77	234.93	0.001526	1.48	44.73	130.31	0.35
Inverigo	275.1218 100	Max WS	66.07	232.33	234.78	233.84	234.91	0.001963	1.61	41.15	127.13	0.40
Inverigo	256.351 90	Max WS	66.14	232.34	234.78	233.80	234.88	0.001449	1.37	48.12	80.60	0.34
Inverigo	233.2564 80	Max WS	66.20	232.33	234.79	233.41	234.85	0.000683	1.08	61.33	63.68	0.24
Inverigo	210.6123 70	Max WS	66.30	232.32	234.74	233.59	234.83	0.001360	1.36	48.63	39.72	0.33
Inverigo	197.713 60	Max WS	66.41	232.30	234.65	233.72	234.81	0.002359	1.78	37.34	41.02	0.43
Inverigo	181.8634 50	Max WS	66.53	232.25	234.59	233.79	234.77	0.002748	1.87	35.65	71.16	0.47
Inverigo	159.4336 40	Max WS	66.66	232.26	234.54	233.81	234.71	0.002879	1.80	37.07	27.56	0.47
Inverigo	153.24 35		Bridge									
Inverigo	147.0547 30	Max WS	66.66	232.26	234.48	233.49	234.60	0.001619	1.52	43.76	23.91	0.36
Inverigo	117.4892 20	Max WS	66.88	231.82	234.47	233.13	234.56	0.001098	1.30	51.41	26.57	0.30
Inverigo	60.7408 10	Max WS	67.25	231.91	234.27	233.45	234.46	0.002636	1.88	35.68	20.49	0.46
Inverigo	0 0	Max WS	67.25	231.65	234.24	233.06	234.33	0.001212	1.33	50.66	27.75	0.31

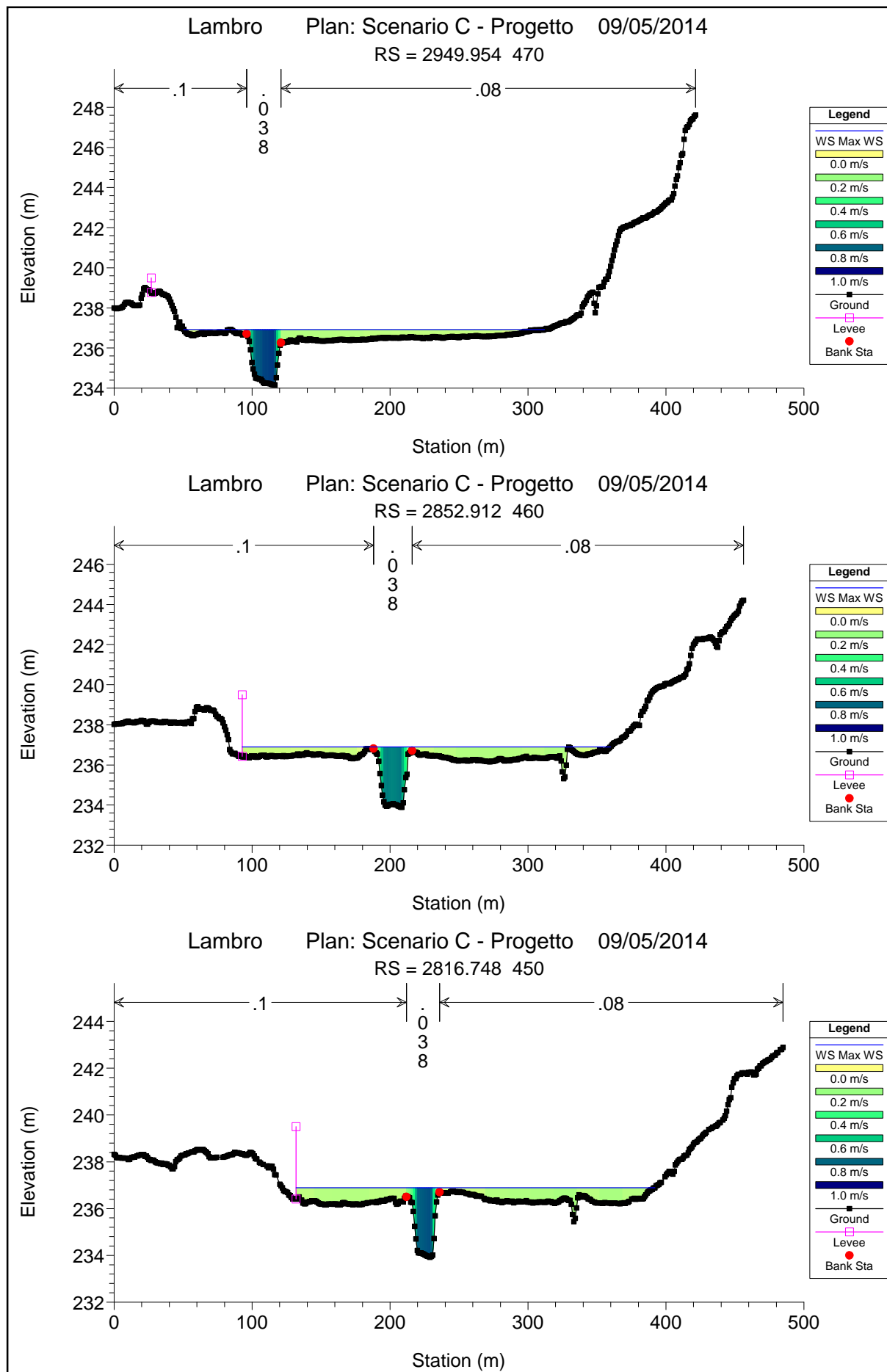


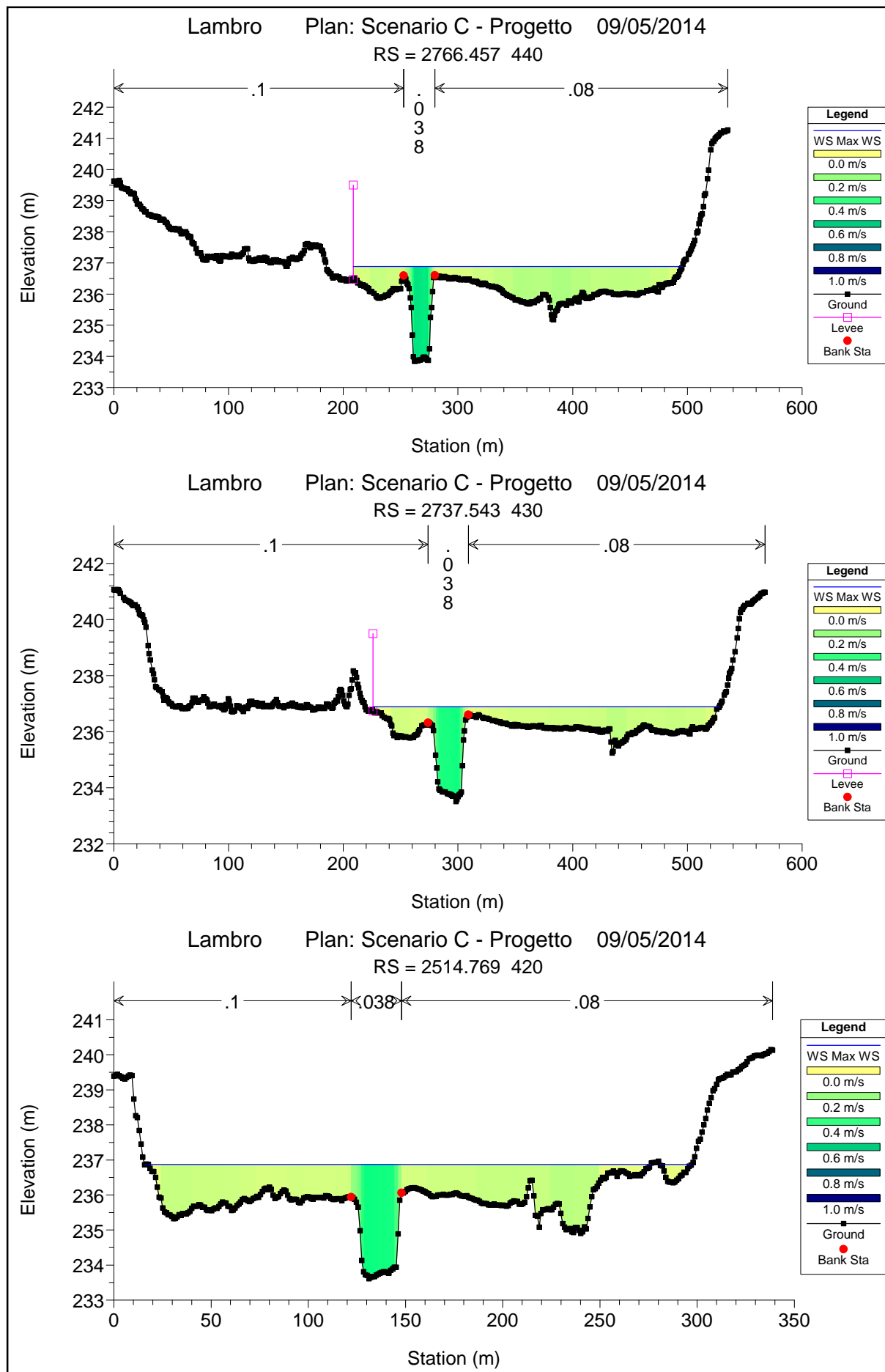


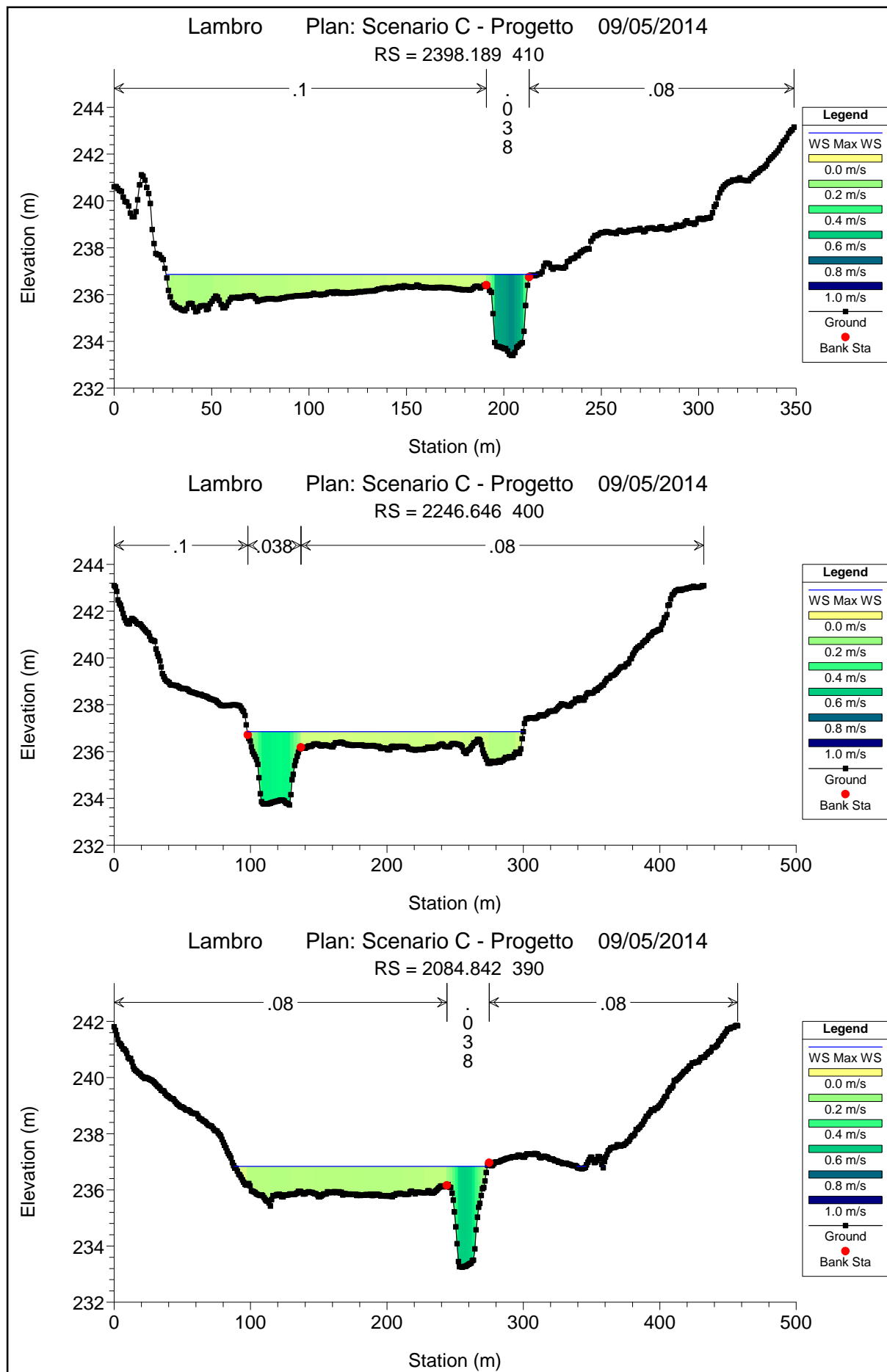


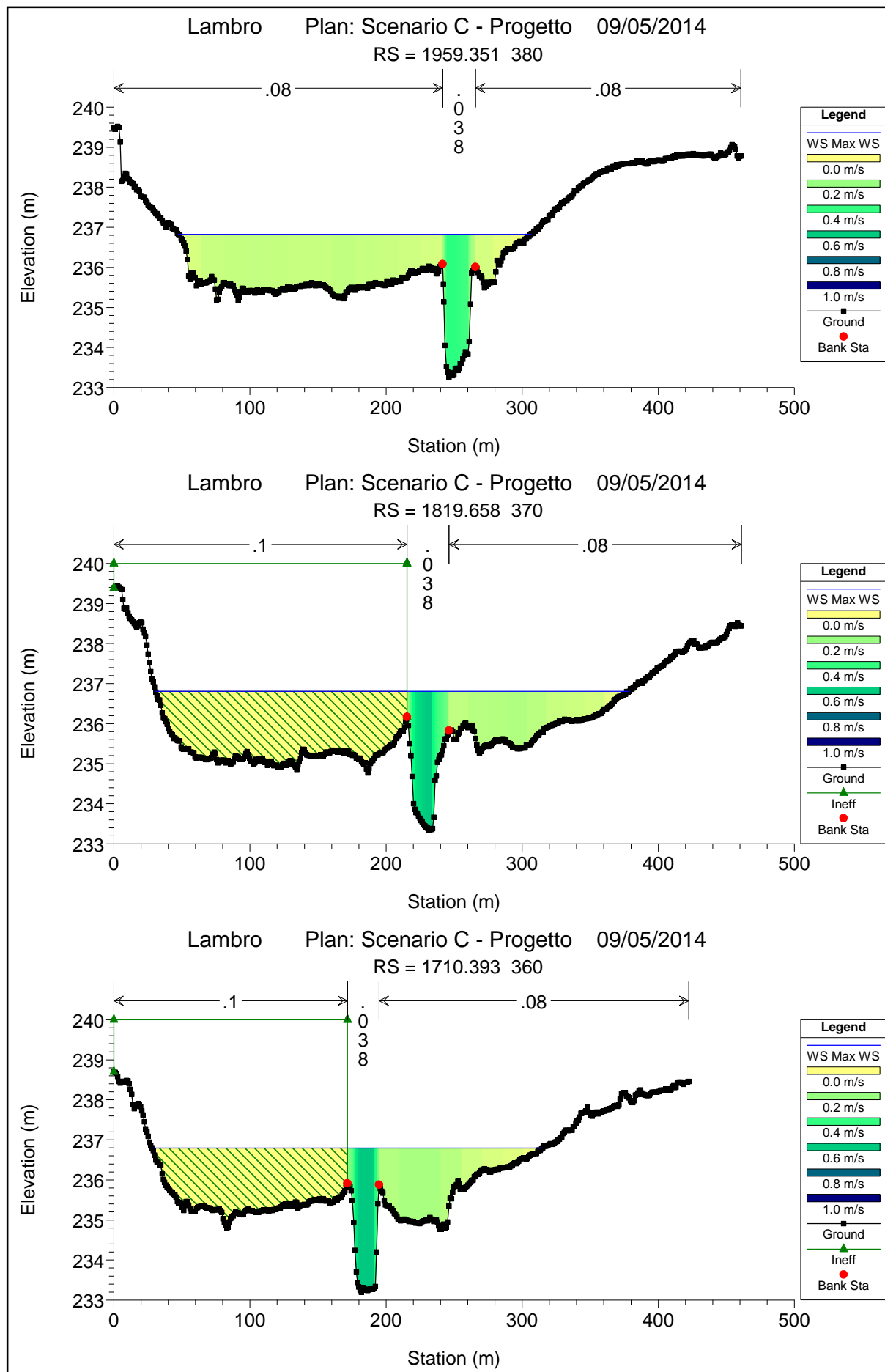


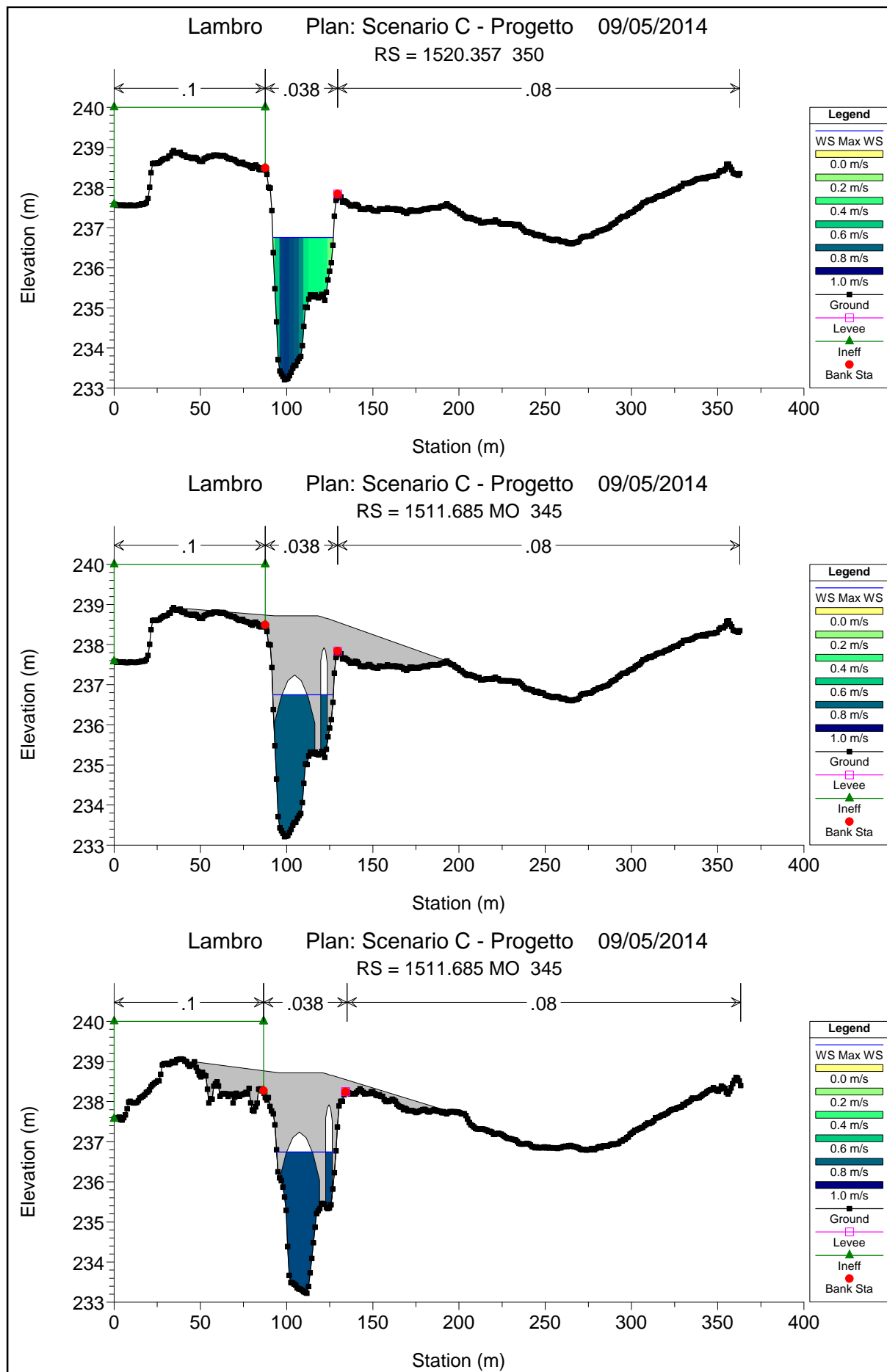


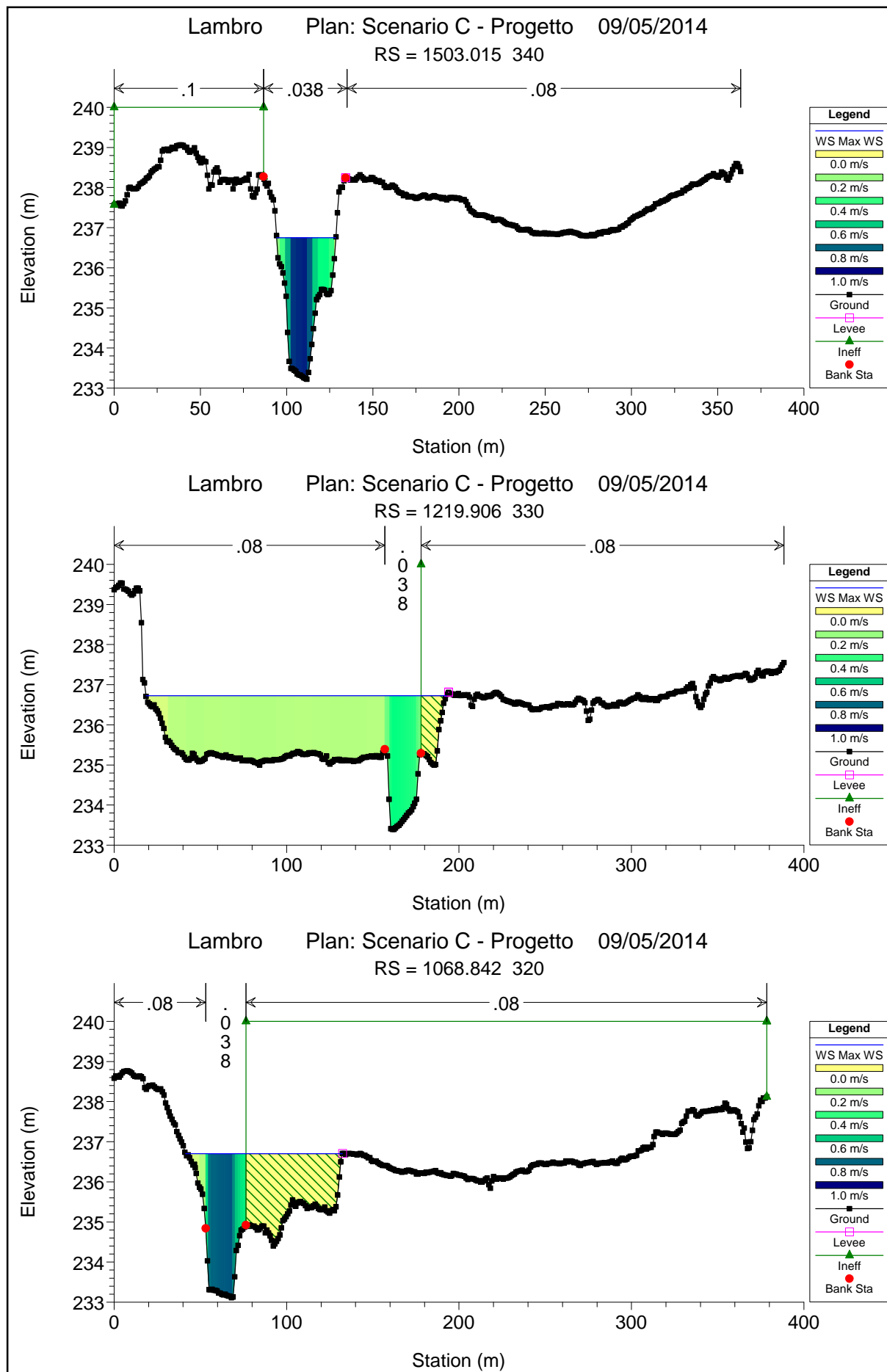


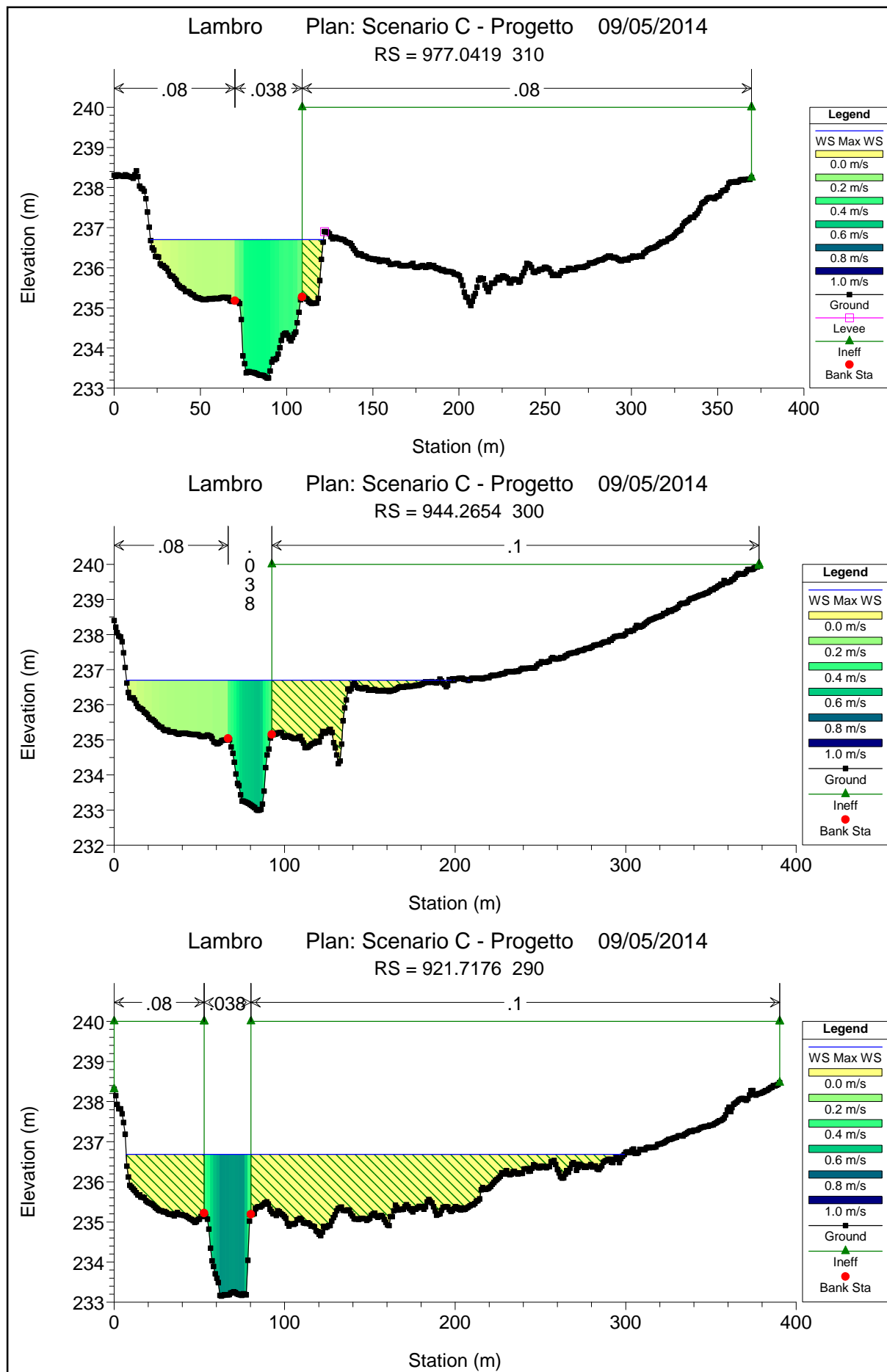


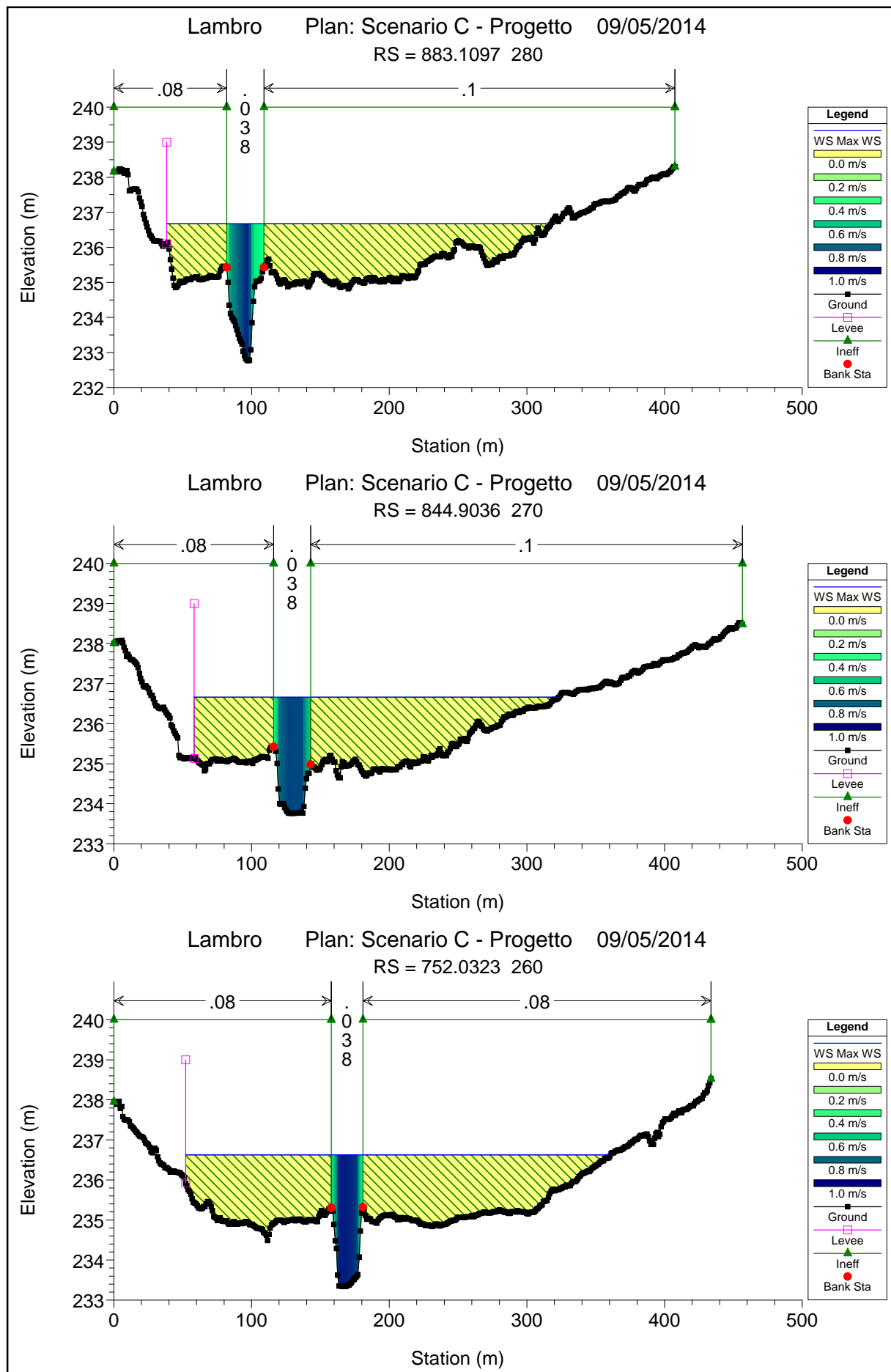


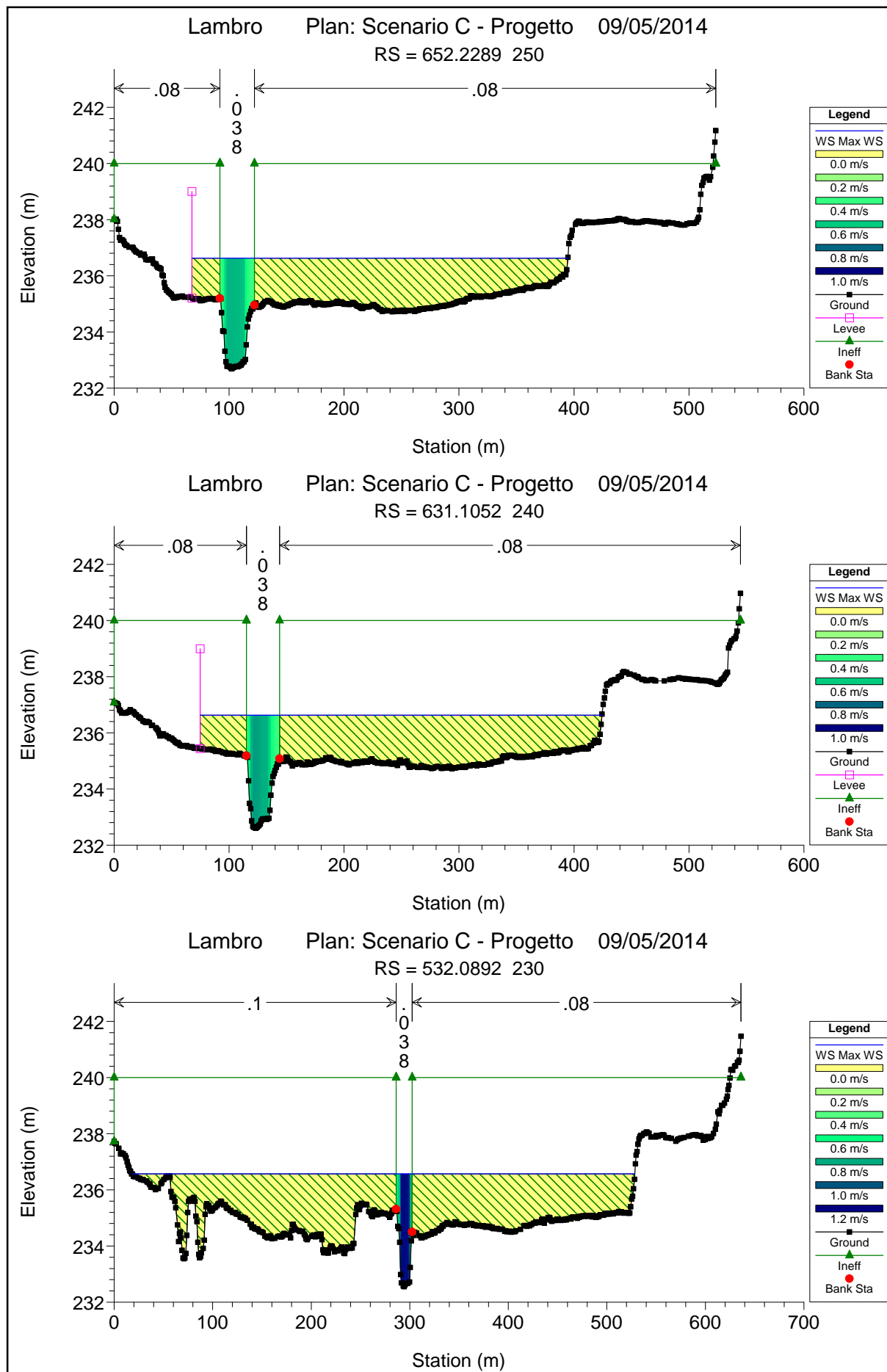


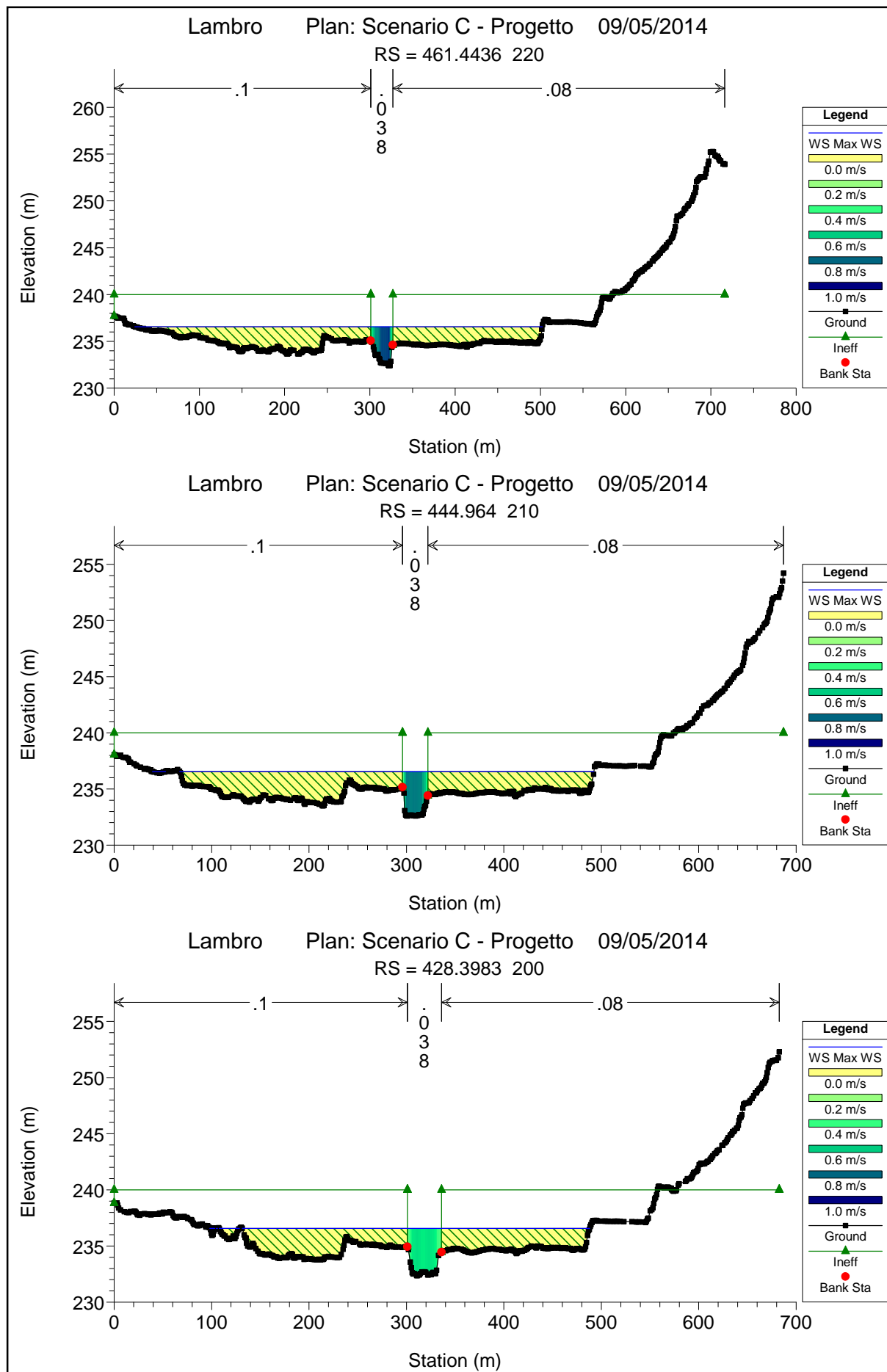


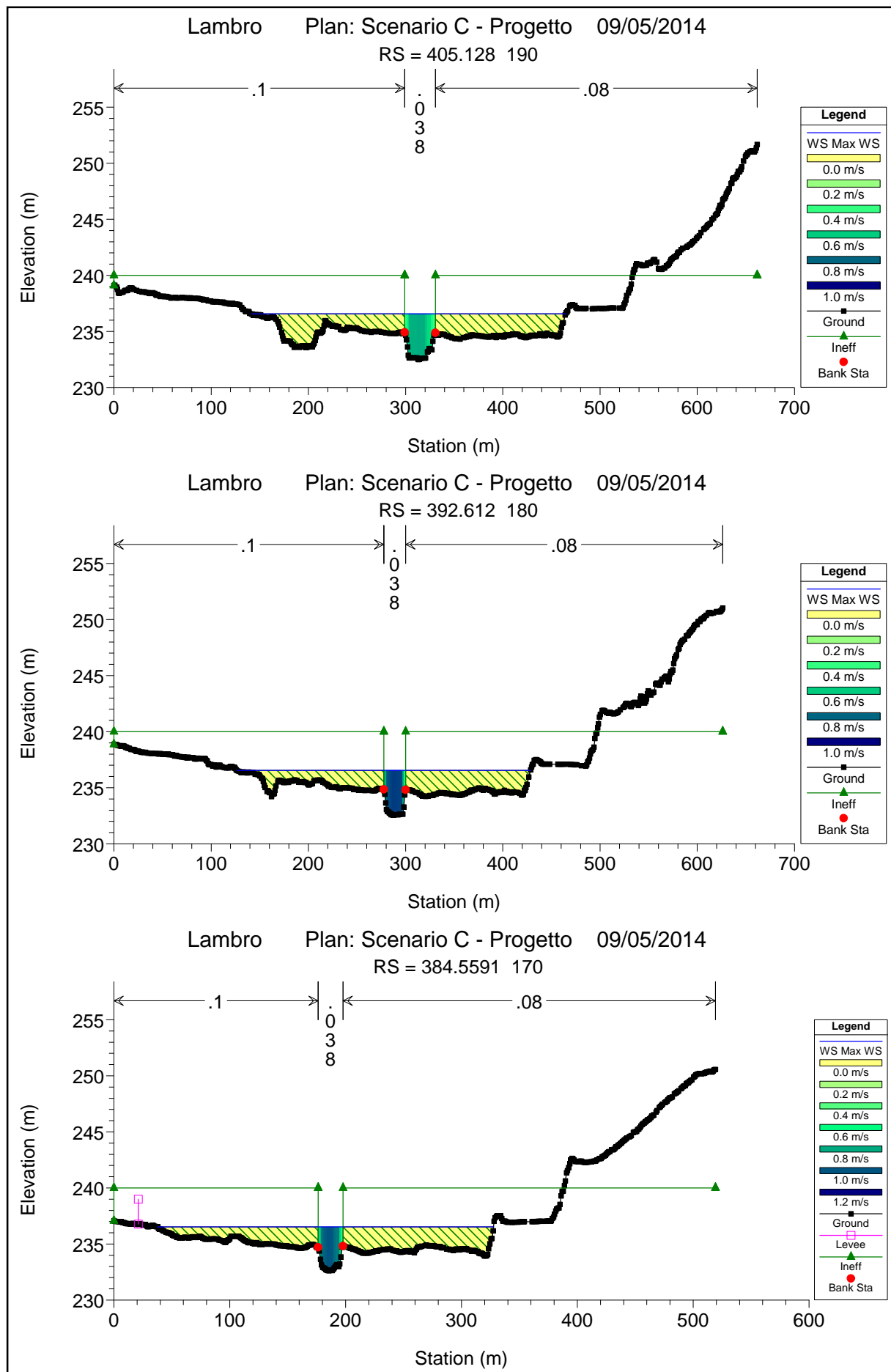


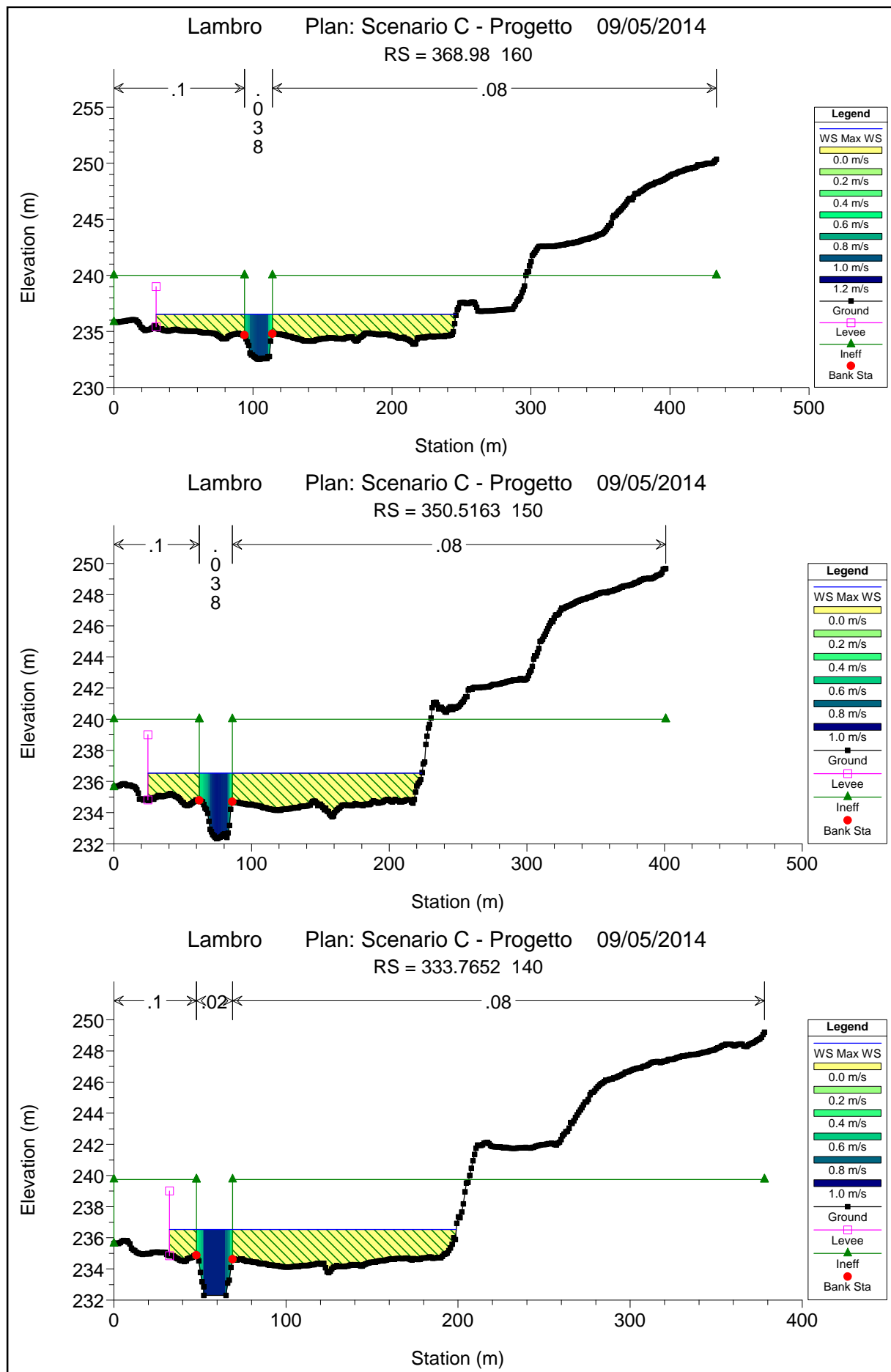


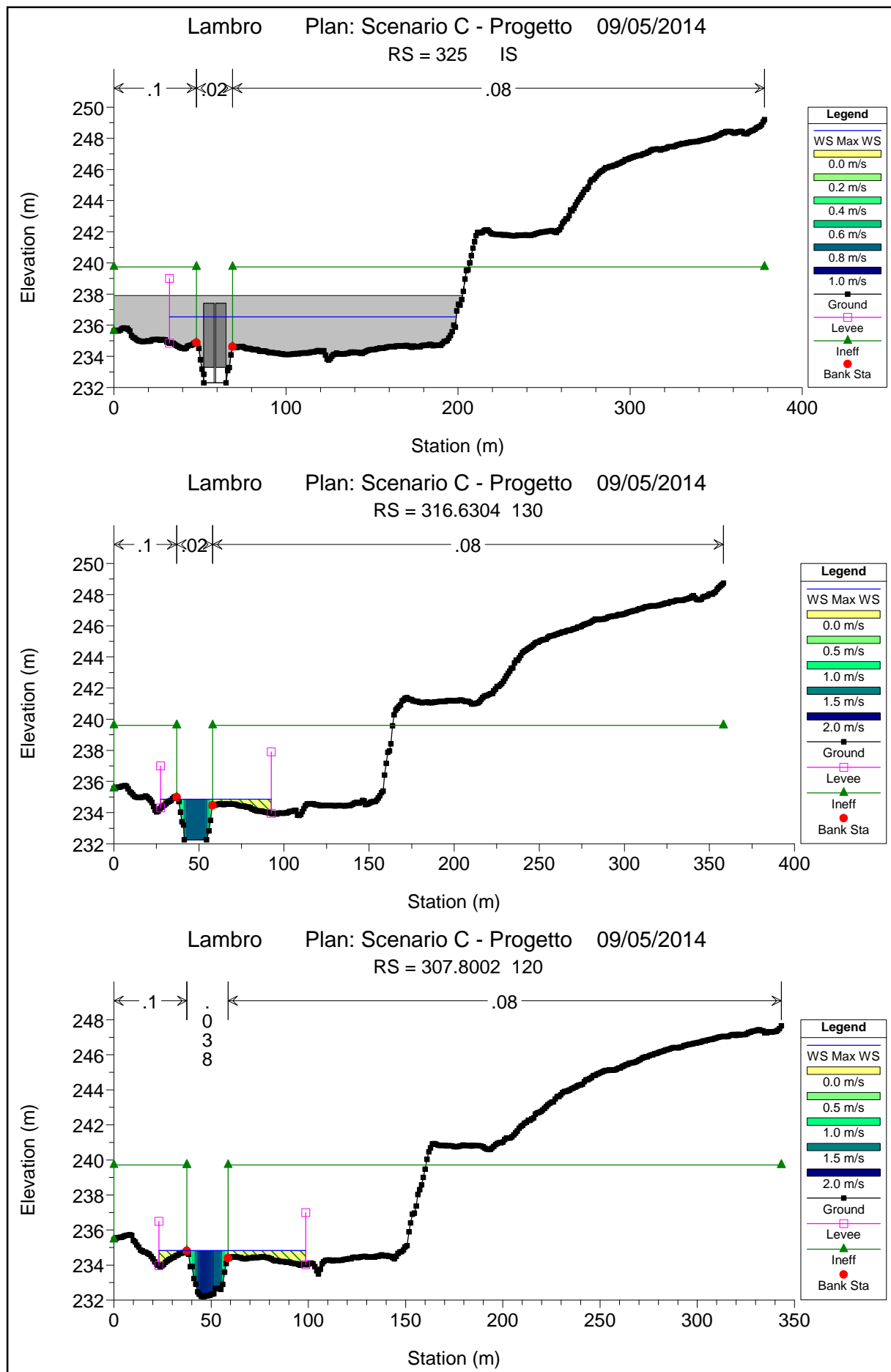


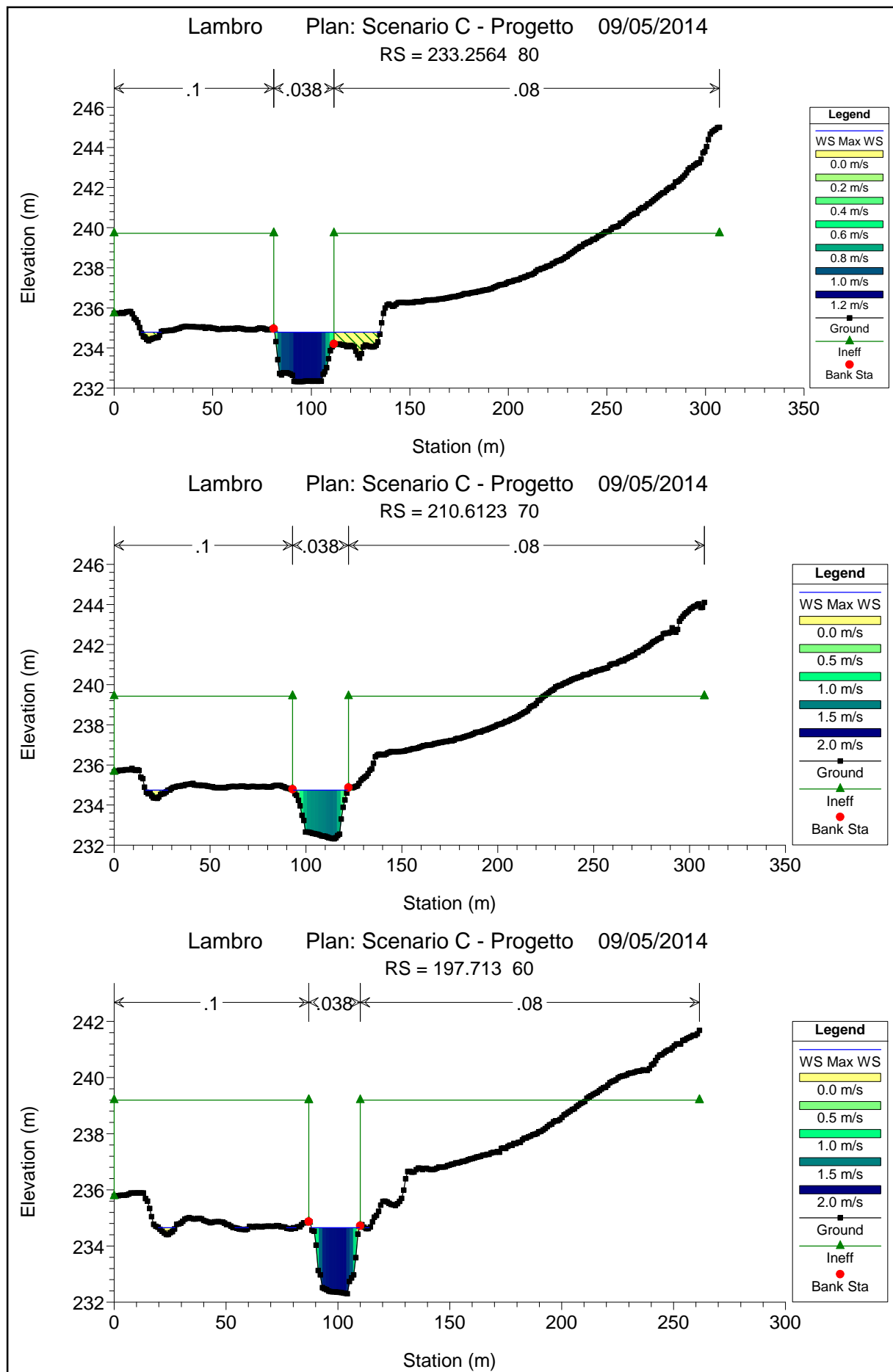


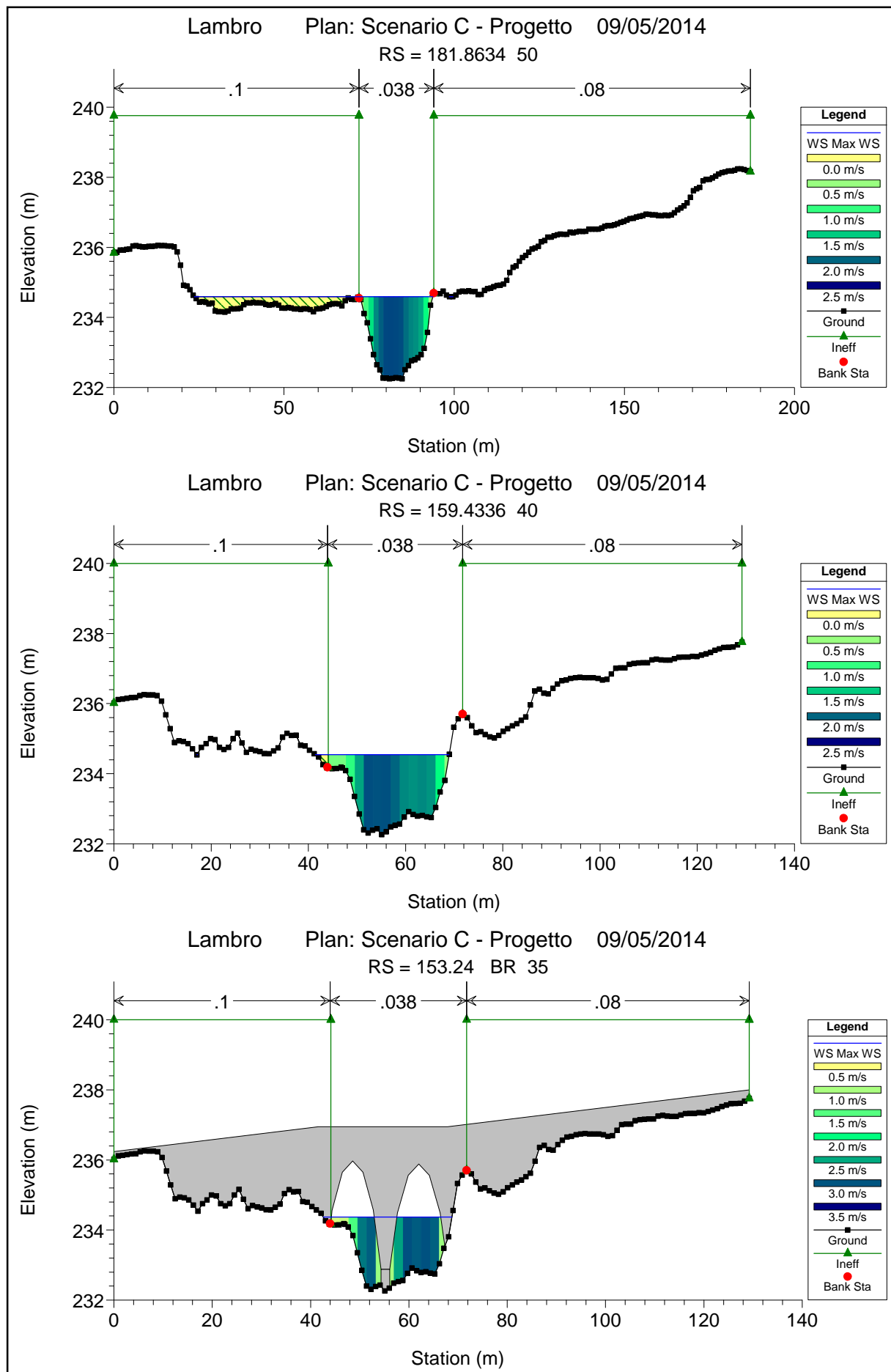


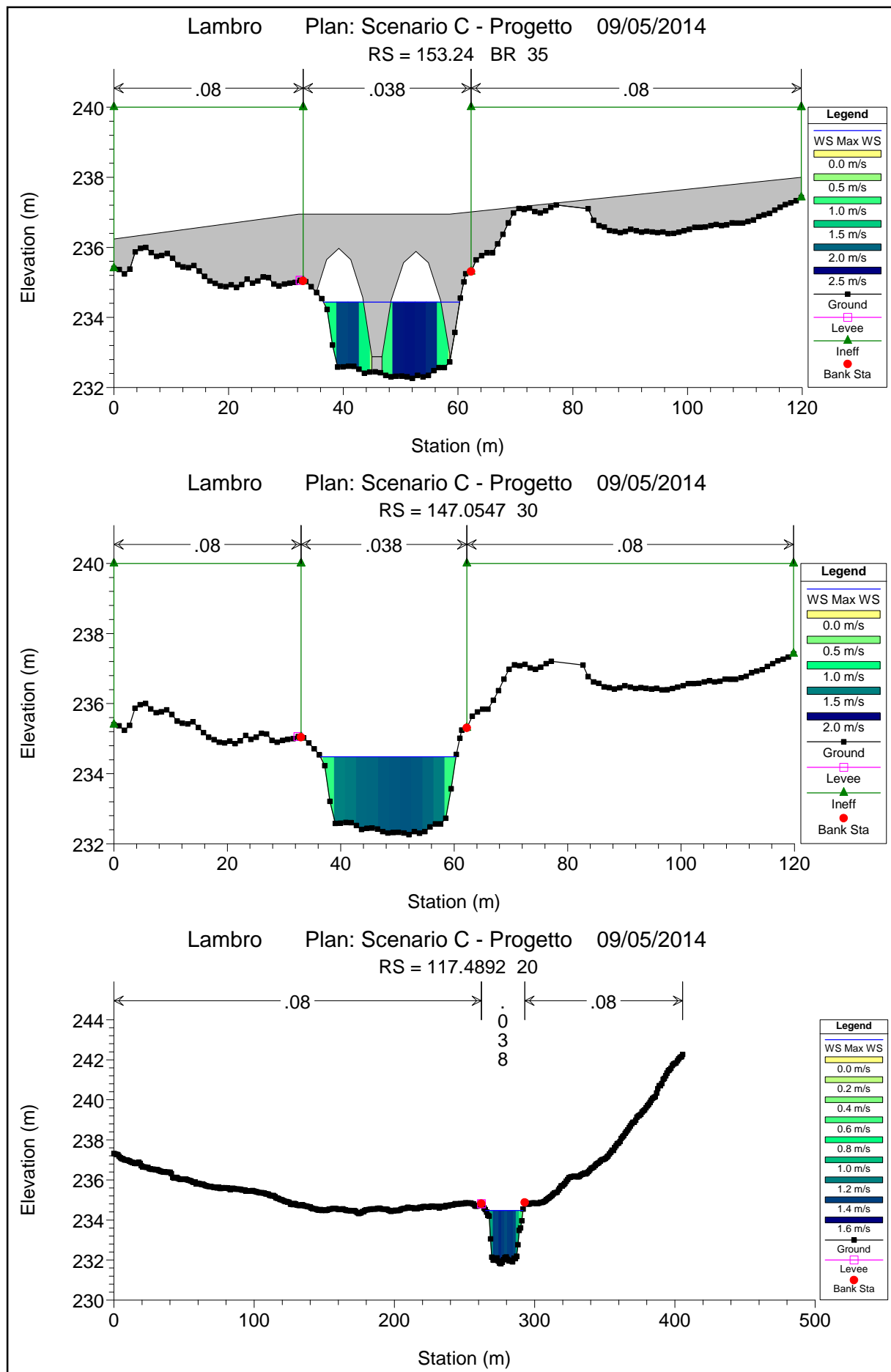


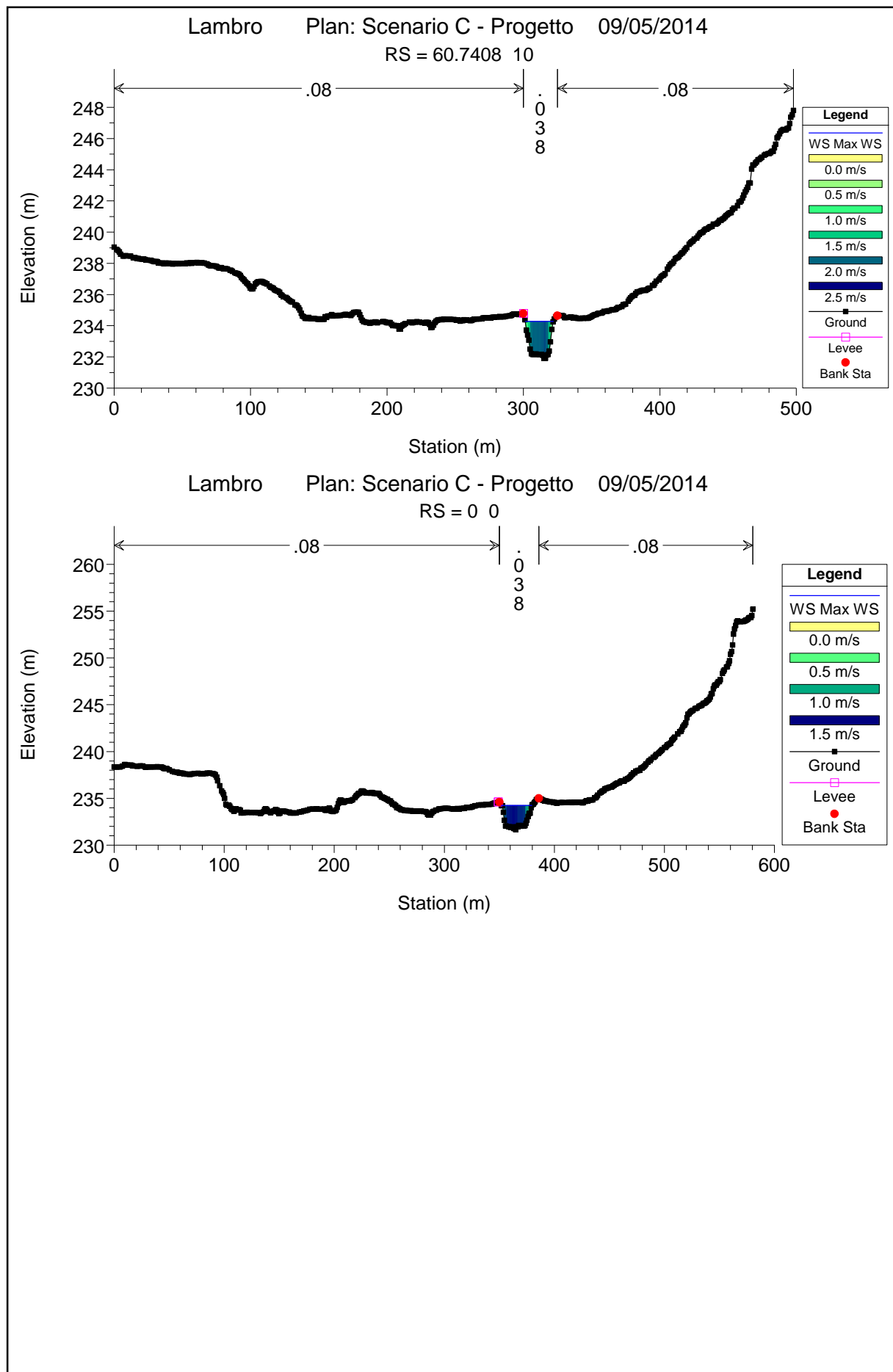














PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo

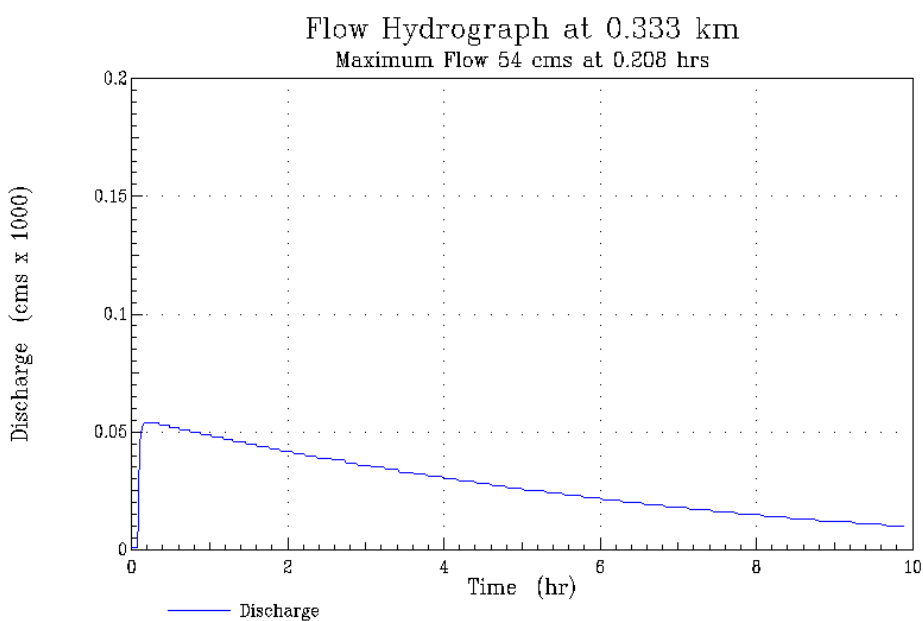
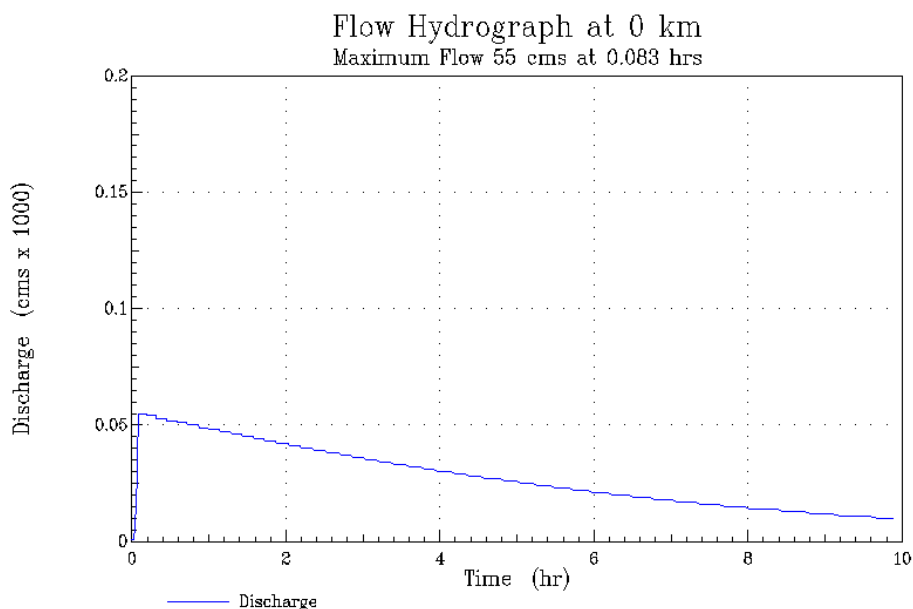
SRA
s.r.l.
STUDIO ROSSO
INGEGNERI ASSOCIATI s.r.l.

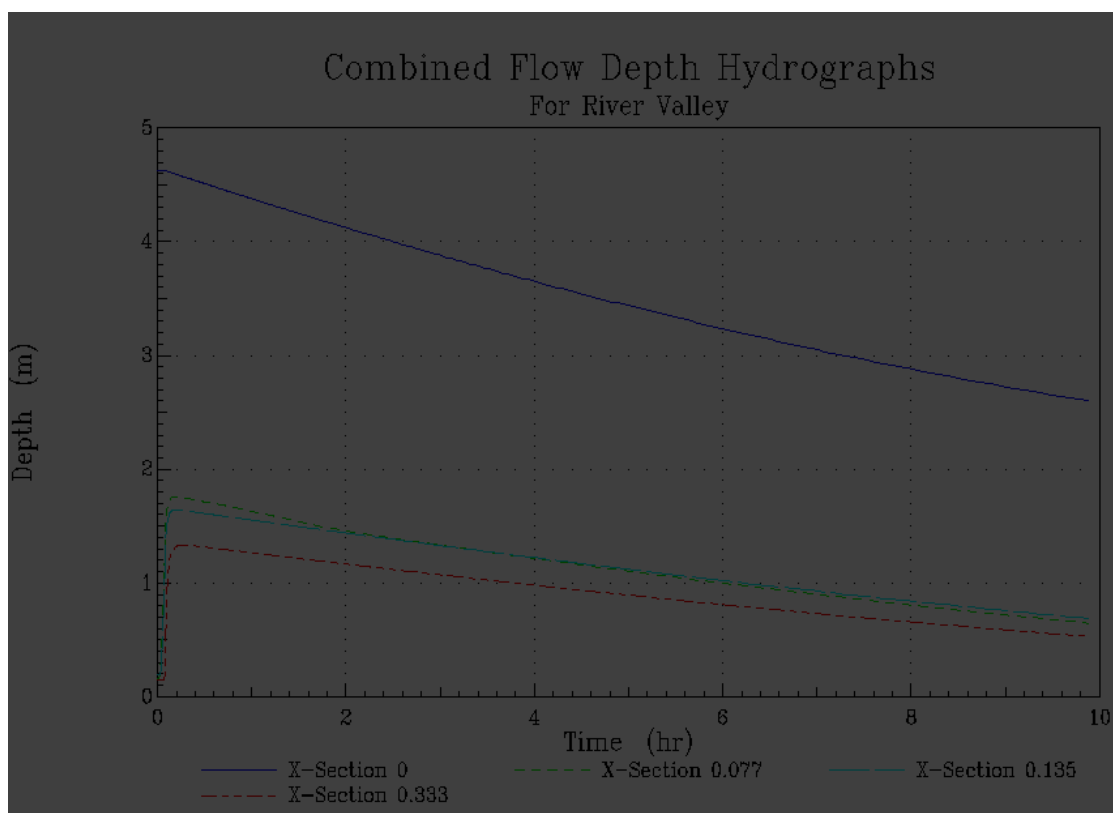
ALLEGATO 5

– Rischio di collasso dell'opera



SCENARIO A



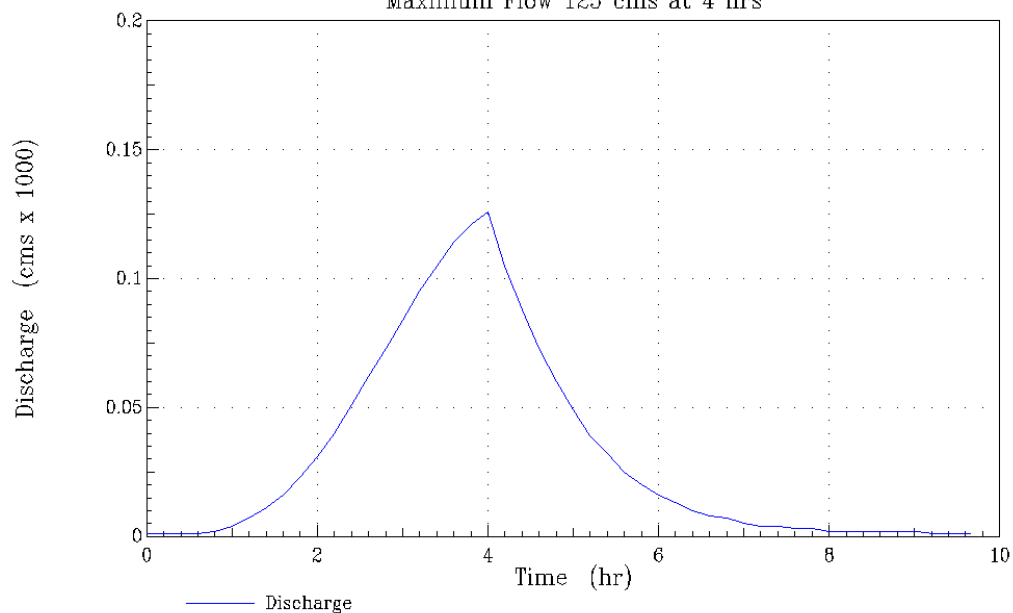




SCENARIO B

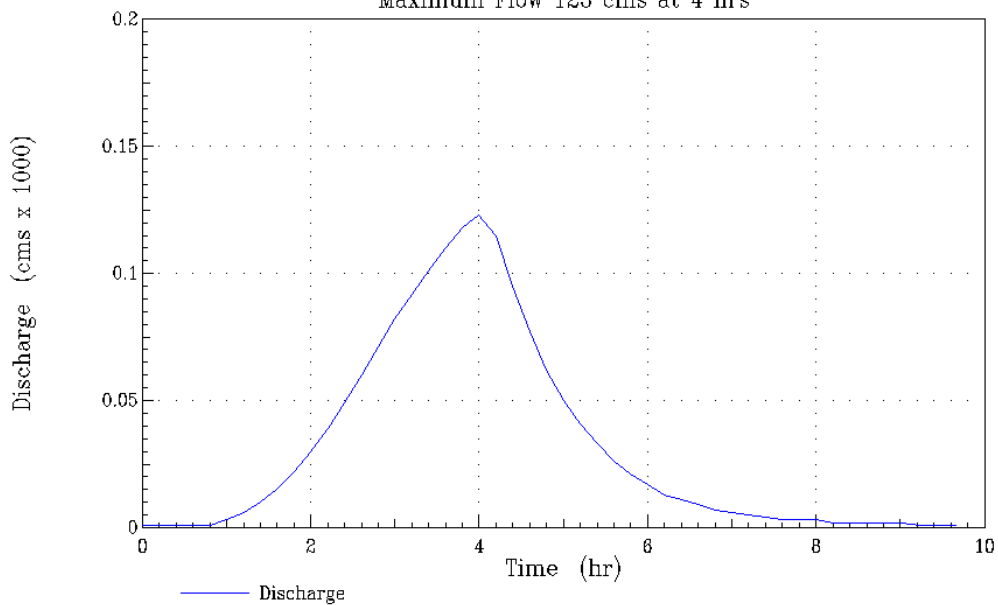
Flow Hydrograph at 0 km

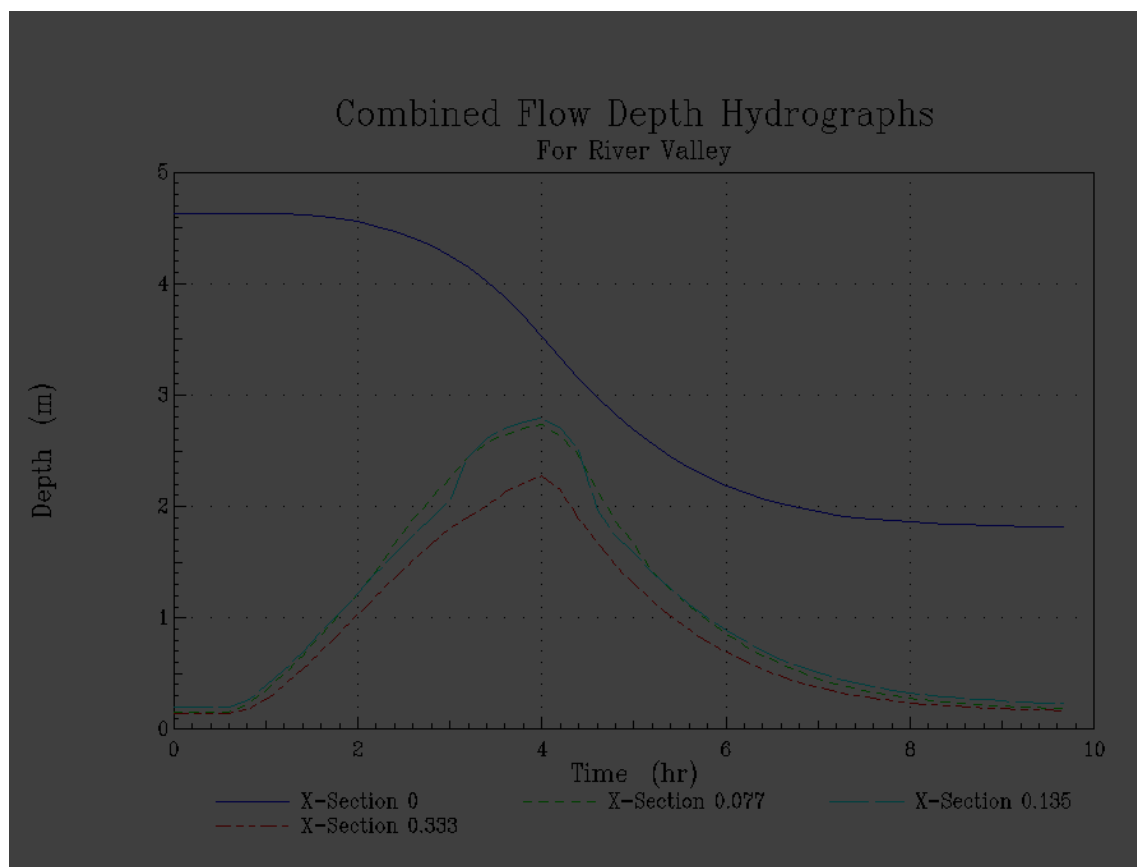
Maximum Flow 125 cms at 4 hrs



Flow Hydrograph at 0.333 km

Maximum Flow 123 cms at 4 hrs







*Il Commissario Straordinario
delegato all'attuazione degli interventi
di mitigazione del rischio idrogeologico*



**Regione
Lombardia**



**Parco Regionale
Valle del Lambro**

Comuni di Inverigo (CO), Nibionno (LC) e Veduggio con Colzano (MB)



Oggetto

AREA DI LAMINAZIONE DI INVERIGO

**INTERVENTI IDRAULICI E DI RIQUALIFICAZIONE FLUVIALE NEI TERRITORI DI
INVERIGO, NIBIONNO E VEDUGGIO CON COLZANO**

PROGETTO DEFINITIVO

**RELAZIONE IDROLOGICO - IDRAULICA
INTEGRAZIONI**

Progettisti -Timbri e Firme



PARCO REGIONALE DELLA
VALLE DEL LAMBRO

Via Veneto 19
TRIUGGIO

web: www.parcovalldelambro.it
web: www.progettolambro.it

Consulenze

Progettazione Idraulica: prof.ing. Maurizio ROSSO - ing. Santo LA FERLITA

Progettazione Strutturale: ing. Piergiorgio LOCATELLI - ing. Nicola NAVA

Consulenza Ambientale: arch. Moris LORENZI

Consulenza Geologica: dott. geol. Pietro ALBORGHETTI

Assistenza Grafica: arch. Massimo NEGRI

VERSIONE N°	DATA	DESCRIZIONE REVISIONE E RIFERIMENTI DOCUMENTI SOSTITUTIVI	Elaborato
0	MAGGIO 2014	EMISSIONE	R02.1
0	NOVEMBRE 2014	INTEGRAZIONE	



INDICE

1. PREMESSA	2
2. STUDI PREGRESSI E DATI DISPONIBILI	3
3. SIMULAZIONE NUMERICA DEGLI SCENARI INTEGRATIVI	4
3.1 DESCRIZIONE DEGLI SCENARI GIÀ SIMULATI	4
3.1.1 Scenario "A" – Stato attuale	4
3.1.2 Scenario "B" – Portate attuali con intervento di laminazione di Inverigo	5
3.1.3 Scenario "C" – Portate di progetto P.A.I. con intervento di laminazione di Inverigo	8
3.2 DESCRIZIONE DEGLI SCENARI INTEGRATIVI	10
3.2.1 Scenario "B_bis" – Portate attuali conseguenti alla nuova gestione del Cavo Diotti e laminazione di Inverigo	10
3.2.2 Scenario "D" – Benefici dell'opera di regolazione di Inverigo su portate parossistiche dei sottobacini a valle di Merone (CO)	12
3.3 SINTESI DELLE PORTATE DI VERIFICA	14
3.4 DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO	17
3.5 DESCRIZIONE DEI RISULTATI	18
3.5.1 Scenario "B_bis" – Portate attuali conseguenti alla nuova gestione del Cavo Diotti e laminazione di Inverigo	18
3.5.2 Scenario "D" – Benefici dell'opera di regolazione di Inverigo su portate parossistiche dei sottobacini a valle di Merone (CO)	20
4. VERIFICHE AI SENSI DEL D.M. 26/06/2014 – M.I.T.	22
4.1 L'APPLICAZIONE DELLA NORMA	22
4.2 VERIFICHE CONDOTTE IN RIFERIMENTO ALLO SCENARIO "B_BIS"	25
4.3 VERIFICHE CONDOTTE IN RIFERIMENTO ALLO SCENARIO "C"	27
5. CONCLUSIONI	29
5.1 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI PROGETTUALI INTEGRATIVE	29
5.2 RISULTATI DELLE VERIFICHE AI SENSI DEL DM 26/06/2014	29

ALLEGATI

- ALLEGATO 1 – Risultati simulazione idraulica: scenario A – Stato attuale
- ALLEGATO 2 – Risultati simulazione idraulica: scenario B – Portate attuali con laminazione Inverigo
- ALLEGATO 3 – Risultati simulazione idraulica: scenario C – Portate progetto con laminazione Inverigo
- ALLEGATO 4 – Risultati simulazione idraulica: scenario B_bis – Portate attuali con C. Diotti e Inverigo
- ALLEGATO 5 – Risultati simulazione idraulica: scenario D – Benefici su portate sottobacini locali
- ALLEGATO 6 – Scenario B_bis: verifiche ai sensi del D.M. 26/06/2014
- ALLEGATO 7 – Scenario C: verifiche ai sensi del D.M. 26/06/2014



1. PREMESSA

Le attività descritte nella presente relazione tecnica si collocano nell'ambito della progettazione definitiva delle opere di regolazione delle portate previste nell'intervento *"Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"*.

L'emanazione di nuova normativa tecnica di settore e quanto emerso nel corso dell'incontro tenutosi in Regione Lombardia in data 10/11/2014 hanno comportato la necessità di eseguire una serie di simulazioni numeriche idrauliche integrative descritte in dettaglio nel prosieguo. Esse sono mirate alla predisposizione di due nuovi scenari di simulazione idrodinamica (B_bis e D), oltre ai tre scenari originariamente prodotti (A, B e C), e alle verifiche di sicurezza conseguenti all'entrata in vigore del DM 26/06/2014 emanato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti concernente le *"Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)"*.

Nell'ambito delle attività integrative di questa relazione si intendono integralmente richiamati i contenuti del Progetto Definitivo redatto nel maggio 2014.



2. STUDI PREGRESSI E DATI DISPONIBILI

Gli scriventi dispongono del Progetto Definitivo del maggio 2014, oltre al complesso degli studi che erano già disponibili al momento della redazione dello stesso, ossia:

- Sistemazione del fiume Lambro proposta dal "Comitato Coordinatore per le Acque della Provincia di Milano" nel 1937;
- "Proposte per la sistemazione idraulica del Lambro e per il riassetto paesaggistico della sua valle", detto "Piano Lambro" – Provincia di Milano, 1986;
- Progetto esecutivo per i "Lavori di sistemazione delle opere idrauliche del Lambro Settentrionale nel tronco compreso tra il ponte dell'autostrada MI-BG ed il ponte di innesto alla tangenziale est di C.na Gobba nei comuni di Brugherio e Milano" del Magistrato per il Po di Parma – 1989 ÷ 1997.
- "Progetto Preliminare di sistemazione del fiume Lambro a monte di Villasanta" di competenza della Regione Lombardia, redatto dagli scriventi nel 1998;
- "Progetto di Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico" redatto dall'Autorità di Bacino del fiume Po.

Inoltre, è stato attentamente esaminato lo "Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua naturali e artificiali all'interno dell'ambito idrografico di pianura Lambro – Olona" e la conseguente "Variante al Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) Fasce fluviali del fiume Lambro nel tratto dal Lago di Pusiano alla confluenza con il deviatore Redefossi", che sostanzialmente ha recepito e fatto propri gli esiti del citato Studio di Fattibilità ed è stata adottata nel mese di marzo 2004.

Oltre a quanto elencato in precedenza, gli scriventi hanno potuto analizzare le informazioni desumibili da:

- Progetto preliminare degli "Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano – Area di laminazione di Inverigo" redatto dal Parco Regionale della Valle del Lambro nel novembre 2012;
- Contributi delle Associazioni locali rispetto ai contenuti di detto progetto;
- Tesi di Laurea Magistrale dell'ing. Chiara Vellani redatta presso il Politecnico di Milano con il supporto del relatore prof. G. Becciu e inerente lo "Studio del sistema delle aree di laminazione lungo il Lambro sublacuale ed affluenti finalizzata alla stesura del protocollo di gestione integrato per la difesa idraulica della valle e della città di Monza";
- Rilievo topografico e DTM riguardanti il tratto d'alveo e le aree perifluviali d'interesse;
- Relazione idrologica – idraulica del progetto delle opere di ristrutturazione del Cavo Diotti.



3. SIMULAZIONE NUMERICA DEGLI SCENARI INTEGRATIVI

3.1 DESCRIZIONE DEGLI SCENARI GIÀ SIMULATI

Nei successivi paragrafi si sintetizzano gli esiti delle simulazioni già condotte e descritte negli elaborati del Progetto Definitivo prodotto nel maggio 2014, con particolare riferimento ai contenuti dell'Elaborato 02 – Relazione idrologico-idraulica a cui si rinvia per maggiori dettagli.

3.1.1 Scenario "A" – Stato attuale

Il primo scenario simulato è stato quello relativo alla condizione attuale del tratto di corso d'acqua indagato in riferimento alle portate di verifica (TR = 200 anni) ed alla configurazione morfologica attualmente esistente, ossia in assenza delle opere di regolazione delle portate previste nel P.A.I. e in assenza degli interventi di sistemazione del Cavo Diotti attualmente in fase di esecuzione.

Per quanto riguarda le portate defluenti utilizzate per il calcolo del profilo di deflusso si è fatto riferimento ai seguenti contributi:

- Idrogramma in ingresso alla sezione di monte, collocata a valle del ponte della S.S. 342, caratterizzato da un picco di portata pari a $115 \text{ m}^3/\text{s}$, così come previsto nel P.A.I.;
- Contributi di portata uniformemente distribuiti lungo il tratto d'interesse (bacini sottesi LAM 6 e 7);
- Contributo di portata localizzato alla confluenza con la Bevera di Veduggio.

Inoltre, quale condizione al contorno di valle è stata imposta la pendenza media dell'alveo.

La simulazione numerica ha quindi consentito di calcolare i livelli idrici massimi raggiunti in ciascuna sezione di calcolo, la loro evoluzione nel tempo in funzione degli idrogrammi in ingresso, l'idrogramma di piena in uscita dal sistema ($Q_{\text{MAX}} = 135 \text{ m}^3/\text{s}$) e la delimitazione delle aree allagabili.

In seguito alle richieste emerse nel corso del citato incontro tenutosi presso la Regione Lombardia in data 10 novembre 2014, si producono in questa relazione anche le rappresentazioni grafiche inerenti la profondità della corrente e le velocità di deflusso.

Rinviando agli specifici elaborati grafici per la rappresentazione dettagliata di detti parametri, si riporta di seguito il confronto tra l'idrogramma in ingresso da monte e quello in uscita a valle del sistema.

Si evidenzia che le aree allagabili sono sostanzialmente contenute entro le fasce fluviali del P.A.I., confermandone l'attendibilità nonostante le informazioni geometriche ad oggi disponibili siano molto più precise e dettagliate di quelle a suo tempo utilizzate dall'A.d.B.Po nella definizione delle stesse.

In ALLEGATO 1 sono inoltre riportati gli output completi ottenuti dal modello di calcolo che sintetizzano le principali grandezze idrauliche, il profilo di piena ottenuto quale involuppo dei massimi livelli raggiunti nel tratto di corso d'acqua d'interesse e i massimi livelli idrici raggiunti per ciascuna sezione di calcolo con la rappresentazione grafica della distribuzione della velocità di deflusso.



L'esame dei risultati numerici consente di trovare conferma a ciò che già appariva evidente osservando la morfologia meandriforme del fiume Lambro nel tratto d'interesse: le ridottissime pendenze determinano velocità di deflusso decisamente modeste (ben inferiori ad 1 m/s nelle aree golenali) anche per portate di piena caratterizzate da tempi di ritorno duecentennali.

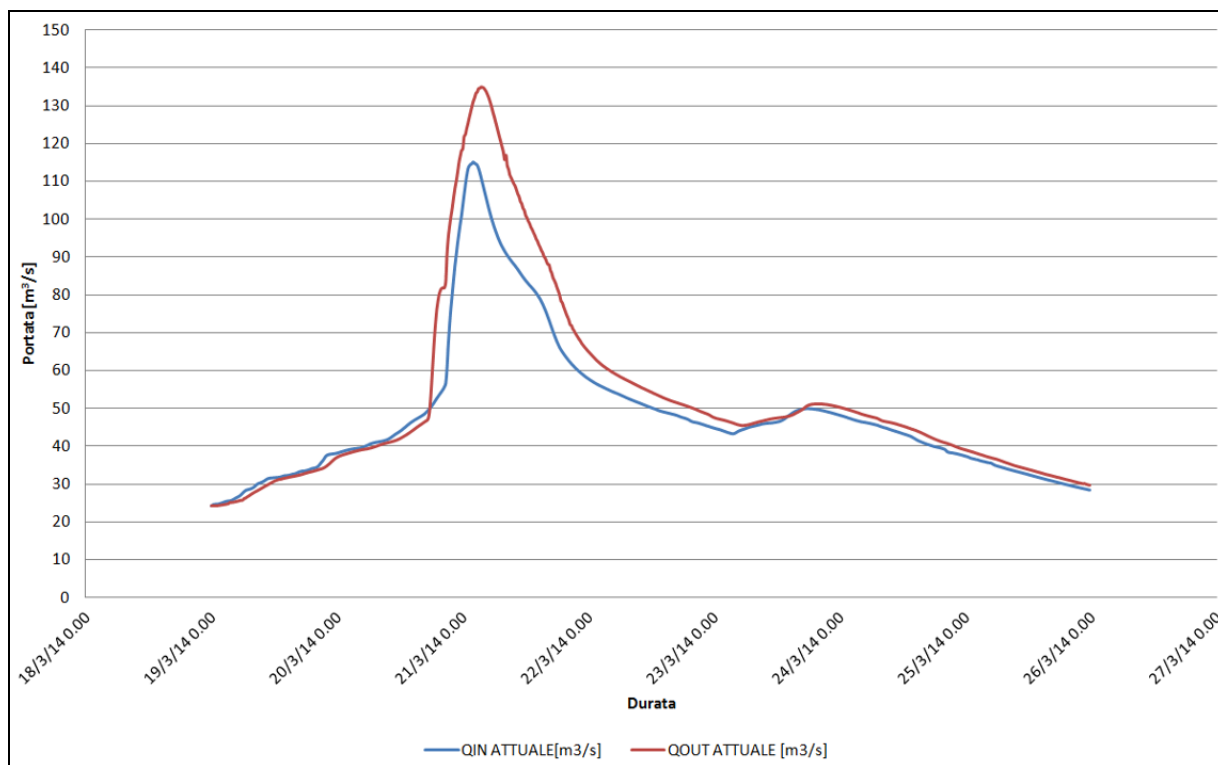


Figura 1 – Scenario A: condizione attuale – Confronto tra l'idrogramma in ingresso e quello in uscita nel tratto di fiume Lambro oggetto d'indagine

3.1.2 Scenario "B" – Portate attuali con intervento di laminazione di Inverigo

Il secondo scenario considerato per le verifiche idrauliche è stato quello caratterizzato dall'inserimento dell'opera di regolazione per la laminazione delle portate. Nello scenario "B" le portate di verifica assunte sono quelle con tempo di ritorno duecentennale in assenza degli interventi di laminazione delle portate prevista dal P.A.I. a monte della sezione di input del modello. Per questa ragione lo scenario "B" è quello che presenta condizioni idrauliche più critiche.

L'opera sarà realizzata in corrispondenza di un nuovo attraversamento del fiume Lambro, che sarà destinato ad uso ciclopedonale, a monte del ponte di via Fornacetta. La regolazione sarà attuata mediante realizzazione di due luci ciascuna delle quali di larghezza 6,0 m, altezza 5,1 m. Ogni luce sarà servita da una paratoia a doppio battente in grado di parzializzarne gradualmente e progressivamente la sezione sino a ridurla ad un'altezza massima di 1,6 m misurata dal fondo scorrevole (luce sottobattente). Pertanto, anche nella



configurazione di massima regolazione, non è prevista la completa chiusura delle paratoie che determinerebbe l'interruzione del deflusso del fiume Lambro.

Le luci sono state dimensionate per assicurare che il deflusso della piena duecentennale, qualora si decida di non attivare l'opera di regolazione, possa avvenire senza alcuna interferenza da parte di quest'ultima garantendo un franco idraulico di 1 m rispetto all'intradosso del nuovo attraversamento.

Gli scriventi hanno anche valutato l'influenza delle diverse geometrie dell'opera sull'ampiezza dell'area allagabile a monte, in modo da minimizzare il rapporto tra l'impatto territoriale ed i benefici attesi. Nonostante le aree allagate individuate nelle simulazioni idrauliche interessino parzialmente con battenti e velocità modesti anche aree golenali non comprese nell'attuale delimitazione delle fasce fluviali (cfr. specifici elaborati grafici), si ritiene importante sottolineare che la frequenza di attivazione dell'opera per eventi così gravosi sarà relativamente ridotta. Per questa ragione sarà necessario movimentare le paratoie con cadenza almeno semestrale in modo da verificarne e assicurarne con continuità l'efficienza e la funzionalità.

Rinviamo all'ALLEGATO 2 per il dettaglio analitico e integrale dei risultati ottenuti con la simulazione numerica idraulica, è utile osservare il profilo di piena mostrato in Figura 2. E' evidente il fenomeno di rigurgito indotto dalla presenza della nuova opera: l'incremento dei livelli determina un maggiore allagamento delle aree golenali al defluire della portata di piena regolata (cfr. ALLEGATO 2).

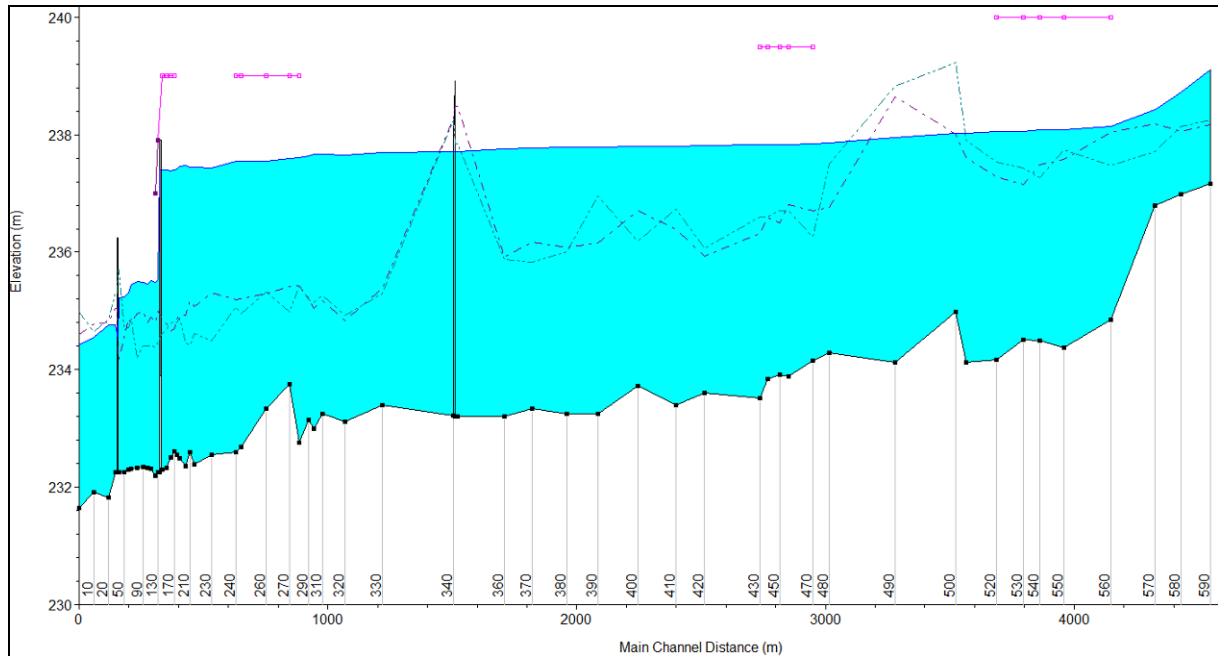


Figura 2 – Profilo di piena relativo allo scenario "B": è evidente il fenomeno di rigurgito dei livelli indotto dalla realizzazione dell'opera di regolazione delle portate



Il connesso aumento della sezione idraulica e il rallentamento della velocità media di deflusso consentono proprio il raggiungimento dell'obiettivo prefissato con la realizzazione di casse di laminazione "in linea", ossia un ritardo nella traslazione dell'onda di piena e una riduzione dell'entità del suo colmo.

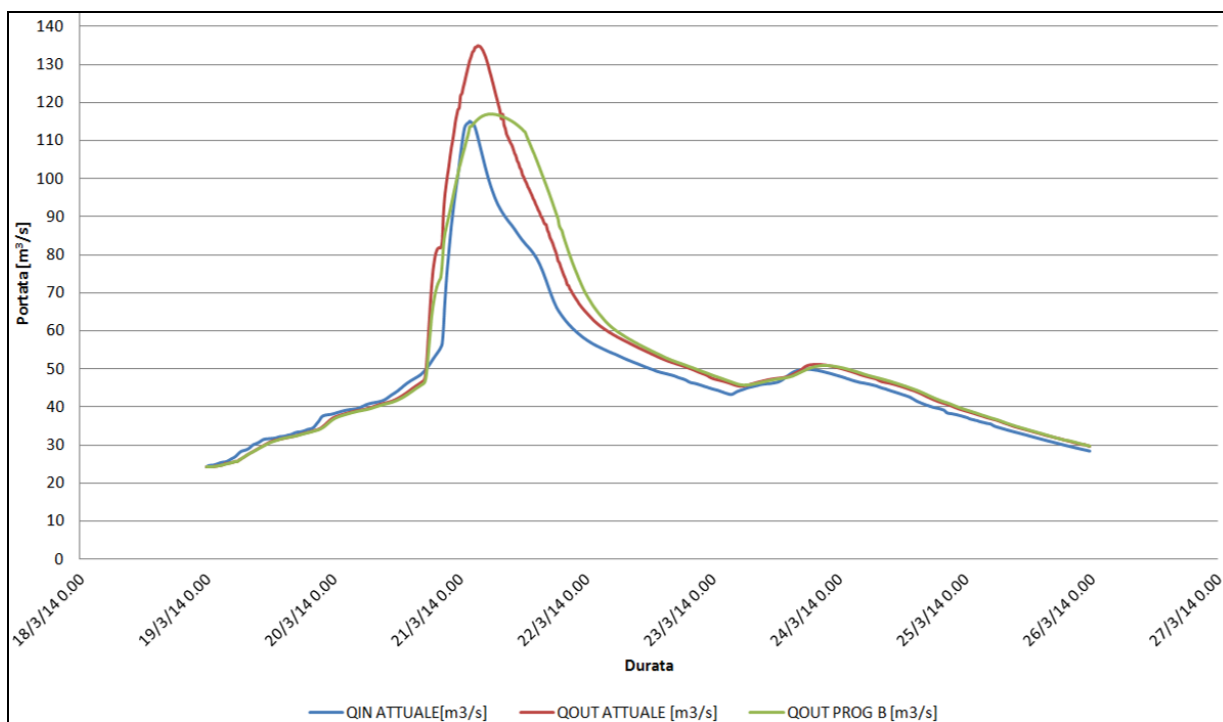


Figura 3 – Confronto tra l'idrogramma in ingresso e quelli in uscita (scenari "A" e "B") nel tratto di fiume Lambro oggetto d'indagine: è evidente il beneficio offerto dall'opera di regolazione in termini di riduzione del picco di piena e ritardo nella traslazione dell'onda.

In particolare, facendo riferimento alla precedente Figura 3, si può notare come la portata in uscita dal sistema si riduca da 135 m³/s (scenario "A", condizioni attuali) a 116 m³/s.

Ciò significa che l'opera di regolazione consente di laminare il complesso dei contributi diretti (bacini LAM 6 e 7) e concentrati (Bevera di Veduggio) che il fiume Lambro riceve nel tratto d'interesse compreso tra il ponte della "Briantea" e quello di via Fornacetta in comune d'Inverigo.

Inoltre, così come richiesto dalla Regione Lombardia, anche per questo caso si è provveduto al tracciamento delle aree allagabili, dei battenti e delle velocità di deflusso mostrate negli specifici elaborati grafici. L'osservazione degli stessi consente di apprezzare come, nonostante l'incremento dei livelli indotto dall'opera di regolazione, le aree allagabili si mantengano sostanzialmente ricomprese all'interno delle vigenti fasce fluviali, a meno di zone molto localizzate ove i limiti delle stesse vengono superati (es. in destra idrografica in corrispondenza del ponte "ex-Victory", cfr. Figura 4).

A questo proposito è utile sottolineare che la maggiore estensione degli allagamenti è estremamente circoscritta, caratterizzata da battenti e velocità di deflusso molto ridotte e, soprattutto, la sua manifestazione



è attesa solo per eventi parossistici con tempi di ritorno duecentennali in configurazione di massima regolazione dell'invaso, ossia in condizioni gravose che si verificano molto raramente.

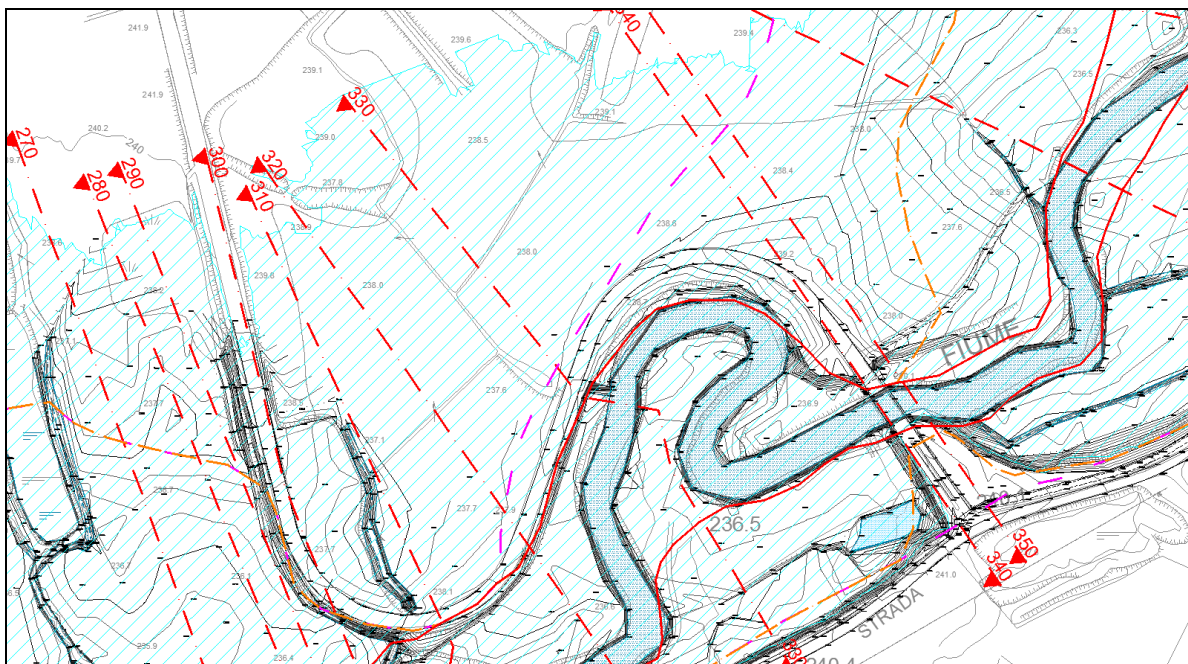


Figura 4 – Locale incongruenza tra l'andamento delle fasce fluviali e i limiti delle aree allagabili tracciati in riferimento allo scenario "B" (il più gravoso)

La delimitazione delle aree allagabili ha inoltre consentito di confermare la necessità di realizzare alcune opere di contenimento dei livelli, già previste nel P.A.I., a protezione di alcuni insediamenti. In particolare:

- Linea arginale a protezione della cascina "Cattafame" in comune di Inverigo;
- Linea arginale in località "Fornace Consonni" in comune di Nibionno;
- Linea arginale in località "Molino Nuovo" in comune di Nibionno.

Oltre alle suddette opere di difesa, un'ulteriore linea arginale sarà realizzata quale prolungamento in destra e sinistra idrografica del rilevato di accesso al nuovo attraversamento dell'opera di regolazione.

3.1.3 Scenario "C" – Portate di progetto P.A.I. con intervento di laminazione di Inverigo

Il terzo scenario considerato nel Progetto Definitivo del maggio 2014 è stato quello simulato al fine di verificare la funzionalità dell'opera di regolazione delle portate di Inverigo con riferimento alle portate di progetto indicate nel P.A.I. al momento in cui tutte le opere di laminazione pianificate a monte dell'area d'interesse saranno realizzate.



Il precedente scenario "B" si pone dunque quale configurazione transitoria durante la realizzazione progressiva degli interventi che dallo stato attuale porteranno allo stato di definitiva sistemazione del corso d'acqua nel tratto d'interesse.

Considerando il fatto che gli interventi di laminazione delle portate previsti nel P.A.I. determineranno un consistente abbattimento del colmo di portata proveniente da monte anche per il tempo di ritorno duecentennale (dai 115 m³/s attuali ai 65 m³/s futuri), questo scenario si presenta molto meno gravoso del precedente in termini di impatto sul territorio. Pertanto, l'intervento di regolazione in progetto oltre a consentire il conseguimento degli obiettivi del P.A.I., ossia l'invarianza della portata in ingresso e uscita dall'area di laminazione di Inverigo laminando i contributi idrici che il Lambro ivi riceve (cfr. Figura 5), potrà consentire ulteriori benefici in termini di riduzione del picco di portata in uscita a valle grazie al volume d'invaso che comunque resterà disponibile a monte.

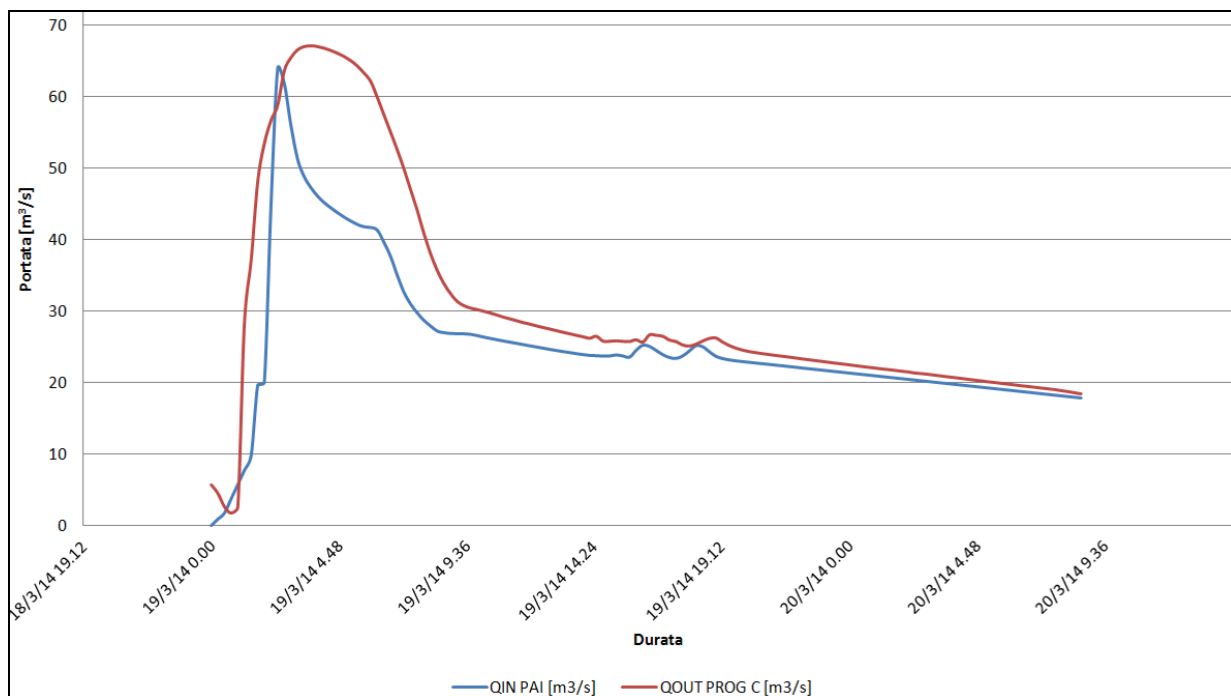


Figura 5 – Scenario C: configurazione di progetto relativa al momento in cui tutti gli interventi di laminazione delle portate previsti nel P.A.I. saranno realizzati – Confronto tra l'idrogramma in ingresso e quello in uscita nel tratto di fiume Lambro oggetto d'indagine



3.2 DESCRIZIONE DEGLI SCENARI INTEGRATIVI

3.2.1 Scenario "B_bis" – Portate attuali conseguenti alla nuova gestione del Cavo Diotti e laminazione di Inverigo

Nel corso del già citato incontro tenutosi presso la Regione Lombardia in data 10 novembre 2014 i funzionari pubblici hanno chiesto che si simulasse un nuovo scenario in condizione transitoria che rispettasse i seguenti vincoli:

1. che l'idrogramma di piena (TR_{200}) del Lambro in ingresso da monte nell'area d'interesse sia definito comprendendo i benefici assicurati delle nuove opere di gestione del Cavo Diotti, attualmente in fase di realizzazione e ormai prossime al completamento;
2. che le aree allagate per effetto della regolazione delle portate, attuata per mezzo dell'opera in progetto di Inverigo, siano ricomprese entro le fasce fluviali vigenti del P.A.I.

Per fornire compiutamente riscontro al primo punto, si è esaminata la relazione idrologica – idraulica del progetto definitivo delle "opere di ristrutturazione del Cavo Diotti in Comune di Merone (CO)" prodotta da ETATEC s.r.l. e messa a disposizione degli scriventi dal Committente Parco del Lambro.

La successiva figura, tratta dalla relazione, mostra il nodo idraulico esistente a valle del lago di Pusiano.

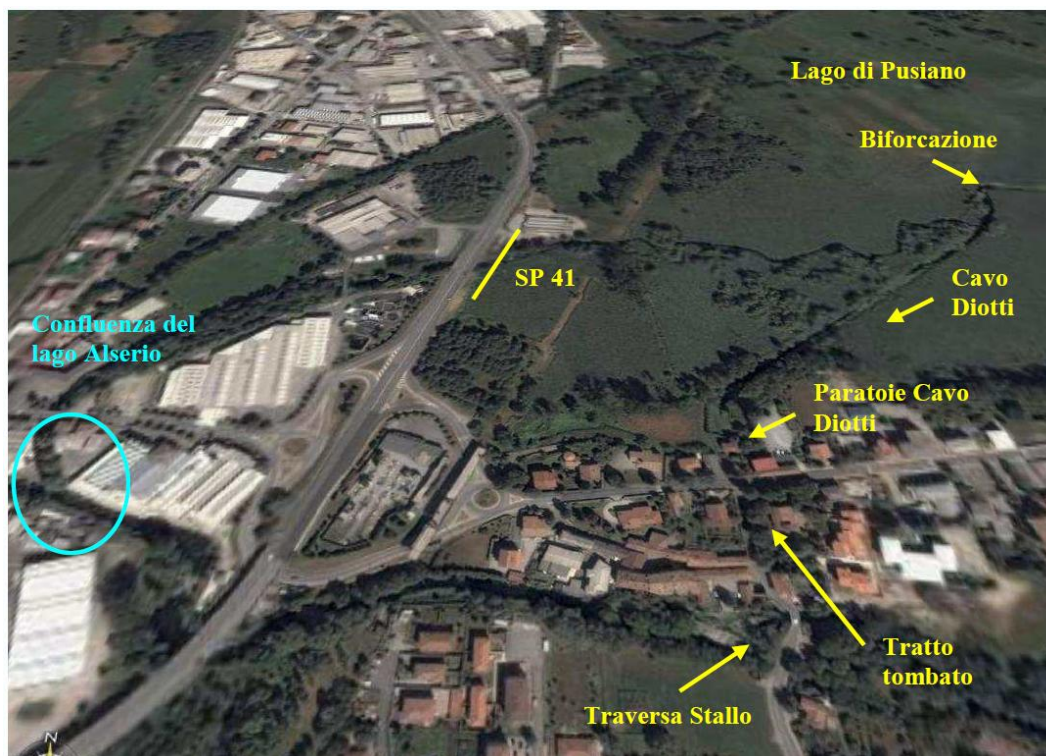


Figura 6 – Nodo idraulico a valle del lago di Pusiano (tratta dalla relazione di ETATEC s.r.l.)



Sempre dalla citata relazione, paragrafo 6.2, è possibile estrarre una descrizione degli interventi attualmente in fase di esecuzione:

"Il progetto proposto interviene direttamente sul Cavo Diotti, articolandosi in due fasi. In una prima fase si prevede di smantellare l'attuale apparato di regolazione composto da due paratoie. A questa operazione segue l'allargamento delle luci esistenti, fino a raggiungere il compromesso tra esigenze di salvaguardia strutturale della casa del custode e la volontà di non fornire una regolazione della portata derivata attraverso una luce ridotta: le due luci passeranno quindi da una sezione 2,00x0,70m, ad una sezione di 2,00x2,00. L'obiettivo è rendere la casa di guardia trasparente al deflusso dell'acqua dal lago di Pusiano verso la galleria, senza ostacolare le portate derivate.

In una seconda fase si inserisce il nuovo sistema di derivazione, composta da una coppia di paratoie piane alloggiare a ridosso dell'imbocco del tombotto sulla sponda sud del lago. Le paratoie hanno luci caratterizzate da una larghezza di 2,00 m e altezza netta 2,20 m.

Contestualmente all'installazione del nuovo sistema si prevede di munire il Cavo Diotti di strumenti di misura e monitoraggio in grado di verificare e interagire con i supporti remoti, per garantire regolazione delle paratoie, in aggiunta a tutte le apparecchiature che rendono l'opera a norma di legge.

Attraverso le nuove paratoie si regola quindi la portata in ingresso alla galleria, indipendentemente da quella derivabile dal canale che sottopassa la casa di guardia".

L'obiettivo degli interventi è "la gestione della derivazione ai fini di minimizzare l'escursione del lago e garantire al contempo un deflusso minimo anche nei periodi di magra al fiume Lambro".

Esso sarà conseguito adottando la procedura di gestione descritta di seguito:

"In occasione di preannuncio di precipitazione meteorica a 5 giorni tale da indurre potenzialmente un'escursione del lago a quota superiore alla 261,50 m s.m. la manovra delle chiuse viene eseguita per gradi in modo da consentire il raggiungimento della quota 259,15 m s.m. ad inizio precipitazione.

Le manovre sulle paratoie risultano pertanto asservite alla necessità di procedere ad uno svaso mantenendo la portata complessiva di deflusso (ramo naturale e Cavo Diotti) al di sotto del valore di 30 m³/s compatibile con le strutture di valle. Nella Tabella 1 sono riportati i valori idraulici caratteristici.

Durante l'evento meteorico, previo asservimento alle risultanze delle previsioni di precipitazione ed alla simulazione in tempo reale sull'intera asta valliva sino a Milano, potrà verificarsi l'opportunità di diminuire il deflusso dal lago al fine di ridurre la sovrapposizione di colmo della portata in uscita dal lago con la portata di piena eventualmente defluente nel torrente Bevera di Molteno che confluisce nel fiume Lambro a Merone. A seguito di procedura codificata derivante dalla simulazione condotta dalla Protezione Civile, potrà quindi essere temporaneamente ridotto il deflusso dal lago (Cavo Diotti) sino all'azzeramento.

La procedura per la gestione del transitorio di sovrapposizione dei colmi di piena dovrà prevedere un deflusso simulato a valle sino a Milano compatibile con le infrastrutture presenti in assenza di rischio di innalzamento del livello del lago al di sopra di quota 261,50 m s.m.



Il controllo della portata complessiva risulta eseguito mediante misuratore posto alla sezione del ponte in frazione Stallo".

Tabella 1 – Portate rilasciate dal lago di Pusiano in funzione dei livelli idrici (tratta dalla relazione di ETATEC s.r.l)

Stato paratoie	Livello nel lago	Livello ad imbocco tratto tombato	PORTATA EMISSARIO NATURALE	PORTATA CAVO DIOTTI (risagomato come da progetto)
Aperte completamente	259,15	258,80	0	4,6
Aperte completamente	259,50	259,06	0	11
Aperte completamente	260,00	259,54	0,8	13,5
Aperte completamente	260,50	260,03	2,6	15
Aperte parzialmente	261,50	260,32	20	10

La portata complessiva massima che sarà rilasciata dal lago di Pusiano al prossimo completamento delle opere si ridurrà dunque a 30 m³/s in luogo degli attuali 50 m³/s indicati nel P.A.I. Invece i contributi di portata provenienti dagli altri sottobacini sono gli stessi adottati nello scenario B. Ciò implica che la portata massima in ingresso all'area di laminazione d'interesse, ossia in corrispondenza del ponte della "Briantea" sia di 99 m³/s.

Per fornire riscontro al secondo vincolo richiesto dalla Regione Lombardia, ossia che le aree allagate per effetto della regolazione delle portate attuata per mezzo dell'opera in progetto di Inverigo siano ricomprese entro le fasce fluviali del P.A.I. attualmente vigenti, si è reso necessario eseguire una serie di simulazioni variando progressivamente il grado di apertura delle paratoie dell'organo di regolazione e, pertanto, rilasciando valori di portata diversi a valle degli organi di regolazione.

Il risultato delle simulazioni è descritto nel paragrafo §3.5.1.

3.2.2 Scenario "D" – Benefici dell'opera di regolazione di Inverigo su portate parossistiche dei sottobacini a valle di Merone (CO)

Come più volte affermato, anche pubblicamente nel corso dei numerosi incontri di condivisione degli elementi progettuali con la popolazione, l'obiettivo principale da conseguire per mezzo della realizzazione dell'opera di regolazione delle portate di Inverigo sarà quello di offrire consistenti benefici di laminazione anche e soprattutto per le portate di piena caratterizzate da tempi di ritorno inferiori ai 200 anni.



Con questo fine è stata svolta una simulazione supplementare nell'ipotesi che un evento meteorico parossistico interessi soltanto i sottobacini del Lambro posti a valle di Merone (CO). Facendo riferimento allo schema idraulico riportato in Figura 7, essi sono: Bevera di Molteno, LAM6, Bevera di Veduggio e LAM7. La Bevera di Renate confluisce a valle dell'opera di regolazione in progetto.

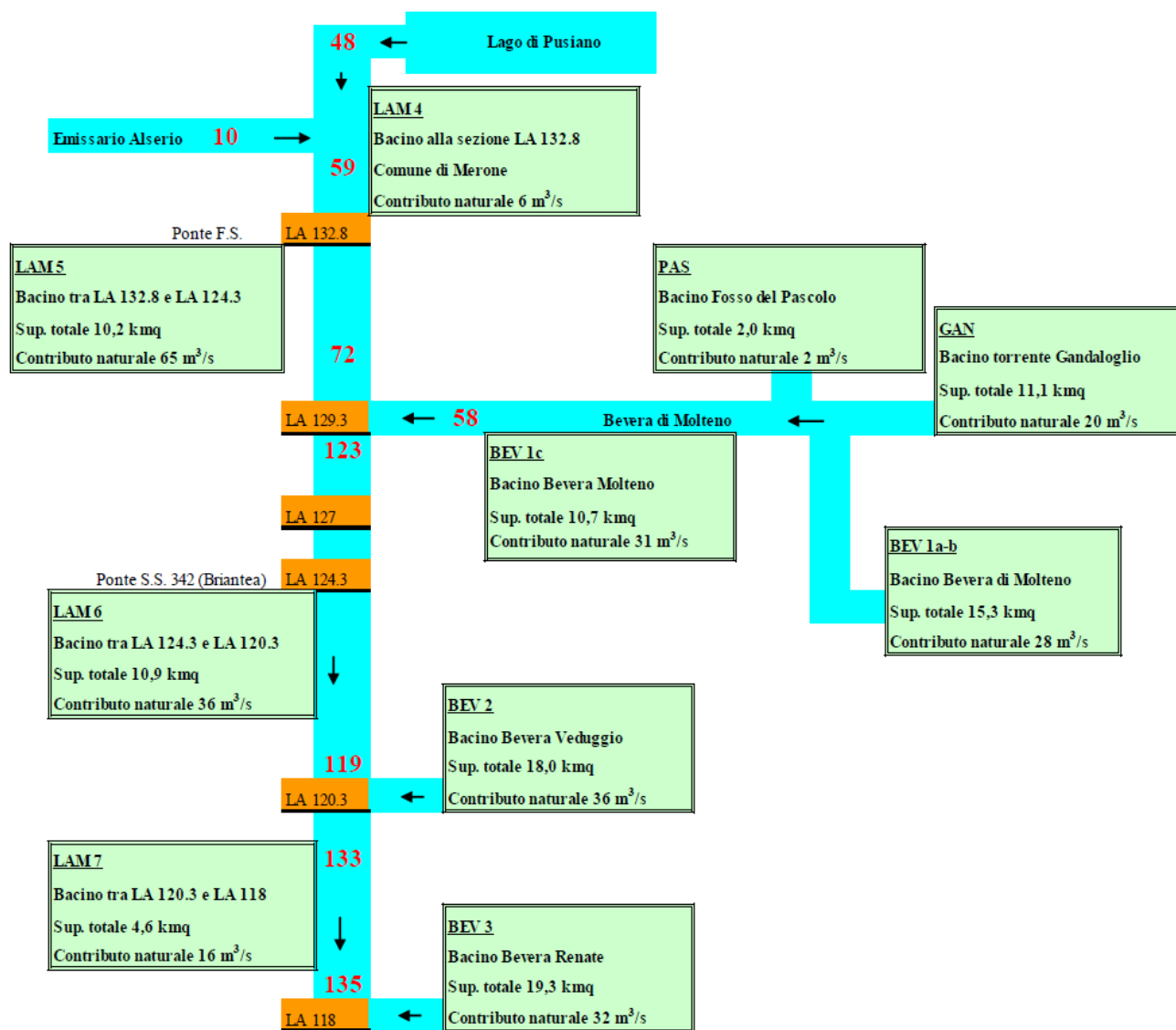


Figura 7 – Schema idrografico del fiume Lambro nel tratto d'interesse (fonte: SdF – 2003)

Pertanto, l'ipotesi alla base dello scenario di simulazione "D" è che da monte defluisca una portata di piena corrispondente ad un tempo di ritorno di 10 anni, cui si sommino i contributi parossistici provenienti dai citati sottobacini.



Nella successiva Tabella 2 sono sintetizzate le portate di piena adottate per la simulazione idraulica i cui esiti sono descritti nel paragrafo §3.5.2.

Tabella 2 – Portate di piena di riferimento assunte per lo scenario di simulazione "D"

Sottobacino	Sezione PAI di riferimento	TR	Portata al colmo (m ³ /s)
Lambro a monte della confluenza con la Bevera di Molteno	LA 132	10	10
Bevera di Molteno	LA 129.3	200	57
LAM6	da LA 124.3 a LA 120.3	200	36
Bevera di Veduggio	LA 120.3	200	36
LAM7	da LA 120.3 a LA 118	200	16

3.3 SINTESI DELLE PORTATE DI VERIFICA

Nel presente paragrafo si riporta una sintesi delle portate al colmo adottate per le simulazioni idrauliche integrative eseguite con modello numerico in moto vario per ciascuno degli scenari descritti in precedenza.

Tabella 3 – Portate di piena di riferimento assunte per gli scenari integrativi di simulazione

Sottobacino	Sezione PAI di riferimento	TR	Scenario B_bis (m ³ /s)	TR	Scenario D (m ³ /s)
Lambro a monte della confluenza con la Bevera di Molteno	LA 132	200	99	10	10
Bevera di Molteno	LA 129.3			200	57
LAM6	da LA 124.3 a LA 120.3	200	36	200	36
Bevera di Veduggio	LA 120.3	200	36	200	36
LAM7	da LA 120.3 a LA 118	200	16	200	16

Nelle figure successive si riportano alcuni stralci cartografici del P.A.I. con indicata la posizione delle sezioni di riferimento.

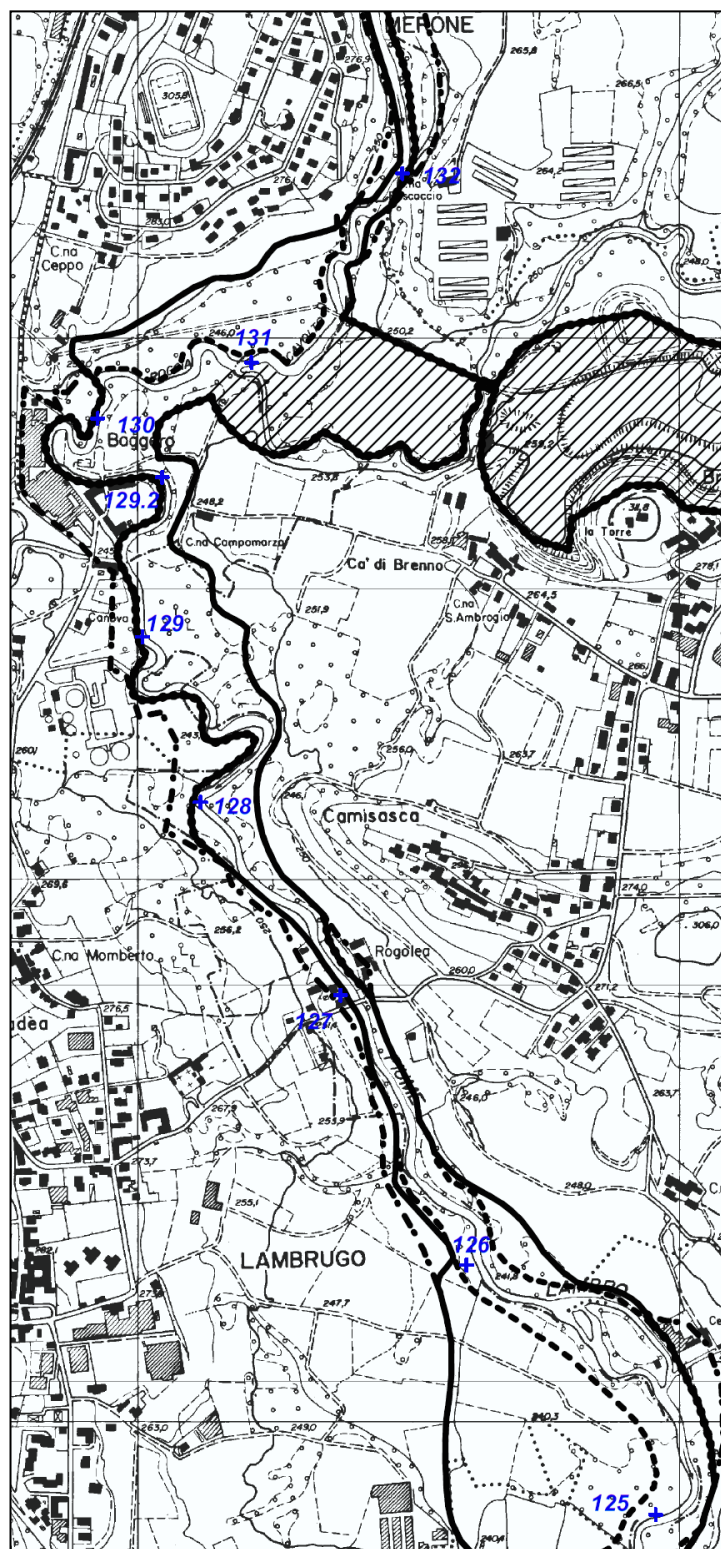


Figura 8 – Sezioni di riferimento PAI nel tratto di interesse (monte)

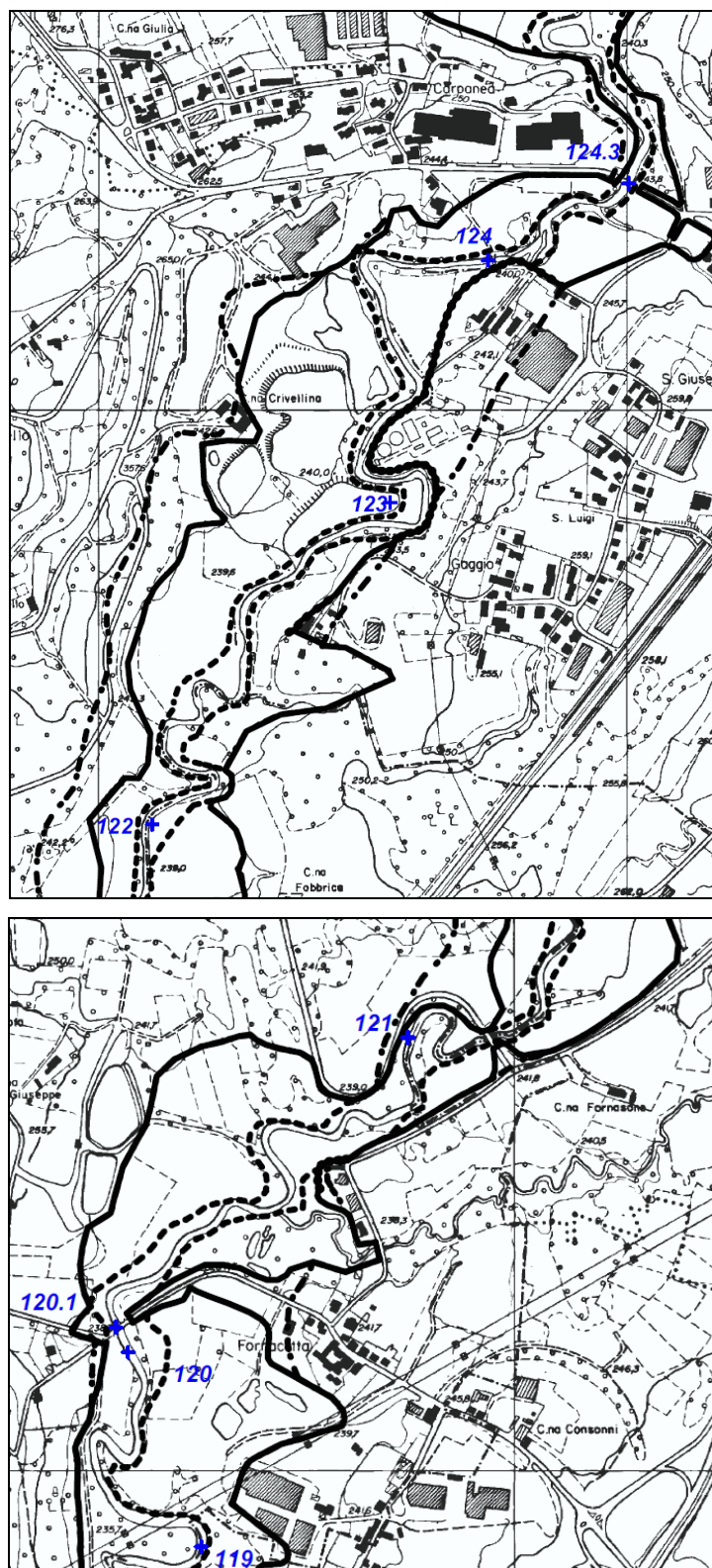


Figura 9 – Sezioni di riferimento PAI nel tratto di interesse (valle)



3.4 DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO

Le necessarie verifiche idrauliche per l'esecuzione delle simulazioni integrative sopra descritte sono state condotte grazie alla predisposizione di un modello numerico idraulico in moto vario.

L'allestimento del modello è avvenuto mediante l'utilizzo del codice di calcolo HEC-RAS River Analysis System, sviluppato dall'U.S. Army Corps of Engineering – Hydrologic Engineering Center. La versione del software utilizzata è la 4.1, aggiornata al mese di gennaio 2010.

HEC-RAS consente il calcolo idraulico monodimensionale di canali naturali e artificiali, sia in condizioni di moto permanente che di moto vario, tenendo conto dell'influenza sul moto di manufatti di vario tipo (ponti, tombini, briglie, sfioratori, luci servite da paratoie, ecc.) eventualmente presenti nel sistema. Possono essere modellati sia canali singoli che reti di canali naturali o artificiali, chiusi o aperti, con l'integrazione di profili di corrente lenta, veloce o di tipo "misto".

Un evento di piena è idraulicamente descritto dalle equazioni del moto vario per correnti a pelo libero. Esse costituiscono un sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali del primo ordine, non lineare e non integrabile analiticamente, dette equazioni di De Saint Venant.

La procedura di calcolo utilizzata per la risoluzione delle equazioni di De Saint Venant si basa su uno schema implicito alle differenze finite, applicato a celle di calcolo a quattro nodi. In questo schema le derivate spaziali e i valori delle funzioni sono calcolati in un punto interno alla cella, di coordinate $[0,5; (n + \theta)]$.

Il sistema di equazioni viene così trasformato, per ogni tronco di corso d'acqua, in una successione di equazioni algebriche calcolate all'interno di ogni cella. Si perviene così a una soluzione simultanea su tutto il tronco, in cui l'intervallo temporale di calcolo può essere maggiore rispetto a un analogo schema di tipo esplicito. Le analisi di stabilità di Von Neumann mostrano che lo schema implicito è incondizionatamente stabile (teoricamente) per $0,5 < \theta < 1$ e condizionatamente stabile per $\theta = 0,5$.

La prima fase necessaria all'implementazione del modello consiste nel creare la geometria del sistema, ossia nel rappresentare l'alveo da analizzare, tracciando il sistema dei corsi d'acqua e le loro connessioni, secondo la direzione di scorrimento dell'acqua. Successivamente si provvede ad inserire le sezioni trasversali estratte dalle basi topografiche disponibili, definendo le quote e le distanze progressive dal punto di origine di ciascuna sezione, convenzionalmente individuato in sponda sinistra, e ad indicare le distanze reciproche procedendo in senso contrario a quello dello scorrimento dell'acqua. Per ogni sezione si identificano, mediante l'inserimento della distanza progressiva specifica, l'alveo e le zone golenali.

L'operazione prosegue con l'inserimento dei dati di scabrezza dell'alveo e delle sponde, secondo il coefficiente n di Manning. Il programma, al termine dell'inserimento delle informazioni geometriche, restituisce il grafico delle sezioni e il profilo altimetrico dell'alveo.

All'interno della geometria che schematizza il sistema si inseriscono inoltre le strutture presenti lungo il corso d'acqua, come ponti o soglie.



Il calcolo del livello del pelo libero si basa sulla risoluzione dell'equazione monodimensionale dell'energia, che calcola le perdite di carico mediante l'equazione di Manning e tiene conto delle perdite localizzate a mezzo di opportuni coefficienti moltiplicativi del termine cinetico. L'equazione del momento è utilizzata ogni volta in cui il profilo del moto subisce brusche variazioni, ad esempio in corrispondenza di ponti, confluenze o risalti idraulici.

3.5 DESCRIZIONE DEI RISULTATI

3.5.1 Scenario "B_bis" – Portate attuali conseguenti alla nuova gestione del Cavo Diotti e laminazione di Inverigo

Come descritto in precedenza, obiettivo della simulazione integrativa richiesta dalla Regione Lombardia è di verificare quale debba essere il vincolo gestionale della nuova opera di regolazione di Inverigo, durante il periodo di transizione necessario all'attuazione di tutti gli interventi di laminazione previsti dal P.A.I. a monte dell'opera, affinché gli allagamenti a monte della stessa restino contenuti all'interno delle fasce fluviali vigenti.

Rispetto allo scenario "B" descritto in precedenza ciò equivale ad imporre una maggiore altezza di apertura della coppia di paratoie poste a presidio dell'opera di regolazione, cui consegue un incremento delle portate rilasciate a valle e la proporzionale riduzione dell'efficienza di laminazione.

L'altezza di apertura delle paratoie è stata dunque determinata incrementando la quota fissata nello scenario "B" (1,6 m) con passo di 0,1 m e restituendo per ciascun "run" del modello i risultati su GIS con il supporto di HecGeoRAS.

La procedura ha consentito di verificare che l'altezza di apertura delle paratoie in grado di far sì che il deflusso di piena sia contenuto all'interno delle fasce fluviali (così come mostrato negli specifici elaborati grafici) è di 3,4 m, che corrisponde ad una quota dell'intradosso degli organi di 235,7 m s.l.m.

Come si può osservare nella successiva Figura 10, è del tutto evidente che ciò equivale ad operare una manovra degli organi elettromeccanici che interferisca minimamente con la corrente di piena, qualora si verifichi un evento caratterizzato dal tempo di ritorno bisecolare.

Evidentemente tale regolazione comporta una notevolissima riduzione dell'efficienza di laminazione dell'invaso di Inverigo che tende ad essere pressoché nulla.

Se da una parte, come già accennato in relazione allo scenario "D" di simulazione, i benefici attesi con la realizzazione dell'opera di Inverigo sono prevalentemente riferibili a scenari meno gravosi, dall'altra a parere degli Scriventi appare del tutto illogico rinunciare al consistente beneficio offerto dalla regolazione delle portate duecentennali (efficienza di laminazione pari al 13%, cfr. scenario "B") al fine di salvaguardare aree perifluviali soltanto perché poste all'esterno delle fasce fluviali vigenti (peraltro, aree non urbanizzate).

Per i risultati completi si faccia riferimento all'ALLEGATO 4.

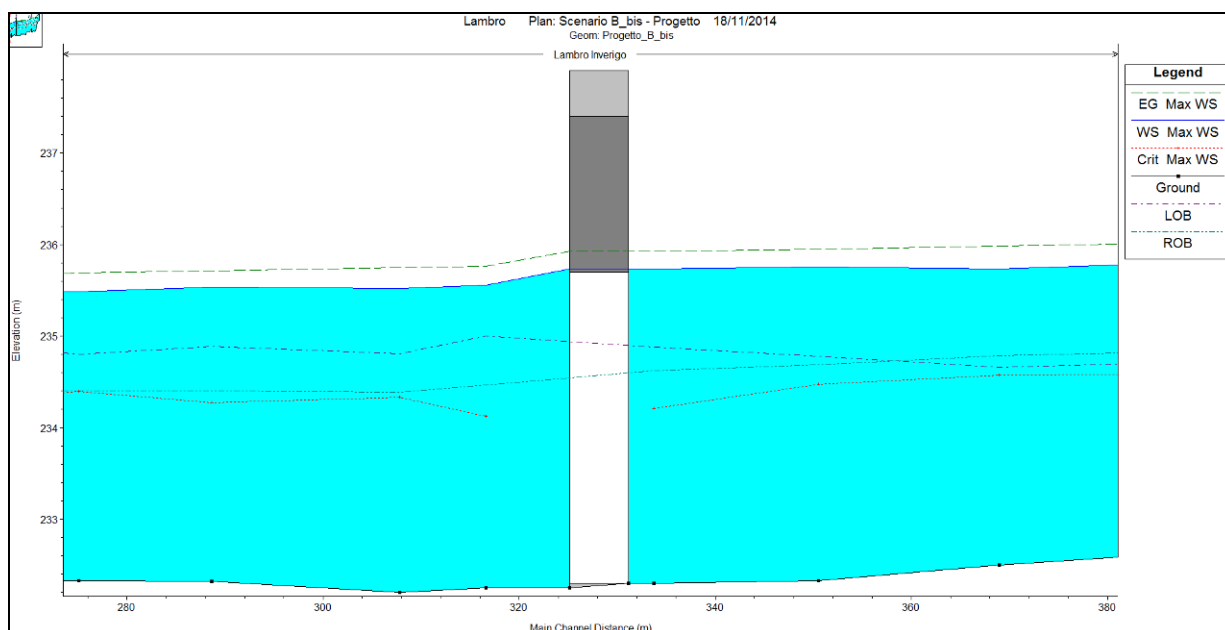


Figura 10 – Profilo della corrente in corrispondenza dell'organo di regolazione delle portate.

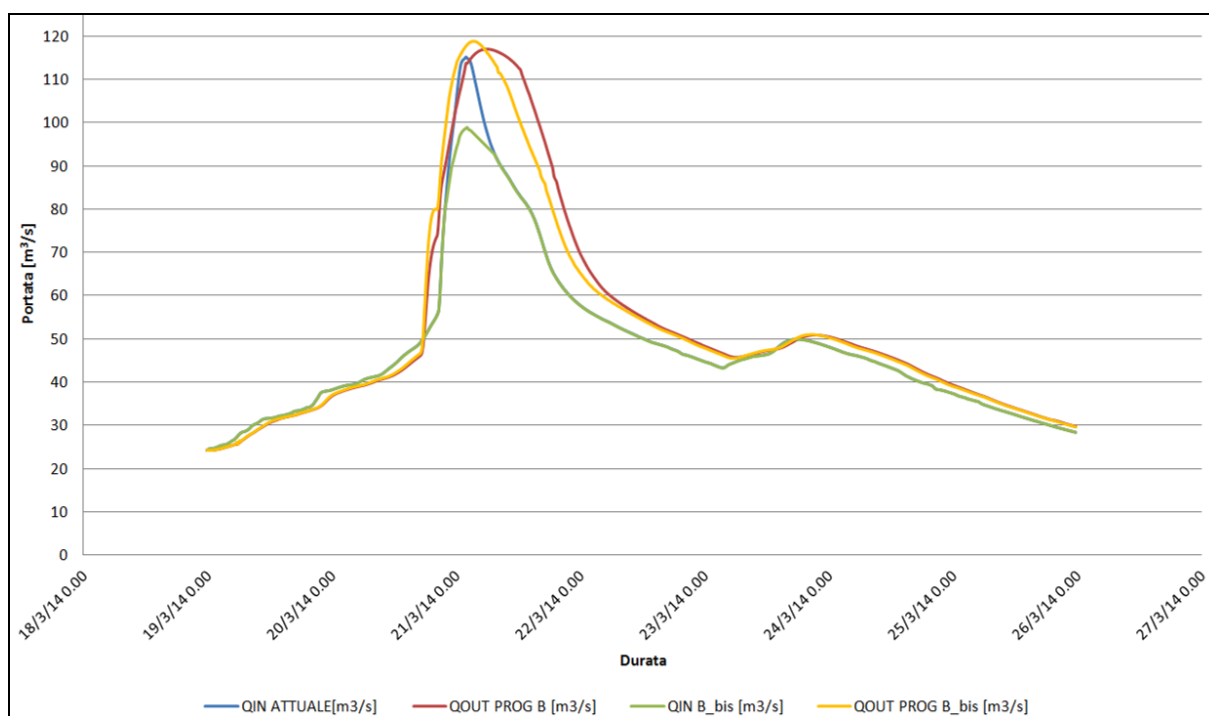


Figura 11 – Scenario B_bis: confronto tra gli idrogrammi in ingresso e in uscita nel tratto di fiume Lambro oggetto d'indagine. E' evidente la consistente riduzione dell'efficacia di laminazione a causa del vincolo imposto di rispetto delle fasce fluviali vigenti a monte dell'opera di regolazione.

Più in dettaglio il picco di portata atteso a valle dell'organo di regolazione si attesta a circa 119 m³/s (cfr. Figura 11), in luogo dei 116 m³/s conseguibili attuando lo scenario "B", sebbene in quest'ultimo l'idrogramma in



ingresso da monte fosse caratterizzato da un picco di portata di 115 m³/s piuttosto che i 99 m³/s assunti nel presente scenario grazie al beneficio offerto dall'entrata in esercizio delle nuove opere di regolazione del Cavo Diotti.

3.5.2 Scenario "D" – Benefici dell'opera di regolazione di Inverigo su portate parossistiche dei sottobacini a valle di Merone (CO)

La seconda simulazione integrativa è stata realizzata per mostrare come la nuova opera di Inverigo consenta di ottenere consistenti benefici in relazione ad eventi parossistici non uniformemente distribuiti sul bacino del Lambro chiuso alla sezione dell'opera.

In particolare è stato ipotizzato il verificarsi di un evento meteorico in grado di determinare afflussi di piena duecentennale dei sottobacini che contribuiscono alla portata del Lambro a valle del Comune di Merone (Bevera di Molteno, etc.).

Al contempo si è ipotizzato che le portate defluenti dal sottobacino del Lambro posto a monte di Merone siano caratterizzate da un colmo di piena decennale (cfr. §3.2.2) cui corrisponde un valore di 10 m³/s.

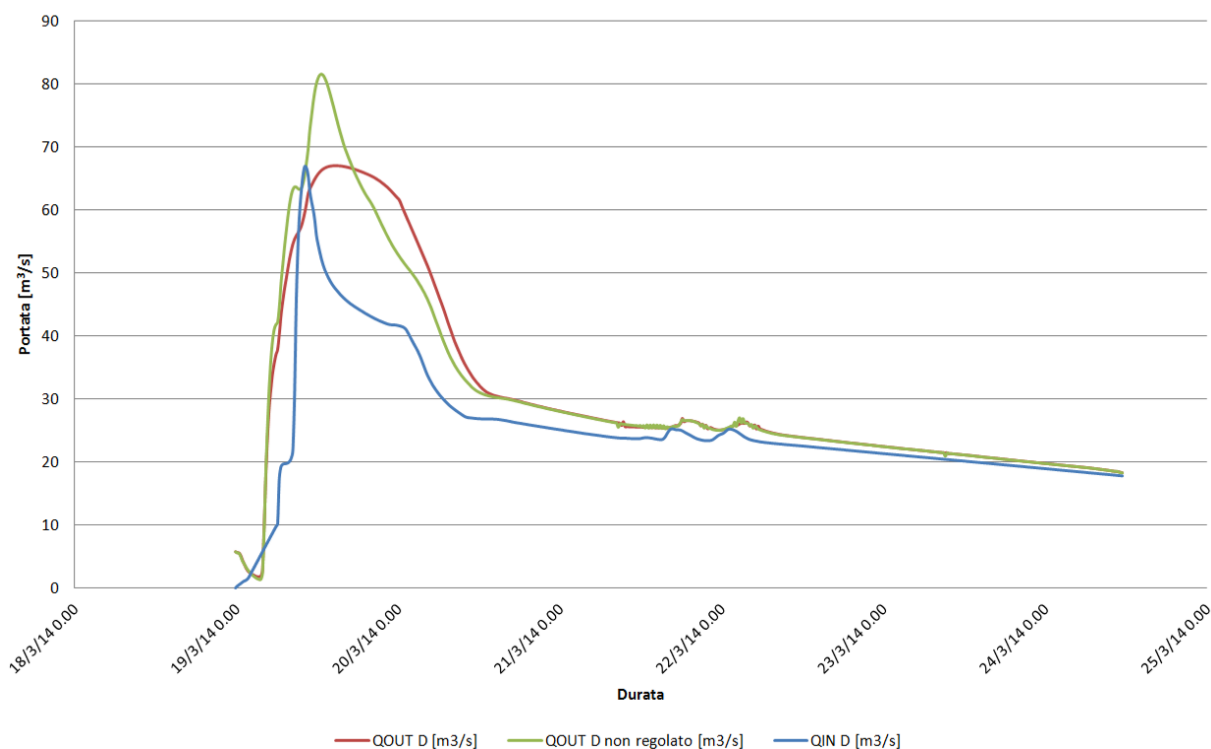


Figura 12 – Confronto tra l'idrogramma del Lambro in ingresso da monte e quelli a valle dell'opera con e senza regolazione delle portate per lo scenario di simulazione "D"

In Figura 12 si riporta il confronto tra l'idrogramma del Lambro in ingresso da monte e quelli a valle dell'opera con e senza regolazione delle portate: è evidentissimo il beneficio ottenuto grazie all'opera. Infatti, è possibile laminare integralmente i contributi parossistici provenienti dai sottobacini afferenti a valle di Merone, pur



garantendo che le aree allagate a monte dell'opera di Inverigo siano comprese entro le fasce fluviali vigenti, così come mostrato negli specifici elaborati grafici.

Di seguito si riporta uno stralcio del profilo di rigurgito a monte dell'opera: esso mostra come la regolazione delle portate garantisca comunque il mantenimento di un consistente franco idraulico.

Per i risultati completi si faccia riferimento all'ALLEGATO 5.

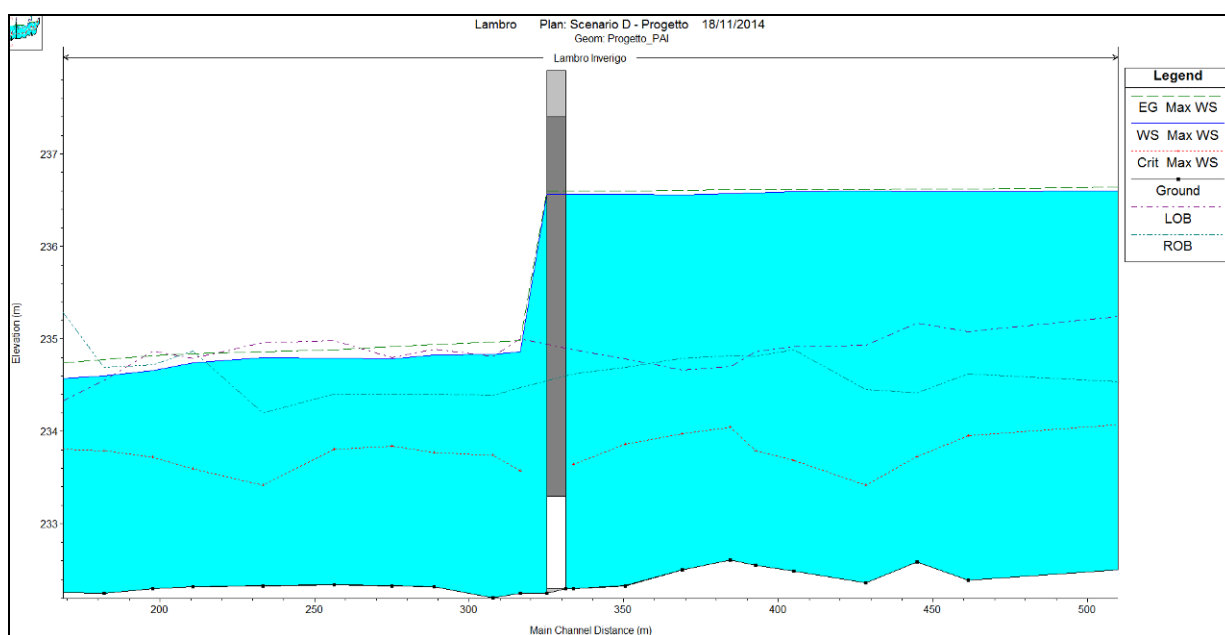


Figura 13 – Profilo di rigurgito determinato dall'esecuzione di manovre delle paratoie per la regolazione delle portate nello scenario "D"



4. VERIFICHE AI SENSI DEL D.M. 26/06/2014 – M.I.T.

Il 26 giugno 2014 il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti ha emanato le nuove "Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)".

Le nuove norme sono state pubblicate sulla Gazzetta Ufficiale n.156 del 8 luglio 2014 e sostituiscono quelle approvate con il decreto ministeriale del 24 marzo 1982.

4.1 L'APPLICAZIONE DELLA NORMA

La norma è stata approvata in via sperimentale ed è stata costituita una Commissione consultiva per il monitoraggio della sua applicazione. La Commissione "entro 12 mesi dall'entrata in vigore delle Norme tecniche di cui all'art. 1 predispone un rapporto sugli esiti dell'attività di monitoraggio ed una proposta di aggiornamento delle norme stesse. Nei successivi 6 mesi è emanato l'aggiornamento delle predette norme".

Nella fattispecie, non esistendo nelle citate norme alcun riferimento ad opere come quelle in progetto, gli Scriventi ritengono che l'opera di regolazione di Inverigo possa essere assimilata, in termini sostanziali, ad una traversa fluviale così come individuata alla lettera F del decreto ministeriale.

"E' definita traversa fluviale ogni sbarramento avente la funzione primaria di stabilizzare a un valore assegnato la quota idrica a monte; pertanto può essere secondaria la funzione di regolazione delle portate.

Si distinguono in traverse a soglia fissa e traverse mobili o presidiate da paratoie.

Per i corsi d'acqua arginati, si applicano tutte le disposizioni delle presenti norme agli argini del tronco fluviale compreso tra la traversa e la sezione di incrocio del profilo di rigurgito che si diparte dalla traversa alla quota massima di regolazione con il profilo che si realizzava nelle condizioni naturali del corso d'acqua con la portata mediamente superata 270 giorni all'anno, antecedentemente alla costruzione della traversa.

Qualora il rigurgito che si diparte dalla traversa interessi argini già esistenti, deve essere dimostrata la loro idoneità alla permanente trattenuta dell'acqua in condizioni di sicurezza. In particolare le verifiche di sicurezza degli argini devono considerare la permanenza in alveo di un livello di pelo libero pari alla quota massima di invaso. Il limite dei tronchi arginali interessati dal volume di rigurgito deve essere materializzato sul terreno.

In ogni caso, le portate di progetto per il dimensionamento della traversa e degli eventuali argini dell'impianto devono coincidere.

Il profilo di piena corrispondente alla portata di dimensionamento definita al cap. C.1 è determinato considerando che:

- 1. per le traverse a soglia fissa, siano chiusi tutti gli scarichi ausiliari (prese, luci sghiaiatrici, ecc.) e la portata passi interamente sulla soglia fissa. Il calcolo deve considerare la occlusione di almeno il 20% della luce libera causata da accumulo di materiale galleggiante a monte delle pile della passerella sormontante lo sfioratore; la riduzione della luce libera sale al 50% se la luce tra le pile è non superiore a 12 m.*



2. *per le traversa mobili, sia chiuso, per blocco delle paratoie, almeno il 30% delle luci principali se queste hanno larghezza non inferiore a 12 m; in caso contrario, il calcolo deve considerare la occlusione di almeno il 50% della residua luce libera per eventuale accumulo di materiale galleggiante.*

Nella progettazione della traversa devono essere studiate le condizioni di trasporto solido nel fiume da sbarrare, per valutare l'entità dell'erosione a valle e dell'interrimento a monte dell'opera, da considerare ai fini della verifica delle condizioni di sicurezza dello sbarramento. Ogni studio su modello idraulico riguardante la interazione tra la struttura e il letto fluviale deve considerare il fondo mobile in condizioni di letto vivo, a meno che non sia altrimenti giustificato".

Si ritiene che l'opera in progetto non sia pienamente assimilabile ad una traversa fluviale poiché l'obiettivo della stessa non è quello di "stabilizzare a un valore assegnato la quota idrica a monte" in maniera continua, ma di effettuare una regolazione delle portate defluenti solo ed esclusivamente in occasione di eventi idrologici intensi i quali, per definizione, hanno una durata limitata. Per il resto del tempo le paratoie di intercettazione saranno completamente sollevate e non interferiranno minimamente con il naturale deflusso del fiume Lambro. Inoltre, il dimensionamento delle paratoie è stato effettuato in modo da garantire che il deflusso della portata di piena duecentennale avvenga senza interferenze, qualora si decidesse di non operare alcuna regolazione.

Per quanto detto, di seguito si prende in esame comma per comma il contenuto sopra citato della lettera F del decreto ministeriale al fine di verificarne l'applicabilità al caso in esame:

" Si distinguono in traverse a soglia fissa e traverse mobili o presidiate da paratoie"

Il caso in esame è assimilabile, anche se non del tutto per i motivi testé spiegati, ad una traversa mobile presidiata da paratoie.

"Per i corsi d'acqua arginati, si applicano tutte le disposizioni delle presenti norme agli argini del tronco fluviale compreso tra la traversa e la sezione di incrocio del profilo di rigurgito che si diparte dalla traversa alla quota massima di regolazione con il profilo che si realizzava nelle condizioni naturali del corso d'acqua con la portata mediamente superata 270 giorni all'anno, antecedentemente alla costruzione della traversa"

Il tratto di fiume Lambro interessato dalle opere in progetto non può definirsi arginato. Infatti, le opere previste di contenimento dei livelli saranno localizzate e finalizzate alla protezione di modesti insediamenti antropici. Peraltro, l'estensione del profilo di rigurgito che si diparte dalla traversa nello scenario più gravoso si esaurisce in corrispondenza (o poco a valle) del ponte della S.S. 342 "Briantea", intersecando il profilo di Thalweg. Omettendo l'esecuzione di onerose e superflue verifiche numeriche, gli Scriventi ritengono sia comunque ragionevole supporre che il profilo della portata mediamente superata 270 giorni all'anno sia ampiamente contenuto entro l'alveo inciso del corso d'acqua, garantendo in tal modo la definizione delle modalità di interferenza dell'opera con i naturali deflussi del Lambro. A maggior riprova si sottolinea nuovamente la scarsa frequenza con la quale l'opera sarà attivata: per portate di magra, morbida o comunque caratterizzate da bassi tempi di ritorno le paratoie saranno mantenute del tutto sollevate e il deflusso naturale non subirà alcuna interferenza da parte degli organi di regolazione.



"Qualora il rigurgito che si diparte dalla traversa interessi argini già esistenti, deve essere dimostrata la loro idoneità alla permanente trattenuta dell'acqua in condizioni di sicurezza. In particolare le verifiche di sicurezza degli argini devono considerare la permanenza in alveo di un livello di pelo libero pari alla quota massima di invaso. Il limite dei tronchi arginali interessati dal volume di rigurgito deve essere materializzato sul terreno".

Il rigurgito che si dipartirà dalla traversa non interesserà argini esistenti e quelli di nuova realizzazione saranno comunque interessati per modesti intervalli di tempo di cui si è già tenuto conto per il dimensionamento degli stessi (verifiche di filtrazione con modello bidimensionale, etc.)

"In ogni caso, le portate di progetto per il dimensionamento della traversa e degli eventuali argini dell'impianto devono coincidere".

Si conferma che le portate di dimensionamento dell'opera di regolazione e degli argini di monte coincidono.

"Il profilo di piena corrispondente alla portata di dimensionamento definita al cap. C.1 (...)"

Al capitolo C.1 si afferma che "gli scarichi di superficie della diga devono essere dimensionati per l'onda con portata al colmo di piena corrispondente al periodo di ritorno di 1000 anni, per le dighe in calcestruzzo, e di 3000 anni per le dighe di materiali sciolti, tenendo conto dell'effetto di laminazione esercitato dal serbatoio" e, inoltre che "le verifiche devono comprendere anche la stima della portata di piena con periodo di ritorno di 50, 100, 200 e 500 anni".

Per quanto già affermato in precedenza è del tutto evidente che l'opera in progetto non sia assimilabile ad una diga in materiali sciolti né, men che meno, ad una diga in calcestruzzo. Per questa ragione non si ritiene applicabile la verifica in riferimento a portate di piena con tempo di ritorno di 1'000 o 3'000 anni. Al limite anche il successivo riferimento alla portata di piena cinquecentennale non sarebbe strettamente applicabile al caso in essere. Peraltro, portate di piena così elevate molto probabilmente non sarebbero in grado di raggiungere naturalmente le sezioni di interesse, poiché determinerebbero estesissimi allagamenti già a monte delle opere in progetto cui conseguirebbe un aggiramento delle stesse. Tuttavia, per garantire il rispetto di adeguate condizioni di sicurezza idraulica per i territori interferiti dalle opere, si è comunque scelto di effettuare le verifiche con riferimento agli scenari progettuali "B_bis" (transitorio) e "C" (definitivo) per la portata catastrofica cinquecentennale come descritto nei successivi paragrafi.

"(...) è determinato considerando che:

- 1. per le traverse a soglia fissa, siano chiusi tutti gli scarichi ausiliari (luci sghiaiatrici, ecc.) e la portata passi interamente sulla soglia fissa. Il calcolo deve considerare la occlusione di almeno il 20% della luce libera causata da accumulo di materiale galleggiante a monte delle pile della passerella sormontante lo sfioratore; la riduzione della luce libera sale al 50% se la luce tra le pile è non superiore a 12 m.*

Non applicabile al caso in esame.

- 2. "per le traversa mobili, sia chiuso, per blocco delle paratoie, almeno il 30% delle luci principali se queste hanno larghezza non inferiore a 12 m; in caso contrario, il calcolo deve considerare la occlusione di almeno il 50% della residua luce libera per eventuale accumulo di materiale galleggiante".*



Considerando che l'altezza netta delle luci presidiate da paratoie è di 5,1 m, l'applicazione del citato comma implica l'ipotesi che le luci siano ostruite per 1,53 m (30% di 5,1 m) per blocco delle paratoie e per un ulteriore 1,785 m (50% della differenza tra 5,1 m e 1,53 m) per eventuale accumulo di materiale galleggiante. In totale è dunque necessario ipotizzare che le luci siano ostruite per $1,53 + 1,785 = 3,315$ m, il che equivale ad imporre che l'altezza di apertura delle paratoie (luce netta) sia fissata a $5,1 - 3,315 = 1,785$ m sul fondo scorrevole. In quote assolute: fondo scorrevole 232,3 m s.l.m.; intradosso delle paratoie 234,085 m s.l.m.

"Nella progettazione della traversa devono essere studiate le condizioni di trasporto solido nel fiume da sbarrare, per valutare l'entità dell'erosione a valle e dell'interrimento a monte dell'opera, da considerare ai fini della verifica delle condizioni di sicurezza dello sbarramento. Ogni studio su modello idraulico riguardante la interazione tra la struttura e il letto fluviale deve considerare il fondo mobile in condizioni di letto vivo, a meno che non sia altrimenti giustificato".

Non applicabile al caso in esame per le ragioni già spiegate in precedenza. Non si tratta di una traversa fissa e la frequenza di azionamento delle paratoie e la loro conseguente interferenza con il deflusso naturale del fiume Lambro sarà decisamente modesta. Pertanto, gli Scriventi ritengono trascurabili gli effetti sulle dinamiche di trasporto solido del corso d'acqua in termini di tendenza all'erosione a valle e deposito a monte. D'altro canto è lecito attendersi che nei poco frequenti casi di attivazione delle paratoie, l'effetto di rigurgito dei livelli e la proporzionale riduzione delle velocità di deflusso determinino la sedimentazione di materiale solido sui piani golenali. Sarà onere del gestore prevedere adeguate azioni di ripristino delle aree golenali e/o eventuali misure compensative a fronte della quantità e della qualità dei depositi che si origineranno di volta in volta.

Di seguito si riportano gli esiti delle verifiche condotte per gli scenari di simulazione "B_bis" e "C", ossia per la configurazione transitoria e definitiva di sistemazione dell'asta fluviale nel tratto d'interesse.

4.2 VERIFICHE CONDOTTE IN RIFERIMENTO ALLO SCENARIO "B_BIS"

Lo scenario transitorio "B_bis" è stato simulato nell'ipotesi di entrata in esercizio delle nuove opere di regolazione del Cavo Diotti, che a breve consentiranno di regolare al meglio i deflussi idrici rilasciati dal Lago di Pusiano. Il resto delle ipotesi coincide con quanto a suo tempo simulato nell'ambito dello scenario "B", ossia la sola realizzazione dell'opera di regolazione di Inverigo in assenza delle altre opere previste per la riduzione attiva dei picchi di portata del Lambro (es. laminazione della Bevera di Molteno a Costa Masnaga (LC), etc.), a meno della prevista ostruzione delle luci del nuovo manufatto di regolazione chiesta dal DM.

La portata di picco dell'idrogramma di verifica in ingresso al tratto d'interesse, ossia quella relativa al tempo di ritorno cinquecentennale è di $129,1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Si è dunque provveduto ad eseguire una nuova simulazione in moto vario con il supporto del modello numerico monodimensionale. Rinviano all'ALLEGATO 4 per l'esame completo dei risultati ottenuti, si ritiene utile mostrare innanzitutto che la nuova opera di regolazione delle portate consente il contenimento dei livelli associati alla portata catastrofica, sebbene con franco minimo.

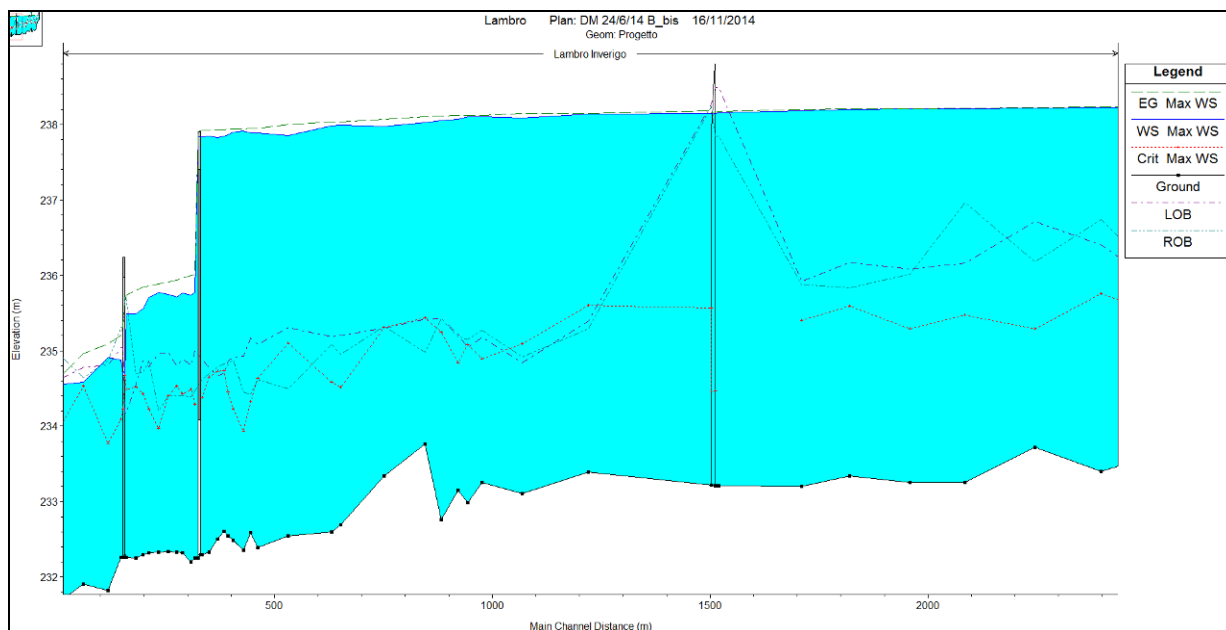
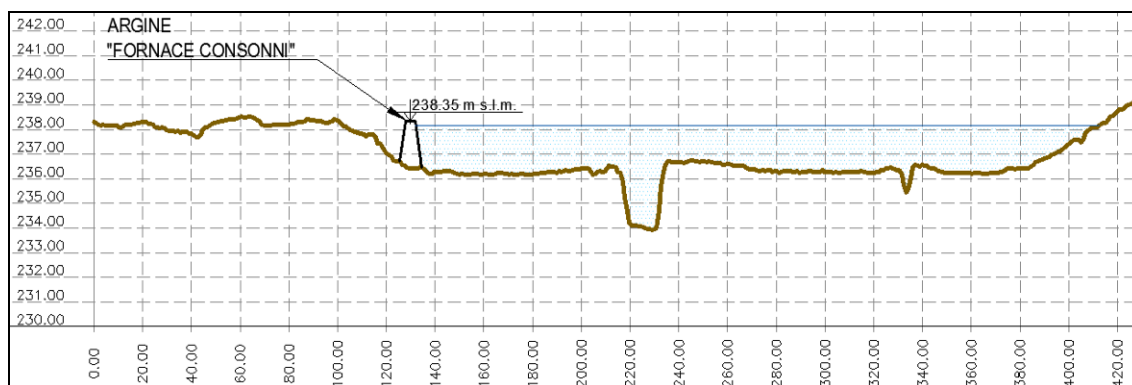
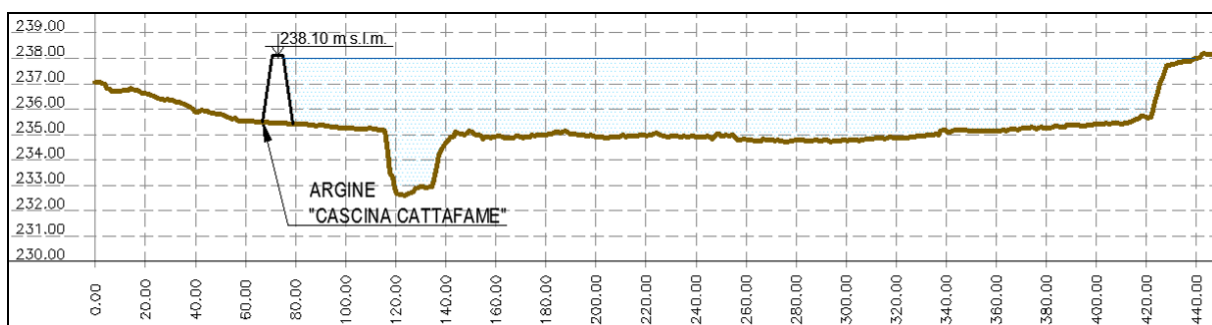


Figura 14 – Profilo di piena ed effetto di rigurgito dell'opera di regolazione per la piena catastrophica cinquecentennale con riferimento allo scenario progettuale "B_bis" imponendo la parziale ostruzione delle luci.

Anche le nuove linee arginali di monte sono in grado di contenere i livelli di piena, sebbene anche in questo caso con franchi minimi. A titolo di esempio si riportano di seguito le sezioni di calcolo n.240, 450 e 540, collocate in corrispondenza della Cascina "Cattafame", della località "Fornace Consonni" e della località "Molino Nuovo".



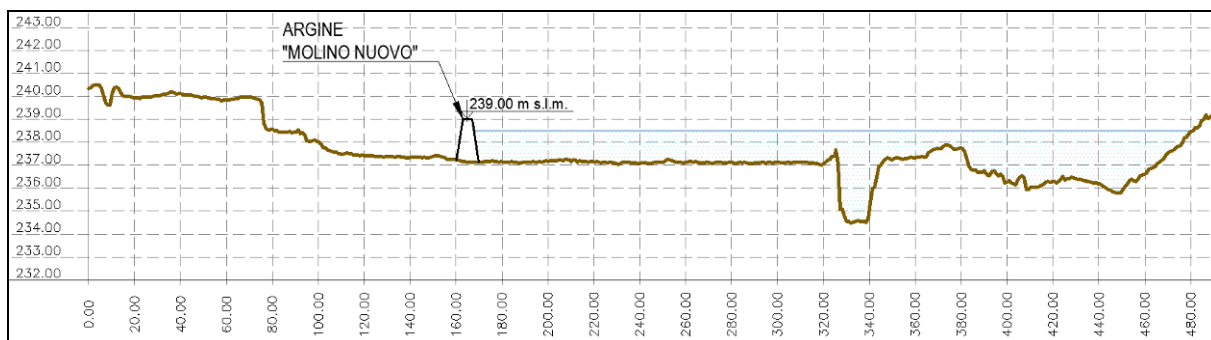


Figura 15 – Sezioni di calcolo n.240, 450 e 540 con indicazione del livello idrico atteso per la piena catastrofica cinquecentennale con riferimento allo scenario progettuale "B_bis" imponendo la parziale ostruzione delle luci.

4.3 VERIFICHE CONDOTTE IN RIFERIMENTO ALLO SCENARIO "C"

Le medesime verifiche sono state condotte in riferimento allo scenario di simulazione relativo alla configurazione definitiva attesa per l'asta del Lambro nel tratto d'interesse. Nel presente caso, come era lecito attendersi, la portata di picco dell'idrogramma in ingresso a monte è decisamente minore che nel caso precedente: 84,8 m³/s. Tale circostanza determina migliori condizioni di sicurezza in relazione ai maggiori franchi calcolati in corrispondenza delle nuove opere in progetto. Rinviamo all'ALLEGATO 5 per l'esame completo dei risultati ottenuti, di seguito si riporta a titolo esemplificativo lo stralcio del profilo idrico della corrente di piena e dell'associato fenomeno di rigurgito (cfr. Figura 17): è evidente come quest'ultimo si estenda per un tratto minore rispetto al caso precedente. Inoltre, al di là dei battenti idrici attesi sulle aree golenali, le velocità di deflusso sulle stesse saranno sempre contenute in ragione delle ridotte pendenze esistenti e dell'ampiezza delle sezioni idrauliche (cfr.).

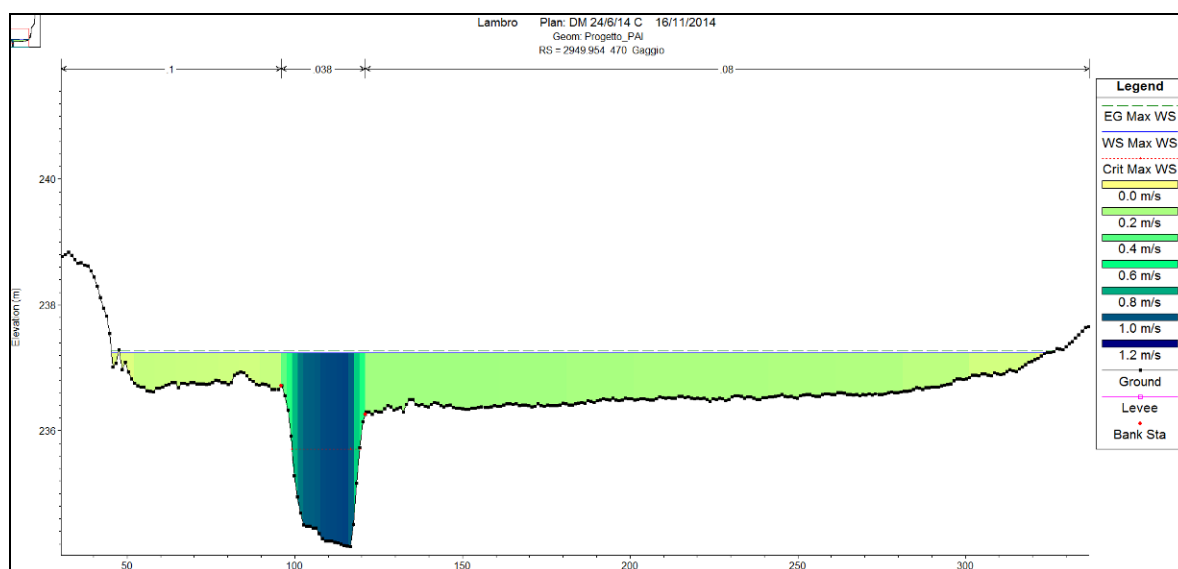


Figura 16 – Sezione di calcolo n.470: si notino le ridotte velocità di deflusso sui piani golenali.

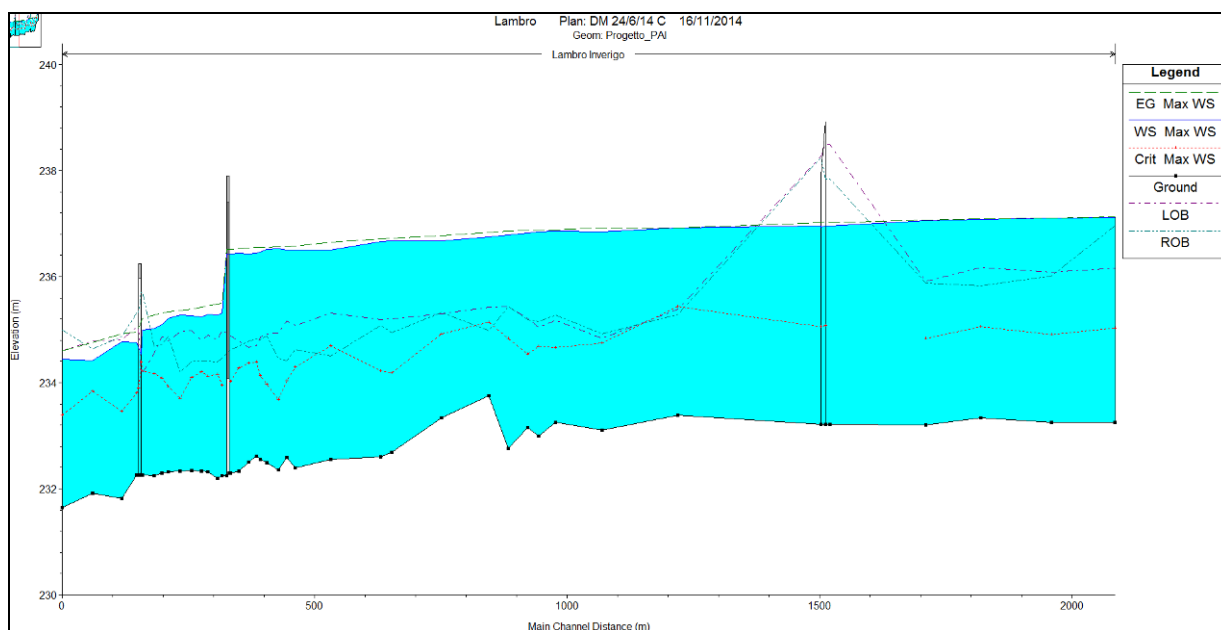


Figura 17 – Profilo di piena ed effetto di rigurgito dell'opera di regolazione per la piena catastofica cinquecentennale con riferimento allo scenario progettuale "C" imponendo la parziale ostruzione delle luci.



5. CONCLUSIONI

L'emanazione di nuova normativa tecnica di settore e quanto emerso nel corso dell'incontro tenutosi in Regione Lombardia in data 10/11/2014 hanno comportato la necessità di eseguire una serie di simulazioni numeriche idrauliche integrative rispetto a quelle già effettuate in sede di predisposizione del Progetto Definitivo. In particolare si tratta di due nuovi scenari di simulazione idrodinamica (B_bis e D), oltre ai tre scenari originariamente prodotti (A, B e C), e alle verifiche di sicurezza conseguenti all'entrata in vigore del DM 26/06/2014 emanato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti concernente le "Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)". Queste ultime sono state svolte in riferimento allo scenario transitorio "B_bis" e definitivo "C".

5.1 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI PROGETTUALI INTEGRATIVE

La simulazione "B_bis" è stata condotta su richiesta della Regione Lombardia di verificare quale debba essere il vincolo gestionale della nuova opera di regolazione di Inverigo, durante il periodo di transizione necessario all'attuazione di tutti gli interventi di laminazione previsti dal P.A.I. a monte dell'opera, affinché gli allagamenti a monte della stessa restino contenuti all'interno delle fasce fluviali vigenti.

Ciò equivale ad operare una manovra degli organi elettromeccanici che interferisca solo in minima parte con la corrente di piena in occasione di un evento caratterizzato dal tempo di ritorno bisecolare e tale regolazione comporta una notevolissima riduzione dell'efficienza di laminazione dell'invaso di Inverigo che tende ad essere pressoché nulla. **A parere degli Scriventi appare del tutto illogico rinunciare al consistente beneficio offerto dalla regolazione delle portate duecentennali** al fine di salvaguardare aree perifluviali soltanto perché poste all'esterno delle fasce fluviali vigenti.

La simulazione "D" è stata realizzata per mostrare come la nuova opera di Inverigo consenta di ottenere consistenti benefici in relazione ad eventi parossistici non uniformemente distribuiti sul bacino del Lambro chiuso alla sezione dell'opera.

I risultati ottenuti mostrato inequivocabilmente la possibilità offerta dalla nuova opera di regolazione di **laminare integralmente i contributi parossistici provenienti dai sottobacini afferenti al Lambro a valle di Merone**, pur garantendo che le aree allagate a monte dell'opera di Inverigo siano comprese entro le fasce fluviali vigenti.

5.2 RISULTATI DELLE VERIFICHE AI SENSI DEL DM 26/06/2014

Si sottolinea innanzitutto l'approvazione della norma in via sperimentale per i primi 12 mesi dall'entrata in vigore della stessa. Per quanto riguarda la sua applicabilità al caso in esame, non esistendo alcun riferimento specifico ad opere come quelle in progetto, gli Scriventi ritengono che l'opera di regolazione di Inverigo possa essere assimilata, anche se non del tutto, ad una traversa fluviale mobile così come individuata alla lettera F



del decreto ministeriale. In particolare è del tutto evidente che l'opera in progetto non sia assimilabile ad una diga in materiali sciolti né, men che meno, ad una diga in calcestruzzo. Per questa ragione non si ritiene applicabile la verifica in riferimento a portate di piena con tempo di ritorno di 1'000 o 3'000 anni. Al limite anche il successivo riferimento alla portata di piena cinquecentennale non sarebbe strettamente applicabile al caso in essere. Peraltro, **portate di piena così elevate molto probabilmente non sarebbero in grado di raggiungere naturalmente le sezioni di interesse, poiché determinerebbero estesissimi allagamenti già a monte delle opere in progetto cui conseguirebbe un aggiramento delle stesse.** Tuttavia, per garantire il rispetto di adeguate condizioni di sicurezza idraulica per i territori interferiti dalle opere, si è comunque scelto di effettuare le verifiche con riferimento agli scenari progettuali "B_bis" (transitorio) e "C" (definitivo) per la portata catastrofica cinquecentennale.

I risultati delle verifiche mostrano che la nuova opera di regolazione delle portate consente il contenimento dei livelli associati alla portata catastrofica, sebbene con franco minimo, così come le nuove linee arginali di monte. Si sottolinea, inoltre, che al di là dei battenti idrici attesi sulle aree golenali nello scenario più gravoso, le velocità di deflusso sulle stesse saranno sempre contenute in ragione delle ridotte pendenze esistenti e dell'ampiezza delle sezioni idrauliche (cfr. ALLEGATO 6).



PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo



ALLEGATI



PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo



ALLEGATO 1

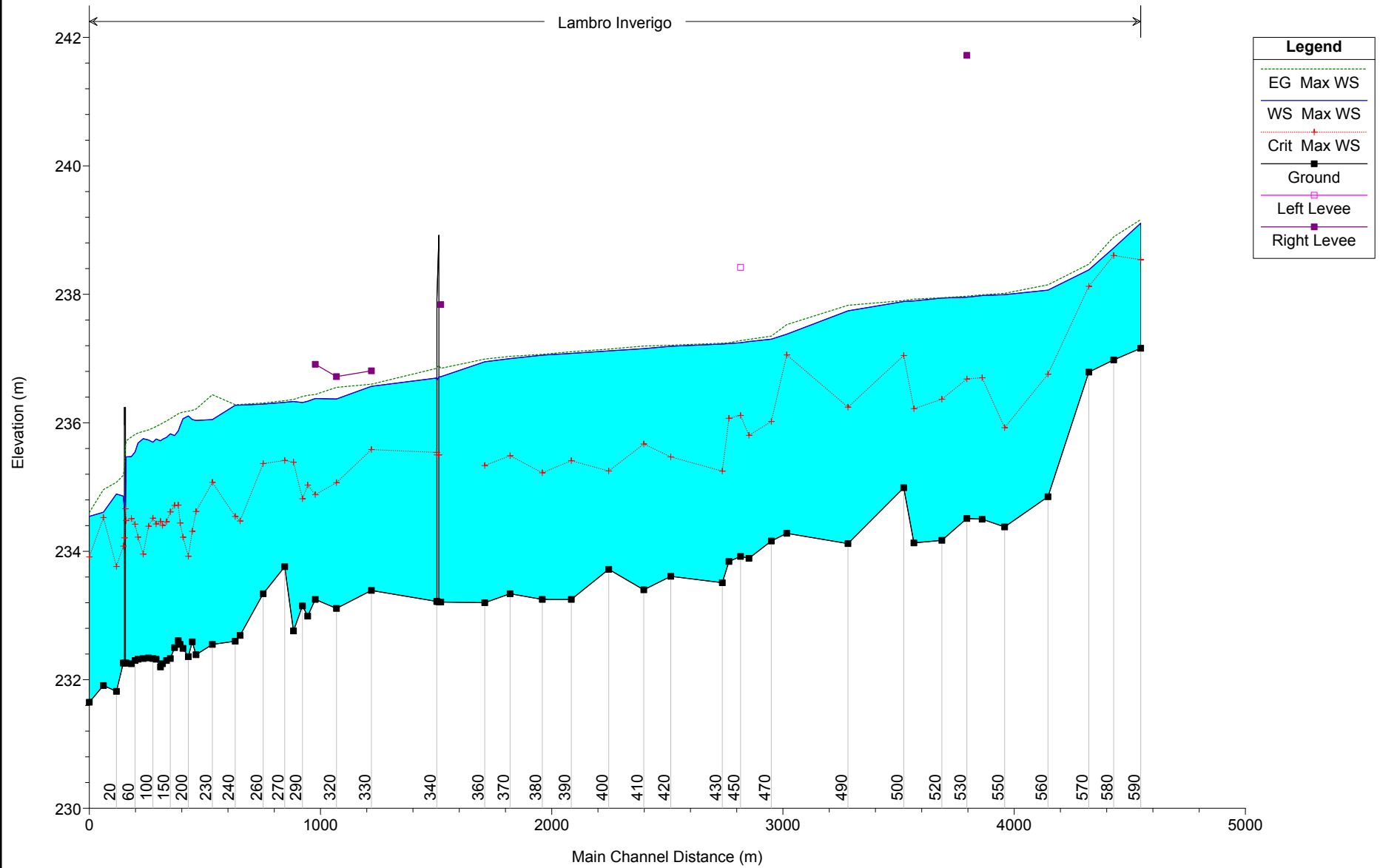
– Risultati simulazione idraulica: scenario A – Stato attuale

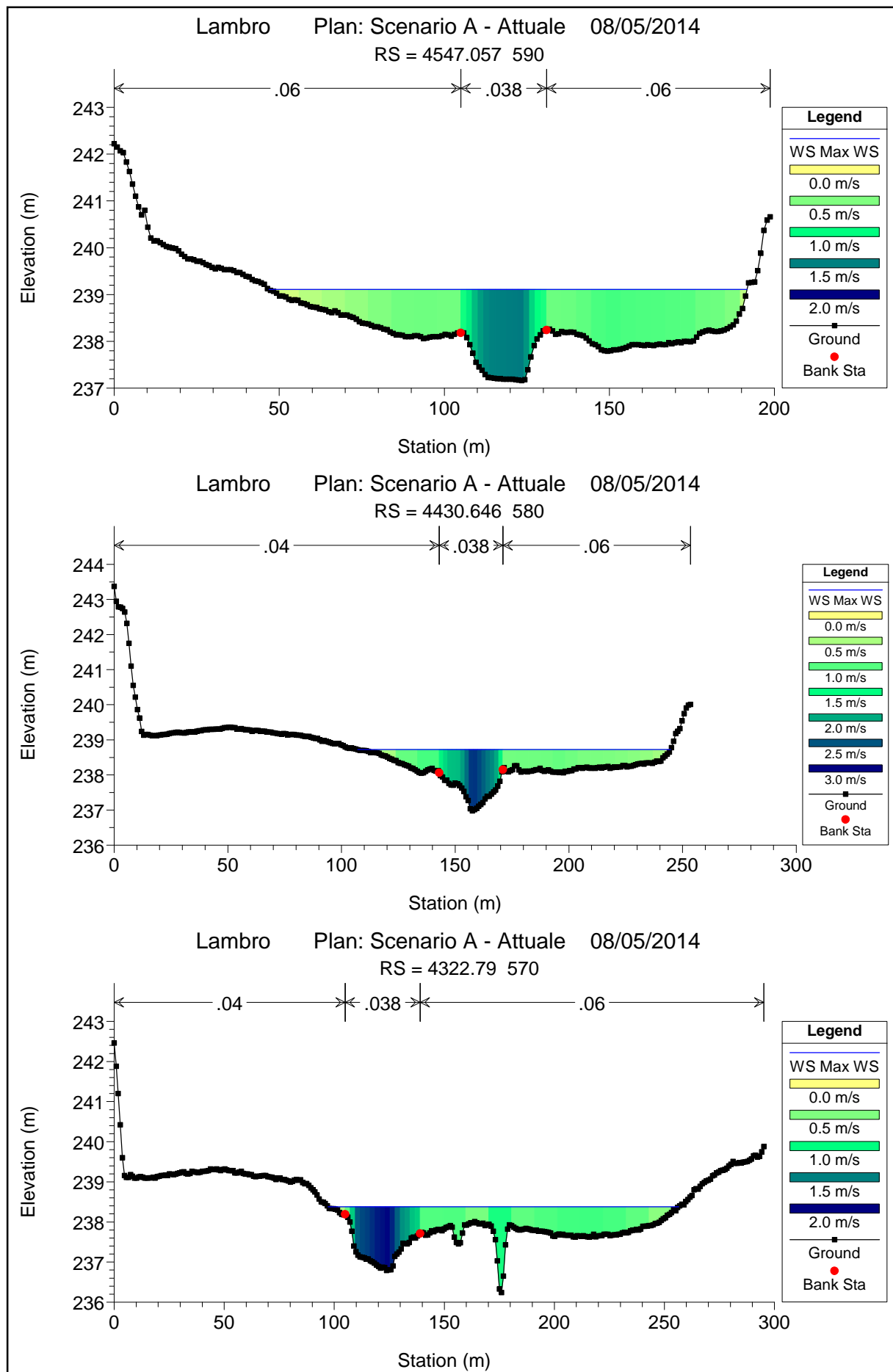
HEC-RAS Plan: A - Attuale River: Lambro Reach: Inverigo Profile: Max WS

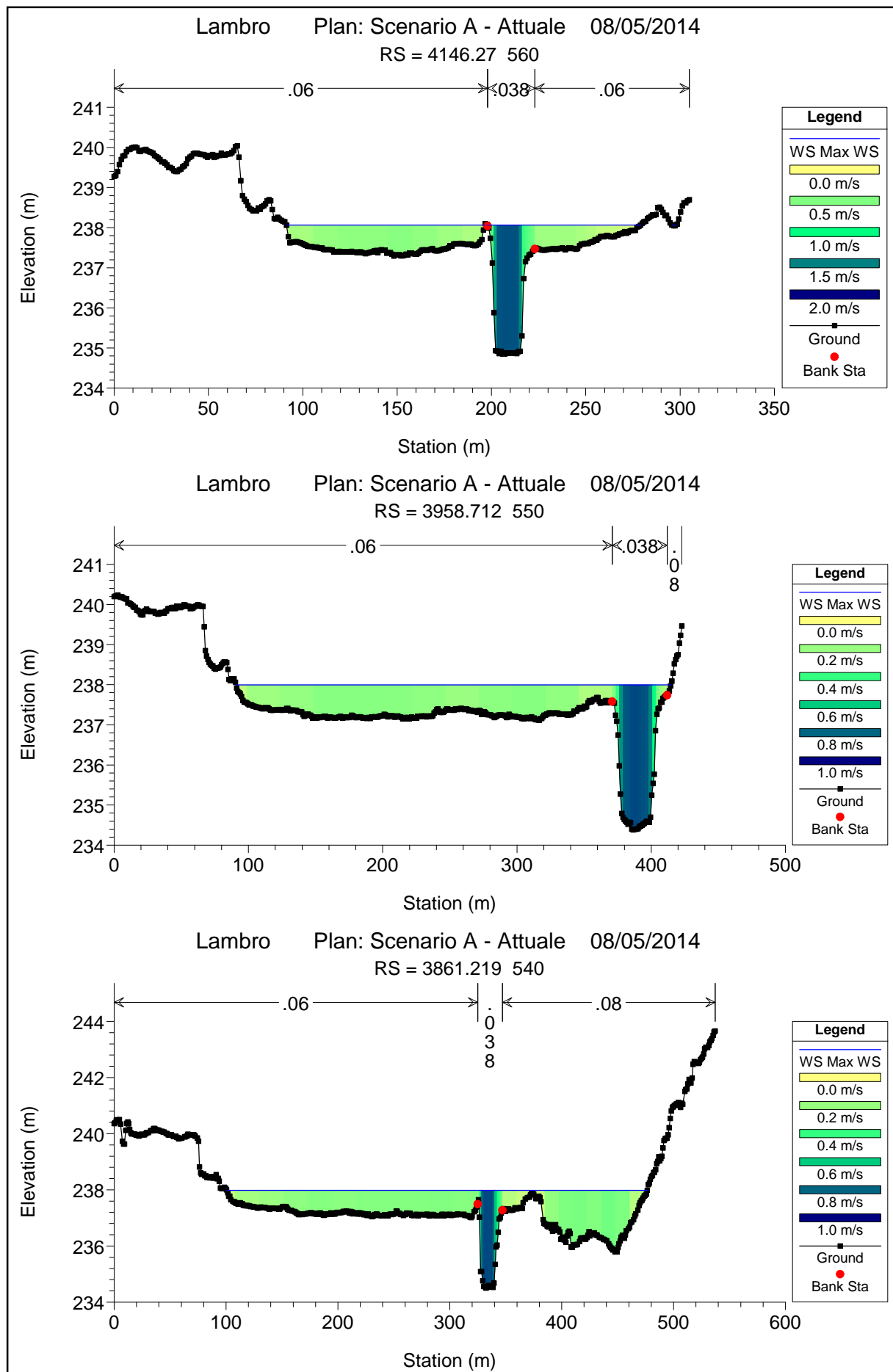
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Inverigo	4547.057 590	Max WS	115.10	237.16	239.11	238.54	239.16	0.001468	1.36	141.82	144.76	0.35
Inverigo	4430.646 580	Max WS	115.08	236.98	238.72	238.60	238.90	0.005583	2.21	83.22	137.62	0.64
Inverigo	4322.79 570	Max WS	115.31	236.79	238.38	238.12	238.47	0.003491	1.67	111.55	159.37	0.50
Inverigo	4146.27 560	Max WS	115.46	234.85	238.07	236.76	238.15	0.001236	1.49	140.81	188.50	0.32
Inverigo	3958.712 550	Max WS	115.74	234.38	238.00	235.93	238.02	0.000277	0.76	291.63	323.92	0.16
Inverigo	3861.219 540	Max WS	116.01	234.50	237.98	236.70	237.99	0.000265	0.74	383.54	375.87	0.15
Inverigo	3795.401 530	Max WS	116.21	234.51	237.95	236.68	237.97	0.000320	0.82	276.97	268.59	0.17
Inverigo	3687.068 520	Max WS	116.54	234.17	237.94	236.37	237.95	0.000069	0.40	397.17	350.37	0.08
Inverigo	3566.631 510	Max WS	116.84	234.13	237.90	236.22	237.93	0.000481	0.86	180.55	237.82	0.20
Inverigo	3522.358 500	Max WS	116.98	234.99	237.89	237.05	237.90	0.000453	0.78	243.77	279.91	0.19
Inverigo	3281.337 490	Max WS	117.21	234.12	237.74	236.24	237.83	0.001115	1.45	134.96	185.50	0.31
Inverigo	3016.292 480	Max WS	117.03	234.28	237.38	237.06	237.53	0.002500	2.02	125.19	198.64	0.45
Inverigo	2949.954 470	Max WS	117.09	234.16	237.30	236.02	237.35	0.000645	1.19	239.81	283.39	0.24
Inverigo	2852.912 460	Max WS	117.29	233.89	237.26	235.81	237.30	0.000533	1.04	275.78	284.28	0.22
Inverigo	2816.748 450	Max WS	117.20	233.92	237.25	236.11	237.28	0.000642	1.10	273.58	279.44	0.23
Inverigo	2766.457 440	Max WS	117.34	233.84	237.23	236.07	237.25	0.000289	0.77	385.99	392.25	0.16
Inverigo	2737.543 430	Max WS	117.43	233.51	237.23	235.25	237.24	0.000200	0.69	430.68	473.23	0.14
Inverigo	2514.769 420	Max WS	117.83	233.61	237.19	235.47	237.21	0.000223	0.77	389.21	284.58	0.14
Inverigo	2398.189 410	Max WS	117.99	233.40	237.15	235.67	237.19	0.000545	1.14	252.29	199.46	0.22
Inverigo	2246.646 400	Max WS	118.05	233.72	237.12	235.25	237.15	0.000322	0.85	256.72	203.75	0.17
Inverigo	2084.842 390	Max WS	118.29	233.25	237.08	235.41	237.11	0.000412	0.91	263.19	232.59	0.19
Inverigo	1959.351 380	Max WS	118.63	233.25	237.05	235.22	237.07	0.000192	0.72	390.00	272.88	0.13
Inverigo	1819.658 370	Max WS	118.98	233.34	237.00	235.49	237.03	0.000430	1.00	225.35	355.34	0.20
Inverigo	1710.393 360	Max WS	119.19	233.20	236.95	235.34	236.99	0.000474	1.12	213.92	298.39	0.21
Inverigo	1520.357 350	Max WS	119.64	233.21	236.72		236.85	0.001438	1.60	74.82	35.01	0.35
Inverigo	1511.685 345		Mult Open									
Inverigo	1503.015 340	Max WS	119.64	233.22	236.70	235.54	236.85	0.001752	1.72	69.62	34.18	0.38
Inverigo	1219.906 330	Max WS	119.90	233.39	236.57	235.58	236.60	0.000532	1.10	231.30	171.96	0.22
Inverigo	1068.842 320	Max WS	120.04	233.11	236.37	235.07	236.55	0.001455	1.89	66.56	84.22	0.37
Inverigo	977.0419 310	Max WS	120.24	233.25	236.38	234.88	236.44	0.000610	1.15	135.55	97.15	0.24
Inverigo	944.2654 300	Max WS	120.32	232.99	236.34	235.03	236.43	0.000913	1.48	124.66	128.30	0.29
Inverigo	921.7176 290	Max WS	120.36	233.15	236.32	234.82	236.41	0.000861	1.44	116.26	243.40	0.28
Inverigo	883.1097 280	Max WS	120.44	232.76	236.33	235.39	236.36	0.000540	1.05	296.98	279.92	0.22
Inverigo	844.9036 270	Max WS	120.51	233.76	236.32	235.41	236.34	0.000510	0.98	303.08	258.70	0.21
Inverigo	752.0323 260	Max WS	120.70	233.34	236.29	235.37	236.31	0.000336	0.85	361.52	308.18	0.17
Inverigo	652.2289 250	Max WS	120.89	232.69	236.27	234.47	236.29	0.000171	0.67	449.47	353.99	0.13
Inverigo	631.1052 240	Max WS	120.95	232.60	236.27	234.54	236.28	0.000155	0.63	488.79	391.06	0.12
Inverigo	532.0892 230	Max WS	120.94	232.55	236.05	235.07	236.44	0.003290	2.75	43.91	473.33	0.54
Inverigo	461.4436 220	Max WS	132.29	232.39	236.04	234.62	236.21	0.001412	1.86	70.95	440.35	0.36
Inverigo	444.964 210	Max WS	132.40	232.59	236.05	234.31	236.19	0.000985	1.67	79.12	422.37	0.31
Inverigo	428.3983 200	Max WS	132.51	232.36	236.11	233.92	236.18	0.000461	1.19	110.93	370.49	0.21
Inverigo	405.128 190	Max WS	132.64	232.49	236.06	234.22	236.17	0.000740	1.43	92.74	296.00	0.27
Inverigo	392.612 180	Max WS	132.71	232.55	235.95	234.44	236.16	0.001444	1.99	66.68	275.83	0.37
Inverigo	384.5591 170	Max WS	132.78	232.61	235.87	234.72	236.14	0.002149	2.29	57.95	277.23	0.44
Inverigo	368.98 160	Max WS	132.91	232.50	235.80	234.72	236.10	0.002475	2.44	54.41	227.52	0.47
Inverigo	350.5163 150	Max WS	133.07	232.33	235.83	234.61	236.06	0.001998	2.15	62.00	218.46	0.43
Inverigo	333.7652 140	Max WS	133.22	232.30	235.77	234.46	236.03	0.001941	2.24	59.57	193.72	0.42
Inverigo	316.6304 130	Max WS	133.39	232.25	235.74	234.40	235.99	0.001909	2.22	60.06	158.51	0.42
Inverigo	307.8002 120	Max WS	133.49	232.20	235.72	234.46	235.98	0.001985	2.25	59.42	150.84	0.43
Inverigo	288.6484 110	Max WS	133.60	232.32	235.75	234.42	235.94	0.001563	1.96	68.17	150.20	0.38
Inverigo	275.1218 100	Max WS	133.68	232.33	235.70	234.52	235.92	0.001868	2.08	64.14	146.52	0.42
Inverigo	256.351 90	Max WS	133.76	232.34	235.73	234.39	235.89	0.001323	1.75	76.52	136.16	0.35
Inverigo	233.2564 80	Max WS	133.83	232.33	235.75	233.96	235.86	0.000777	1.48	90.57	132.55	0.27
Inverigo	210.6123 70	Max WS	133.95	232.32	235.68	234.22	235.84	0.001298	1.76	76.20	121.00	0.35
Inverigo	197.713 60	Max WS	134.06	232.30	235.54	234.42	235.82	0.002457	2.32	57.75	109.22	0.47
Inverigo	181.8634 50	Max WS	134.20	232.25	235.48	234.51	235.78	0.002674	2.44	55.03	98.67	0.49
Inverigo	159.4336 40	Max WS	134.34	232.26	235.47	234.48	235.72	0.002483	2.22	60.61	69.37	0.47
Inverigo	153.24 35	Bridge										
Inverigo	147.0547 30	Max WS	134.34	232.26	234.86	234.08	235.18	0.003895	2.52	53.21	26.30	0.57
Inverigo	117.4892 20	Max WS	134.57	231.82	234.89	233.76	235.07	0.002292	1.96	102.72	181.72	0.44
Inverigo	60.7408 10	Max WS	134.88	231.91	234.61	234.53	234.96	0.005474	2.79	80.63	169.41	0.66
Inverigo	0 0	Max WS	135.04	231.65	234.54	233.91	234.60	0.001201	1.37	207.84	236.88	0.32

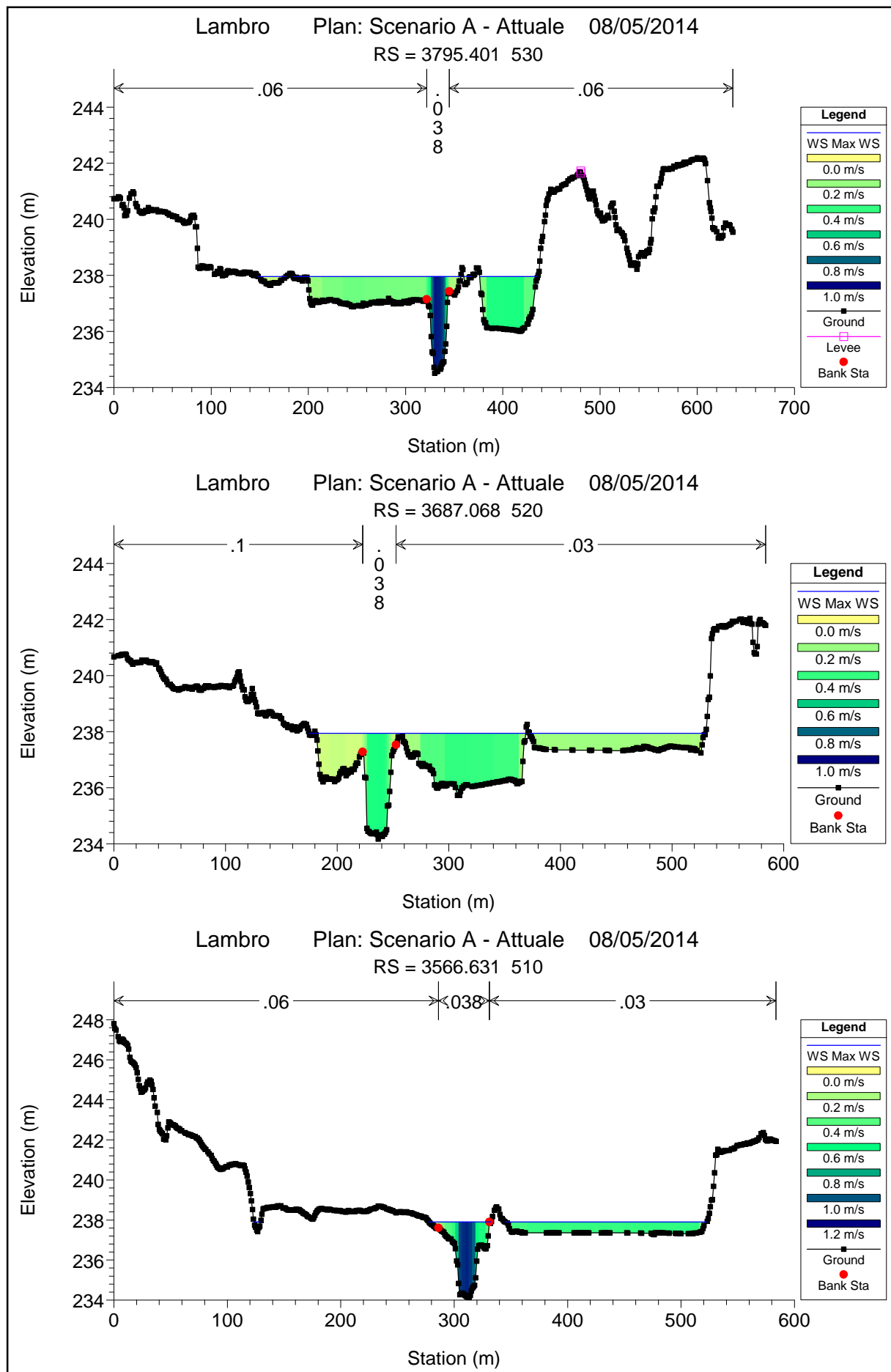
Lambro Plan: Scenario A - Attuale 08/05/2014

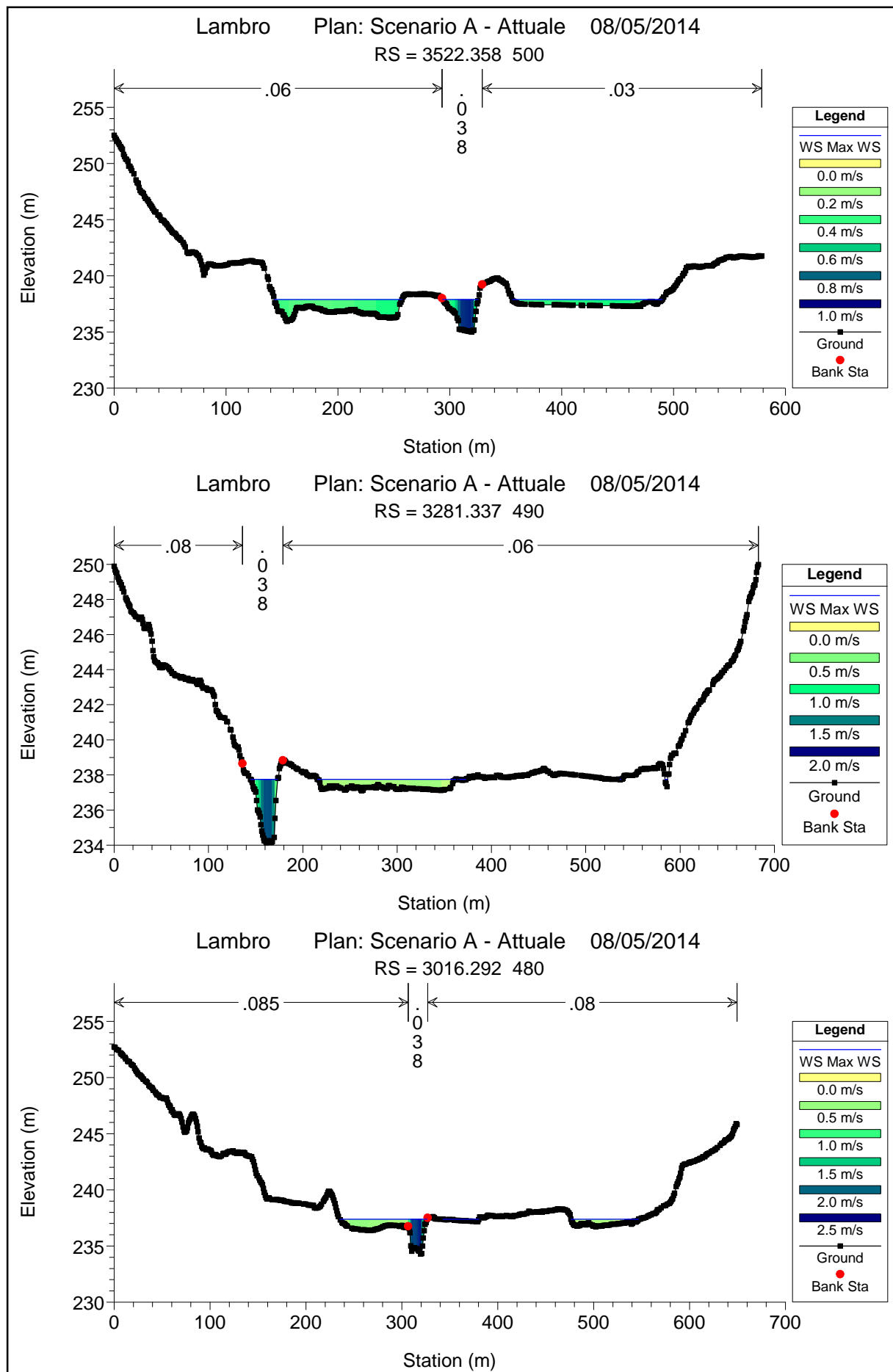
Lambro Inverigo

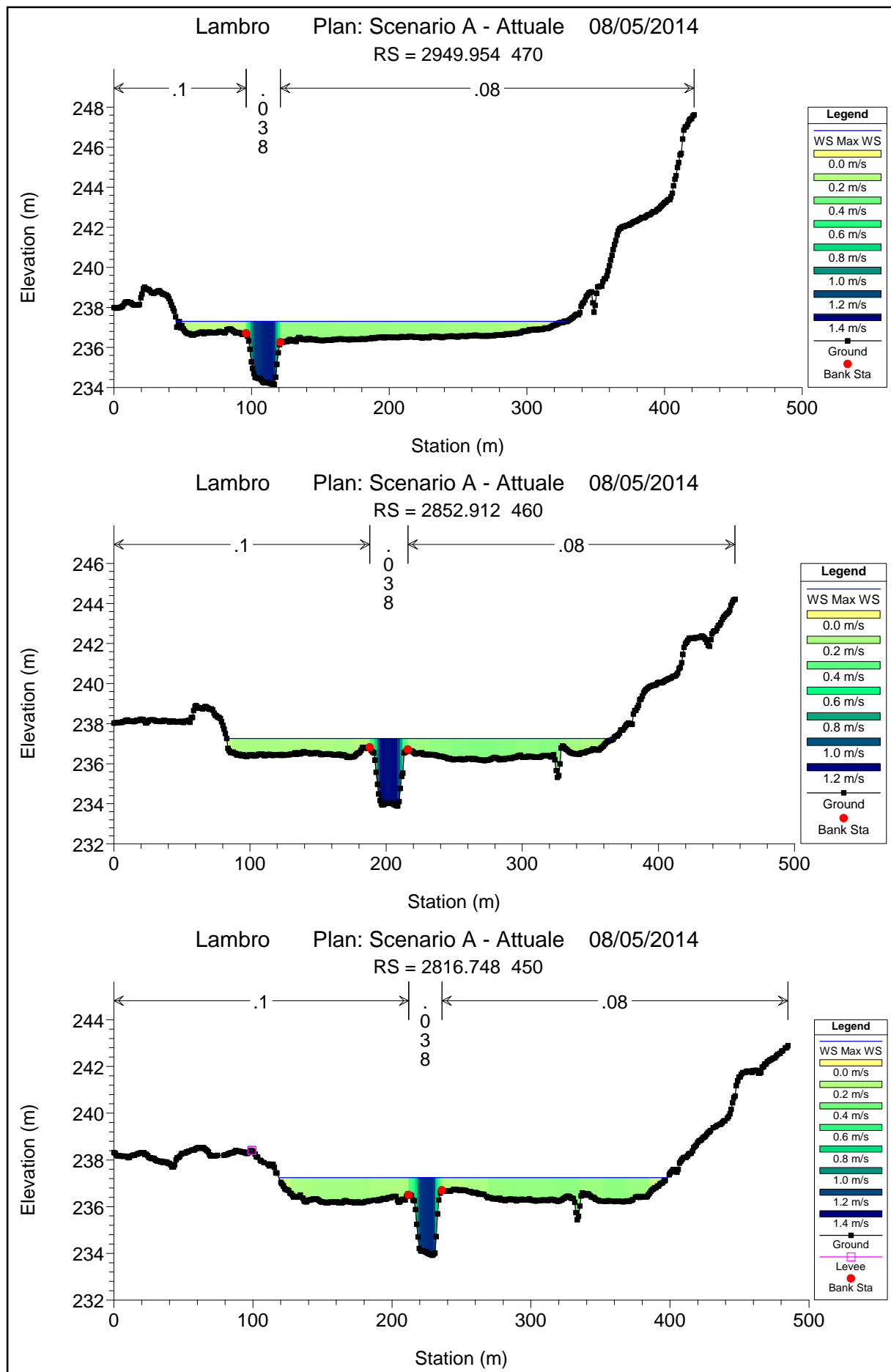


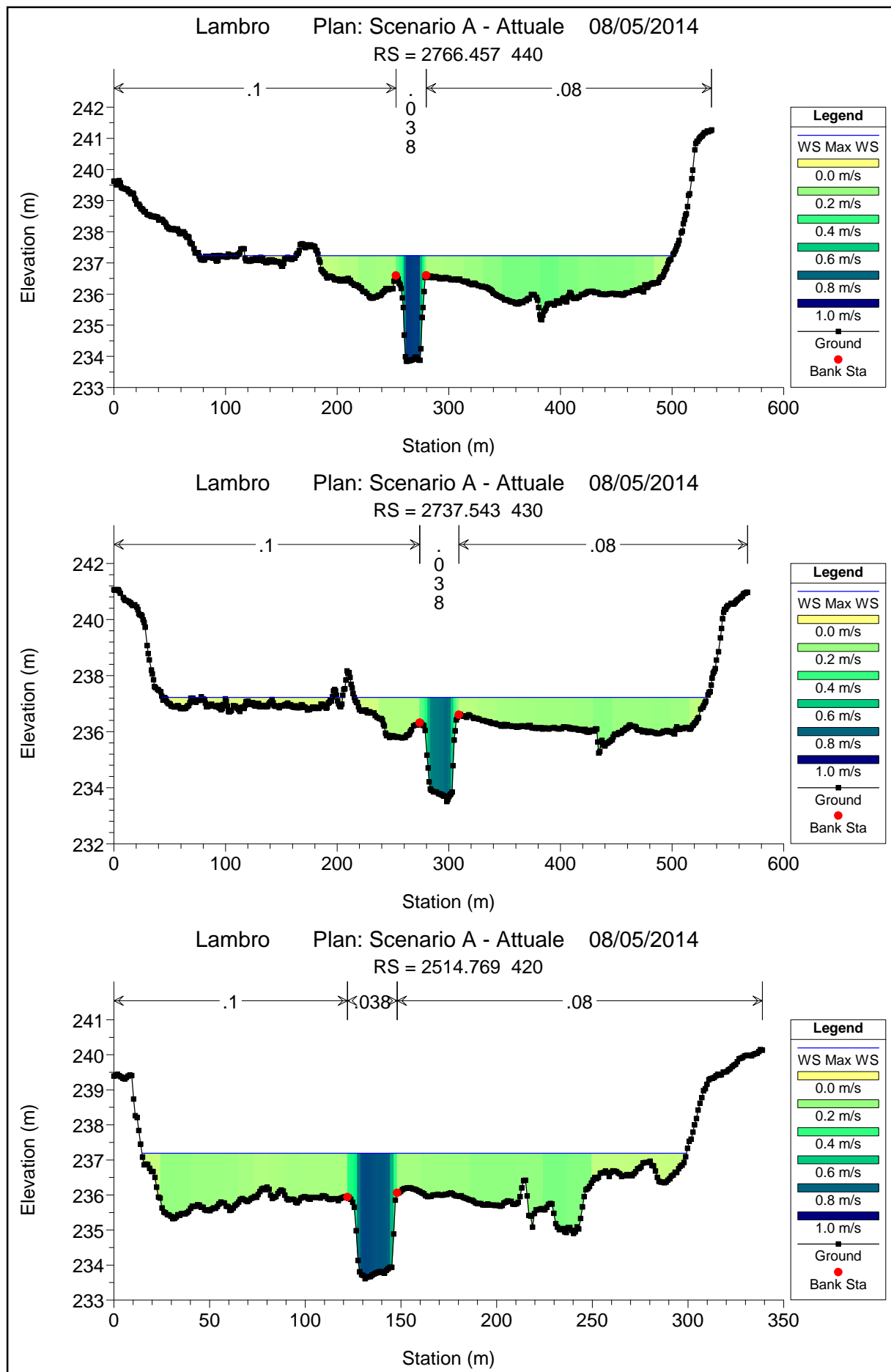


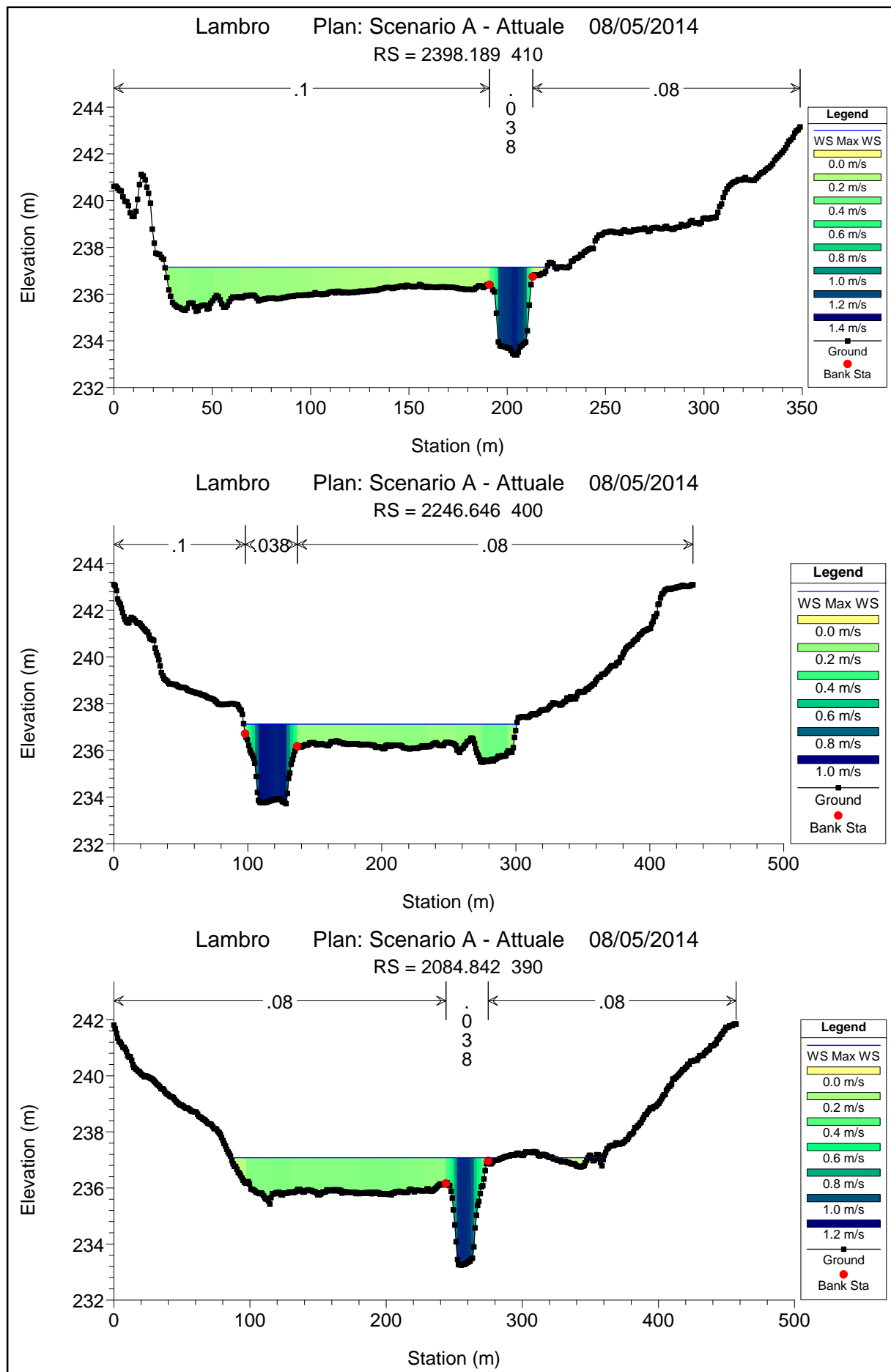


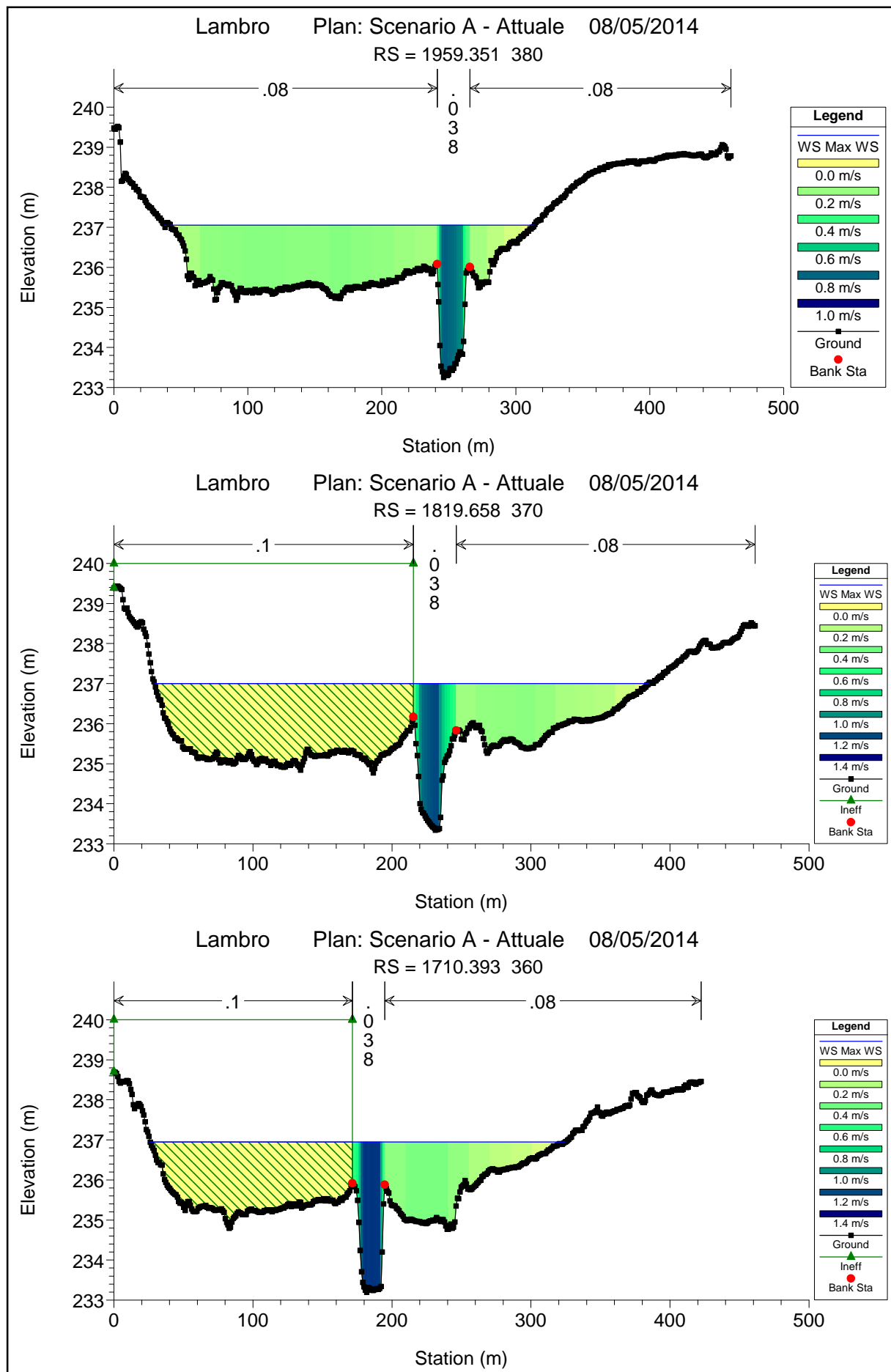


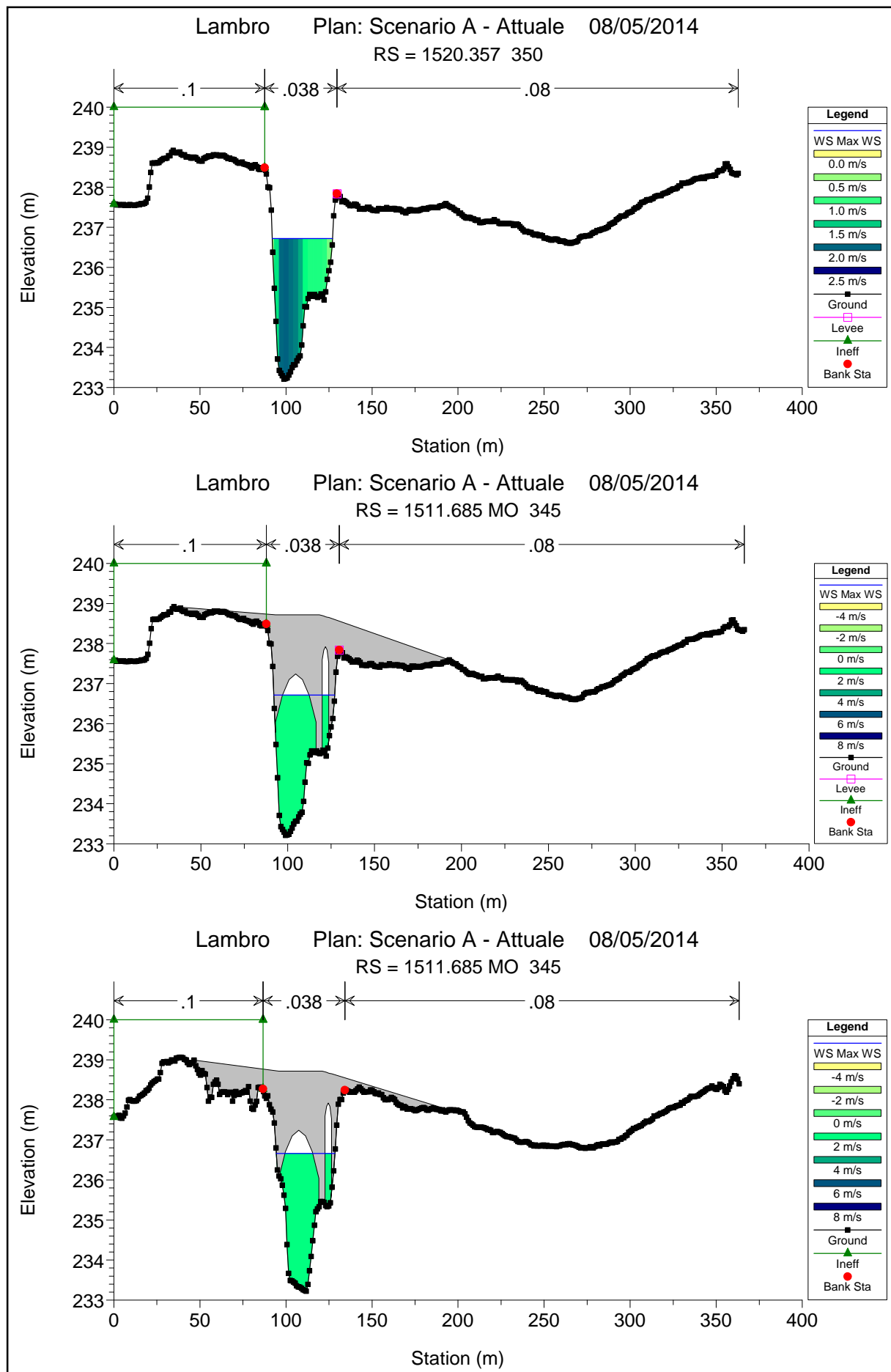


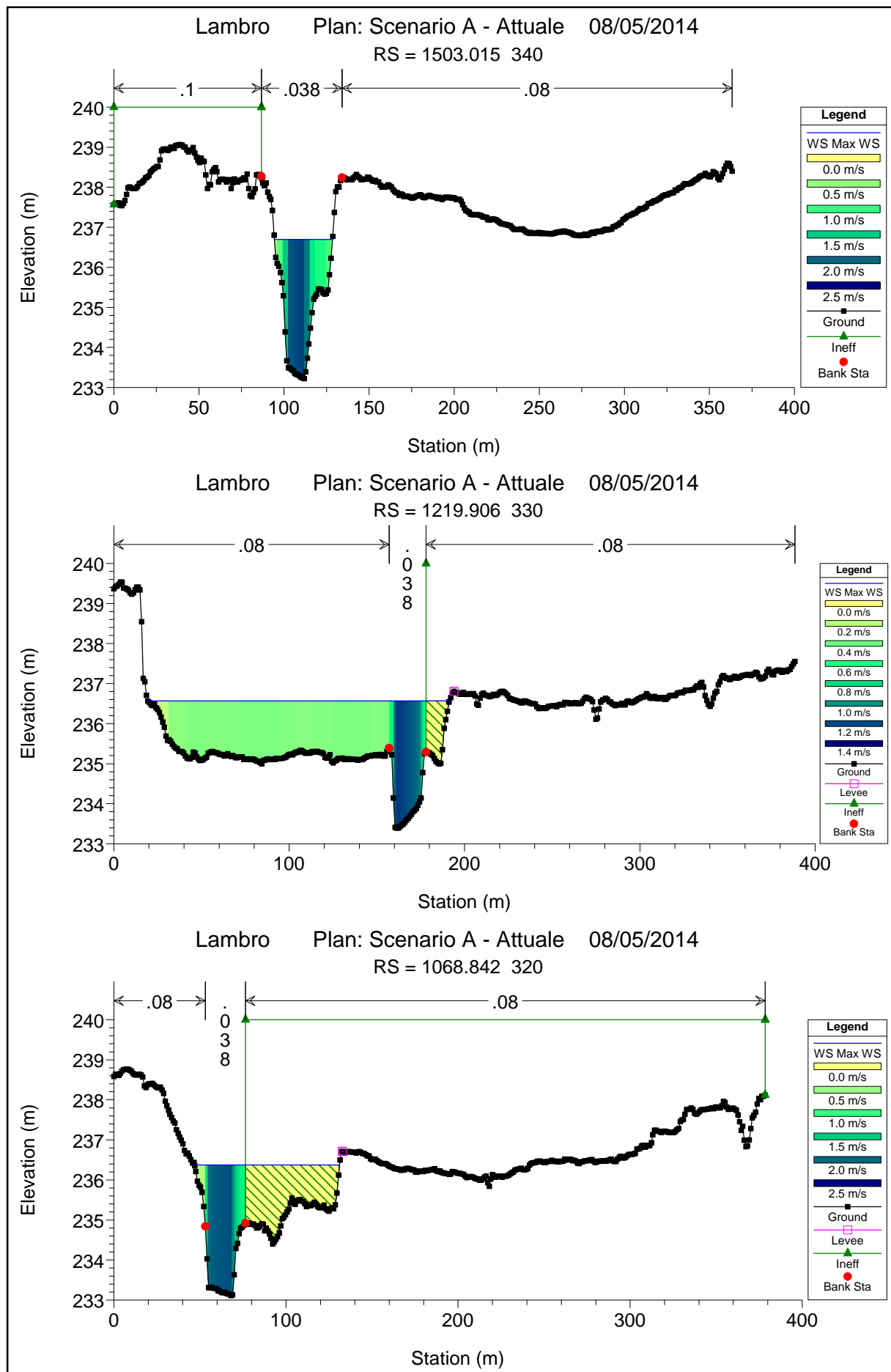


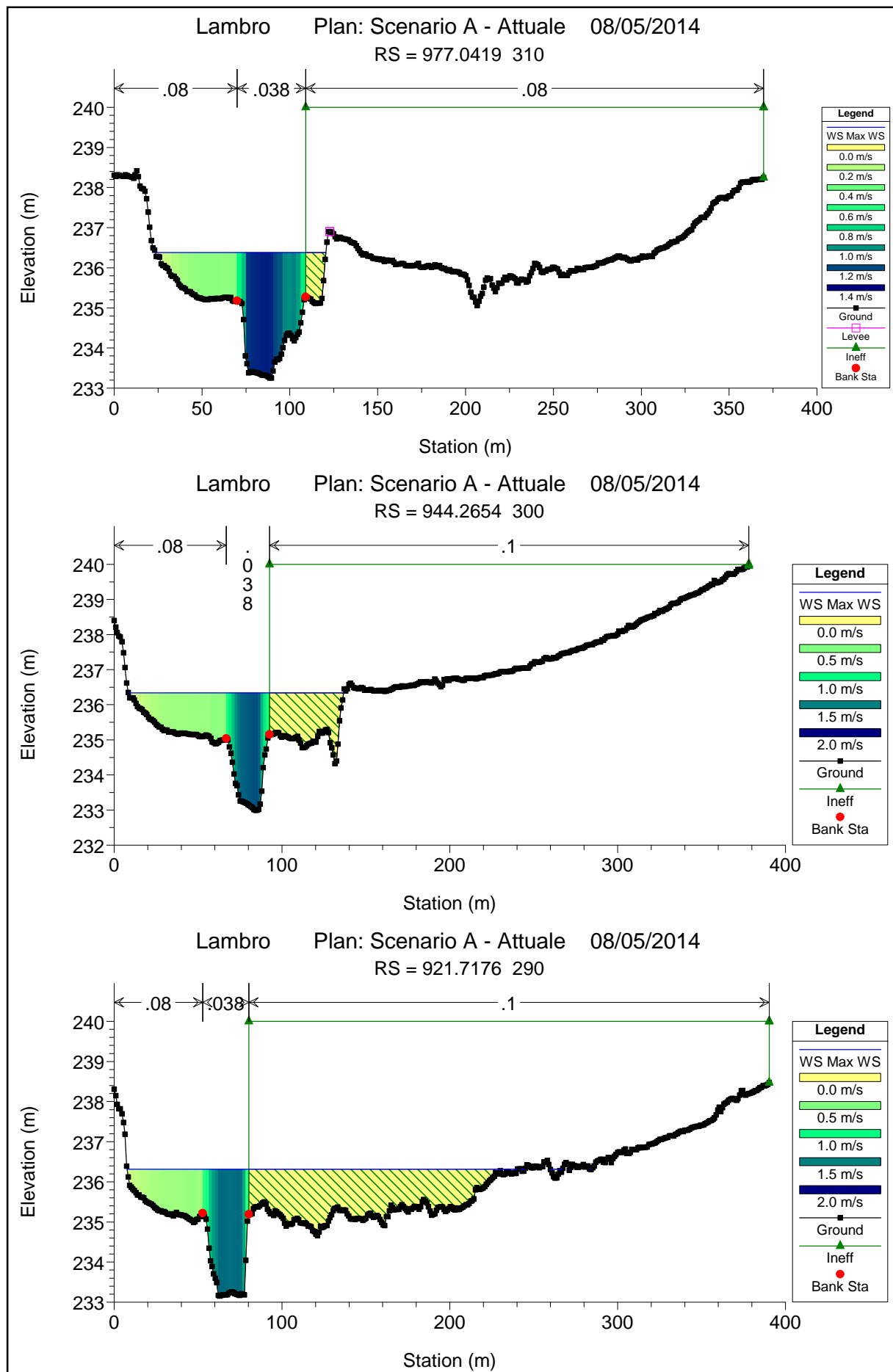


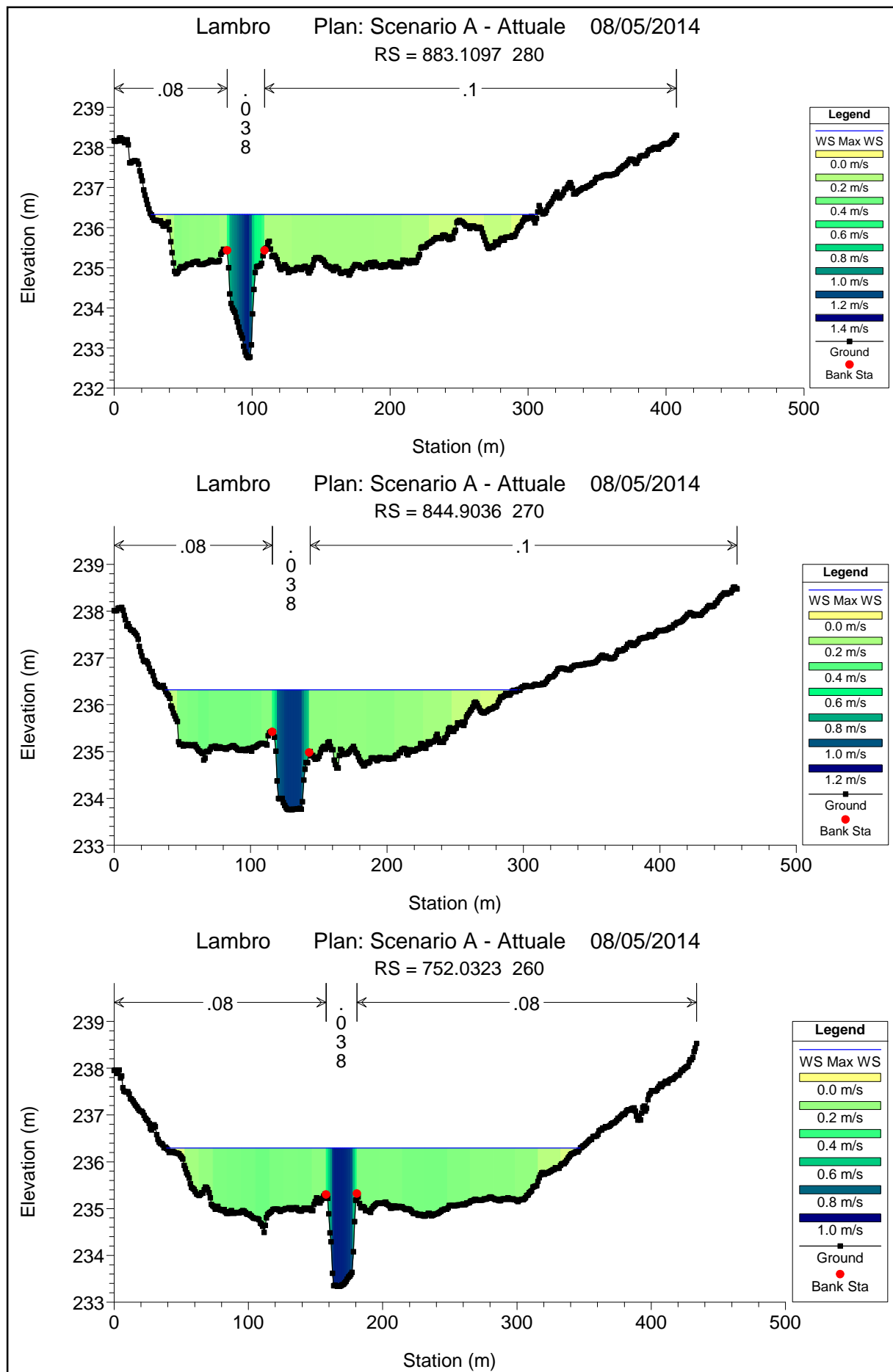


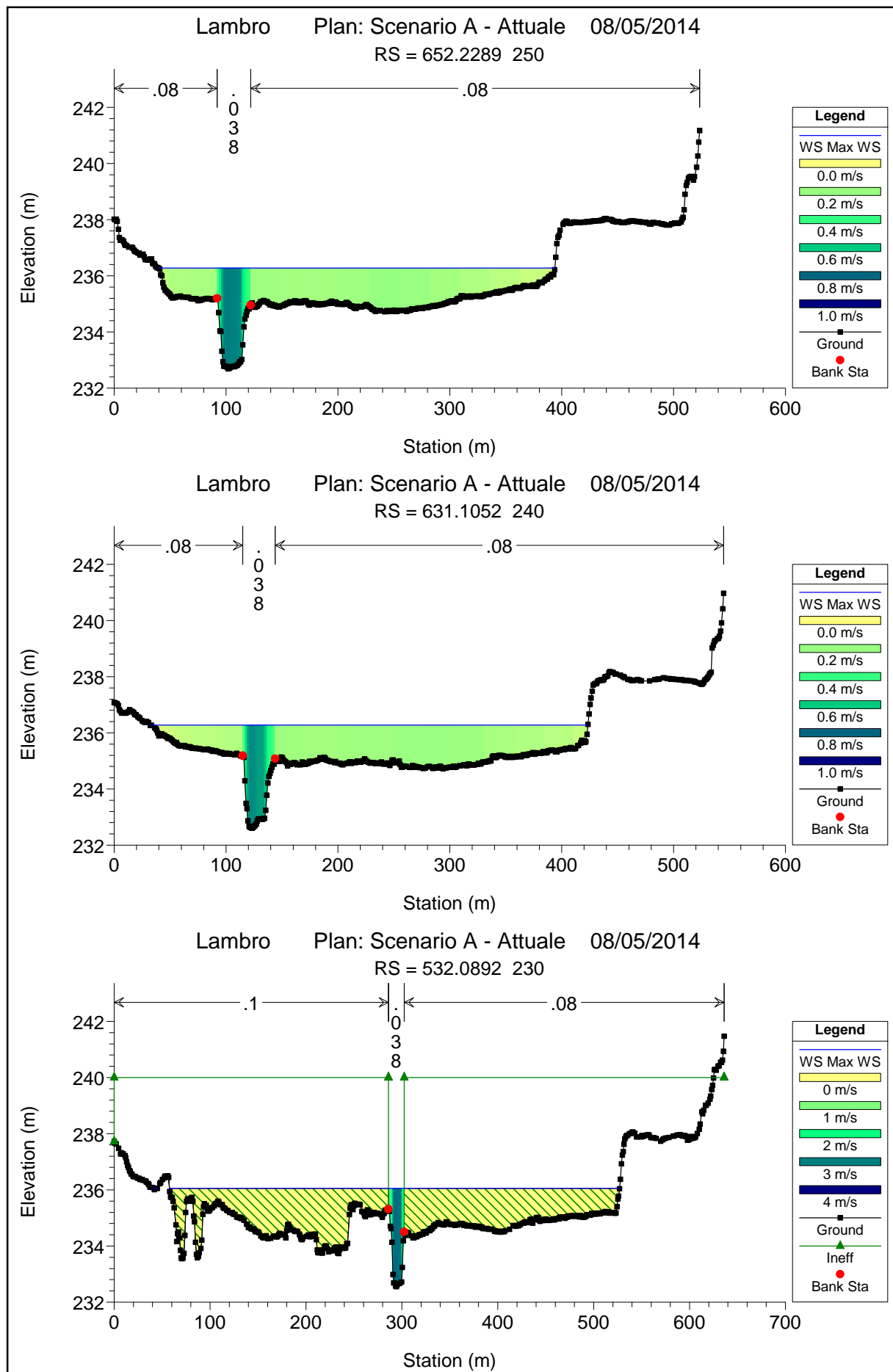


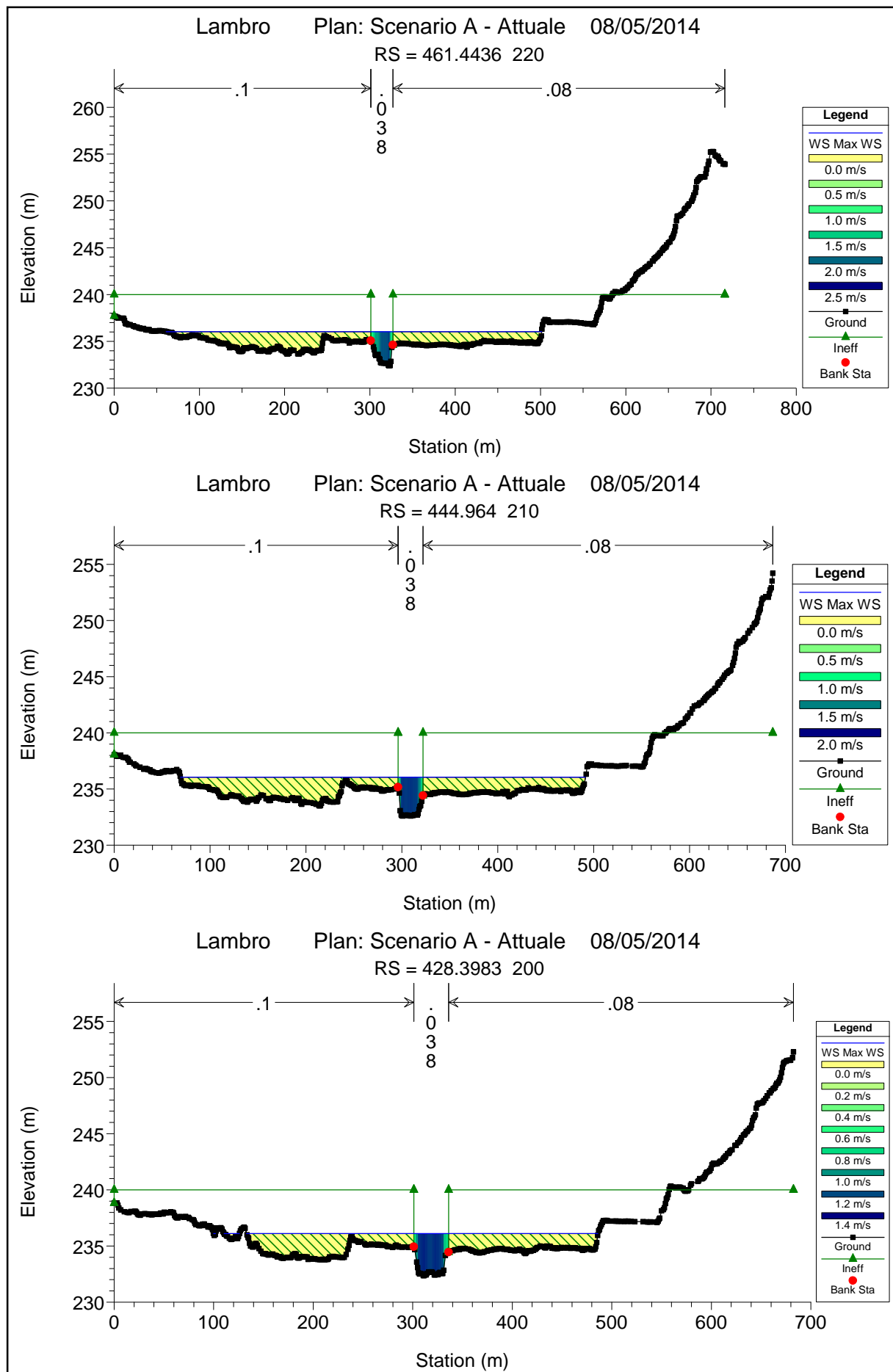


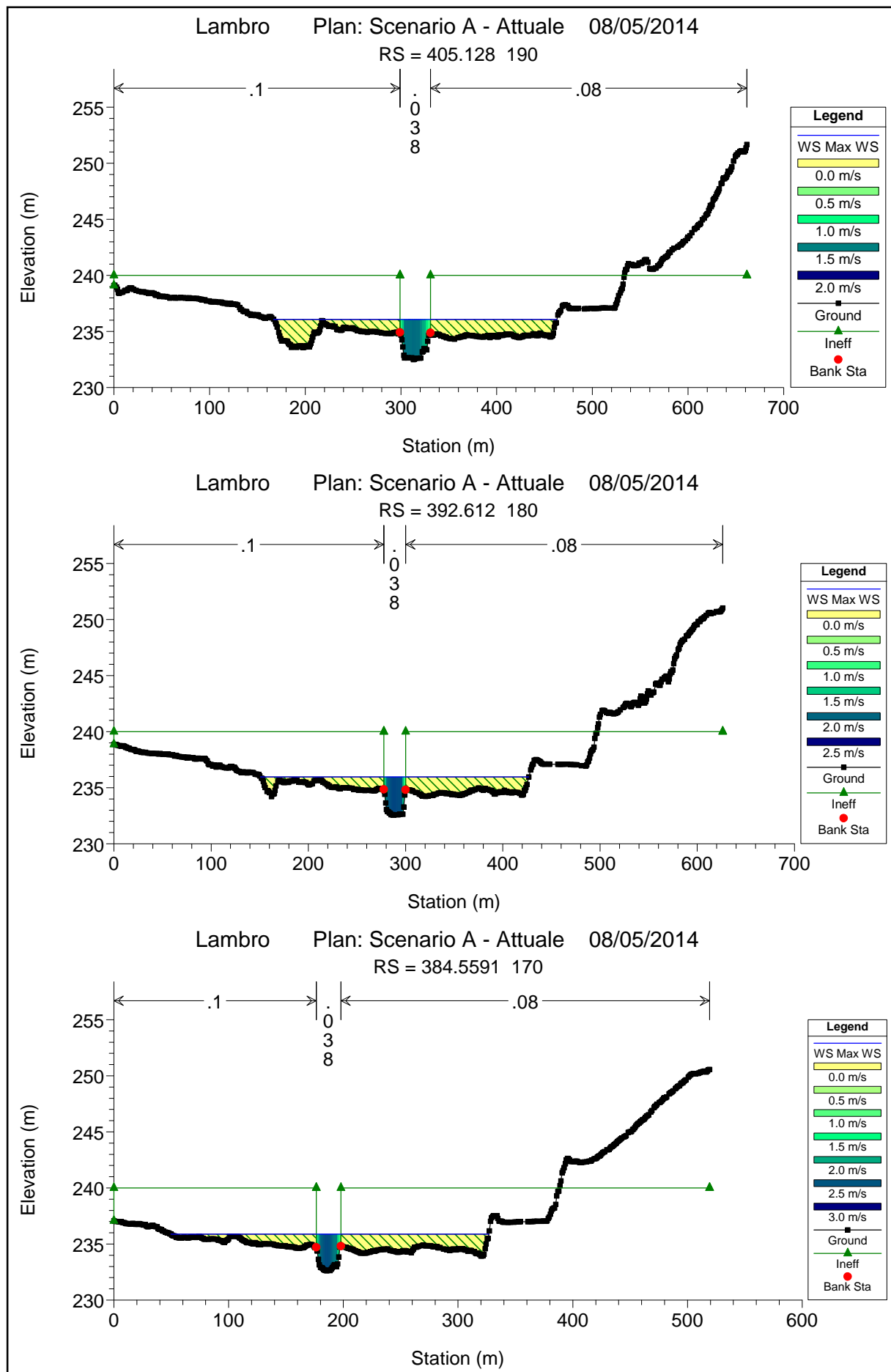


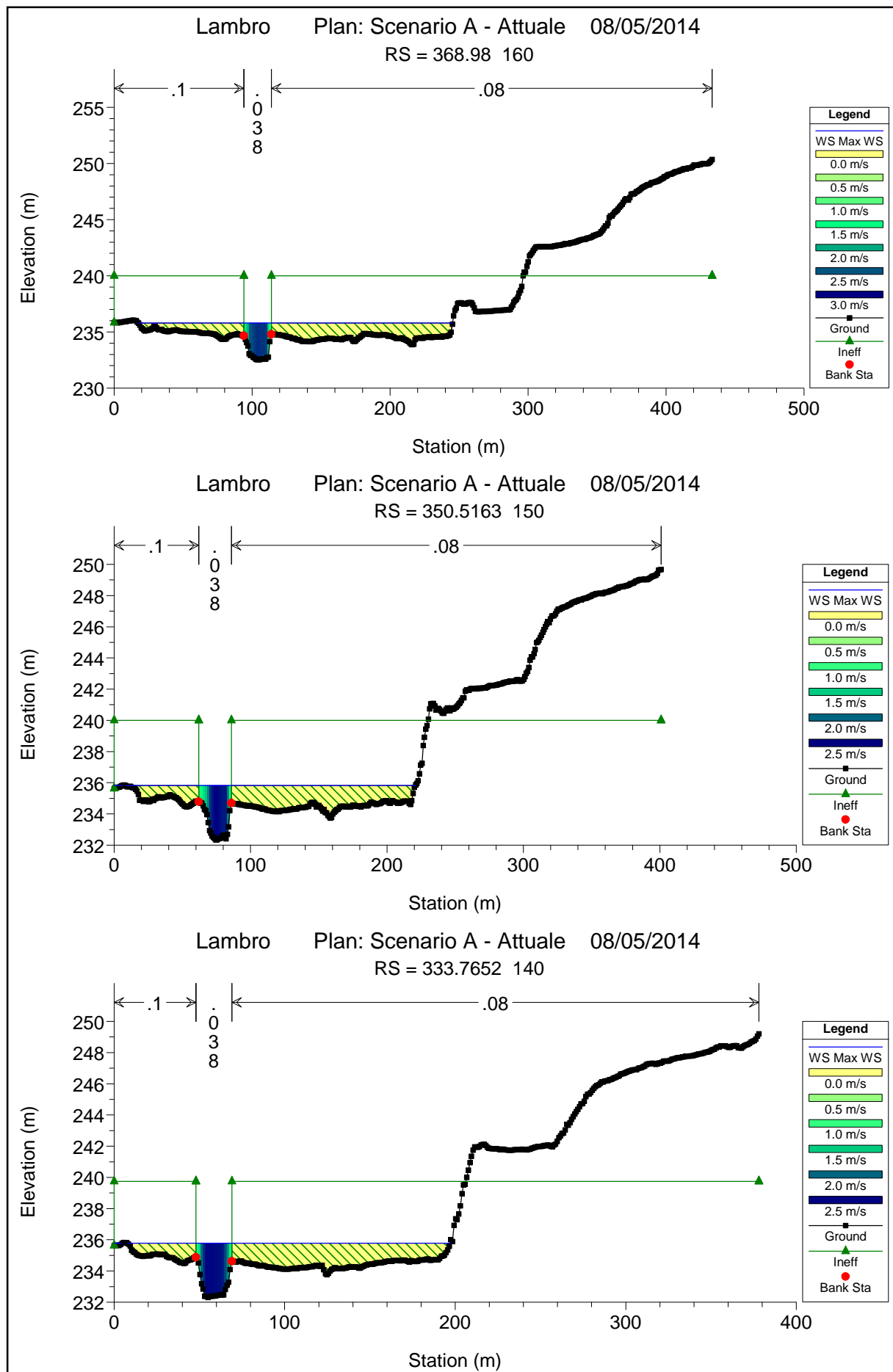


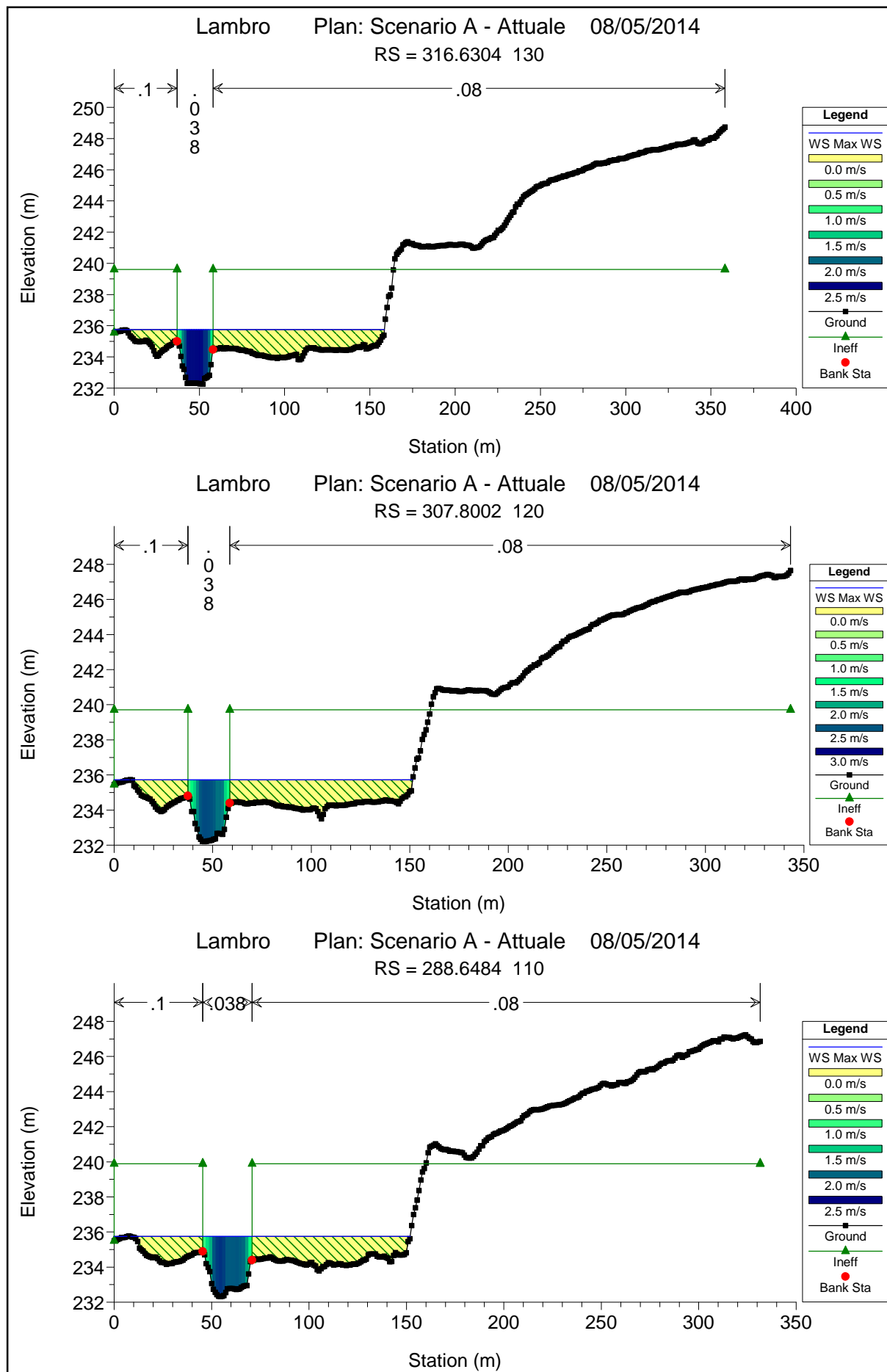


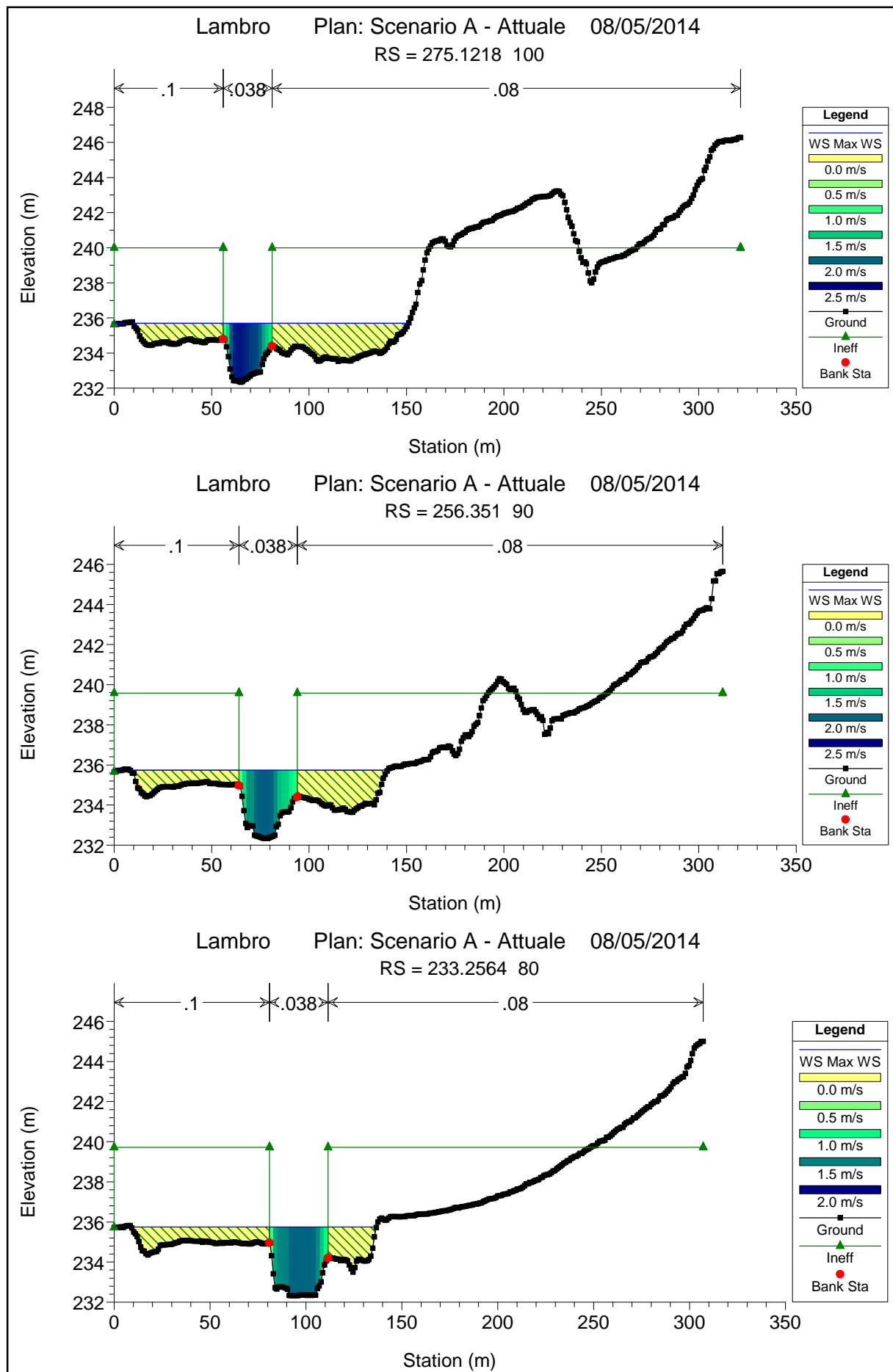


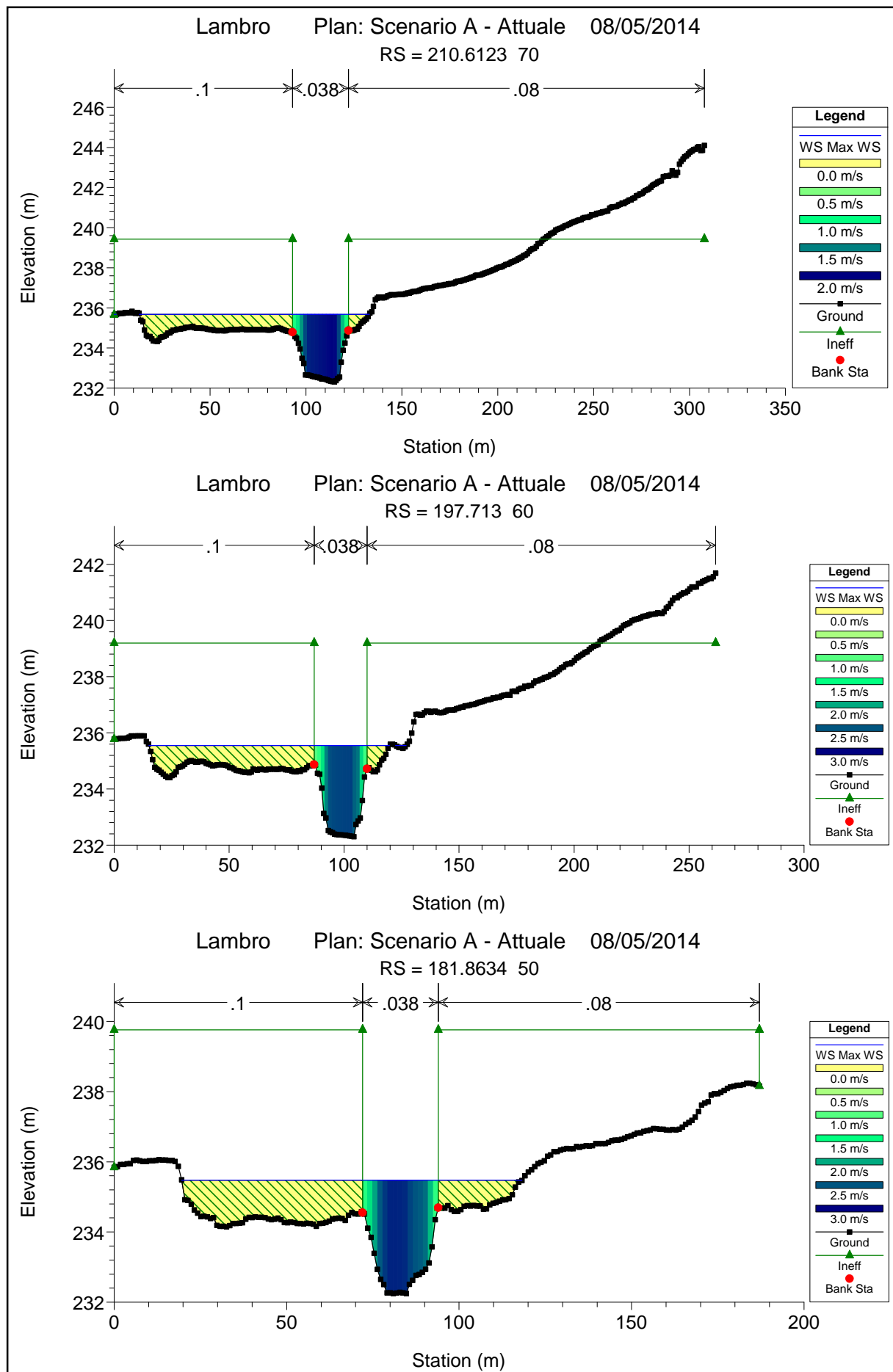


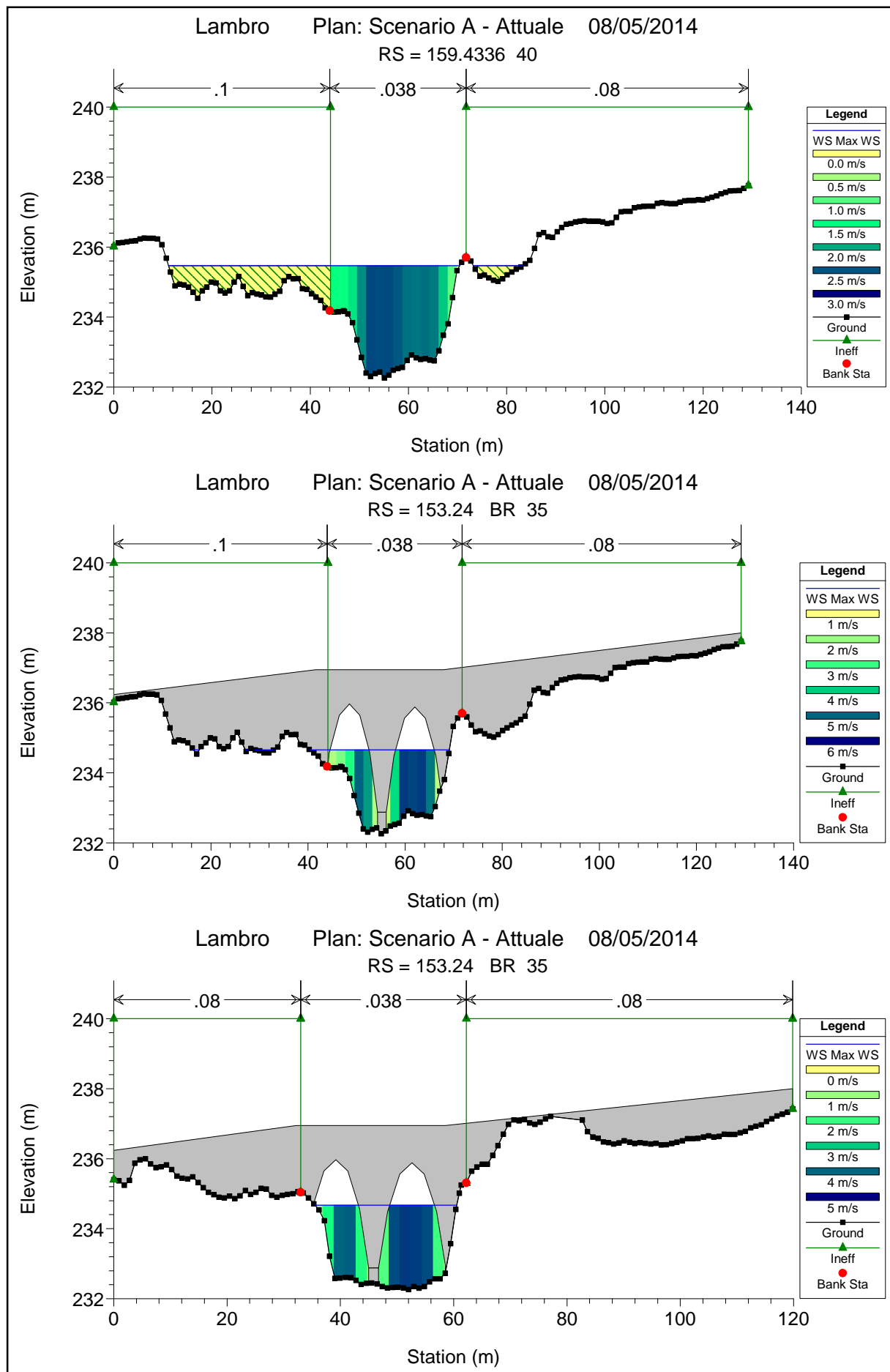


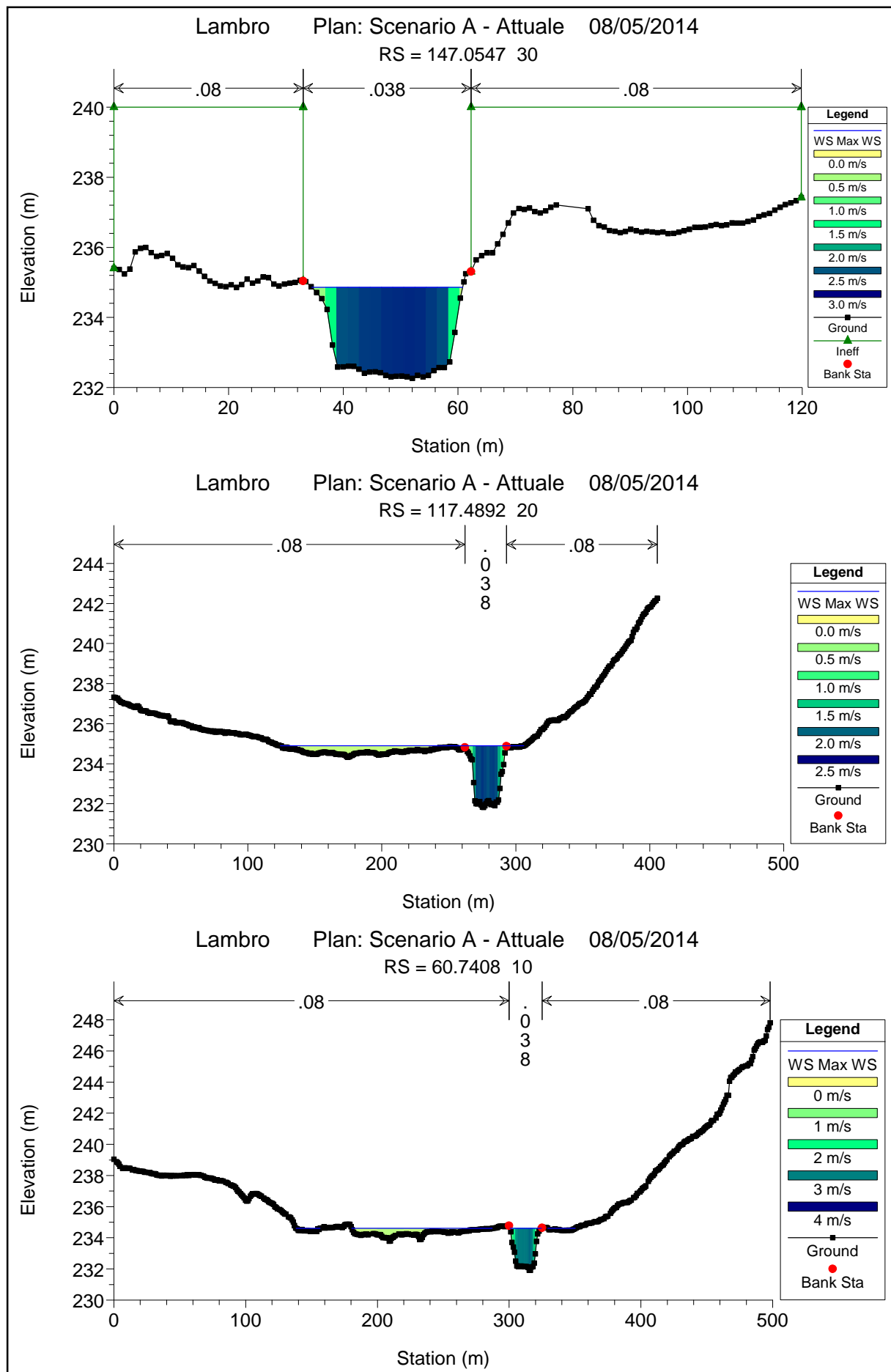


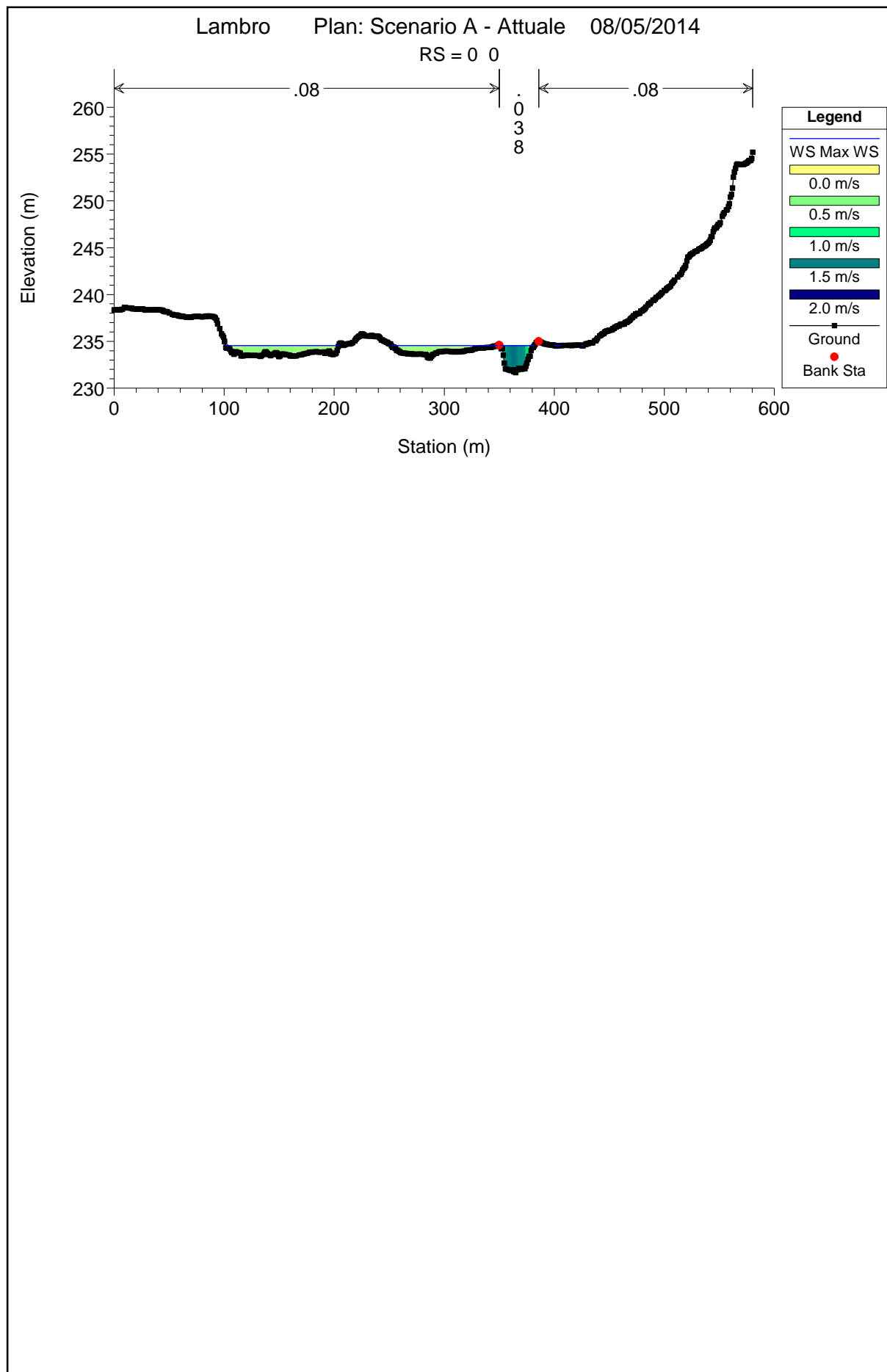














PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo



ALLEGATO 2

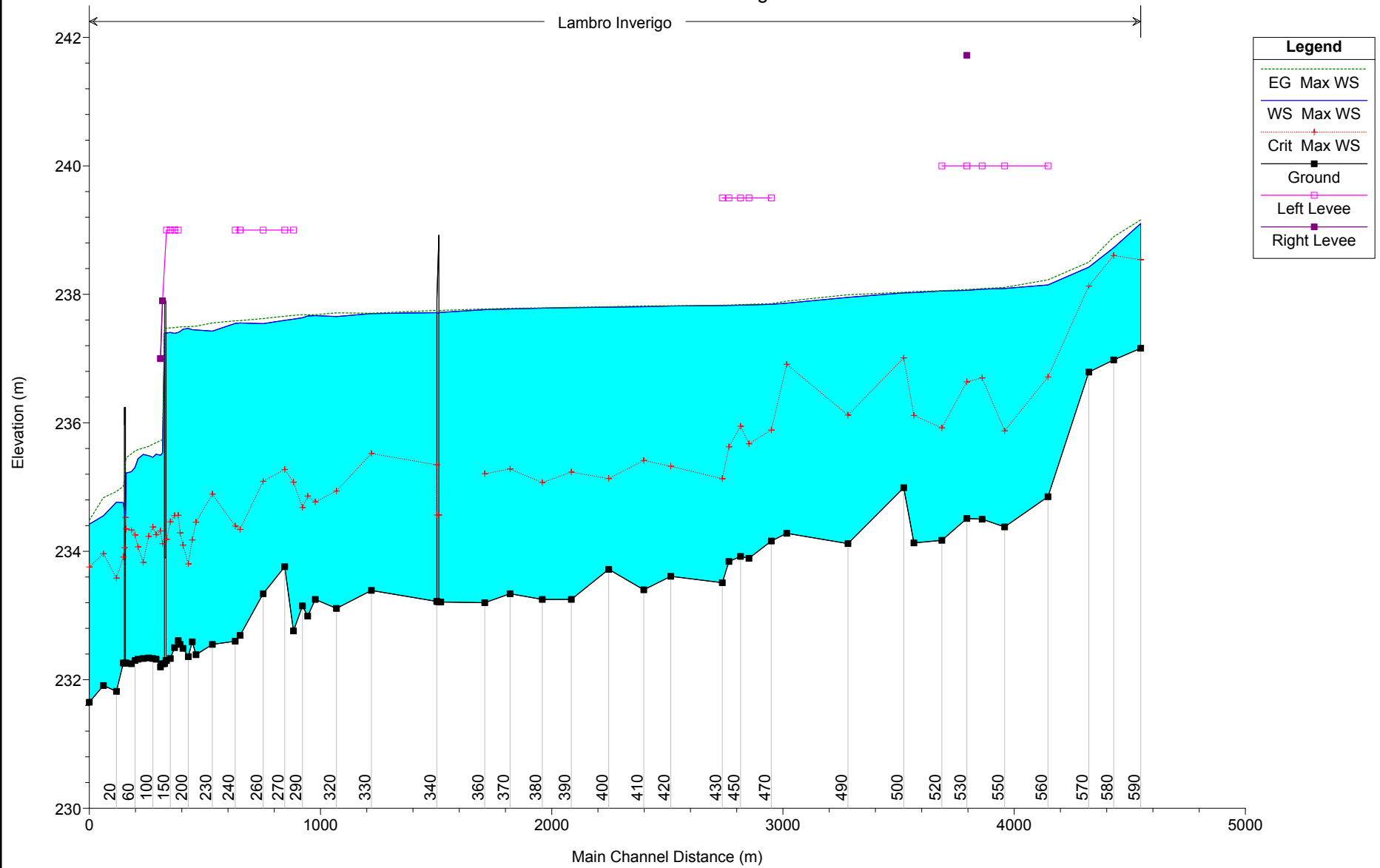
– Risultati simulazione idraulica: scenario B – Portate attuali con laminazione Inverigo

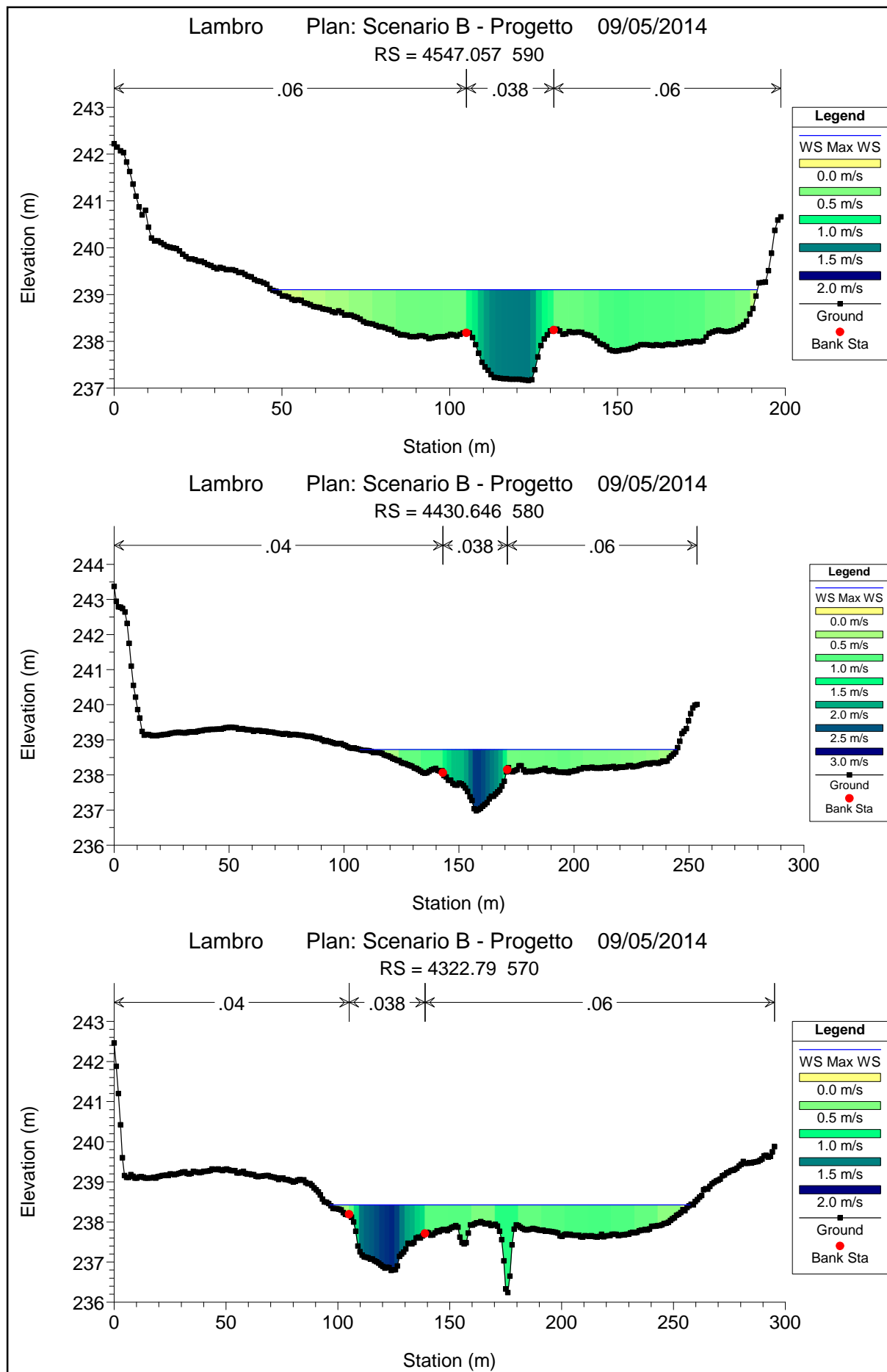
HEC-RAS Plan: B - Progetto River: Lambro Reach: Inverigo Profile: Max WS

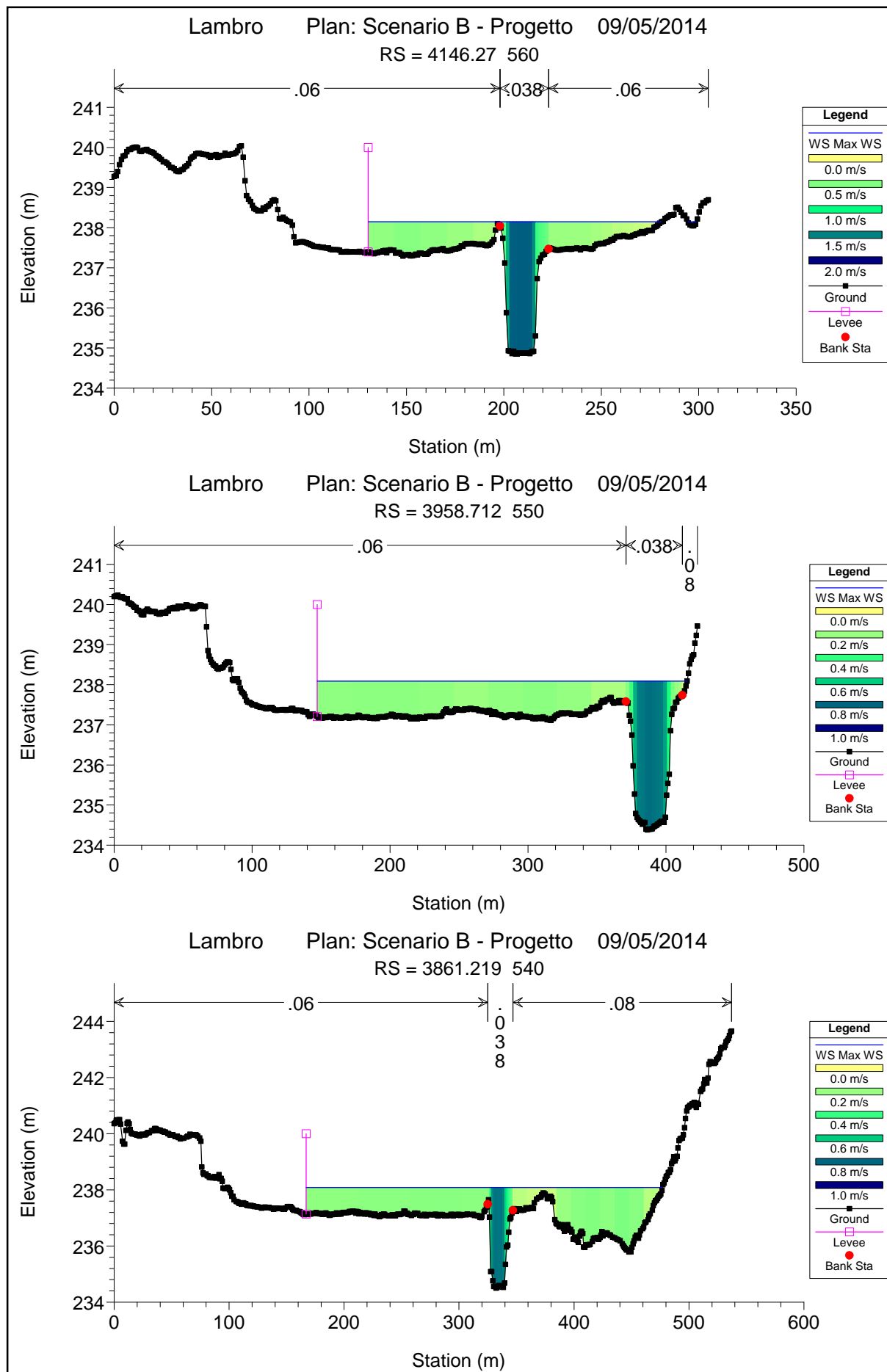
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Inverigo	4547.057 590	Max WS	115.10	237.16	239.10	238.54	239.16	0.001488	1.37	141.12	144.63	0.35
Inverigo	4430.646 580	Max WS	115.02	236.98	238.73	238.60	238.90	0.005485	2.20	83.77	137.84	0.64
Inverigo	4322.79 570	Max WS	114.56	236.79	238.42	238.13	238.50	0.002915	1.56	118.38	161.03	0.46
Inverigo	4146.27 560	Max WS	110.80	234.85	238.15	236.71	238.23	0.001098	1.43	130.94	154.66	0.30
Inverigo	3958.712 550	Max WS	108.34	234.38	238.09	235.88	238.11	0.000215	0.69	284.82	268.19	0.14
Inverigo	3861.219 540	Max WS	107.61	234.50	238.08	236.70	238.09	0.000202	0.67	375.37	310.00	0.13
Inverigo	3795.401 530	Max WS	106.90	234.51	238.06	236.64	238.07	0.000227	0.71	279.29	213.90	0.14
Inverigo	3687.068 520	Max WS	106.71	234.17	238.05	235.92	238.06	0.000049	0.35	376.40	308.25	0.07
Inverigo	3566.631 510	Max WS	106.10	234.13	238.03	236.11	238.04	0.000258	0.66	211.84	244.67	0.15
Inverigo	3522.358 500	Max WS	106.21	234.99	238.02	237.01	238.03	0.000241	0.59	281.78	282.92	0.14
Inverigo	3281.337 490	Max WS	104.32	234.12	237.95	236.12	237.99	0.000580	1.04	184.64	295.05	0.22
Inverigo	3016.292 480	Max WS	102.41	234.28	237.86	236.91	237.89	0.000547	1.06	241.65	280.98	0.22
Inverigo	2949.954 470	Max WS	102.31	234.16	237.84	235.89	237.86	0.000148	0.65	397.04	295.53	0.12
Inverigo	2852.912 460	Max WS	102.47	233.89	237.84	235.67	237.84	0.000126	0.58	427.92	282.64	0.11
Inverigo	2816.748 450	Max WS	102.54	233.92	237.83	235.95	237.84	0.000140	0.60	425.14	274.96	0.11
Inverigo	2766.457 440	Max WS	102.65	233.84	237.83	235.63	237.83	0.000073	0.45	536.88	298.57	0.08
Inverigo	2737.543 430	Max WS	102.72	233.51	237.83	235.13	237.83	0.000054	0.41	567.57	309.67	0.07
Inverigo	2514.769 420	Max WS	102.75	233.61	237.82	235.32	237.82	0.000059	0.45	568.61	289.56	0.08
Inverigo	2398.189 410	Max WS	102.88	233.40	237.81	235.41	237.82	0.000140	0.66	389.19	218.26	0.11
Inverigo	2246.646 400	Max WS	103.02	233.72	237.80	235.13	237.81	0.000082	0.51	401.91	230.59	0.09
Inverigo	2084.842 390	Max WS	103.22	233.25	237.79	235.23	237.80	0.000084	0.49	460.56	298.70	0.09
Inverigo	1959.351 380	Max WS	103.26	233.25	237.79	235.07	237.79	0.000047	0.41	606.34	317.02	0.07
Inverigo	1819.658 370	Max WS	103.57	233.34	237.77	235.28	237.78	0.000098	0.57	368.36	387.72	0.10
Inverigo	1710.393 360	Max WS	103.82	233.20	237.76	235.21	237.77	0.000109	0.63	349.20	342.48	0.10
Inverigo	1520.357 350	Max WS	104.11	233.21	237.72		237.75	0.000260	0.83	203.48	238.79	0.16
Inverigo	1511.685 345		Mult Open									
Inverigo	1503.015 340	Max WS	104.02	233.22	237.71	235.34	237.75	0.000301	0.87	179.39	165.90	0.17
Inverigo	1219.906 330	Max WS	104.42	233.39	237.70	235.52	237.71	0.000073	0.52	413.14	372.14	0.09
Inverigo	1068.842 320	Max WS	104.42	233.11	237.65	234.94	237.71	0.000280	1.08	114.46	310.36	0.17
Inverigo	977.0419 310	Max WS	104.59	233.25	237.67	234.77	237.68	0.000089	0.59	249.83	324.33	0.10
Inverigo	944.2654 300	Max WS	104.66	232.99	237.66	234.86	237.68	0.000123	0.71	238.63	275.66	0.12
Inverigo	921.7176 290	Max WS	104.70	233.15	237.64	234.68	237.68	0.000224	0.96	108.86	353.38	0.15
Inverigo	883.1097 280	Max WS	104.67	232.76	237.61	235.07	237.67	0.000315	1.07	97.60	334.95	0.18
Inverigo	844.9036 270	Max WS	104.73	233.76	237.59	235.27	237.66	0.000362	1.13	92.94	345.28	0.19
Inverigo	752.0323 260	Max WS	104.90	233.34	237.54	235.09	237.62	0.000414	1.25	84.25	352.27	0.21
Inverigo	652.2289 250	Max WS	105.07	232.69	237.55	234.34	237.59	0.000170	0.86	122.55	330.50	0.14
Inverigo	631.1052 240	Max WS	105.15	232.60	237.55	234.39	237.59	0.000190	0.90	117.26	352.67	0.14
Inverigo	532.0892 230	Max WS	105.15	232.55	237.43	234.89	237.55	0.000627	1.58	66.40	525.84	0.25
Inverigo	461.4436 220	Max WS	115.22	232.39	237.45	234.45	237.50	0.000267	1.07	107.57	554.90	0.17
Inverigo	444.964 210	Max WS	115.32	232.59	237.45	234.18	237.50	0.000212	1.00	115.45	538.19	0.15
Inverigo	428.3983 200	Max WS	115.42	232.36	237.47	233.80	237.50	0.000106	0.73	158.62	472.81	0.11
Inverigo	405.128 190	Max WS	115.53	232.49	237.46	234.09	237.49	0.000153	0.84	136.94	404.84	0.13
Inverigo	392.612 180	Max WS	115.59	232.55	237.42	234.29	237.49	0.000288	1.16	99.55	388.91	0.18
Inverigo	384.5591 170	Max WS	115.65	232.61	237.41	234.56	237.49	0.000365	1.27	90.79	353.85	0.20
Inverigo	368.98 160	Max WS	115.75	232.50	237.39	234.56	237.48	0.000405	1.34	86.22	246.91	0.21
Inverigo	350.5163 150	Max WS	115.89	232.33	237.41	234.46	237.48	0.000309	1.16	99.92	201.04	0.18
Inverigo	333.7652 140	Max WS	116.03	232.30	237.40	234.19	237.47	0.000087	1.21	95.64	169.22	0.18
Inverigo	325		Inl Struct									
Inverigo	316.6304 130	Max WS	116.02	232.25	235.53	234.12	235.74	0.000467	2.01	57.76	65.12	0.39
Inverigo	307.8002 120	Max WS	116.09	232.20	235.49	234.32	235.72	0.001987	2.13	54.62	75.50	0.42
Inverigo	288.6484 110	Max WS	116.17	232.32	235.51	234.26	235.69	0.001604	1.87	62.21	139.80	0.38
Inverigo	275.1218 100	Max WS	116.25	232.33	235.46	234.38	235.67	0.001947	2.00	58.25	139.19	0.42
Inverigo	256.351 90	Max WS	116.31	232.34	235.49	234.23	235.63	0.001398	1.68	69.21	128.50	0.35
Inverigo	233.2564 80	Max WS	116.37	232.33	235.51	233.83	235.61	0.000783	1.40	83.08	126.07	0.27
Inverigo	210.6123 70	Max WS	116.46	232.32	235.44	234.07	235.58	0.001362	1.69	69.07	117.51	0.35
Inverigo	197.713 60	Max WS	116.57	232.30	235.31	234.25	235.56	0.002587	2.23	52.29	102.55	0.47
Inverigo	181.8634 50	Max WS	116.68	232.25	235.24	234.33	235.52	0.002819	2.34	49.81	96.20	0.50
Inverigo	159.4336 40	Max WS	116.81	232.26	235.22	234.35	235.46	0.002647	2.16	54.08	63.92	0.47
Inverigo	153.24 35		Bridge									
Inverigo	147.0547 30	Max WS	113.35	232.26	234.76	233.91	235.01	0.003170	2.24	50.58	25.61	0.51
Inverigo	117.4892 20	Max WS	113.52	231.82	234.77	233.58	234.93	0.002071	1.83	81.78	146.47	0.41
Inverigo	60.7408 10	Max WS	112.42	231.91	234.55	233.96	234.83	0.004178	2.46	71.65	155.47	0.58
Inverigo	0 0	Max WS	117.67	231.65	234.42	233.76	234.49	0.001246	1.37	179.83	223.41	0.32

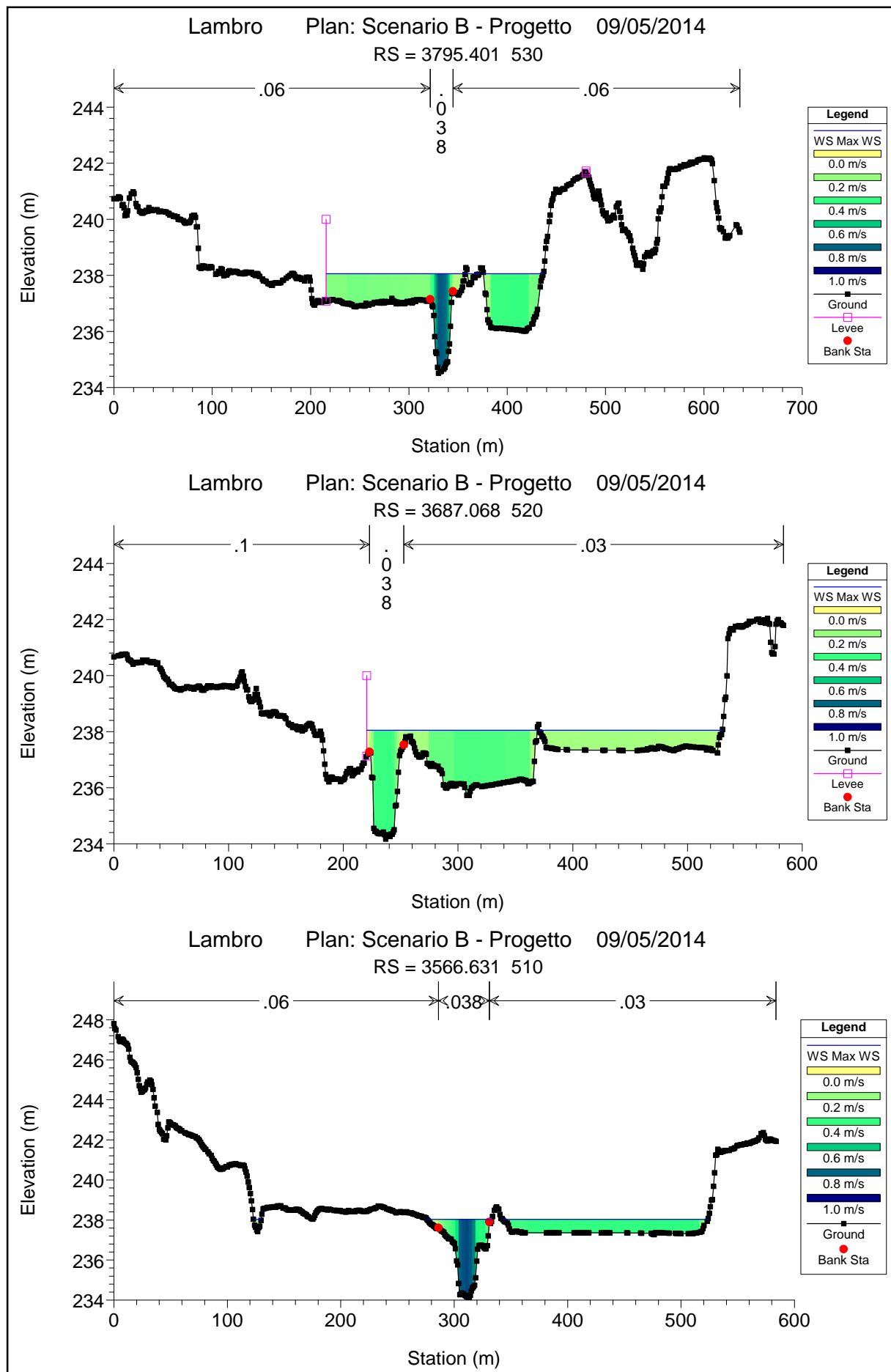
Lambro Plan: Scenario B - Progetto 09/05/2014

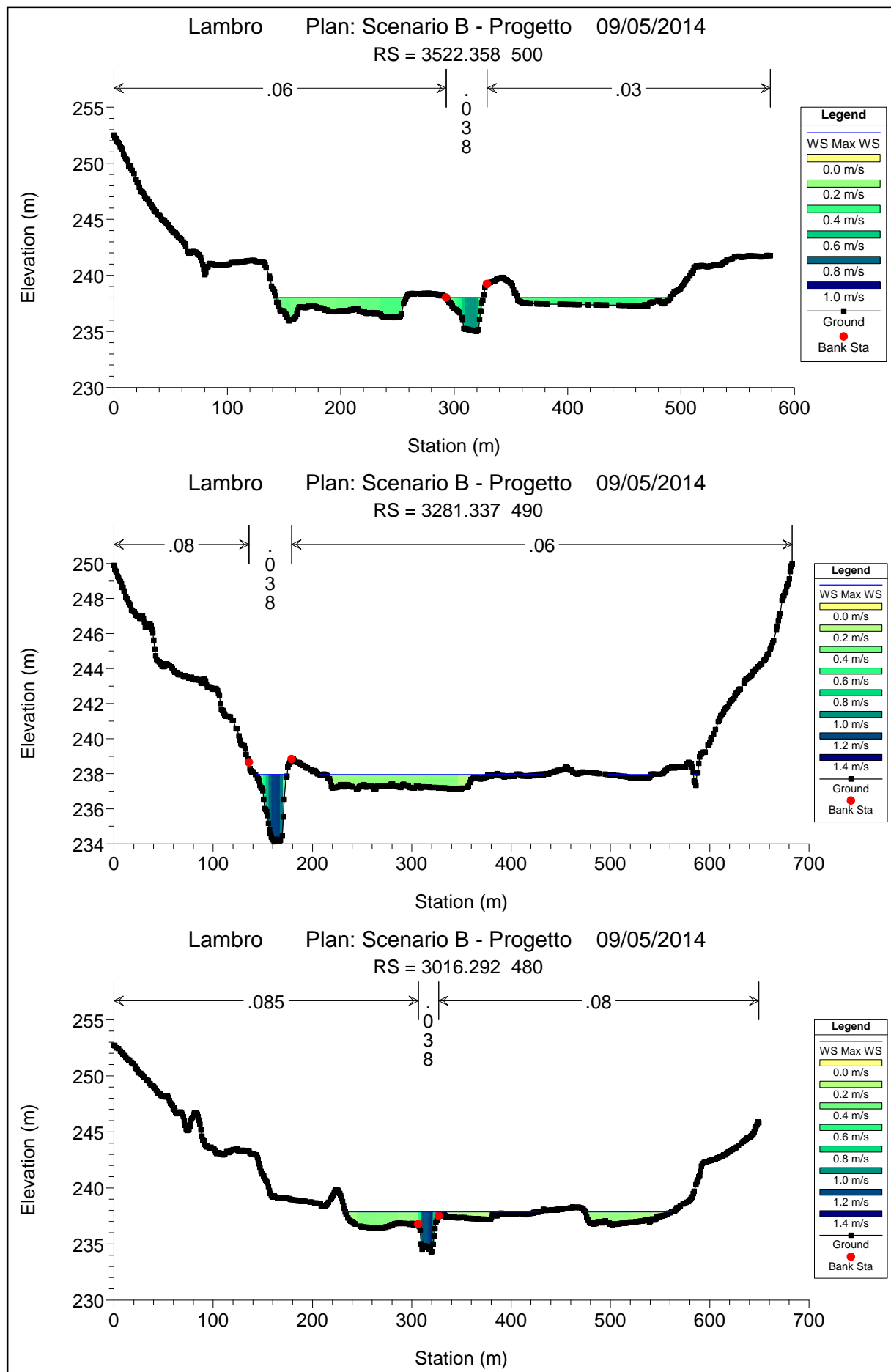
Lambro Inverigo

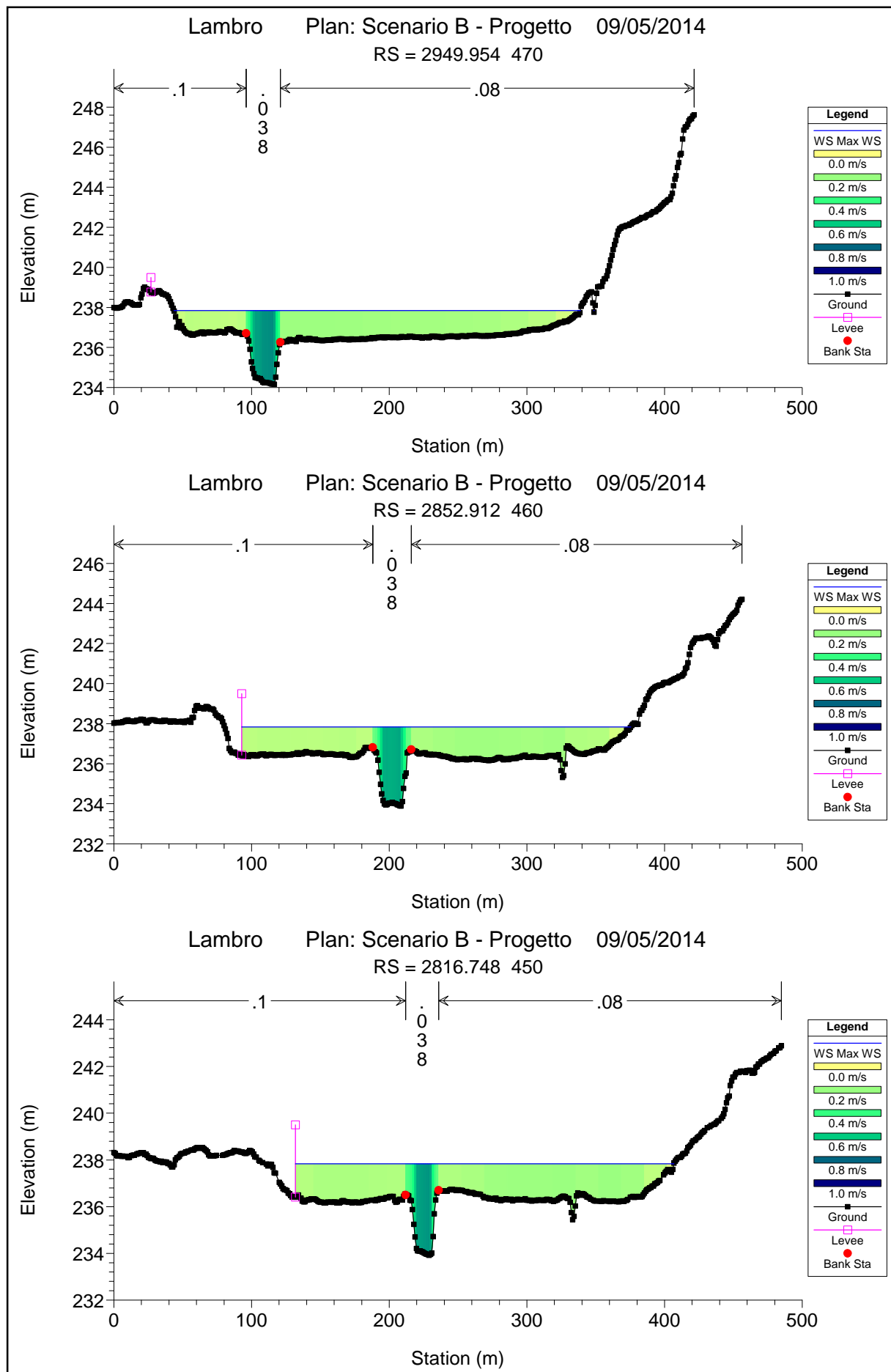


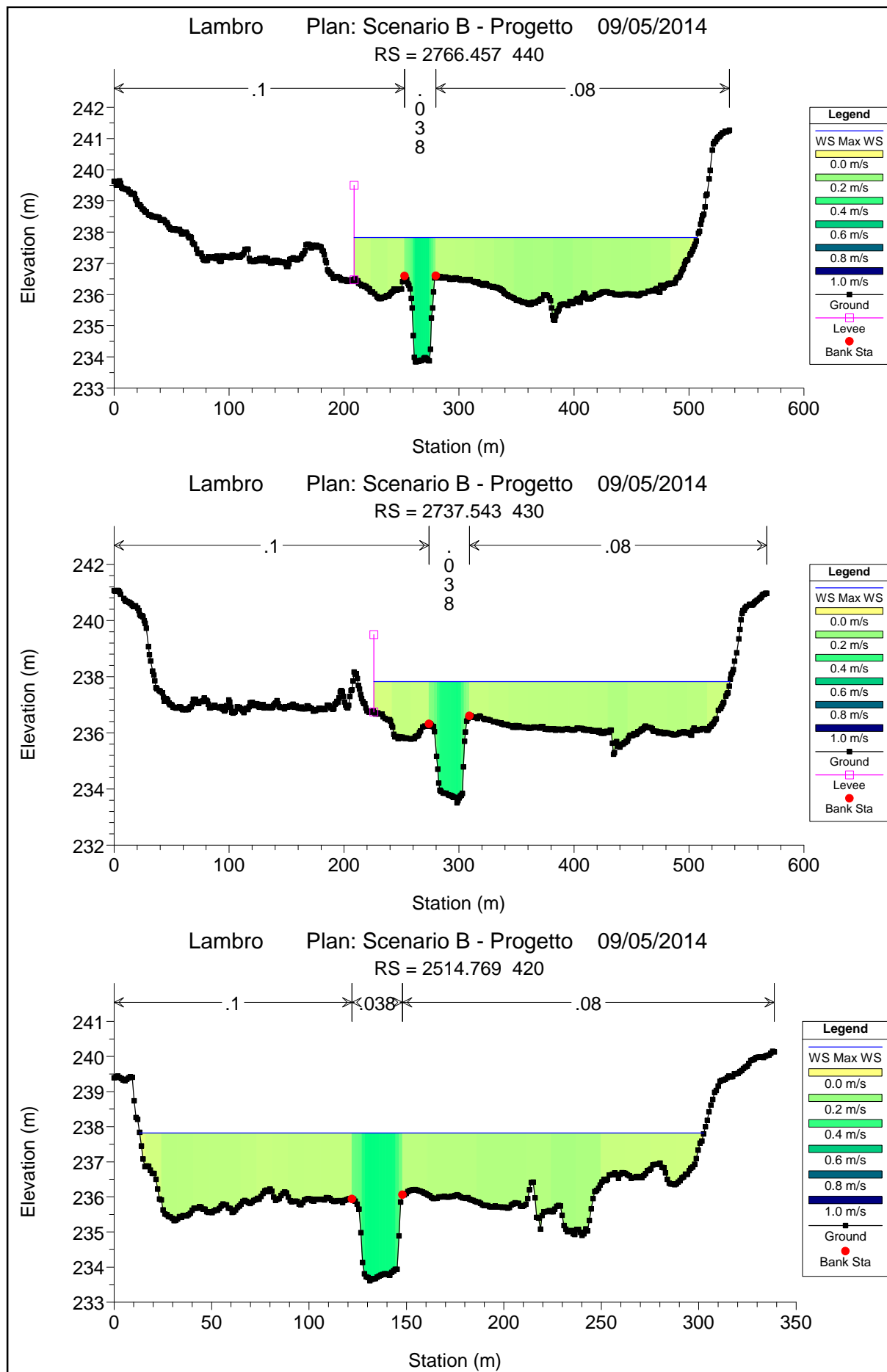


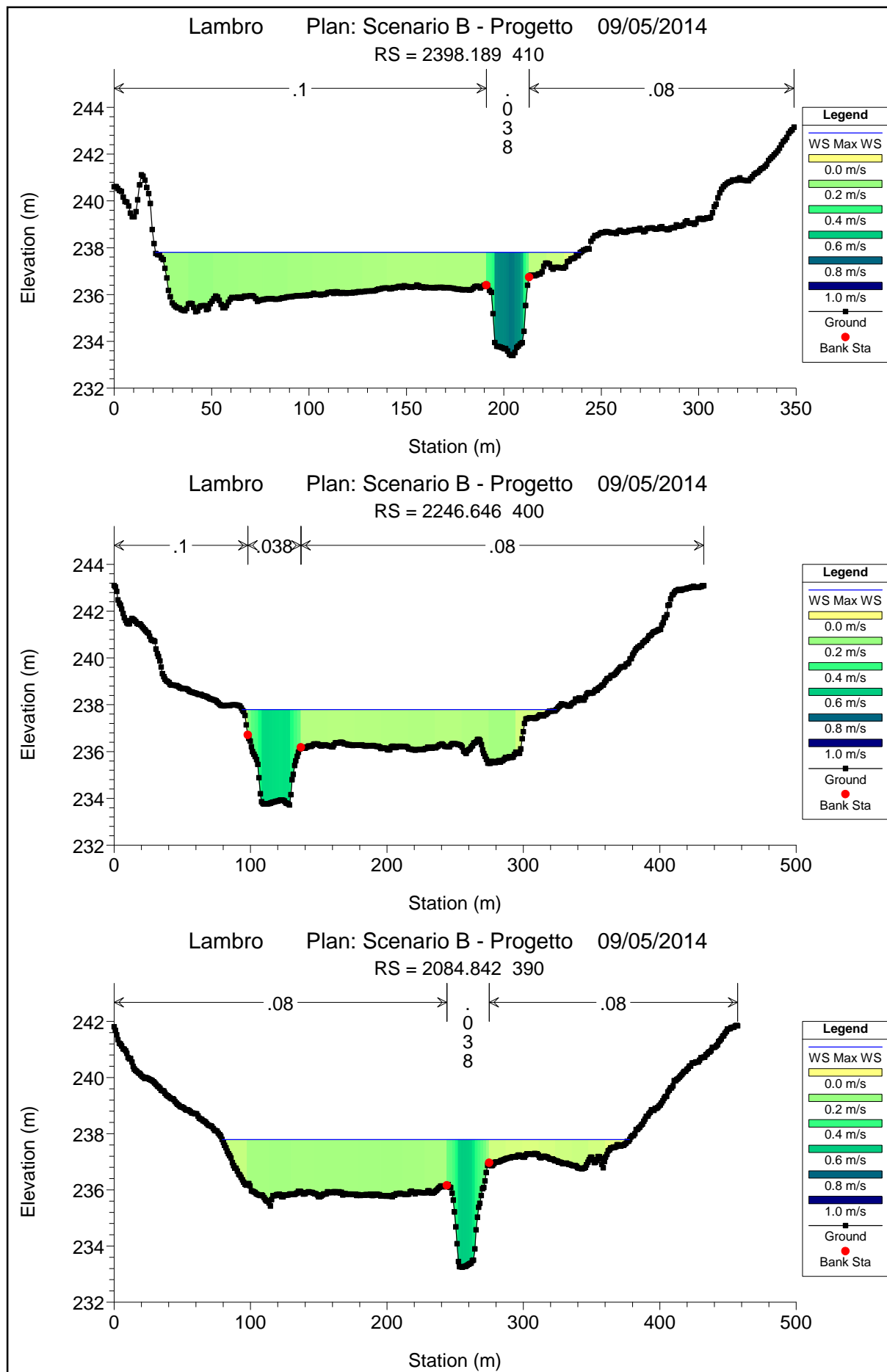


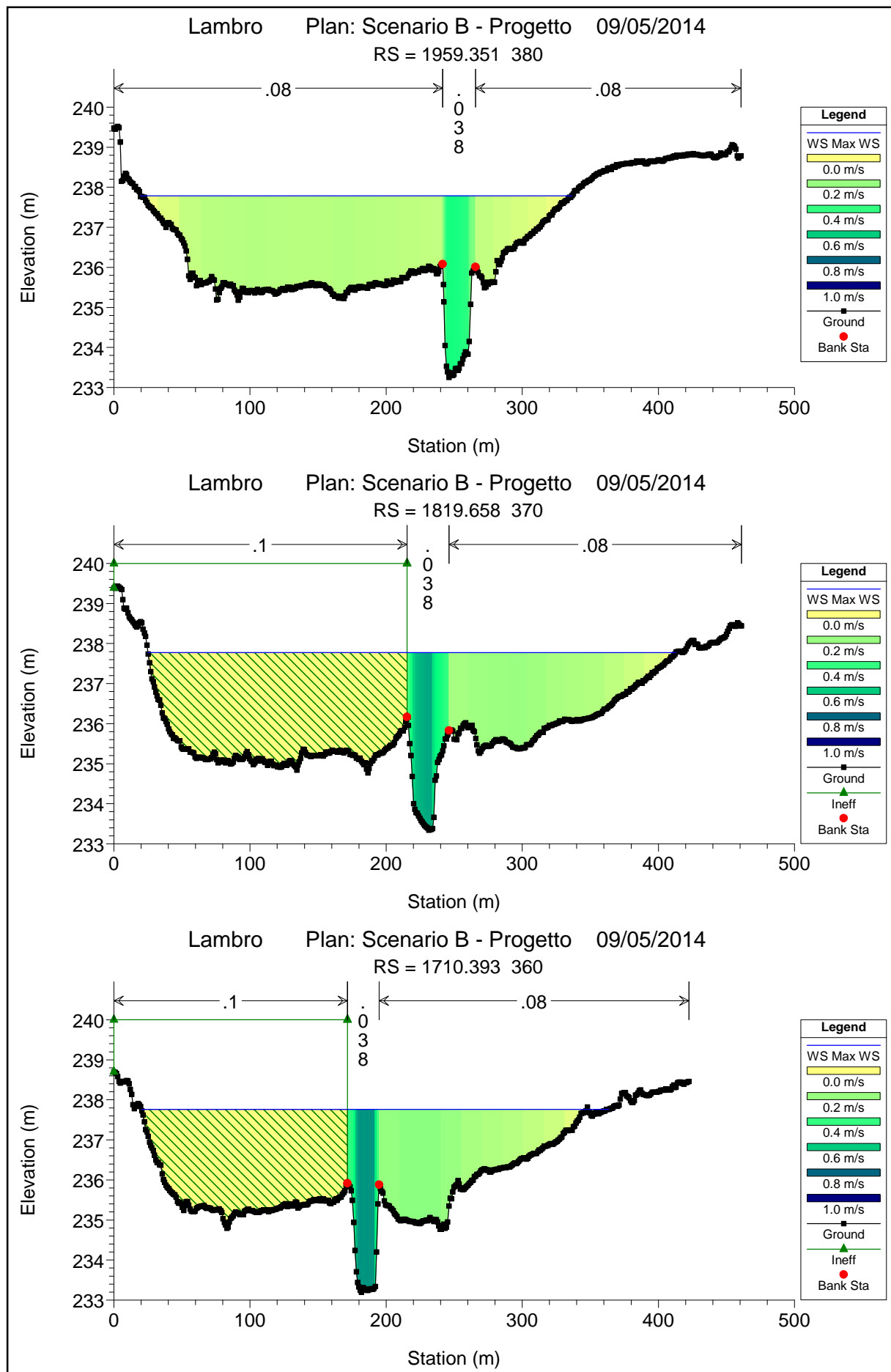


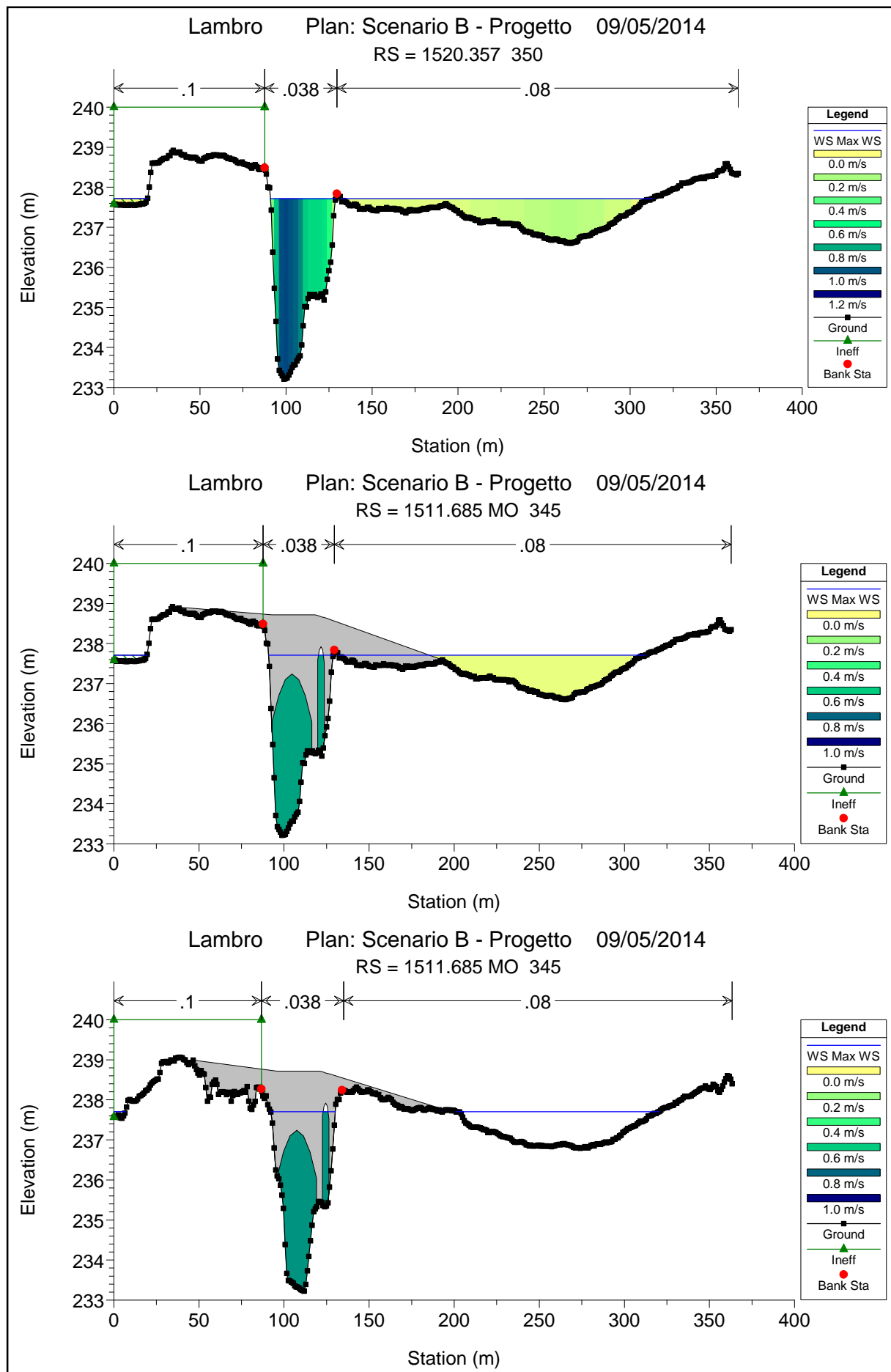


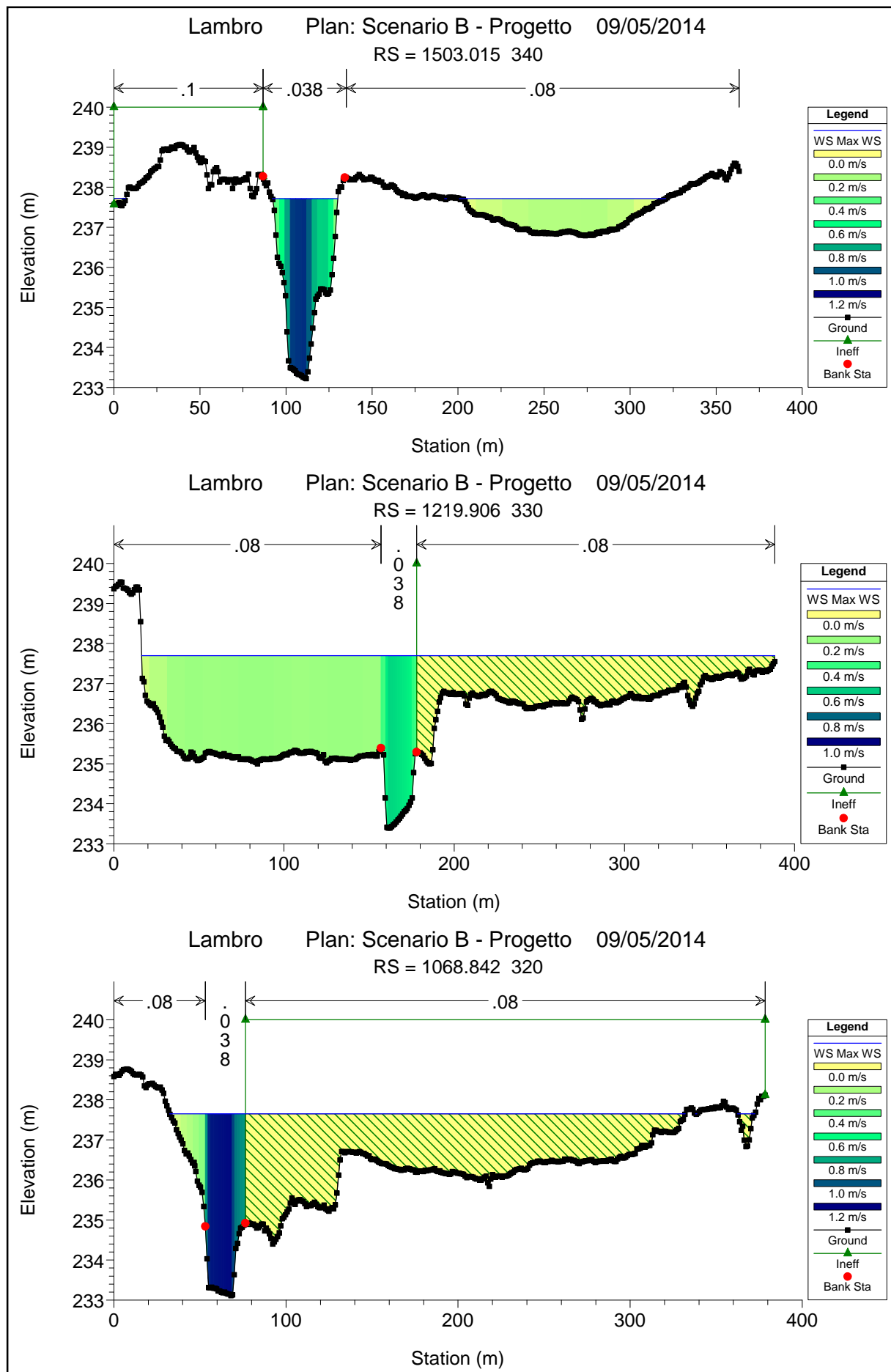


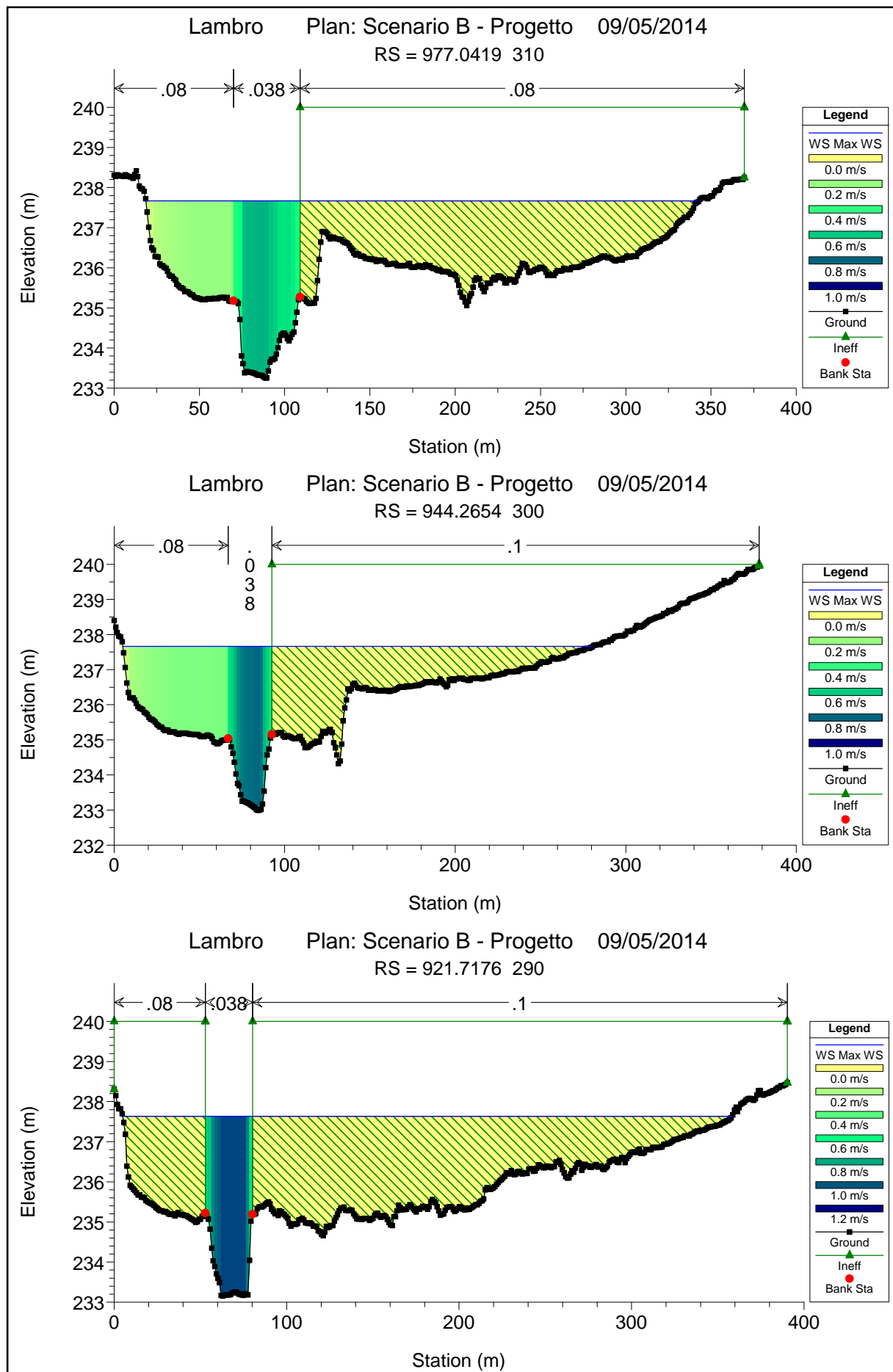


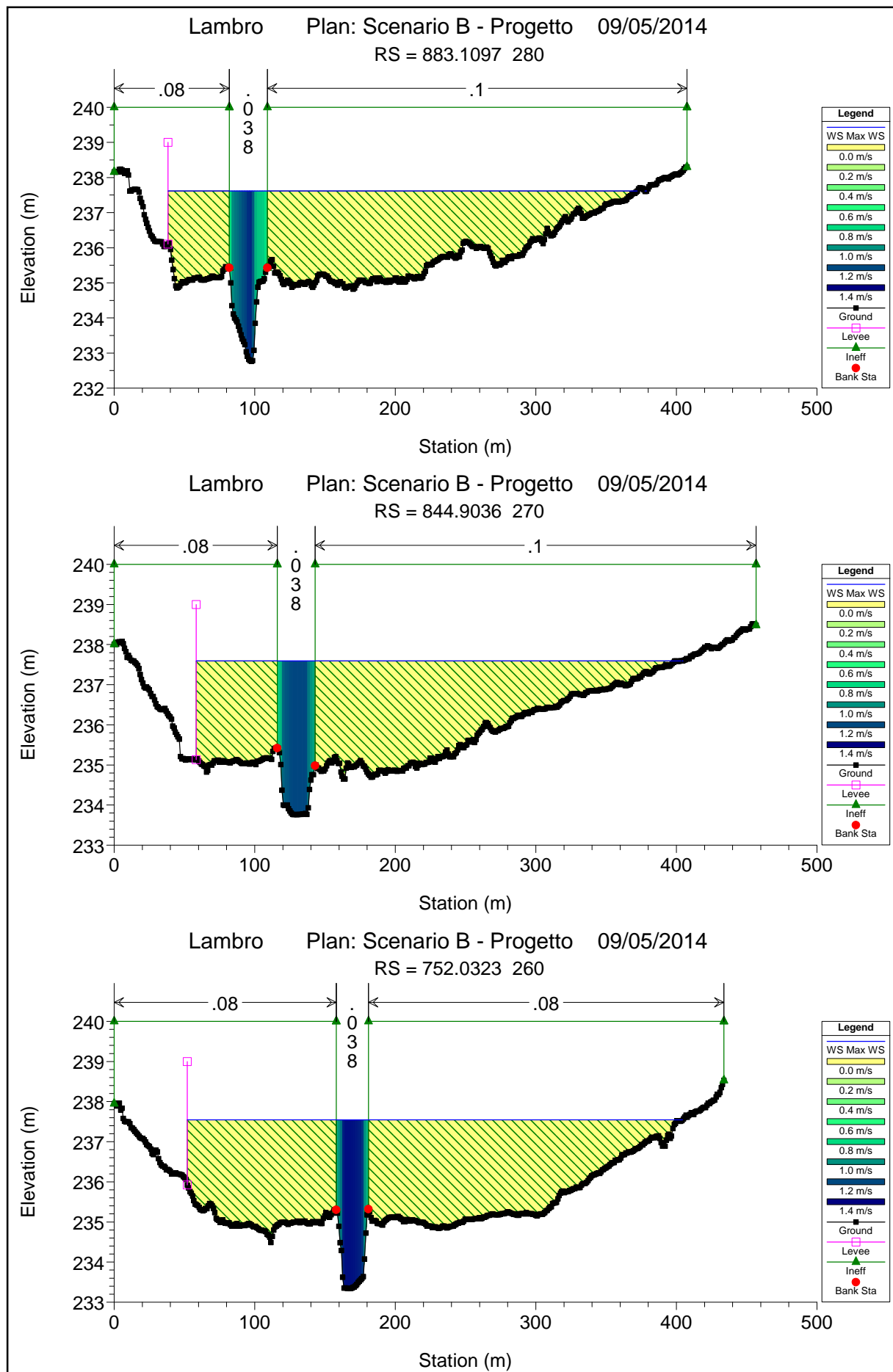


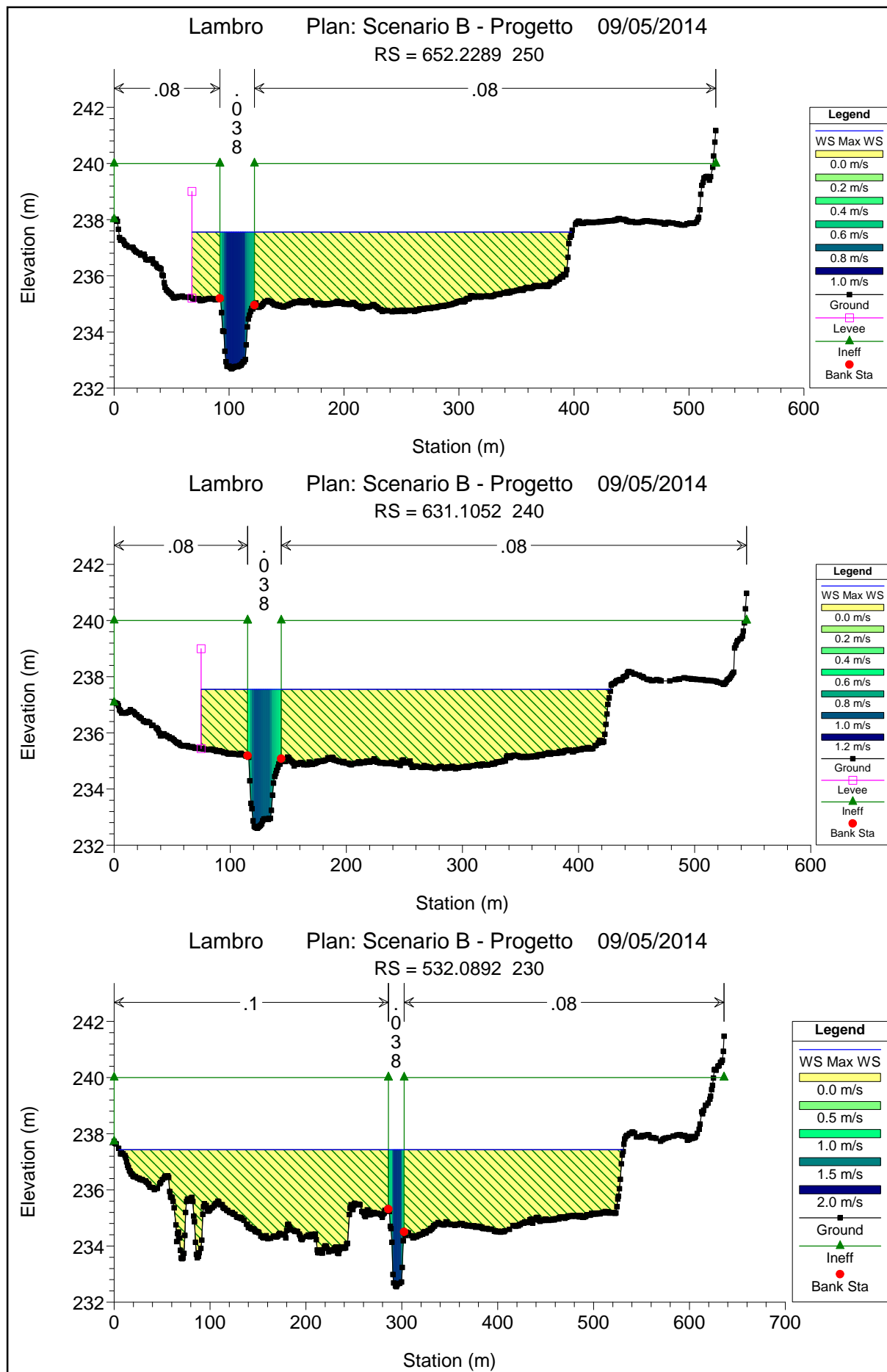


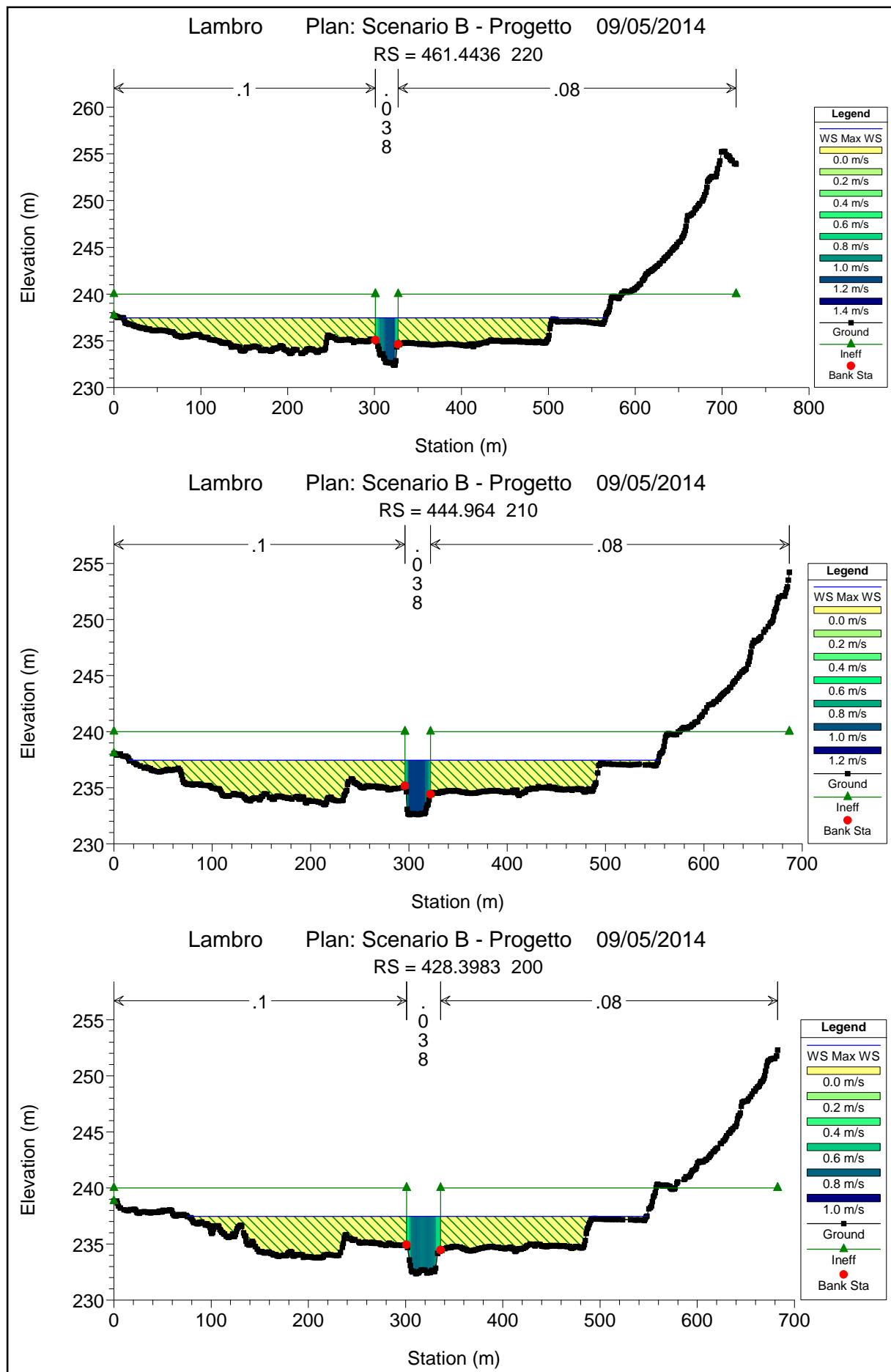


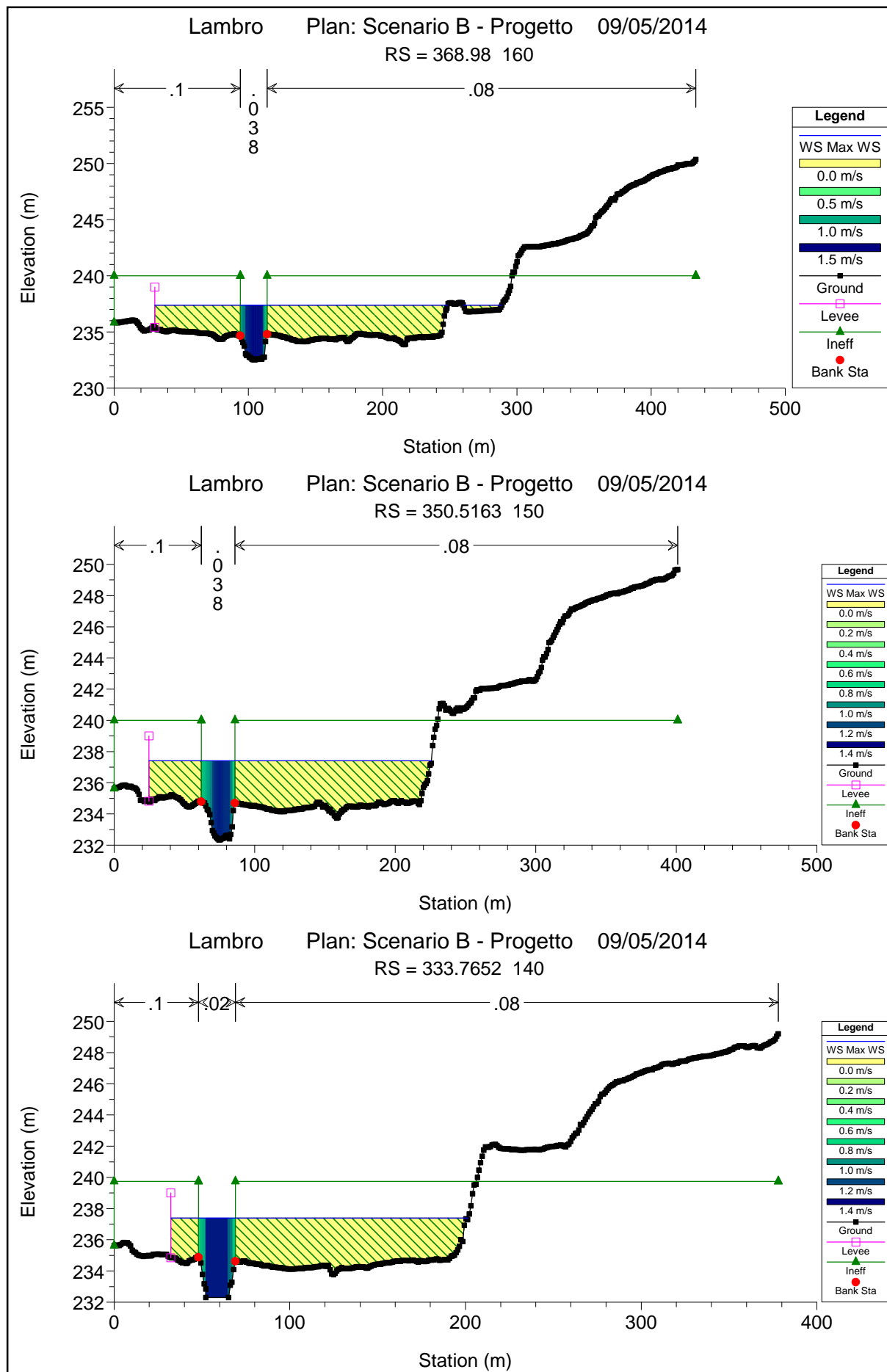


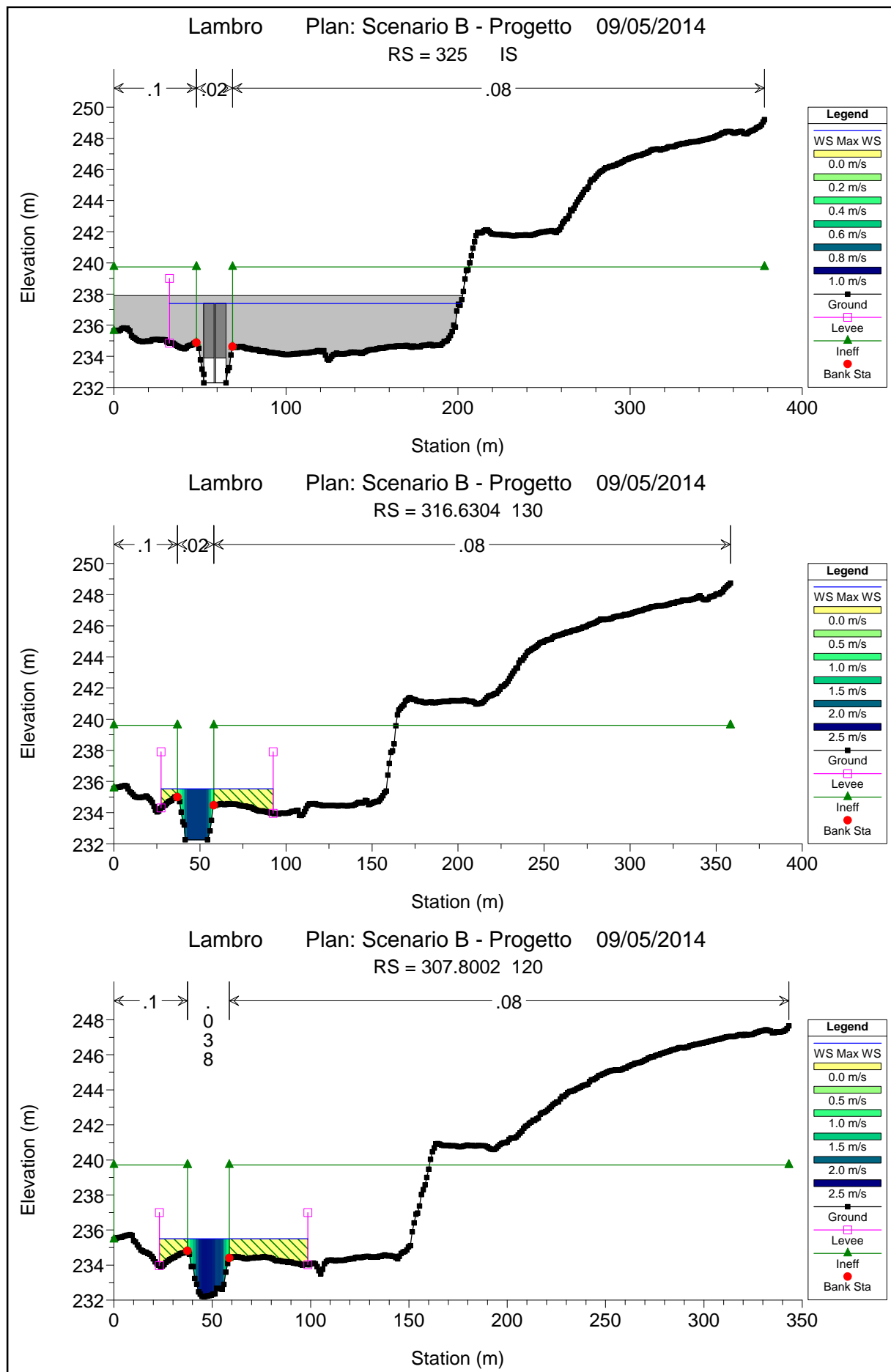


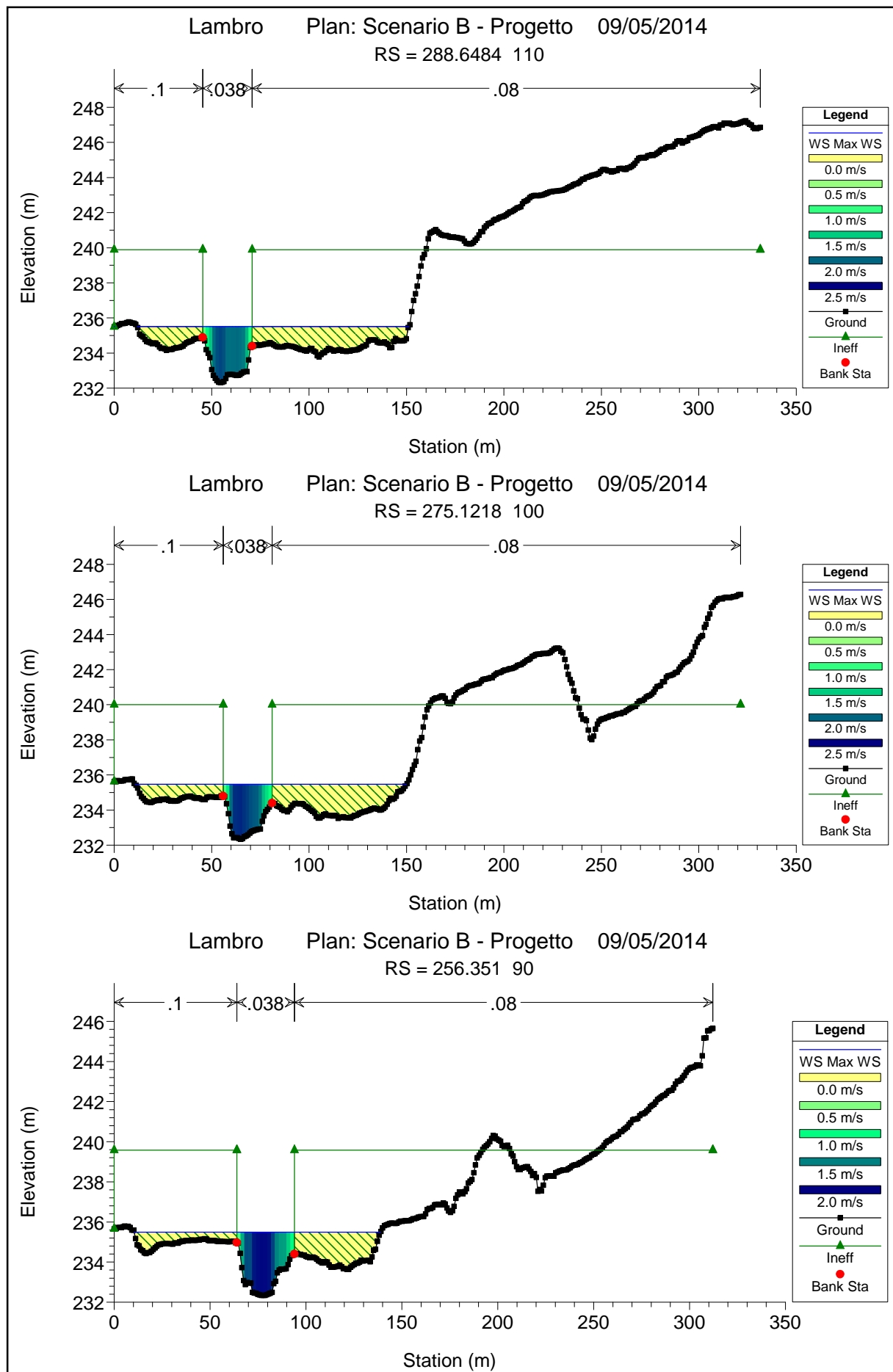


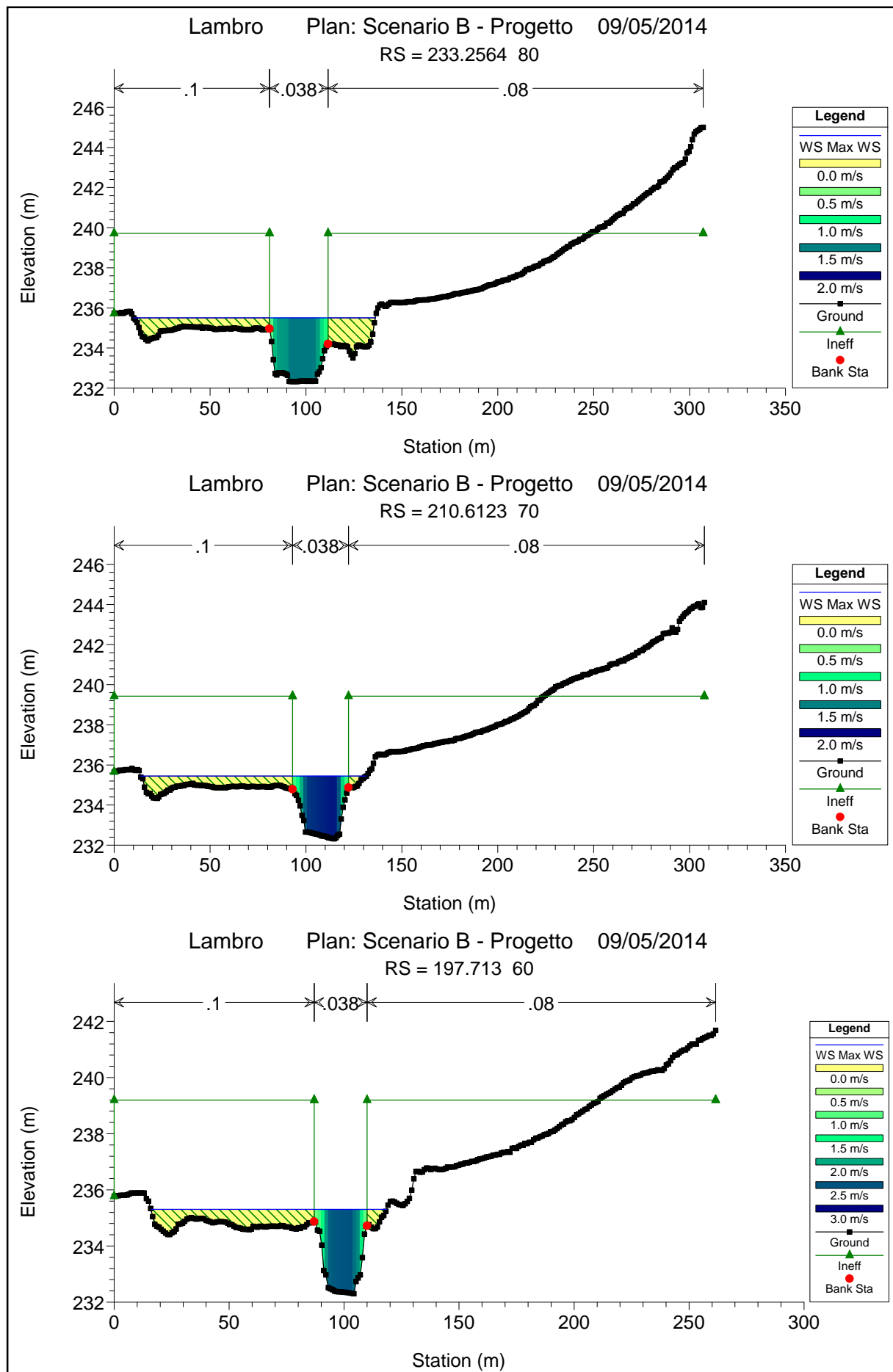


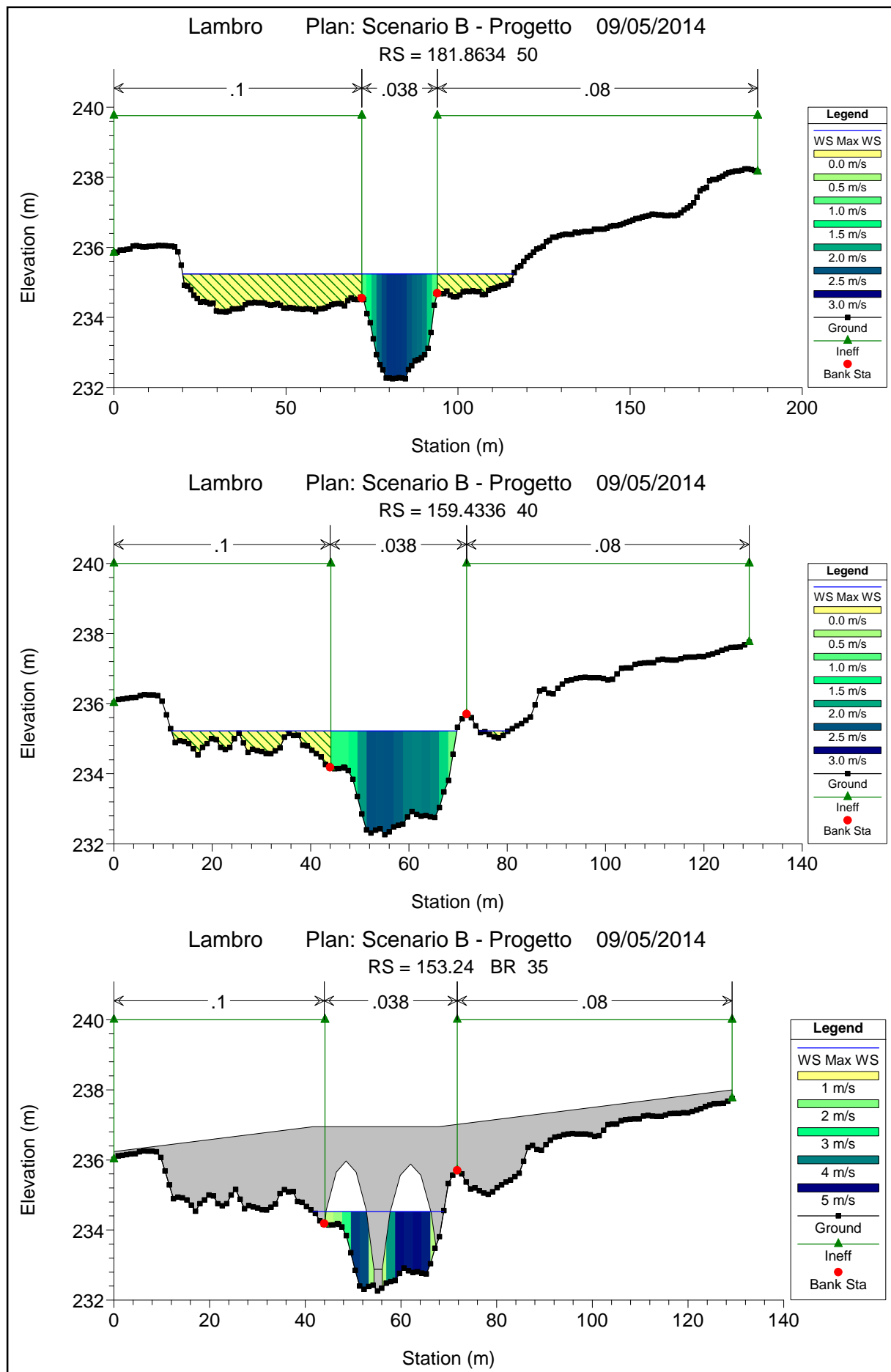


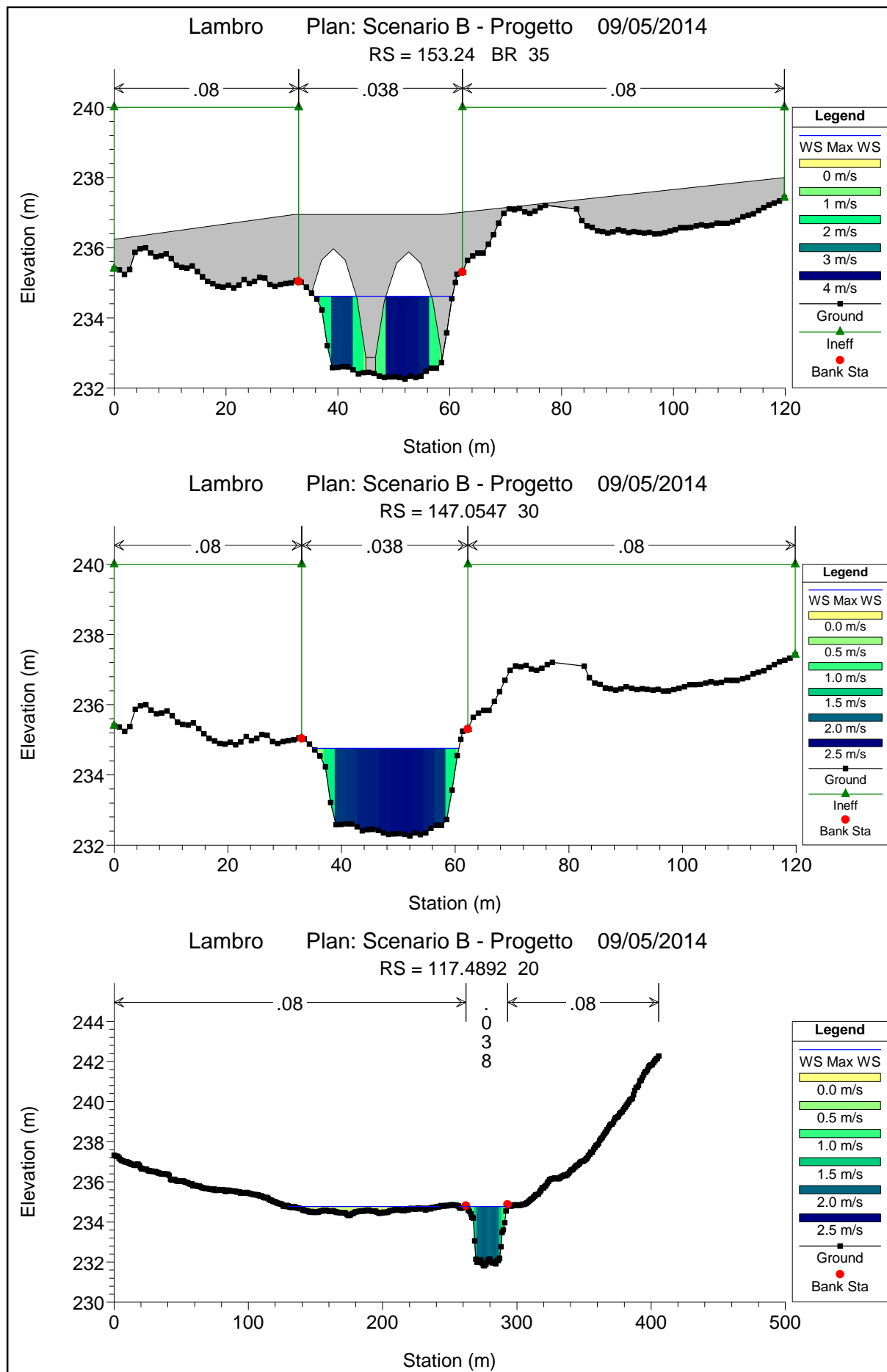


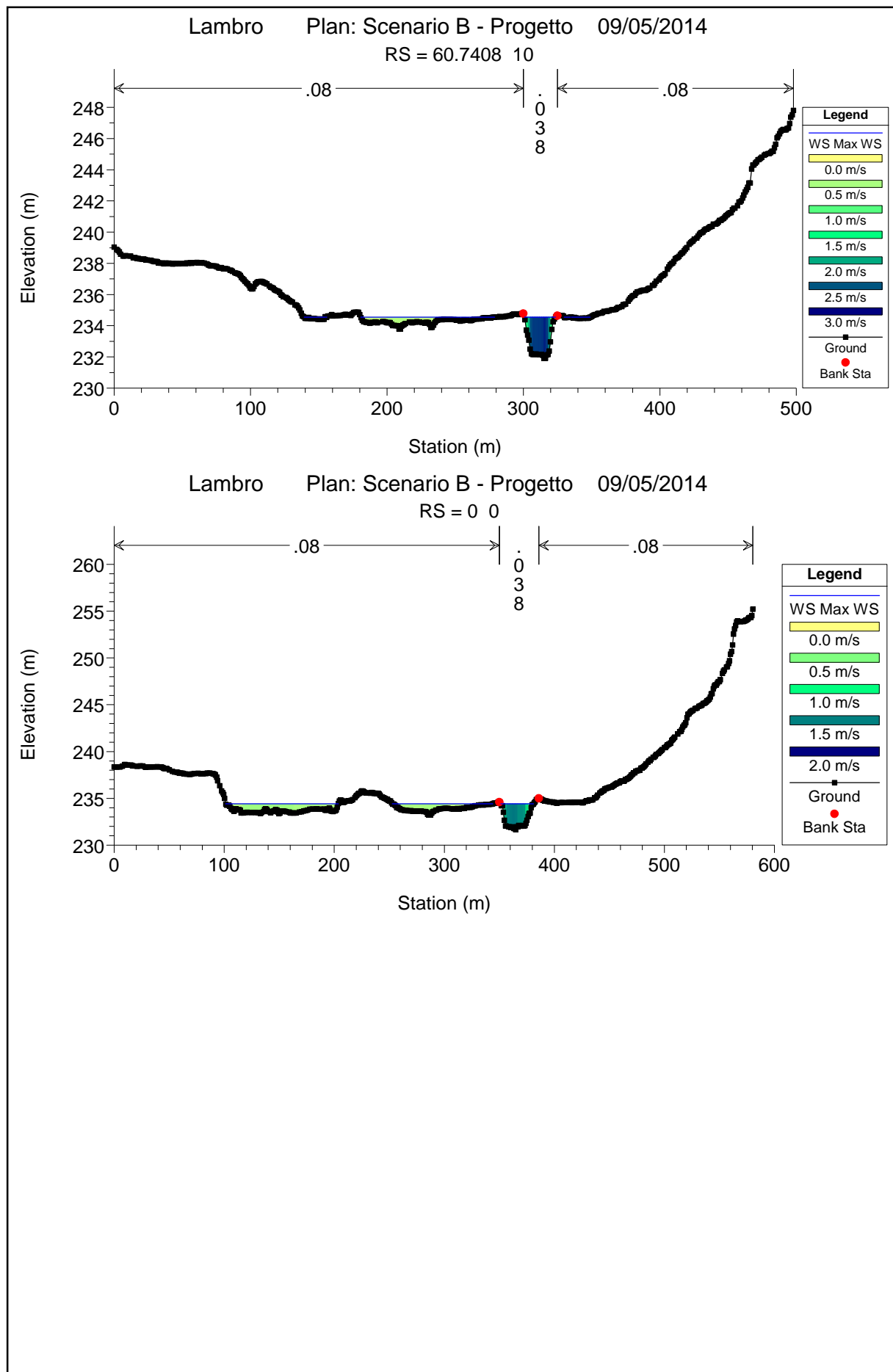














PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo



ALLEGATO 3

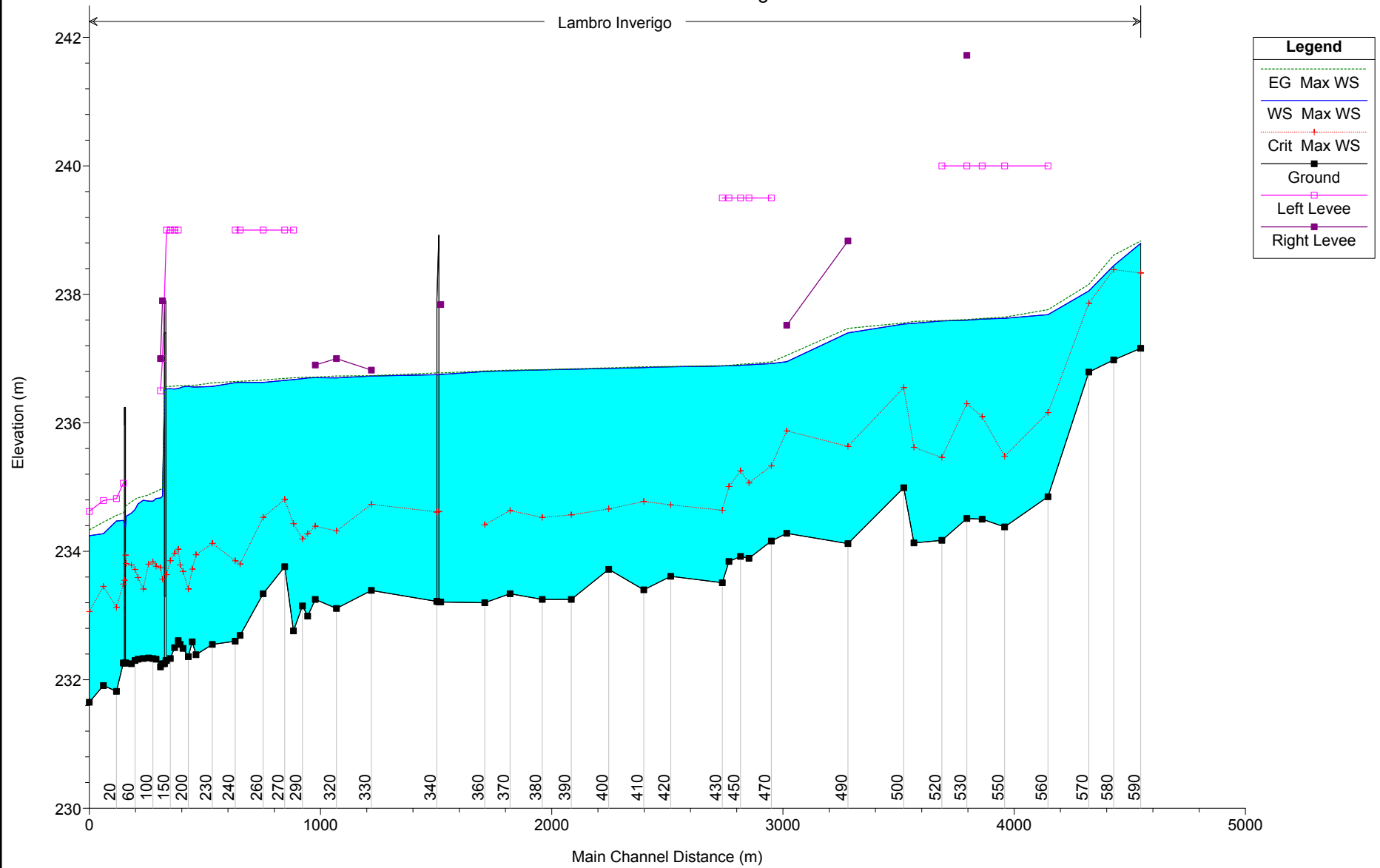
– Risultati simulazione idraulica: scenario C – Portate progetto con laminazione Inverigo

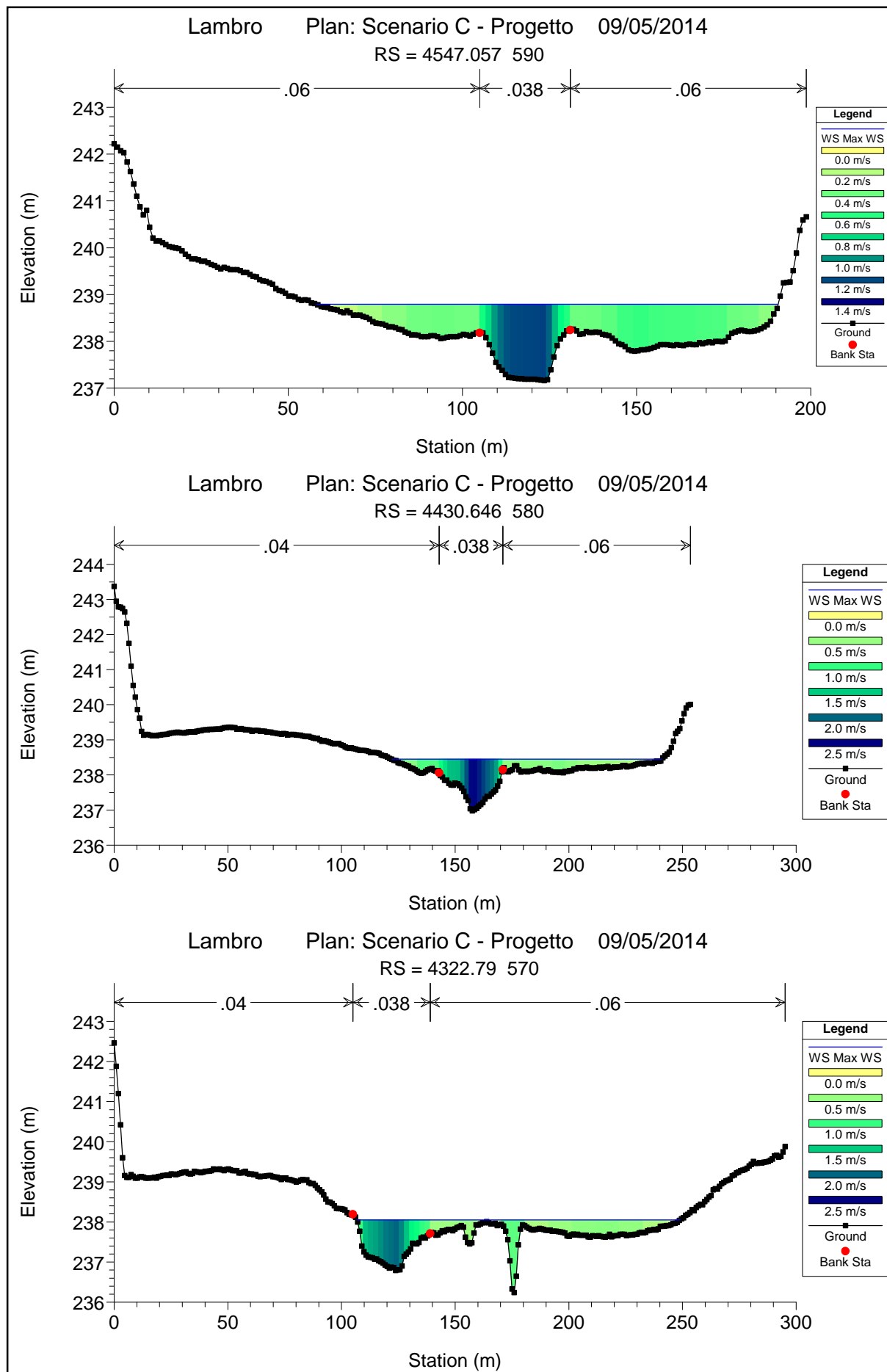
HEC-RAS Plan: C - Progetto River: Lambro Reach: Inverigo Profile: Max WS

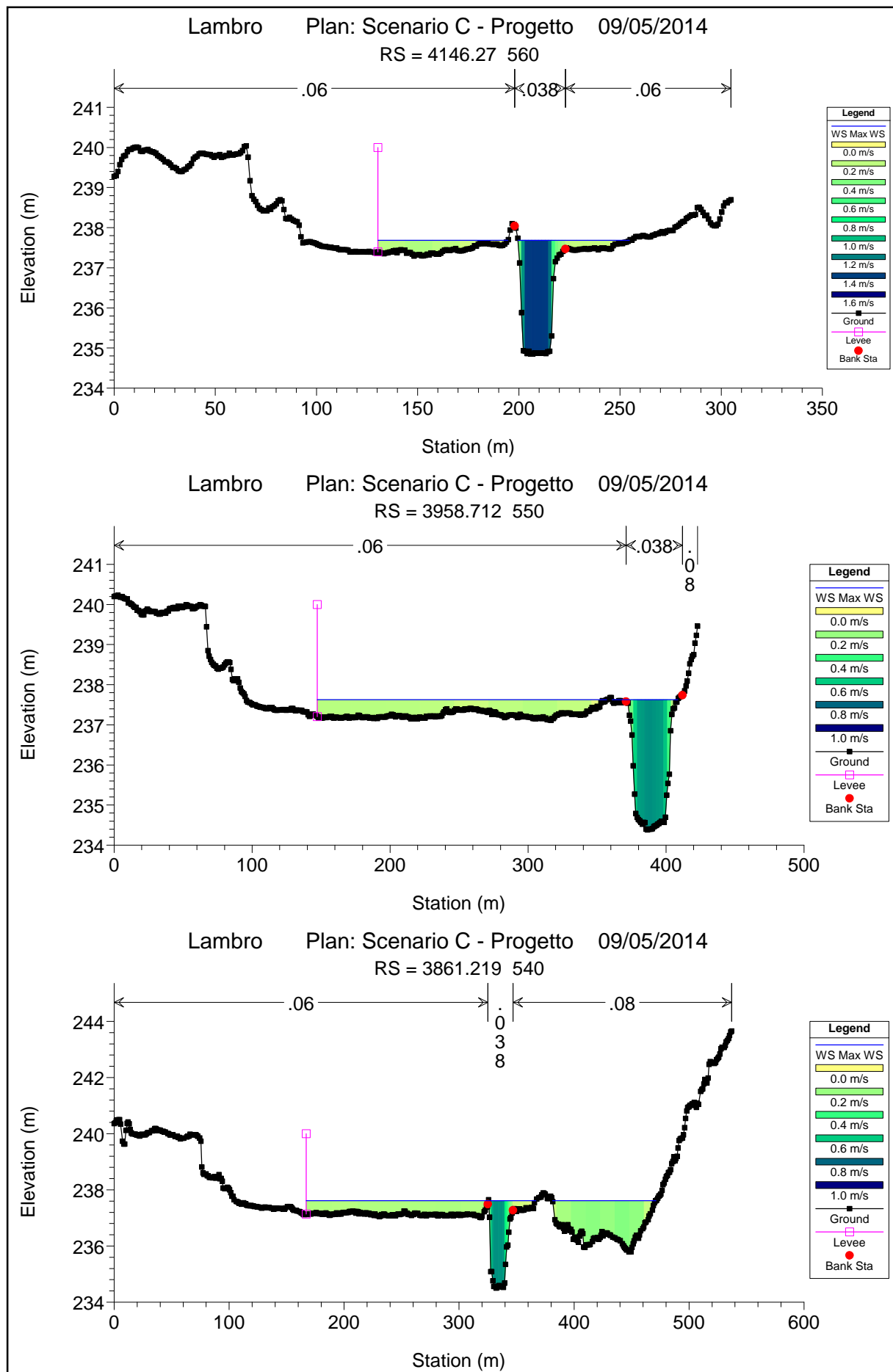
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Inverigo	4547.057 590	Max WS	64.26	237.16	238.79	238.33	238.83	0.001254	1.09	98.14	132.57	0.31
Inverigo	4430.646 580	Max WS	64.09	236.98	238.45	238.38	238.61	0.006289	1.97	48.37	118.76	0.66
Inverigo	4322.79 570	Max WS	63.99	236.79	238.05	237.86	238.15	0.005025	1.65	62.45	142.22	0.58
Inverigo	4146.27 560	Max WS	63.23	234.85	237.68	236.16	237.76	0.001075	1.28	67.10	119.24	0.29
Inverigo	3958.712 550	Max WS	63.30	234.38	237.63	235.48	237.64	0.000224	0.65	161.42	257.36	0.14
Inverigo	3861.219 540	Max WS	63.56	234.50	237.62	236.10	237.63	0.000228	0.62	234.28	289.47	0.14
Inverigo	3795.401 530	Max WS	63.86	234.51	237.60	236.30	237.61	0.000235	0.63	184.98	195.03	0.14
Inverigo	3687.068 520	Max WS	64.23	234.17	237.59	235.46	237.59	0.000055	0.33	236.53	290.84	0.07
Inverigo	3566.631 510	Max WS	64.59	234.13	237.55	235.62	237.58	0.000543	0.82	101.55	215.36	0.21
Inverigo	3522.358 500	Max WS	64.75	234.99	237.54	236.55	237.55	0.000491	0.76	149.14	254.28	0.19
Inverigo	3281.337 490	Max WS	65.00	234.12	237.40	235.63	237.47	0.000785	1.17	55.34	25.74	0.26
Inverigo	3016.292 480	Max WS	51.59	234.28	236.95	235.87	237.05	0.001531	1.45	53.41	83.95	0.34
Inverigo	2949.954 470	Max WS	51.25	234.16	236.92	235.33	236.95	0.000353	0.79	135.83	260.29	0.17
Inverigo	2852.912 460	Max WS	51.27	233.89	236.90	235.06	236.92	0.000278	0.67	171.15	267.01	0.15
Inverigo	2816.748 450	Max WS	51.19	233.92	236.89	235.25	236.91	0.000349	0.72	173.68	260.21	0.17
Inverigo	2766.457 440	Max WS	51.47	233.84	236.89	235.01	236.89	0.000138	0.48	261.08	286.92	0.11
Inverigo	2737.543 430	Max WS	51.39	233.51	236.88	234.64	236.89	0.000087	0.41	279.02	301.82	0.09
Inverigo	2514.769 420	Max WS	51.74	233.61	236.87	234.72	236.88	0.000082	0.43	298.71	275.49	0.09
Inverigo	2398.189 410	Max WS	51.74	233.40	236.86	234.78	236.87	0.000192	0.63	195.05	190.69	0.13
Inverigo	2246.646 400	Max WS	51.79	233.72	236.85	234.66	236.86	0.000109	0.46	201.26	202.39	0.10
Inverigo	2084.842 390	Max WS	51.99	233.25	236.83	234.57	236.84	0.000132	0.49	210.64	193.05	0.11
Inverigo	1959.351 380	Max WS	52.28	233.25	236.82	234.53	236.83	0.000057	0.37	329.56	259.20	0.07
Inverigo	1819.658 370	Max WS	52.51	233.34	236.81	234.63	236.82	0.000119	0.50	194.04	348.05	0.10
Inverigo	1710.393 360	Max WS	52.76	233.20	236.80	234.41	236.81	0.000118	0.54	191.59	287.09	0.10
Inverigo	1520.357 350	Max WS	53.14	233.21	236.75		236.78	0.000270	0.70	76.03	35.08	0.15
Inverigo	1511.685 345		Mult Open									
Inverigo	1503.015 340	Max WS	53.08	233.22	236.75	234.61	236.78	0.000320	0.74	71.37	34.36	0.16
Inverigo	1219.906 330	Max WS	53.36	233.39	236.73	234.73	236.73	0.000078	0.44	256.80	174.25	0.08
Inverigo	1068.842 320	Max WS	53.49	233.11	236.70	234.32	236.73	0.000195	0.75	77.06	90.90	0.14
Inverigo	977.0419 310	Max WS	53.67	233.25	236.70	234.39	236.71	0.000075	0.44	163.76	100.21	0.08
Inverigo	944.2654 300	Max WS	53.74	232.99	236.70	234.27	236.71	0.000105	0.55	155.37	190.23	0.10
Inverigo	921.7176 290	Max WS	53.77	233.15	236.69	234.19	236.71	0.000147	0.65	82.87	292.13	0.12
Inverigo	883.1097 280	Max WS	53.84	232.76	236.67	234.43	236.70	0.000228	0.75	72.22	279.25	0.15
Inverigo	844.9036 270	Max WS	53.91	233.76	236.66	234.81	236.69	0.000276	0.80	67.70	265.10	0.16
Inverigo	752.0323 260	Max WS	54.08	233.34	236.63	234.53	236.67	0.000285	0.85	63.28	308.74	0.16
Inverigo	652.2289 250	Max WS	54.26	232.69	236.63	233.80	236.65	0.000107	0.57	94.77	327.04	0.10
Inverigo	631.1052 240	Max WS	54.31	232.60	236.62	233.85	236.64	0.000120	0.60	90.51	349.49	0.11
Inverigo	532.0892 230	Max WS	54.30	232.55	236.57	234.12	236.62	0.000369	1.04	52.34	510.25	0.18
Inverigo	461.4436 220	Max WS	65.02	232.39	236.56	233.95	236.59	0.000191	0.77	84.44	477.97	0.14
Inverigo	444.964 210	Max WS	65.12	232.59	236.56	233.72	236.58	0.000143	0.71	92.29	438.52	0.12
Inverigo	428.3983 200	Max WS	65.22	232.36	236.57	233.41	236.58	0.000071	0.51	127.05	383.55	0.09
Inverigo	405.128 190	Max WS	65.35	232.49	236.56	233.69	236.58	0.000106	0.60	108.54	323.20	0.10
Inverigo	392.612 180	Max WS	65.41	232.55	236.54	233.79	236.58	0.000192	0.82	79.88	301.96	0.14
Inverigo	384.5591 170	Max WS	65.46	232.61	236.53	234.03	236.58	0.000252	0.91	72.10	290.00	0.16
Inverigo	368.98 160	Max WS	65.57	232.50	236.53	233.97	236.57	0.000274	0.95	68.91	215.81	0.16
Inverigo	350.5163 150	Max WS	65.71	232.33	236.53	233.85	236.57	0.000218	0.83	78.90	198.93	0.15
Inverigo	333.7652 140	Max WS	65.85	232.30	236.53	233.64	236.56	0.000057	0.85	77.37	166.70	0.14
Inverigo	325		Inl Struct									
Inverigo	316.6304 130	Max WS	65.84	232.25	234.86	233.57	234.97	0.000366	1.51	43.69	61.53	0.33
Inverigo	307.8002 120	Max WS	65.91	232.20	234.83	233.74	234.96	0.001741	1.63	40.47	75.50	0.38
Inverigo	288.6484 110	Max WS	66.00	232.32	234.82	233.77	234.93	0.001526	1.48	44.73	130.31	0.35
Inverigo	275.1218 100	Max WS	66.07	232.33	234.78	233.84	234.91	0.001963	1.61	41.15	127.13	0.40
Inverigo	256.351 90	Max WS	66.14	232.34	234.78	233.80	234.88	0.001449	1.37	48.12	80.60	0.34
Inverigo	233.2564 80	Max WS	66.20	232.33	234.79	233.41	234.85	0.000683	1.08	61.33	63.68	0.24
Inverigo	210.6123 70	Max WS	66.30	232.32	234.74	233.59	234.83	0.001360	1.36	48.63	39.72	0.33
Inverigo	197.713 60	Max WS	66.41	232.30	234.65	233.72	234.81	0.002359	1.78	37.34	41.02	0.43
Inverigo	181.8634 50	Max WS	66.53	232.25	234.59	233.79	234.77	0.002748	1.87	35.65	71.16	0.47
Inverigo	159.4336 40	Max WS	66.66	232.26	234.54	233.81	234.71	0.002879	1.80	37.07	27.56	0.47
Inverigo	153.24 35		Bridge									
Inverigo	147.0547 30	Max WS	66.66	232.26	234.48	233.49	234.60	0.001619	1.52	43.76	23.91	0.36
Inverigo	117.4892 20	Max WS	66.88	231.82	234.47	233.13	234.56	0.001098	1.30	51.41	26.57	0.30
Inverigo	60.7408 10	Max WS	67.25	231.91	234.27	233.45	234.46	0.002636	1.88	35.68	20.49	0.46
Inverigo	0 0	Max WS	67.25	231.65	234.24	233.06	234.33	0.001212	1.33	50.66	27.75	0.31

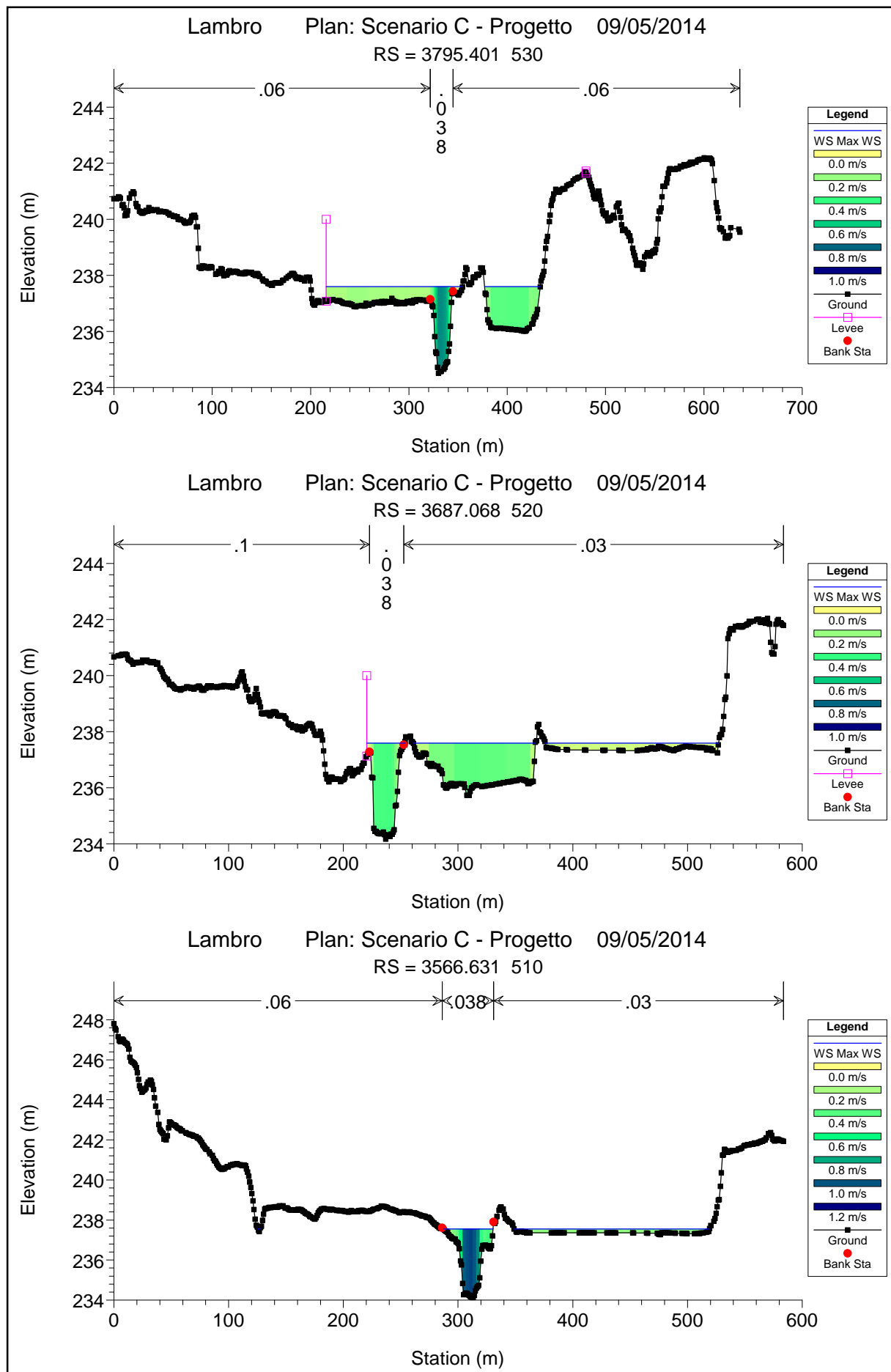
Lambro Plan: Scenario C - Progetto 18/11/2014

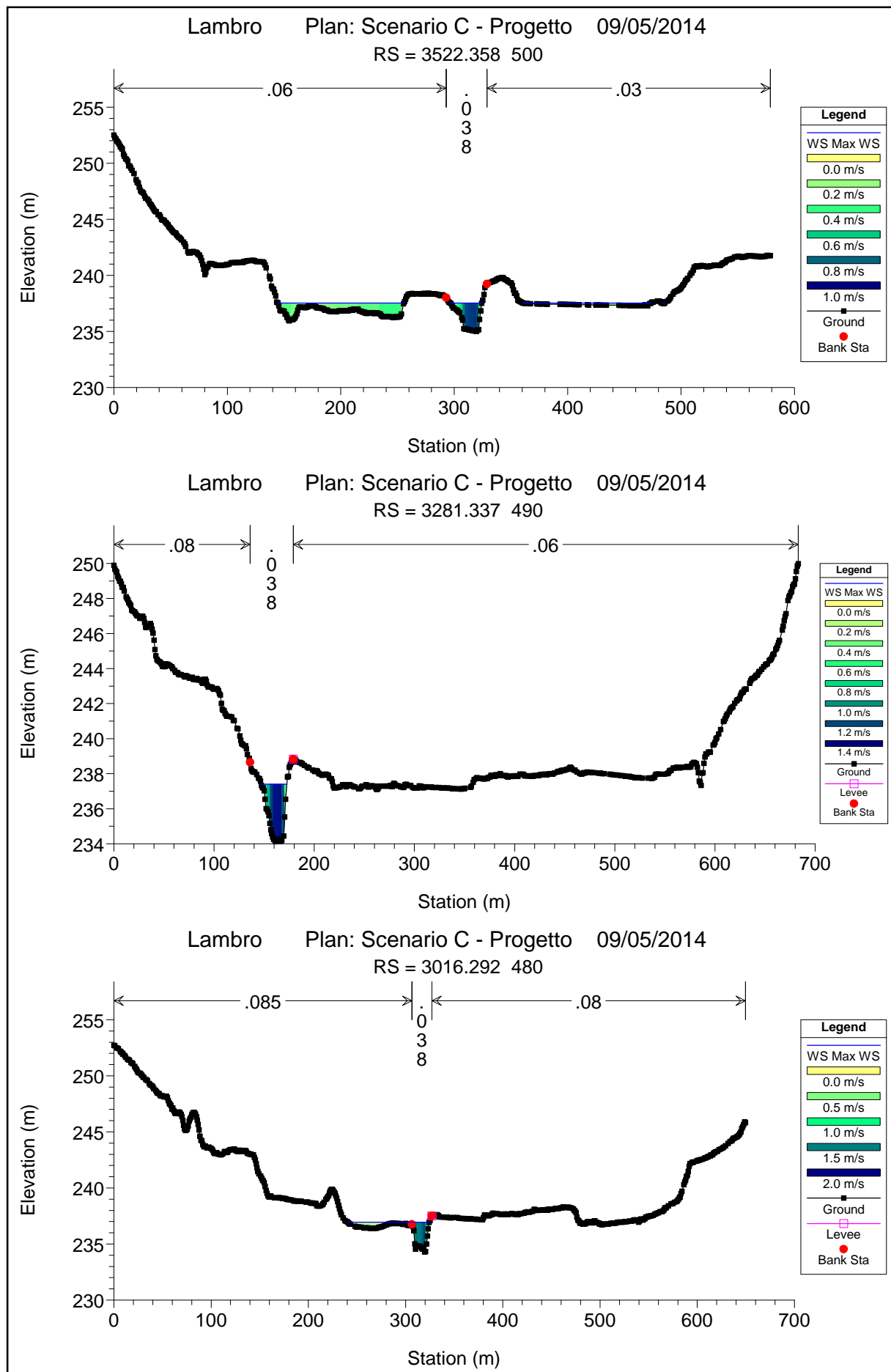
Lambro Inverigo

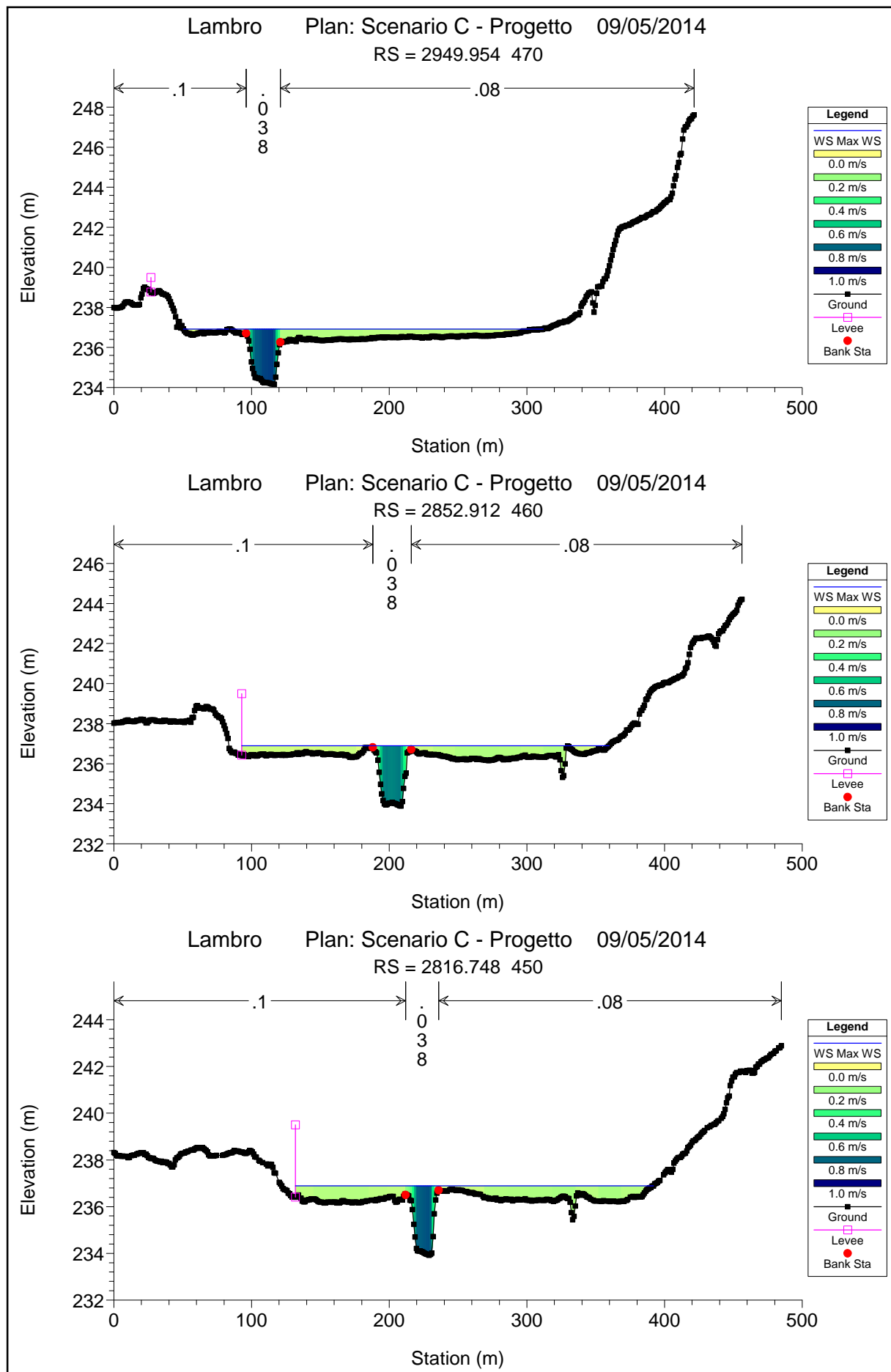


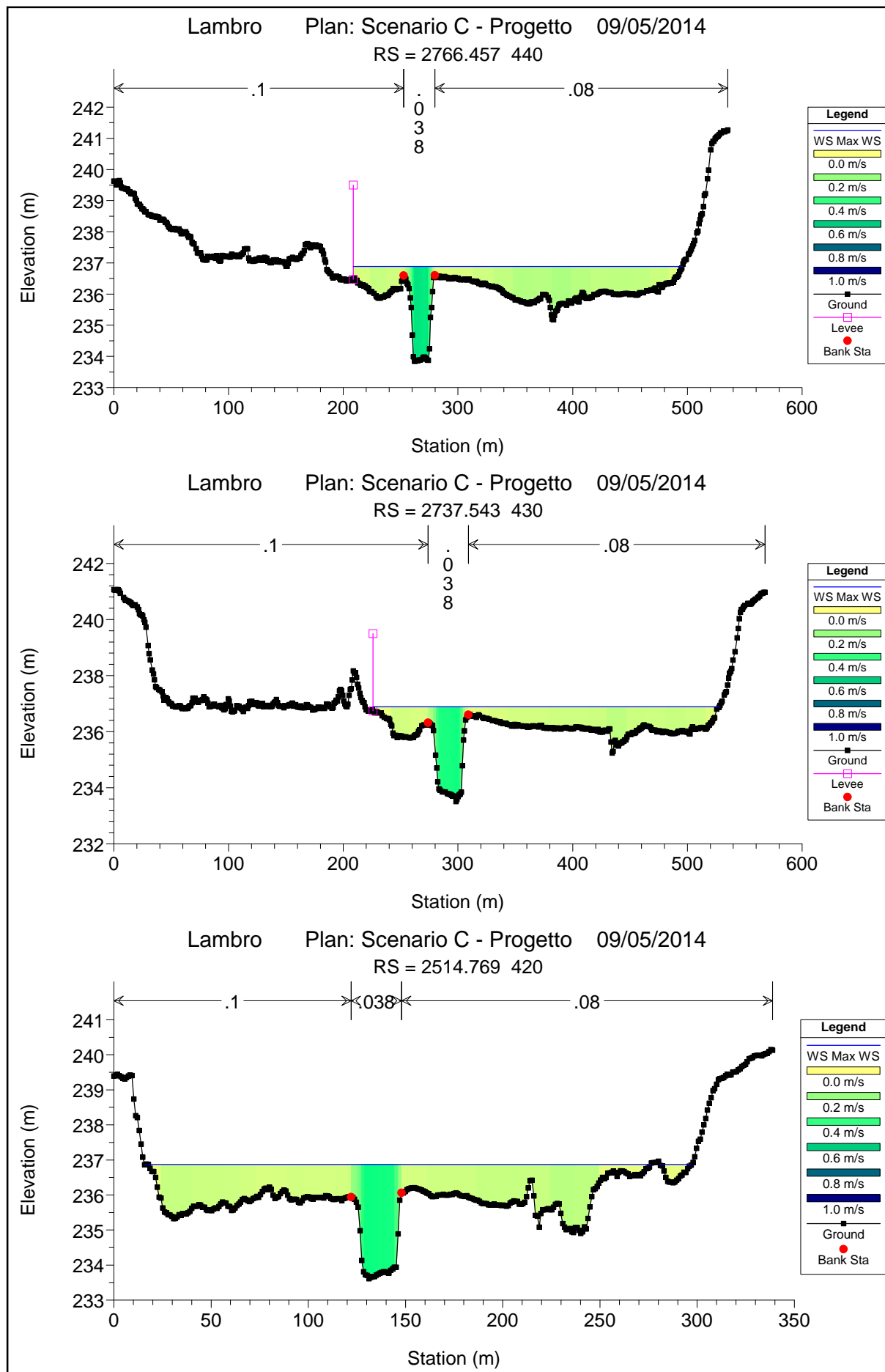


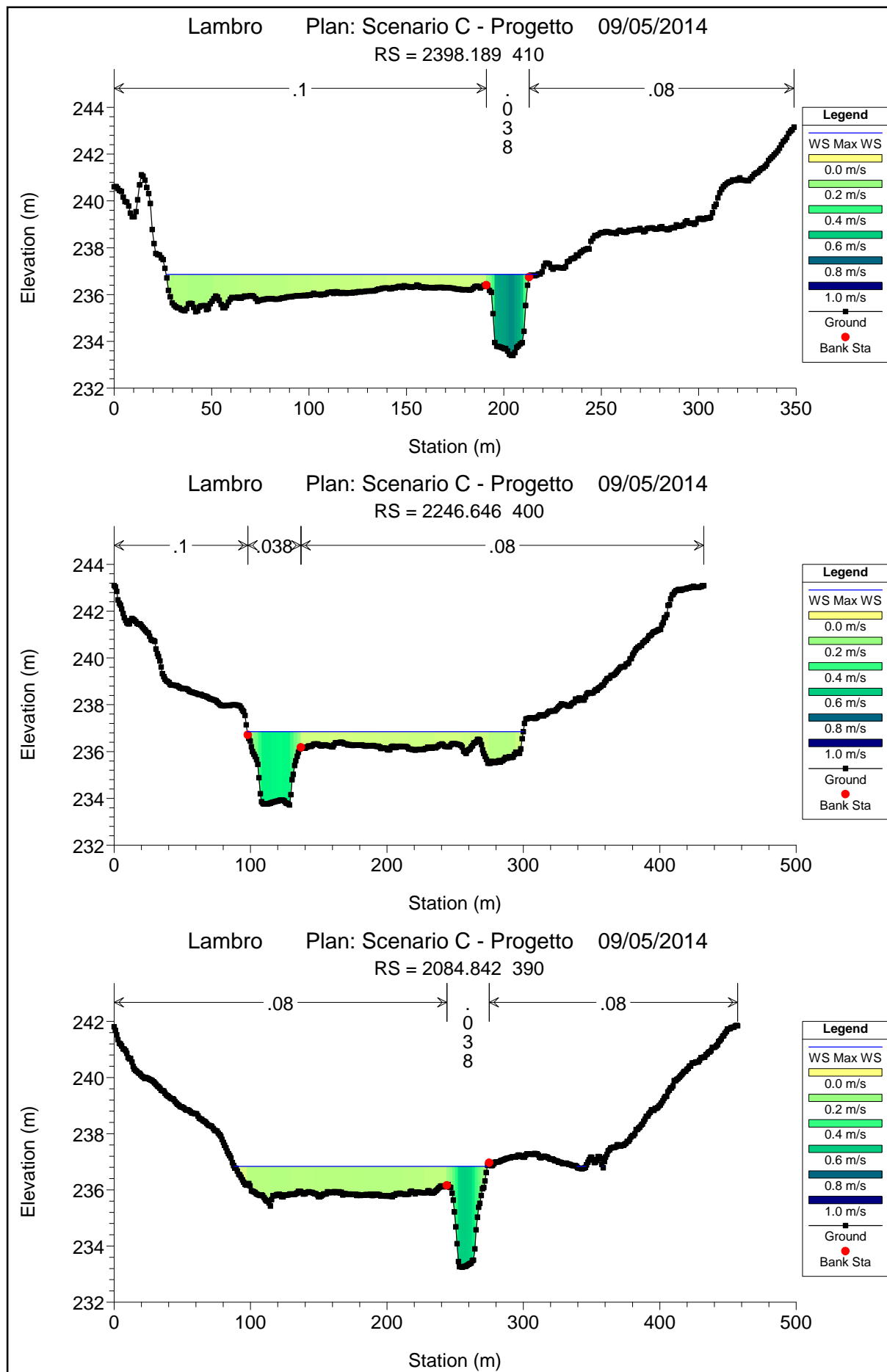


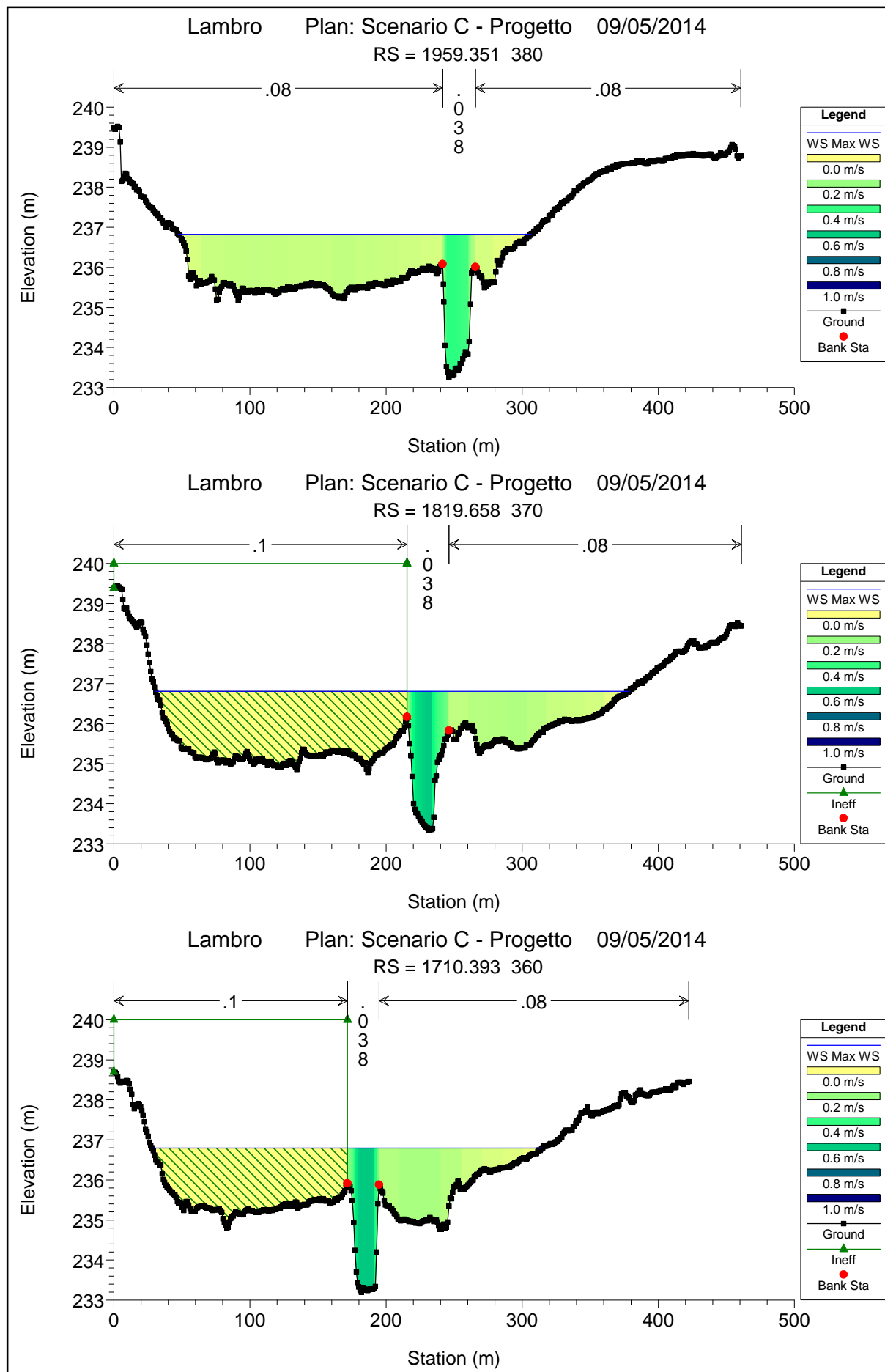


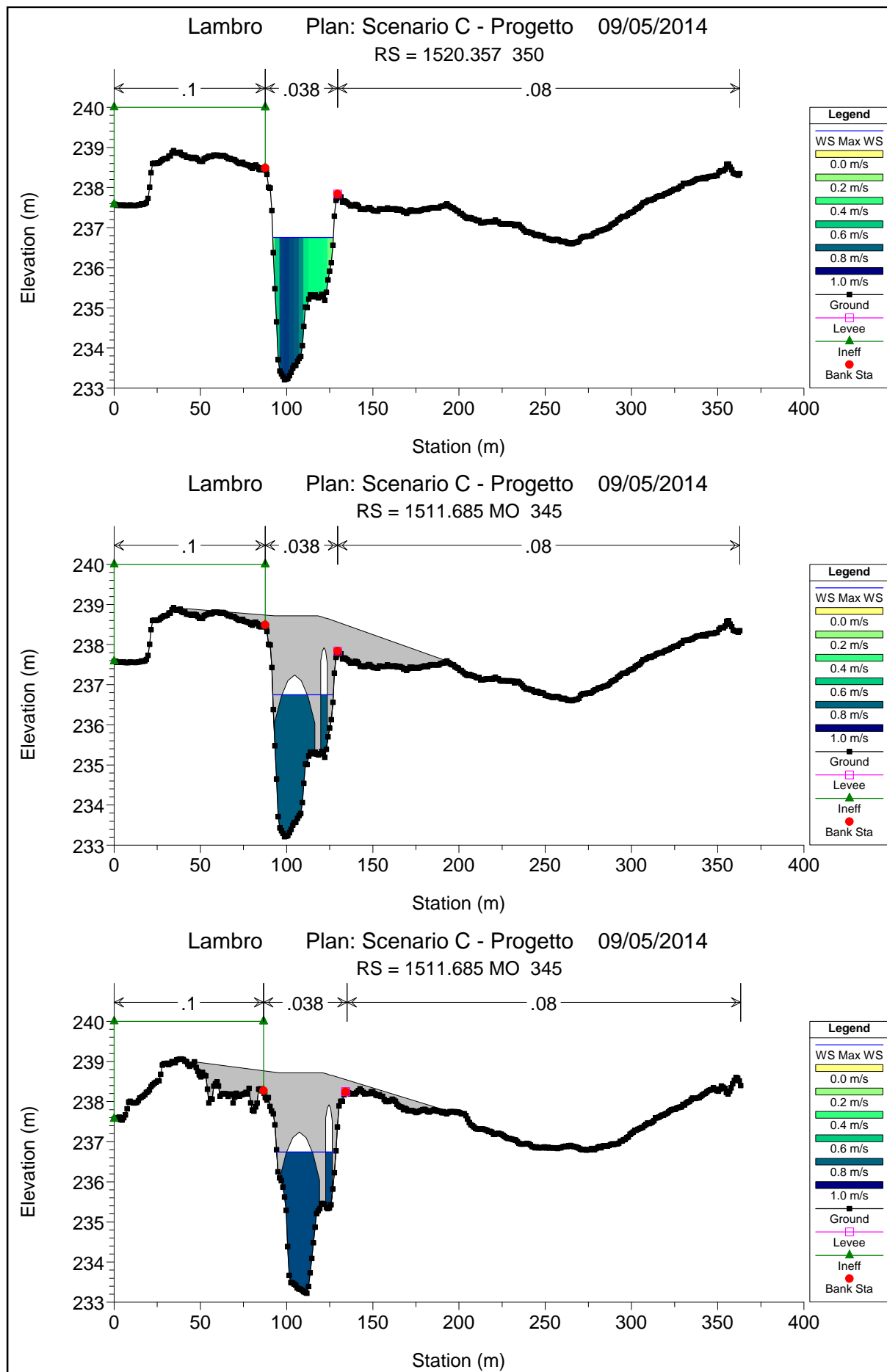


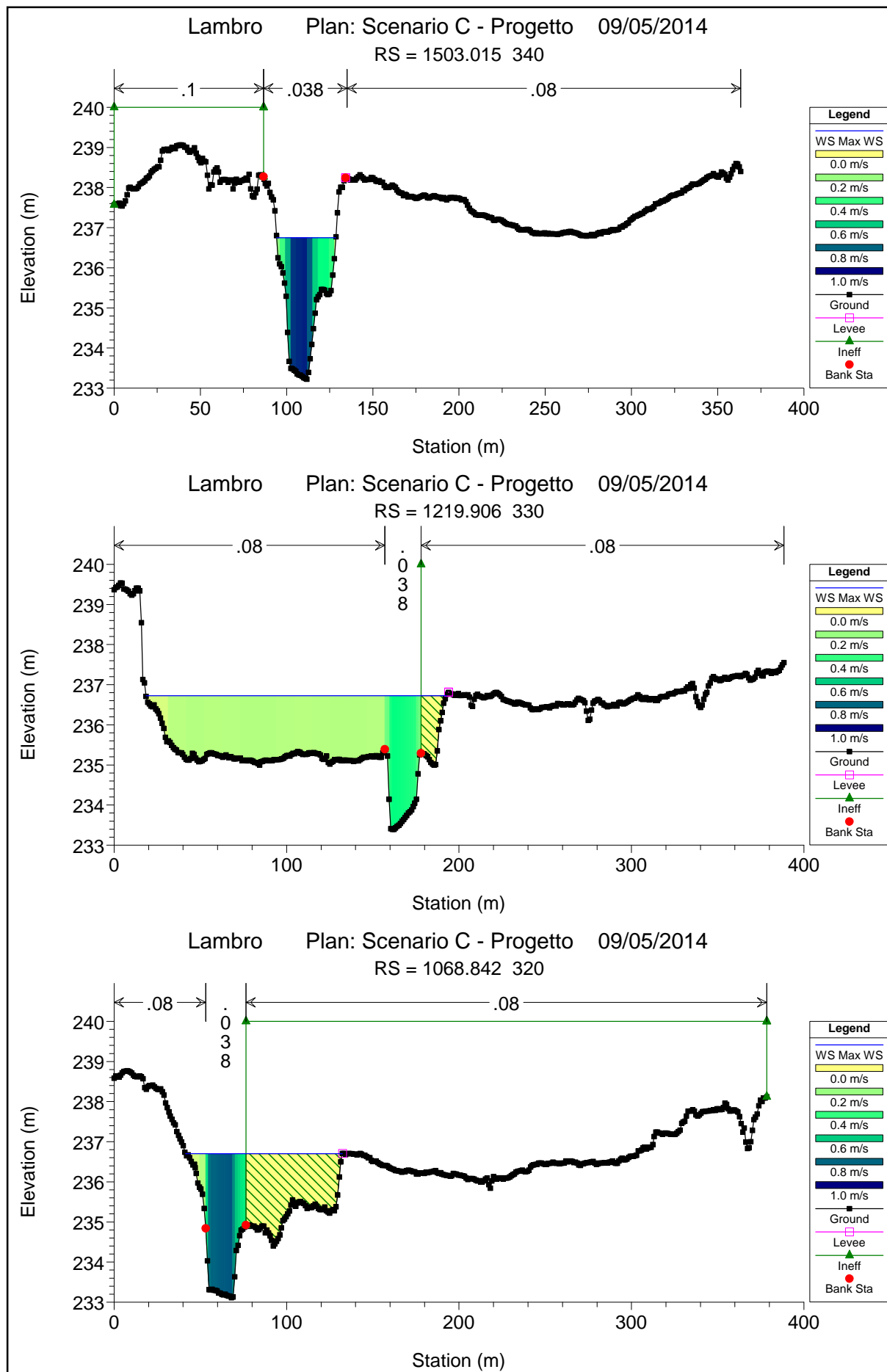


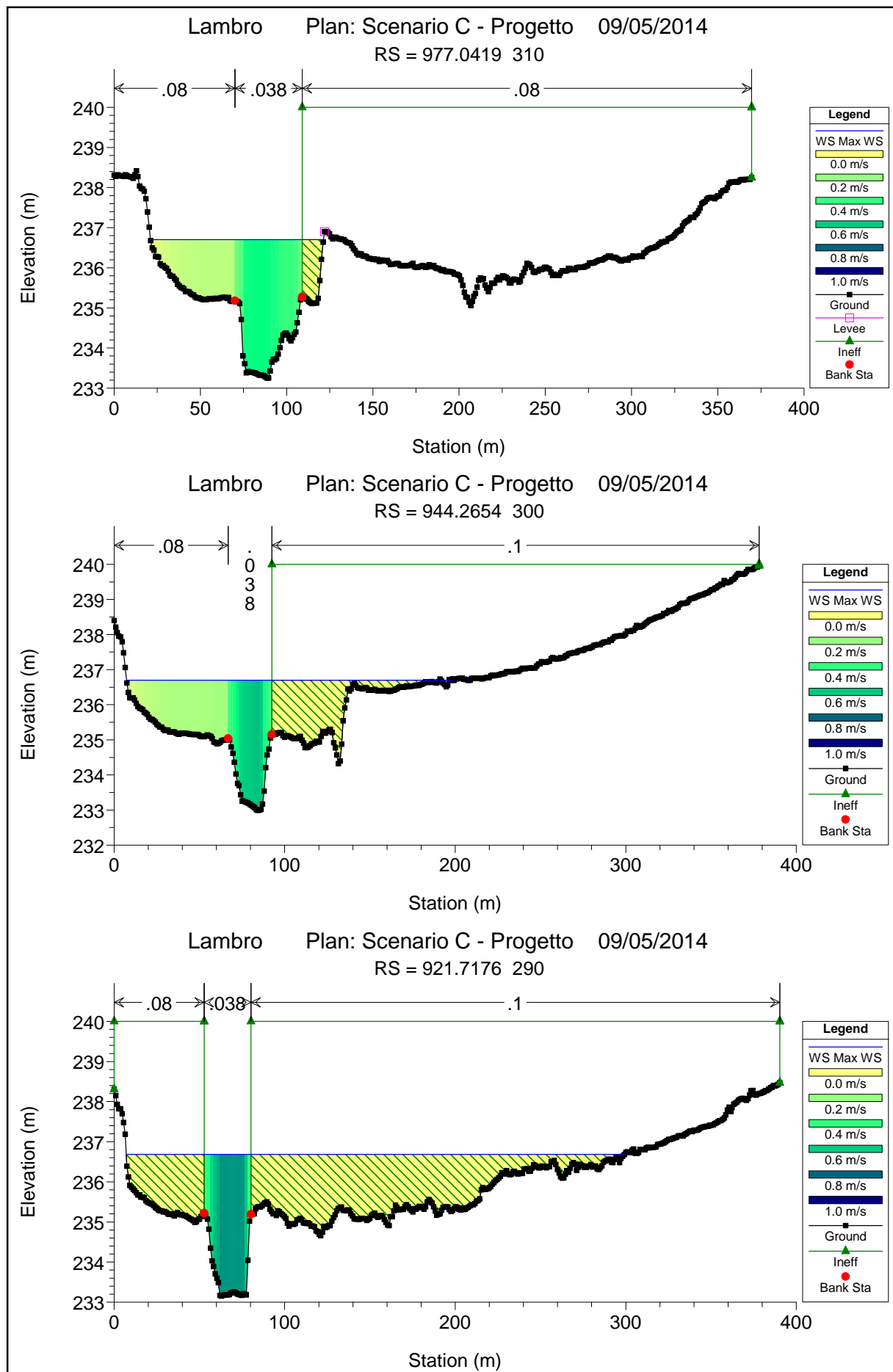


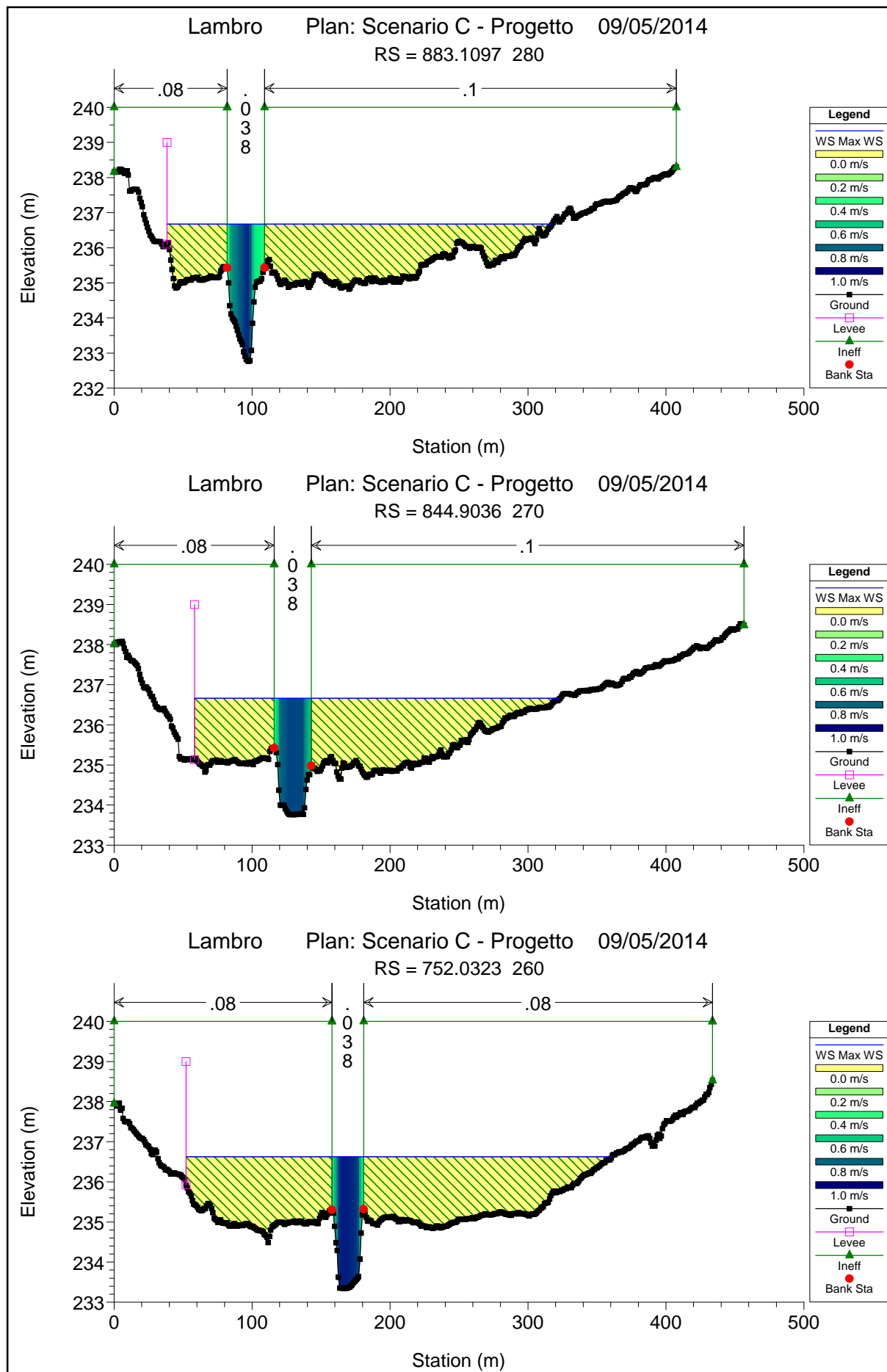


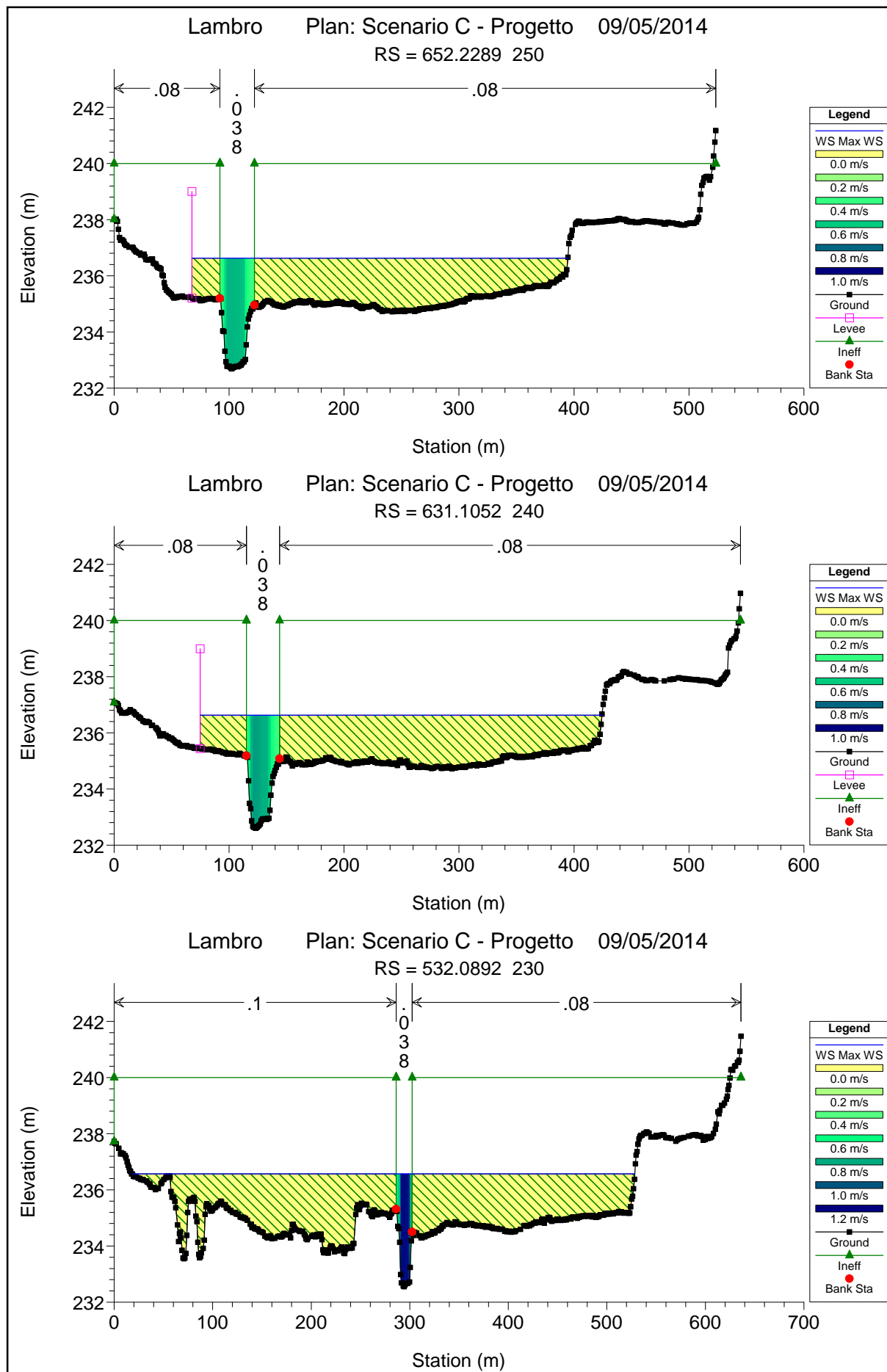


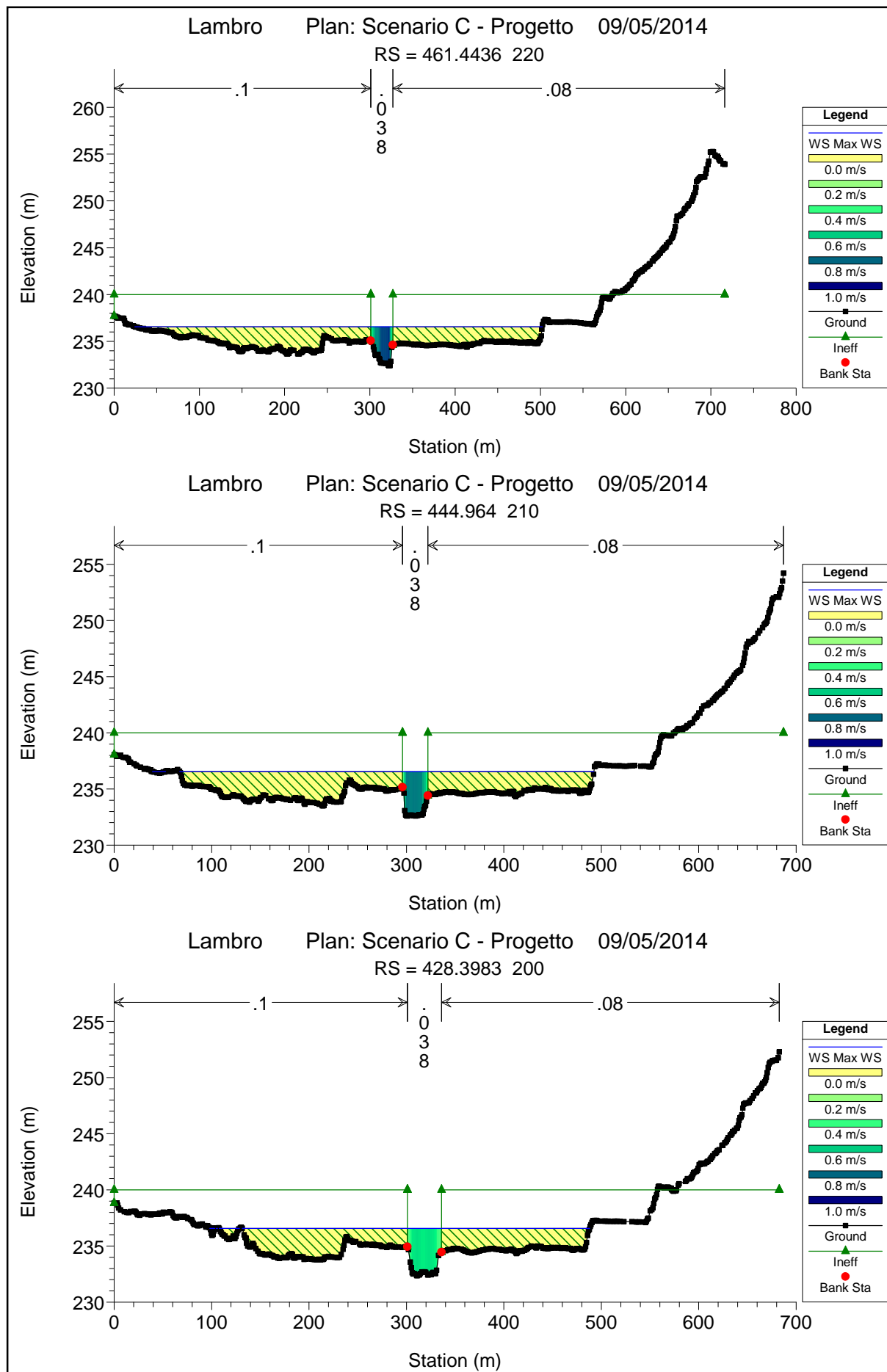


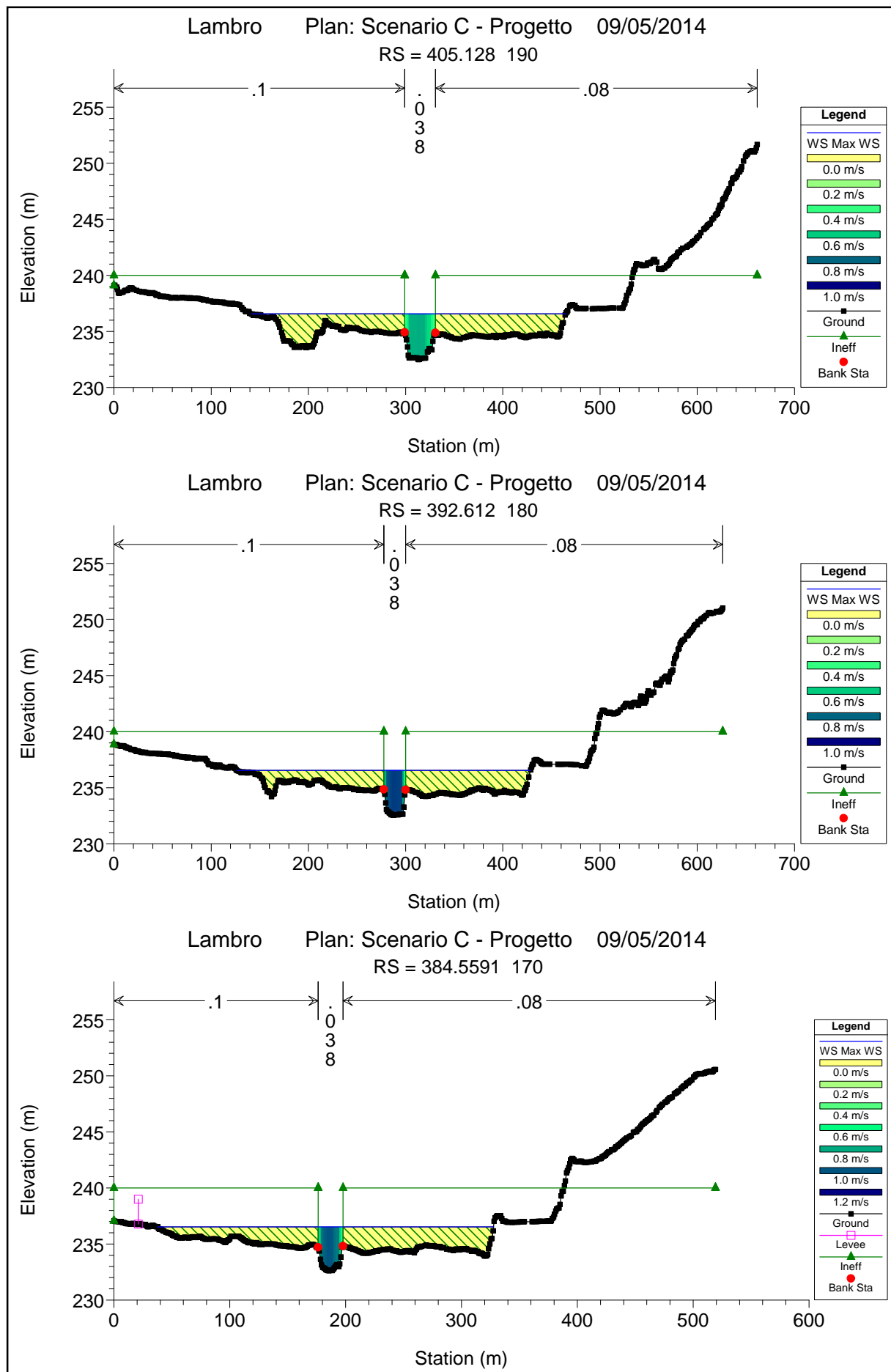


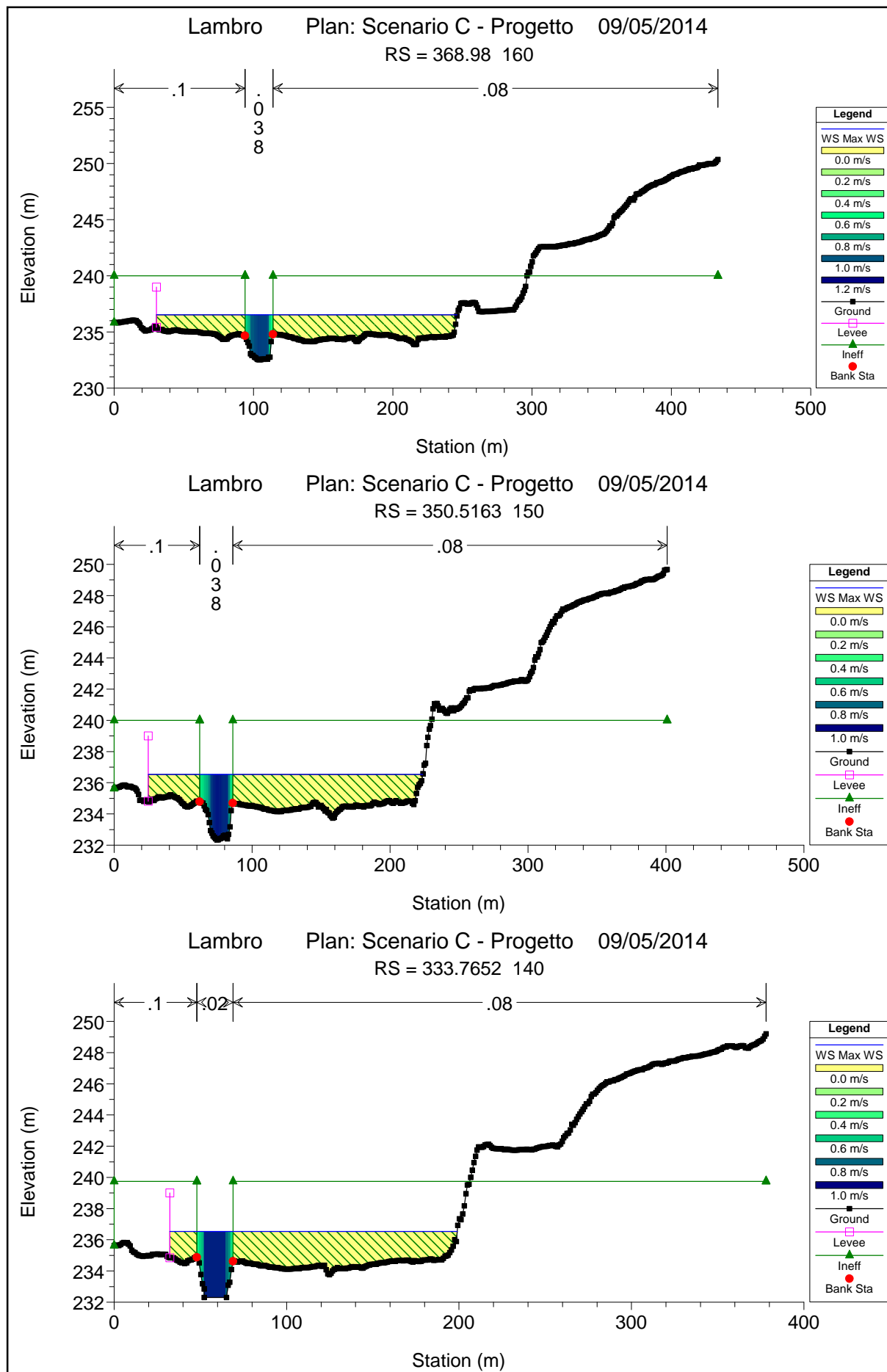


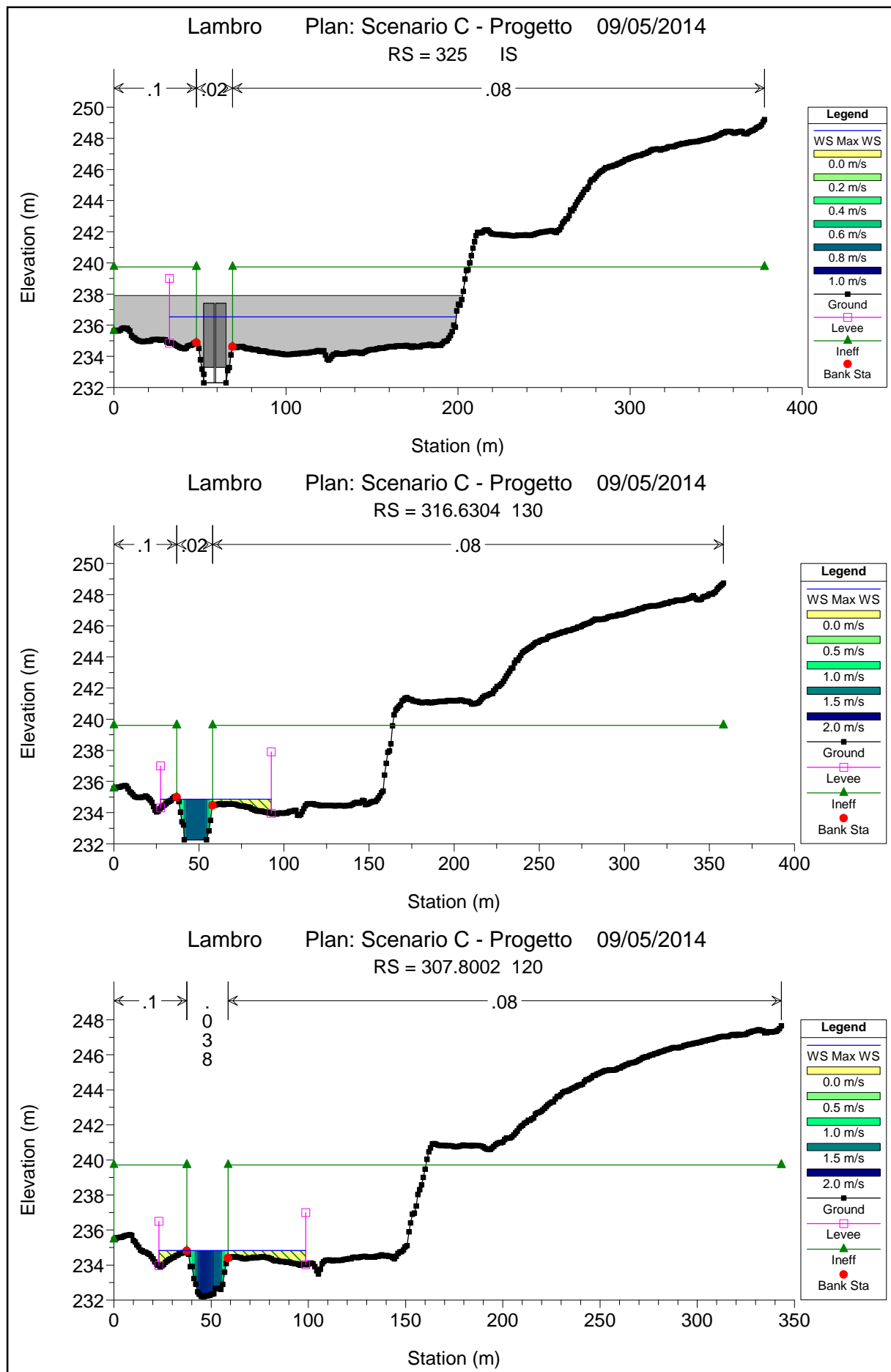


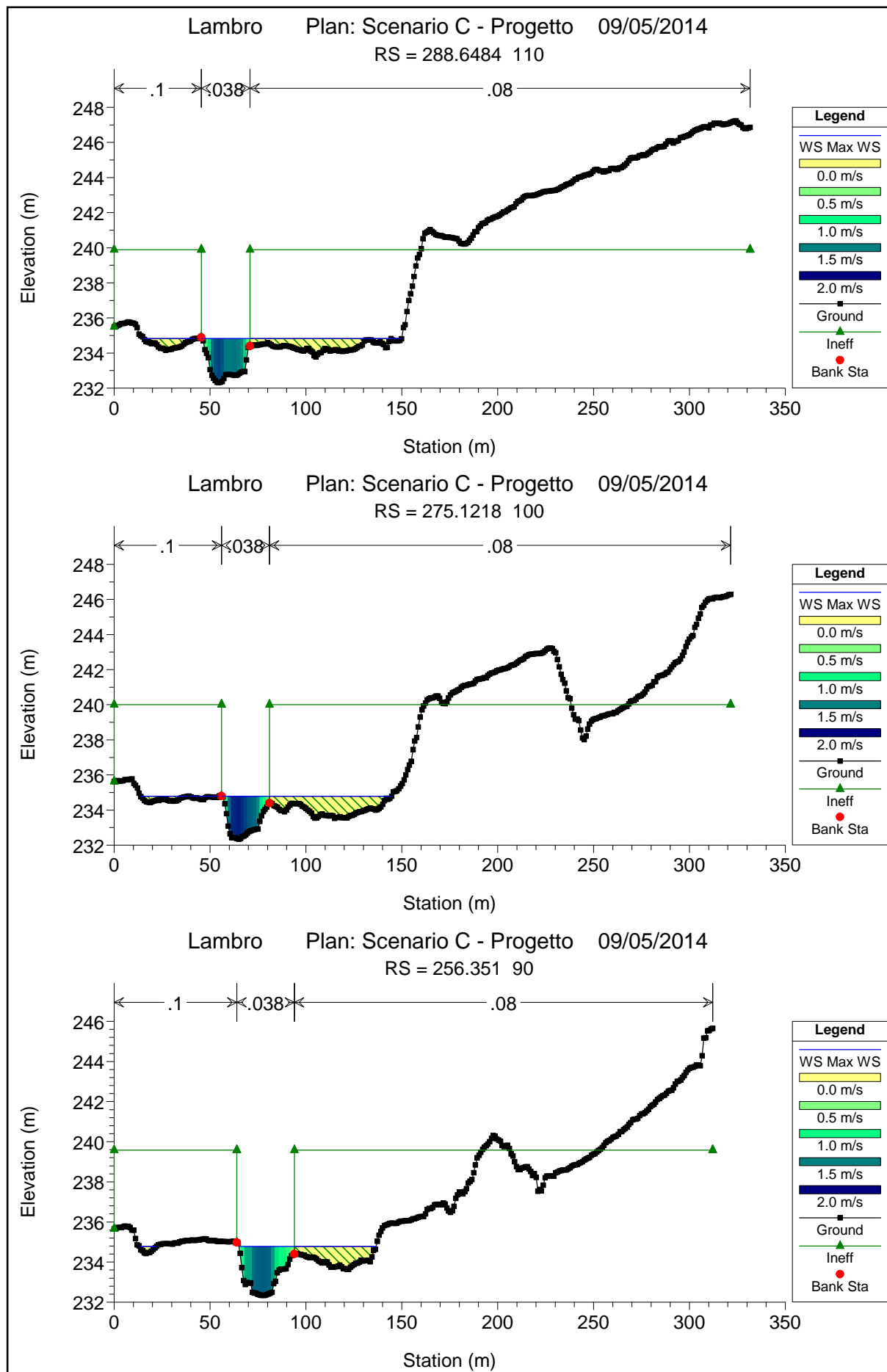


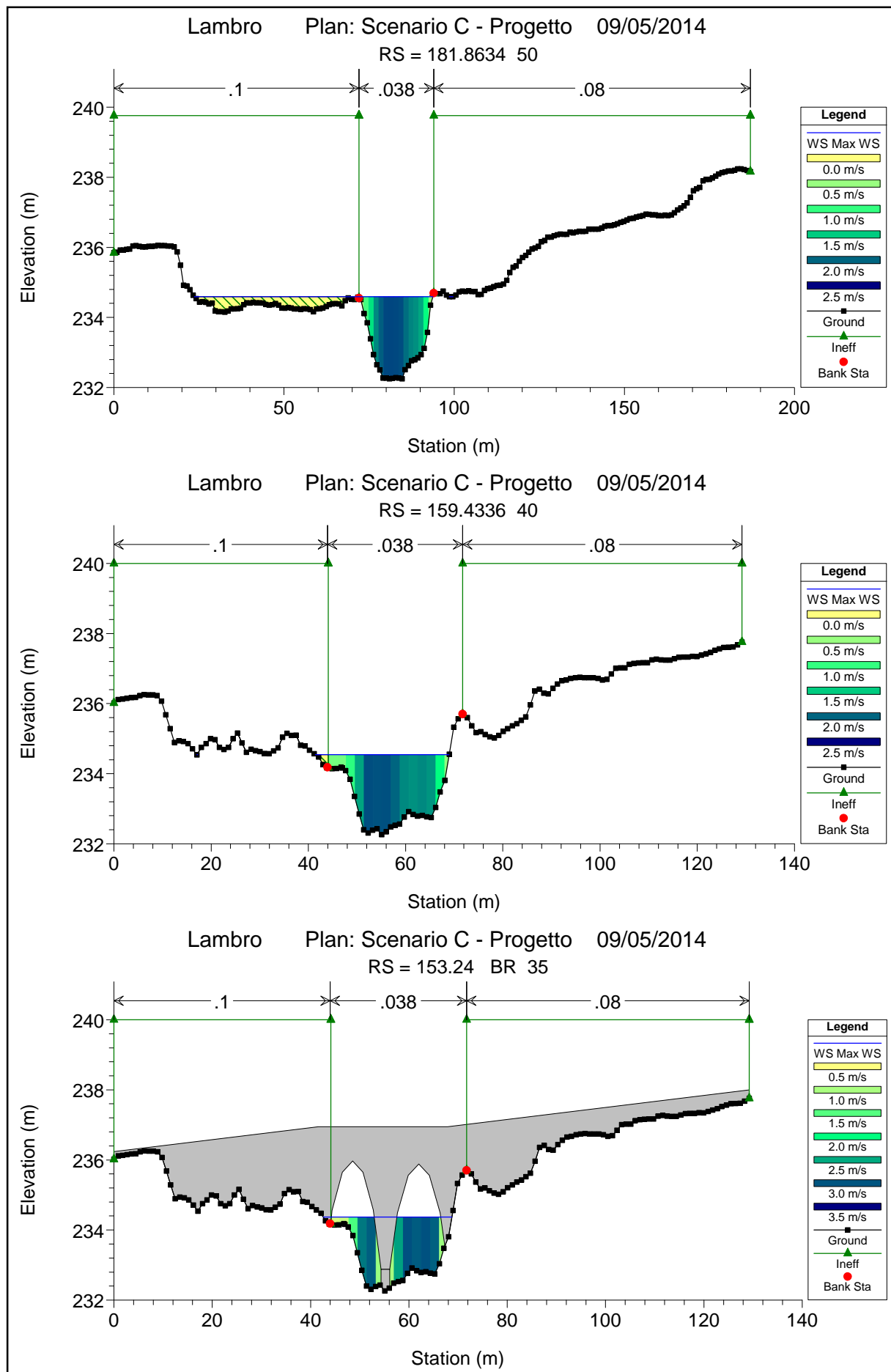


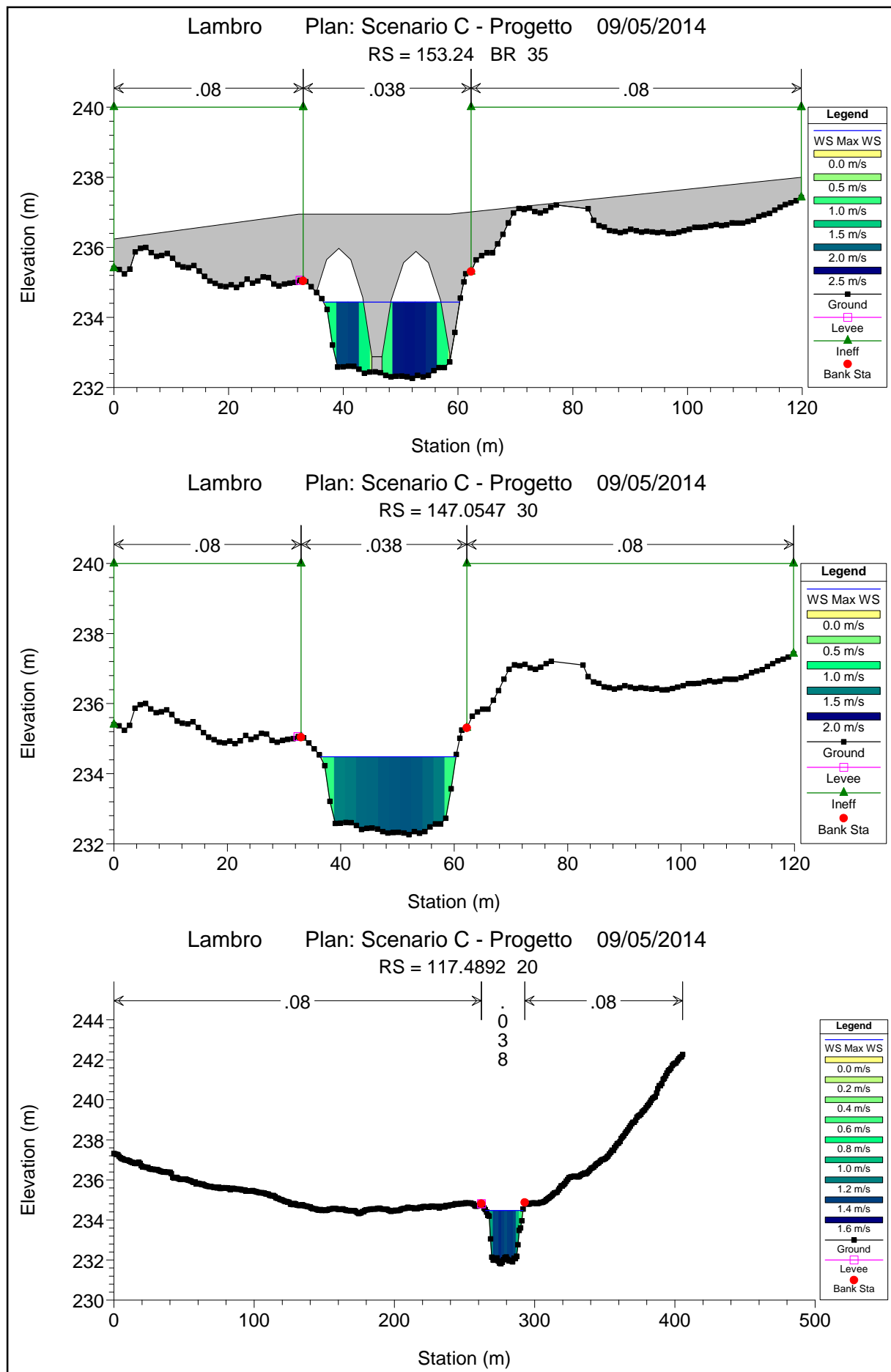


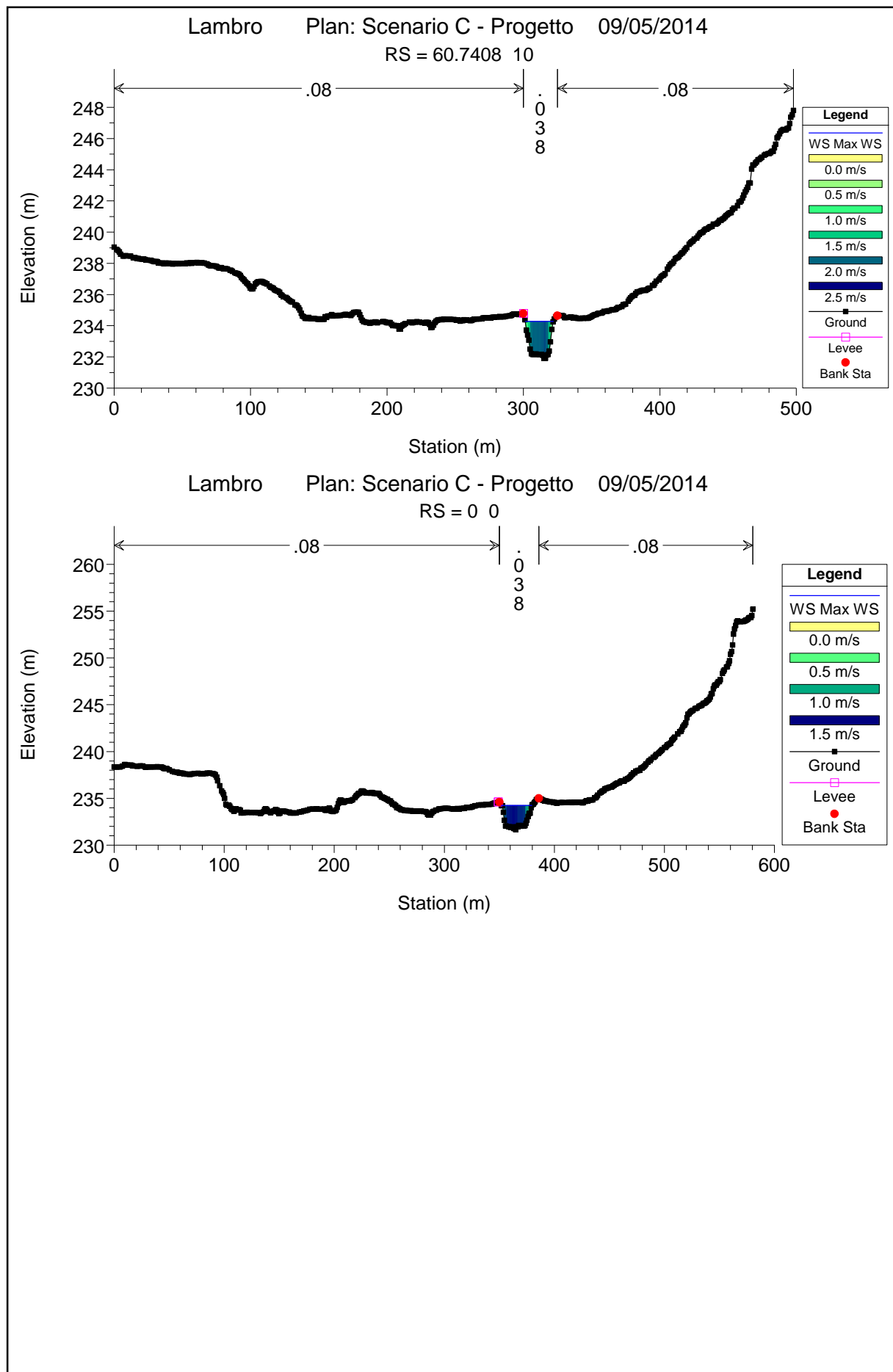














PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo



ALLEGATO 4

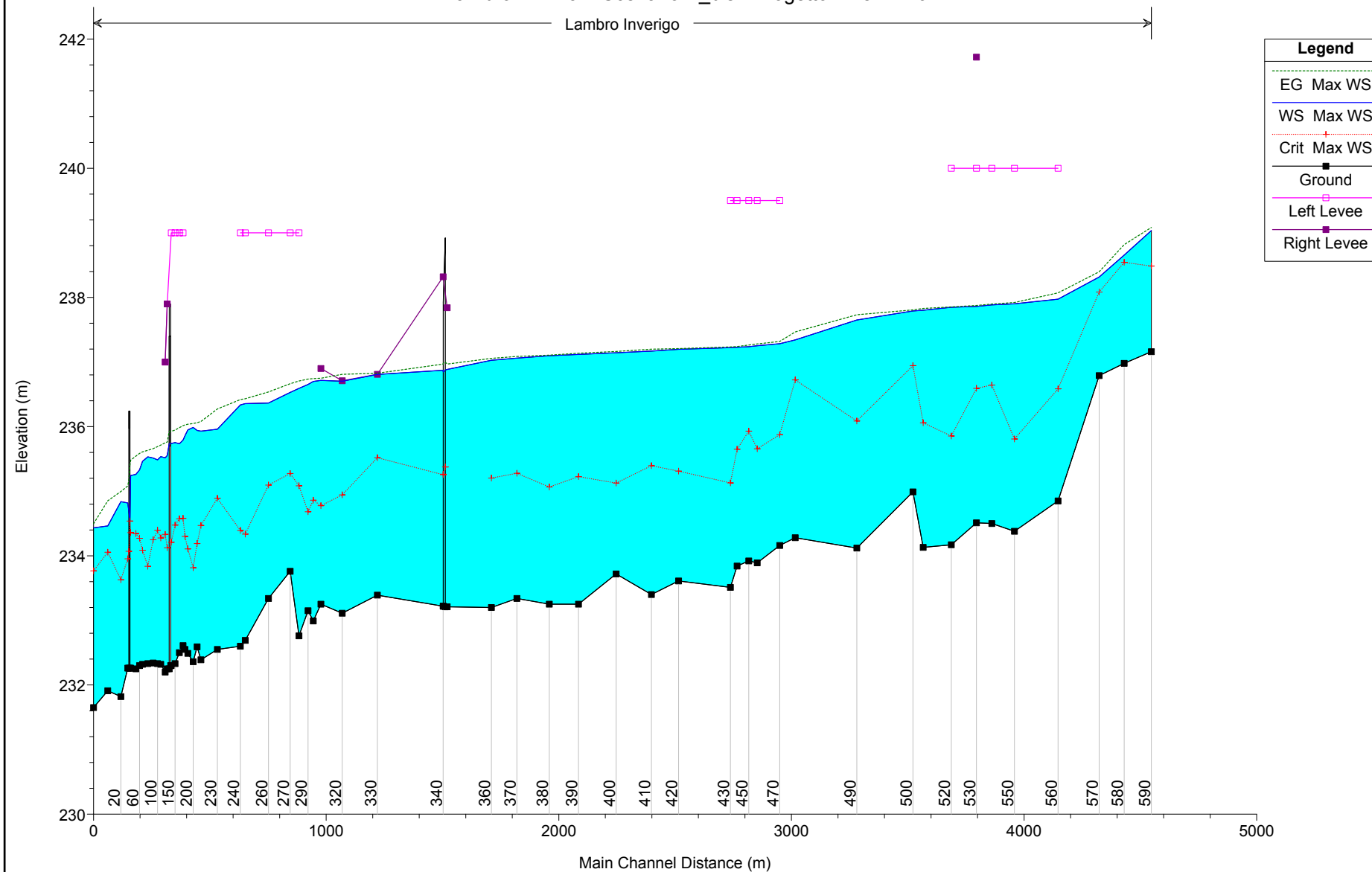
– Risultati simulazione idraulica: scenario B_bis – Portate attuali con C. Diotti e Inverigo

HEC-RAS Plan: B_bis - Progetto River: Lambro Reach: Inverigo Profile: Max WS

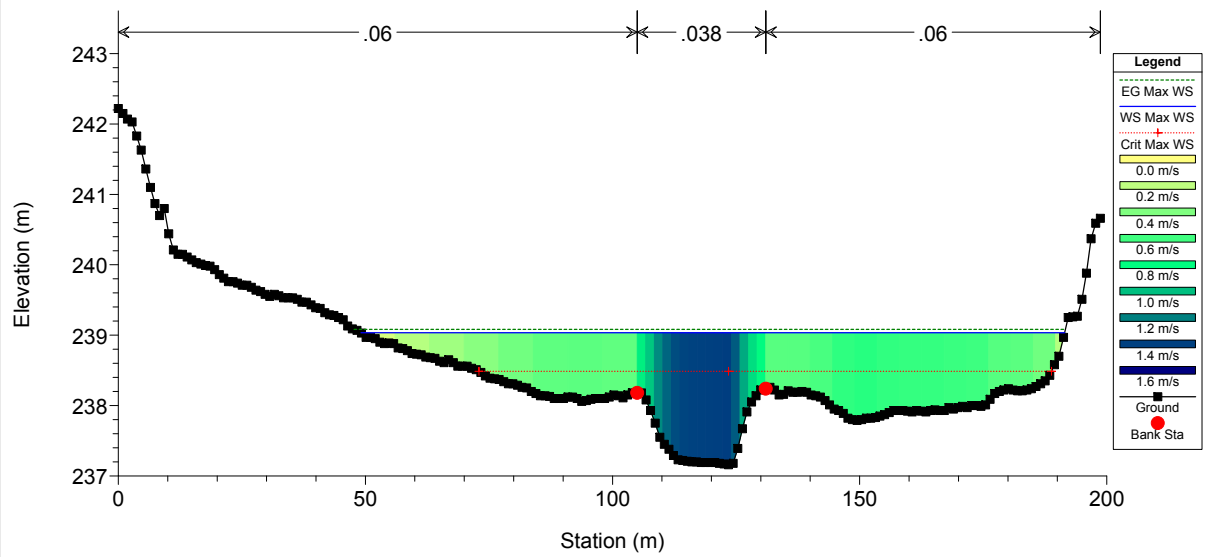
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Inverigo	4547.057 590	Max WS	99.00	237.16	239.03	238.49	239.08	0.001344	1.26	131.37	142.36	0.33
Inverigo	4430.646 580	Max WS	98.99	236.98	238.66	238.54	238.82	0.005470	2.11	74.26	131.93	0.63
Inverigo	4322.79 570	Max WS	99.23	236.79	238.32	238.08	238.40	0.003390	1.58	101.31	154.74	0.49
Inverigo	4146.27 560	Max WS	99.54	234.85	237.97	236.59	238.07	0.001331	1.52	105.40	143.69	0.33
Inverigo	3958.712 550	Max WS	99.74	234.38	237.90	235.81	237.92	0.000291	0.76	233.87	266.71	0.16
Inverigo	3861.219 540	Max WS	99.95	234.50	237.89	236.64	237.90	0.000277	0.74	315.09	308.34	0.15
Inverigo	3795.401 530	Max WS	100.21	234.51	237.86	236.59	237.88	0.000305	0.78	237.41	203.65	0.16
Inverigo	3687.068 520	Max WS	100.53	234.17	237.85	235.86	237.85	0.000072	0.40	313.67	303.58	0.08
Inverigo	3566.631 510	Max WS	100.84	234.13	237.80	236.06	237.83	0.000502	0.85	158.13	230.55	0.20
Inverigo	3522.358 500	Max WS	100.97	234.99	237.79	236.94	237.81	0.000474	0.78	216.84	277.43	0.19
Inverigo	3281.337 490	Max WS	101.17	234.12	237.65	236.09	237.73	0.000996	1.37	118.83	171.84	0.29
Inverigo	3016.292 480	Max WS	101.01	234.28	237.34	236.72	237.47	0.002052	1.82	118.22	187.58	0.41
Inverigo	2949.954 470	Max WS	101.17	234.16	237.28	235.87	237.32	0.000506	1.05	234.13	281.50	0.21
Inverigo	2852.912 460	Max WS	101.28	233.89	237.25	235.66	237.28	0.000418	0.92	265.64	274.24	0.19
Inverigo	2816.748 450	Max WS	101.37	233.92	237.24	235.93	237.26	0.000499	0.97	264.37	266.19	0.21
Inverigo	2766.457 440	Max WS	101.50	233.84	237.23	235.65	237.24	0.000227	0.68	359.38	291.64	0.14
Inverigo	2737.543 430	Max WS	101.59	233.51	237.22	235.13	237.23	0.000158	0.61	381.43	305.53	0.12
Inverigo	2514.769 420	Max WS	101.98	233.61	237.20	235.31	237.21	0.000165	0.66	390.50	284.61	0.12
Inverigo	2398.189 410	Max WS	102.14	233.40	237.17	235.39	237.20	0.000397	0.98	255.23	201.65	0.19
Inverigo	2246.646 400	Max WS	102.26	233.72	237.14	235.13	237.16	0.000230	0.73	261.63	203.87	0.15
Inverigo	2084.842 390	Max WS	102.50	233.25	237.12	235.23	237.14	0.000287	0.77	271.74	238.69	0.16
Inverigo	1959.351 380	Max WS	102.83	233.25	237.10	235.06	237.11	0.000134	0.61	402.39	276.62	0.11
Inverigo	1819.658 370	Max WS	103.13	233.34	237.06	235.28	237.09	0.000291	0.84	236.02	360.03	0.16
Inverigo	1710.393 360	Max WS	103.45	233.20	237.03	235.20	237.06	0.000314	0.93	226.14	301.89	0.17
Inverigo	1520.357 350	Max WS	103.86	233.21	236.88		236.97	0.000858	1.29	80.68	35.37	0.27
Inverigo	1511.685 345		Mult Open									
Inverigo	1503.015 340	Max WS	103.83	233.22	236.87	235.25	236.97	0.001025	1.37	75.65	34.75	0.30
Inverigo	1219.906 330	Max WS	104.16	233.39	236.81	235.52	236.83	0.000260	0.82	269.55	175.63	0.16
Inverigo	1068.842 320	Max WS	104.35	233.11	236.70	234.94	236.81	0.000741	1.46	77.14	90.93	0.27
Inverigo	977.0419 310	Max WS	104.54	233.25	236.72	234.77	236.75	0.000278	0.85	164.89	100.29	0.16
Inverigo	944.2654 300	Max WS	104.62	232.99	236.70	234.86	236.74	0.000397	1.06	155.31	190.07	0.20
Inverigo	921.7176 290	Max WS	104.66	233.15	236.65	234.68	236.74	0.000577	1.28	81.93	291.33	0.24
Inverigo	883.1097 280	Max WS	104.74	232.76	236.59	235.08	236.71	0.000954	1.50	70.04	277.78	0.30
Inverigo	844.9036 270	Max WS	104.81	233.76	236.53	235.27	236.66	0.001246	1.63	64.17	259.13	0.34
Inverigo	752.0323 260	Max WS	105.01	233.34	236.37	235.09	236.54	0.001502	1.83	57.26	298.48	0.37
Inverigo	652.2289 250	Max WS	105.18	232.69	236.36	234.33	236.43	0.000544	1.21	86.58	326.47	0.23
Inverigo	631.1052 240	Max WS	105.23	232.60	236.33	234.39	236.42	0.000623	1.28	82.10	348.76	0.24
Inverigo	532.0892 230	Max WS	105.09	232.55	235.96	234.89	236.27	0.002783	2.48	42.44	468.98	0.49
Inverigo	461.4436 220	Max WS	116.81	232.39	235.93	234.47	236.08	0.001259	1.71	68.15	433.69	0.34
Inverigo	444.964 210	Max WS	116.89	232.59	235.94	234.19	236.06	0.000868	1.53	76.25	421.87	0.29
Inverigo	428.3983 200	Max WS	116.97	232.36	235.99	233.81	236.05	0.000409	1.10	106.73	366.45	0.20
Inverigo	405.128 190	Max WS	117.10	232.49	235.95	234.11	236.04	0.000658	1.31	89.14	293.93	0.25
Inverigo	392.612 180	Max WS	117.19	232.55	235.86	234.30	236.03	0.001254	1.82	64.56	274.64	0.34
Inverigo	384.5591 170	Max WS	117.25	232.61	235.79	234.58	236.01	0.001855	2.09	56.21	276.01	0.41
Inverigo	368.98 160	Max WS	117.38	232.50	235.73	234.57	235.98	0.002097	2.21	53.07	214.79	0.43
Inverigo	350.5163 150	Max WS	117.53	232.33	235.75	234.47	235.95	0.001719	1.95	60.21	195.55	0.39
Inverigo	333.7652 140	Max WS	117.66	232.30	235.74	234.21	235.93	0.000406	1.94	60.78	164.61	0.36
Inverigo	325		Inl Struct									
Inverigo	316.6304 130	Max WS	117.66	232.25	235.55	234.12	235.76	0.000468	2.02	58.23	65.12	0.39
Inverigo	307.8002 120	Max WS	117.74	232.20	235.52	234.33	235.75	0.001986	2.14	55.10	75.50	0.42
Inverigo	288.6484 110	Max WS	117.84	232.32	235.54	234.28	235.71	0.001599	1.88	62.79	140.74	0.38
Inverigo	275.1218 100	Max WS	117.92	232.33	235.49	234.40	235.69	0.001939	2.00	58.83	139.55	0.42
Inverigo	256.351 90	Max WS	118.00	232.34	235.51	234.25	235.66	0.001390	1.69	69.93	128.67	0.35
Inverigo	233.2564 80	Max WS	118.07	232.33	235.53	233.84	235.63	0.000783	1.41	83.82	126.23	0.27
Inverigo	210.6123 70	Max WS	118.19	232.32	235.46	234.09	235.61	0.001357	1.69	69.76	117.82	0.35
Inverigo	197.713 60	Max WS	118.31	232.30	235.33	234.27	235.59	0.002577	2.24	52.81	102.72	0.47
Inverigo	181.8634 50	Max WS	118.44	232.25	235.26	234.34	235.54	0.002811	2.35	50.30	96.34	0.50
Inverigo	159.4336 40	Max WS	118.59	232.26	235.24	234.36	235.48	0.002634	2.17	54.68	64.38	0.47
Inverigo	153.24 35		Bridge									
Inverigo	147.0547 30	Max WS	118.54	232.26	234.82	233.95	235.08	0.003197	2.27	52.16	26.03	0.51
Inverigo	117.4892 20	Max WS	118.79	231.82	234.84	233.63	235.00	0.001996	1.81	93.07	167.70	0.41
Inverigo	60.7408 10	Max WS	119.25	231.91	234.46	234.06	234.85	0.005682	2.85	59.00	119.62	0.67
Inverigo	0 0	Max WS	119.25	231.65	234.43	233.77	234.50	0.001239	1.37	182.56	223.88	0.32

Lambro Plan: Scenario B_bis - Progetto 18/11/2014

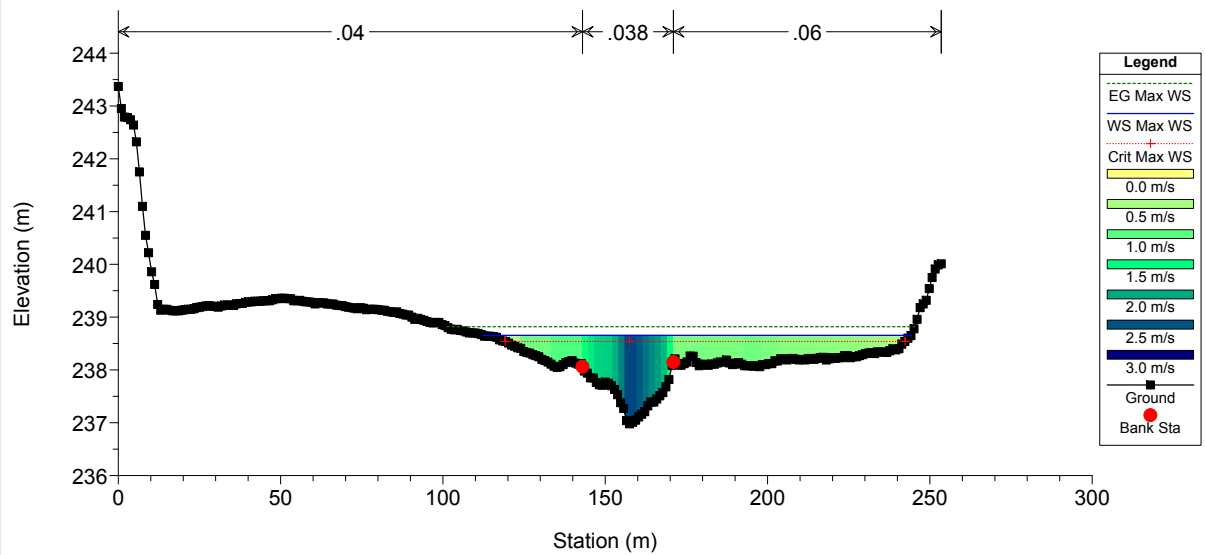
Lambro Inverigo



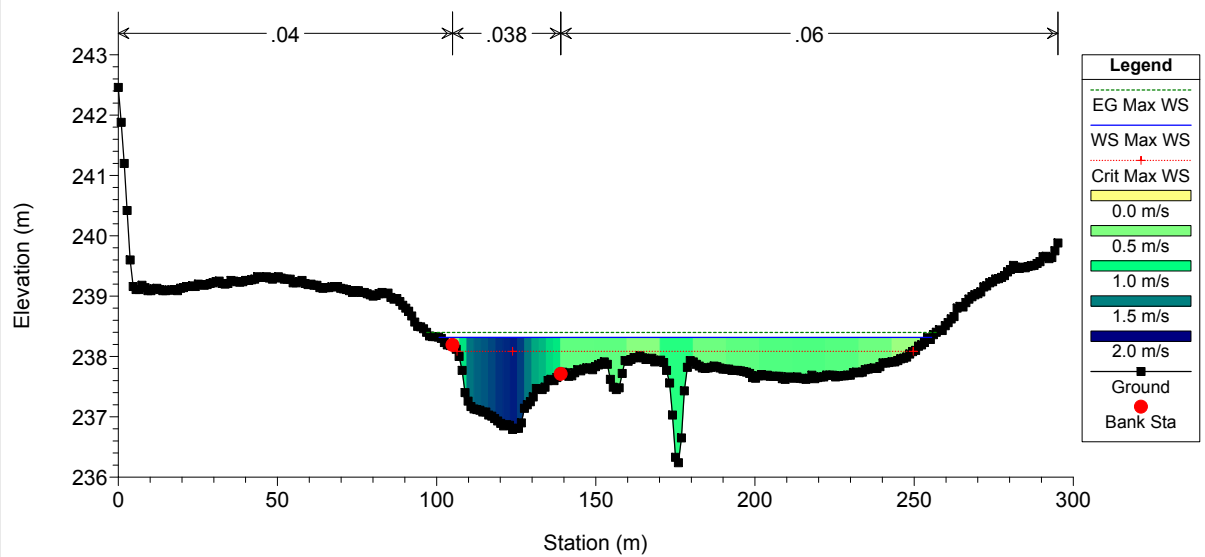
Lambro Plan: Scenario B_bis - Progetto 18/11/2014

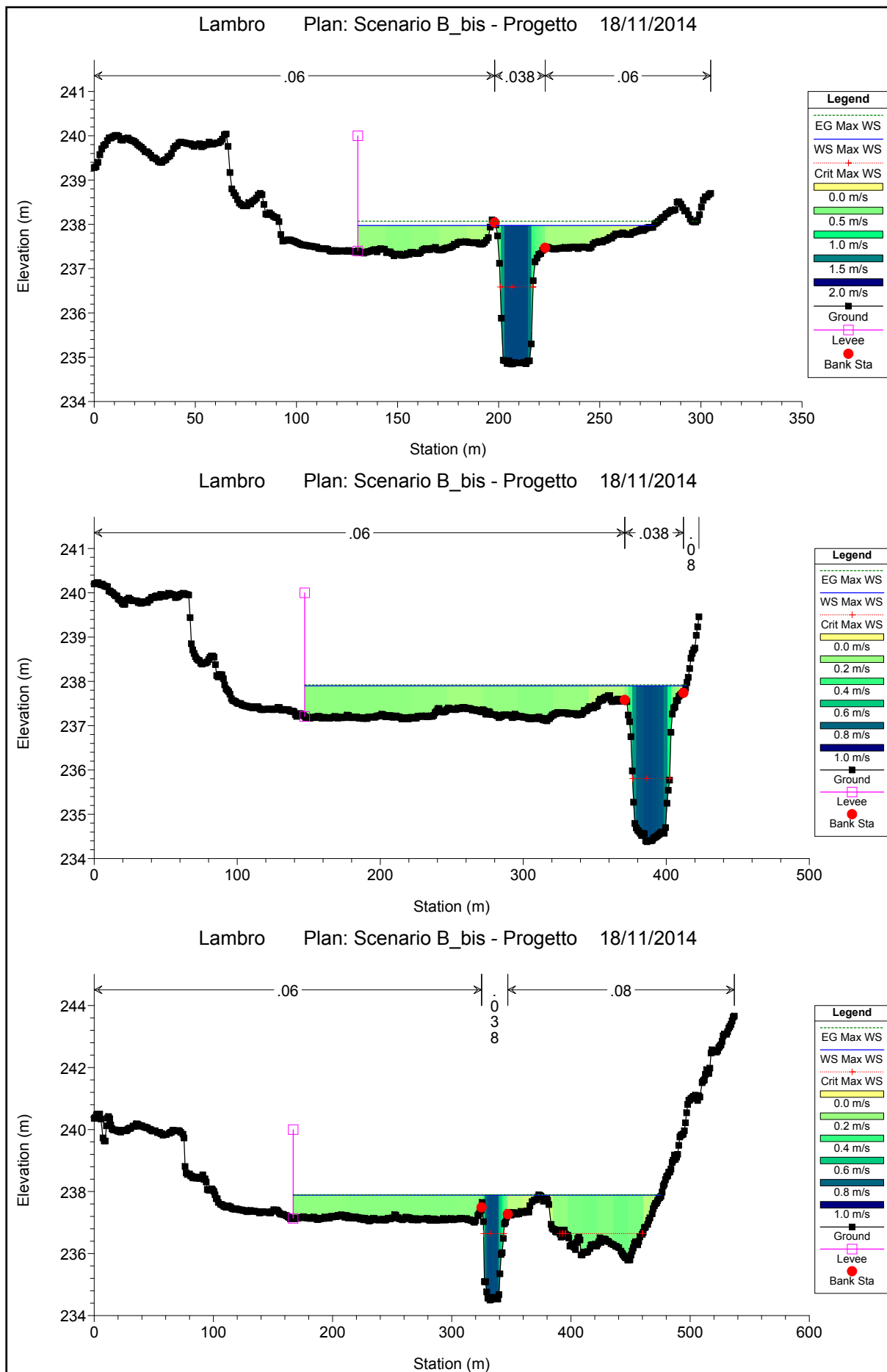


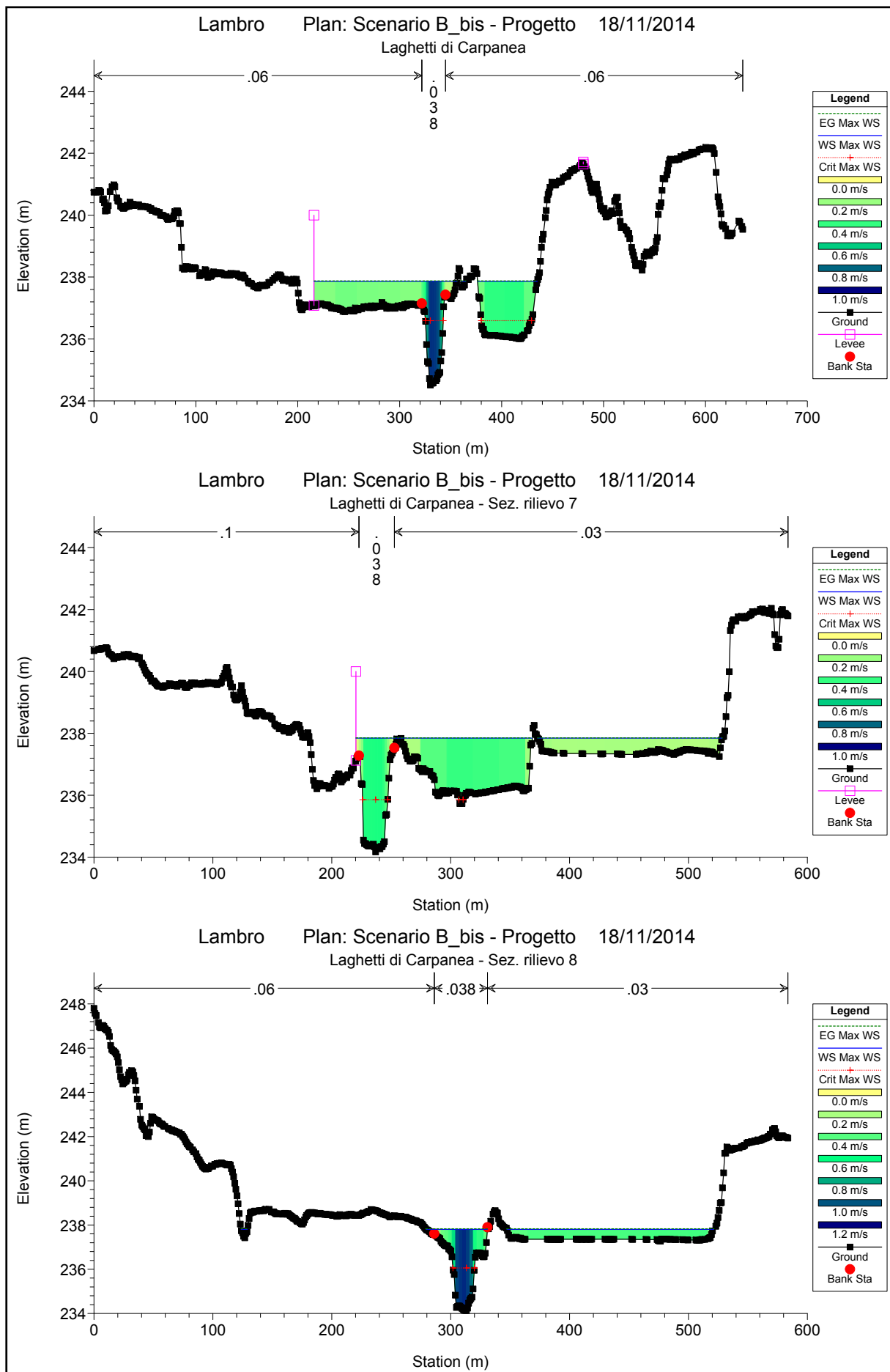
Lambro Plan: Scenario B_bis - Progetto 18/11/2014

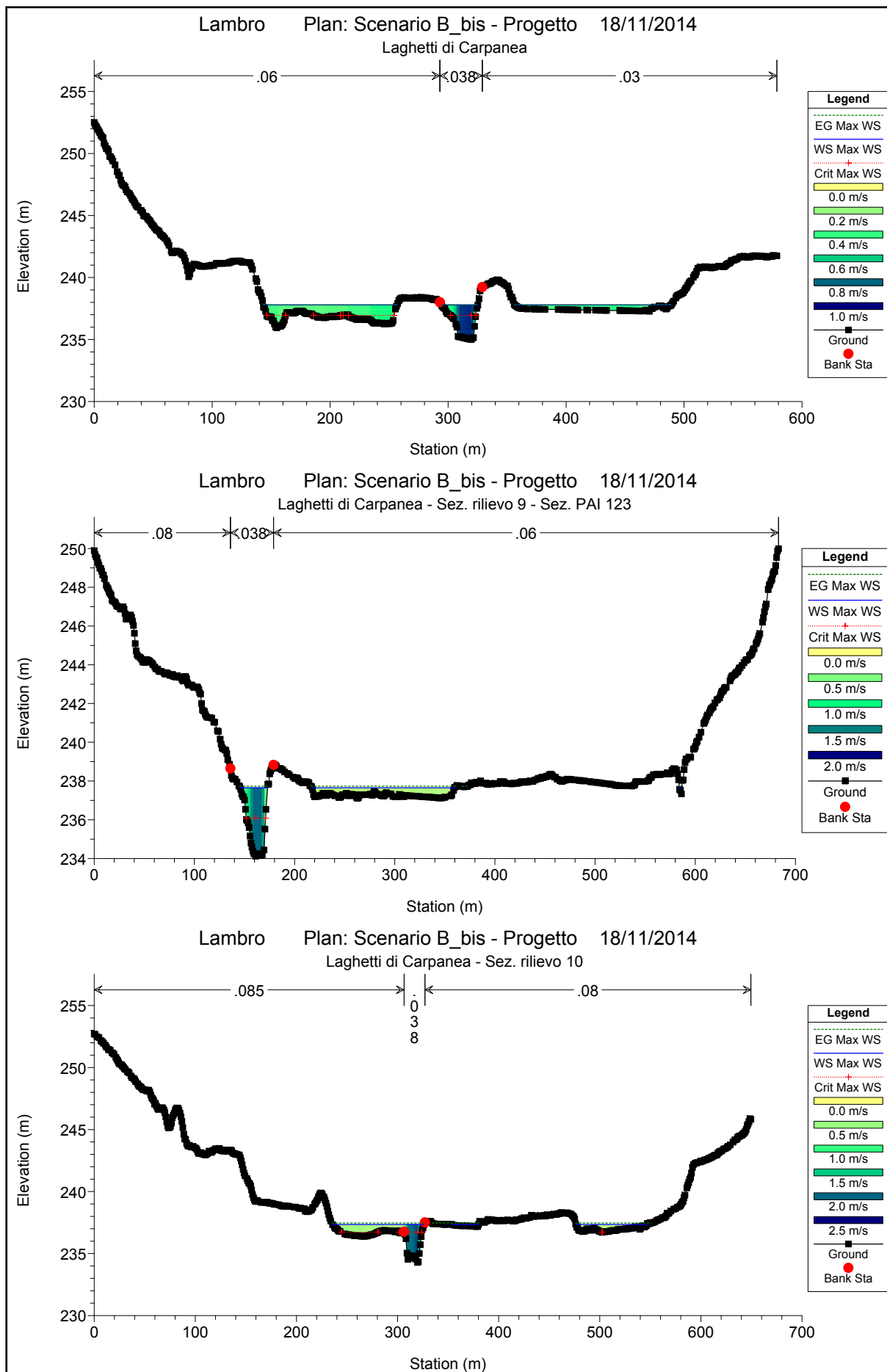


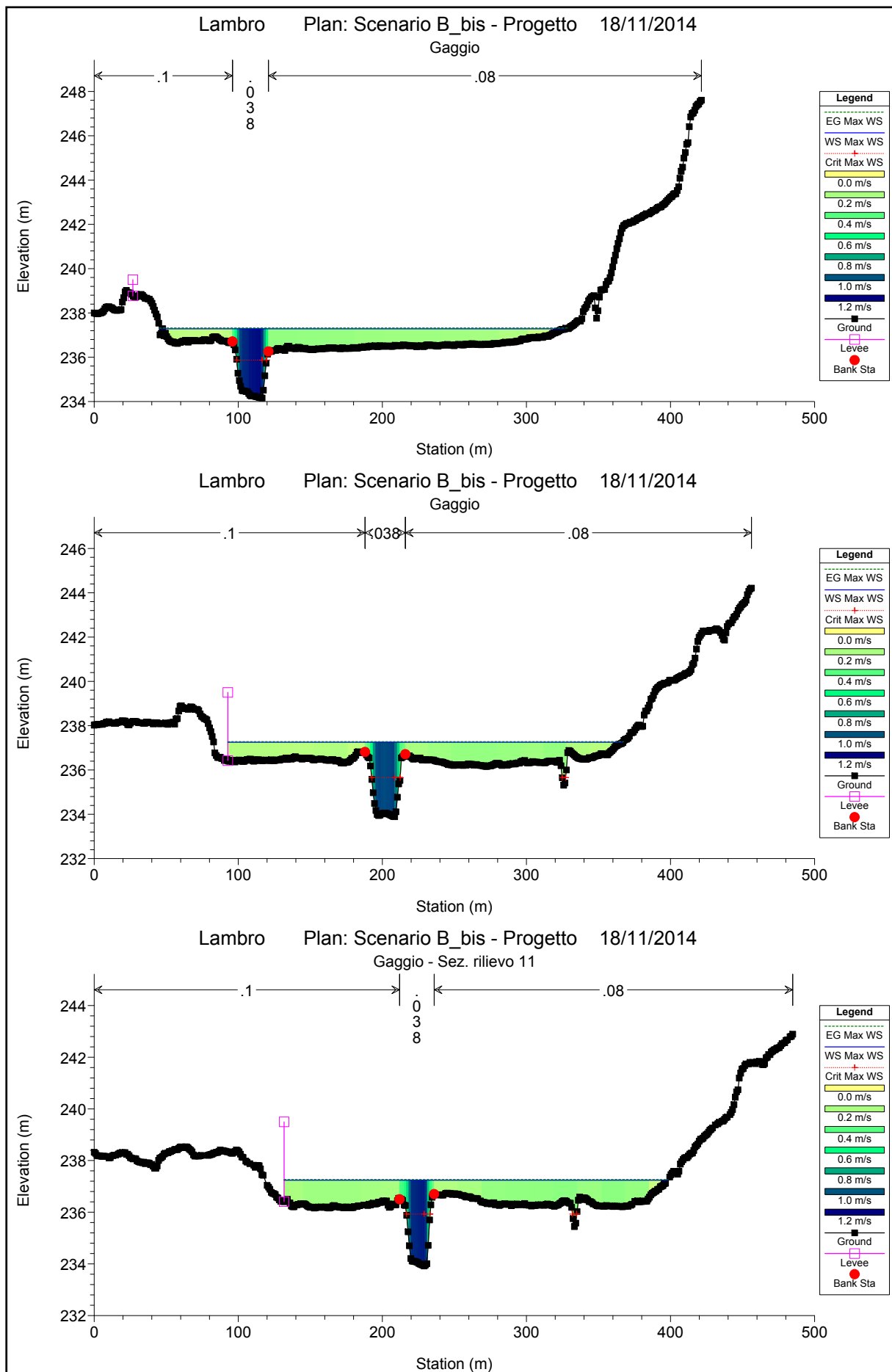
Lambro Plan: Scenario B_bis - Progetto 18/11/2014

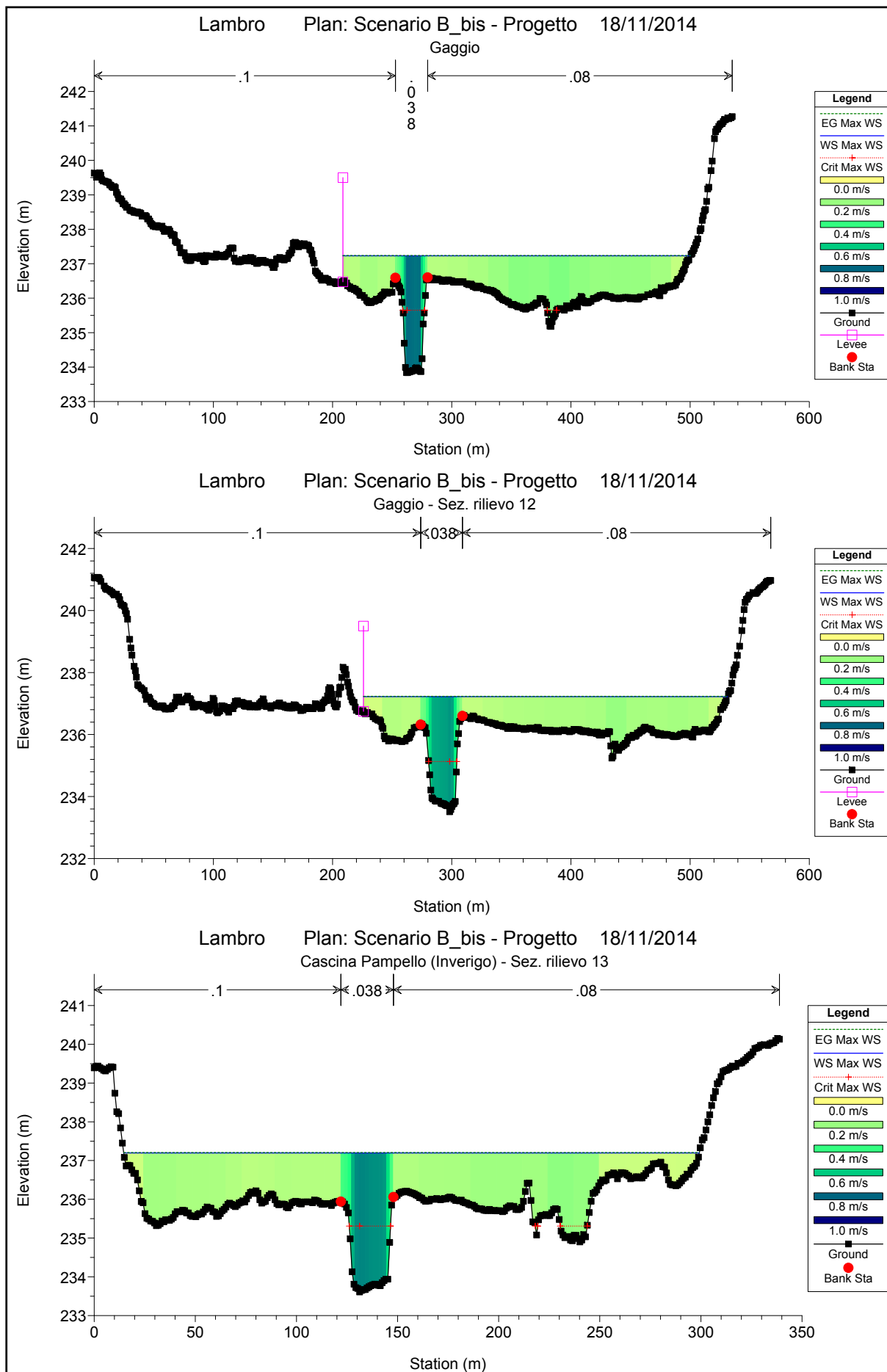


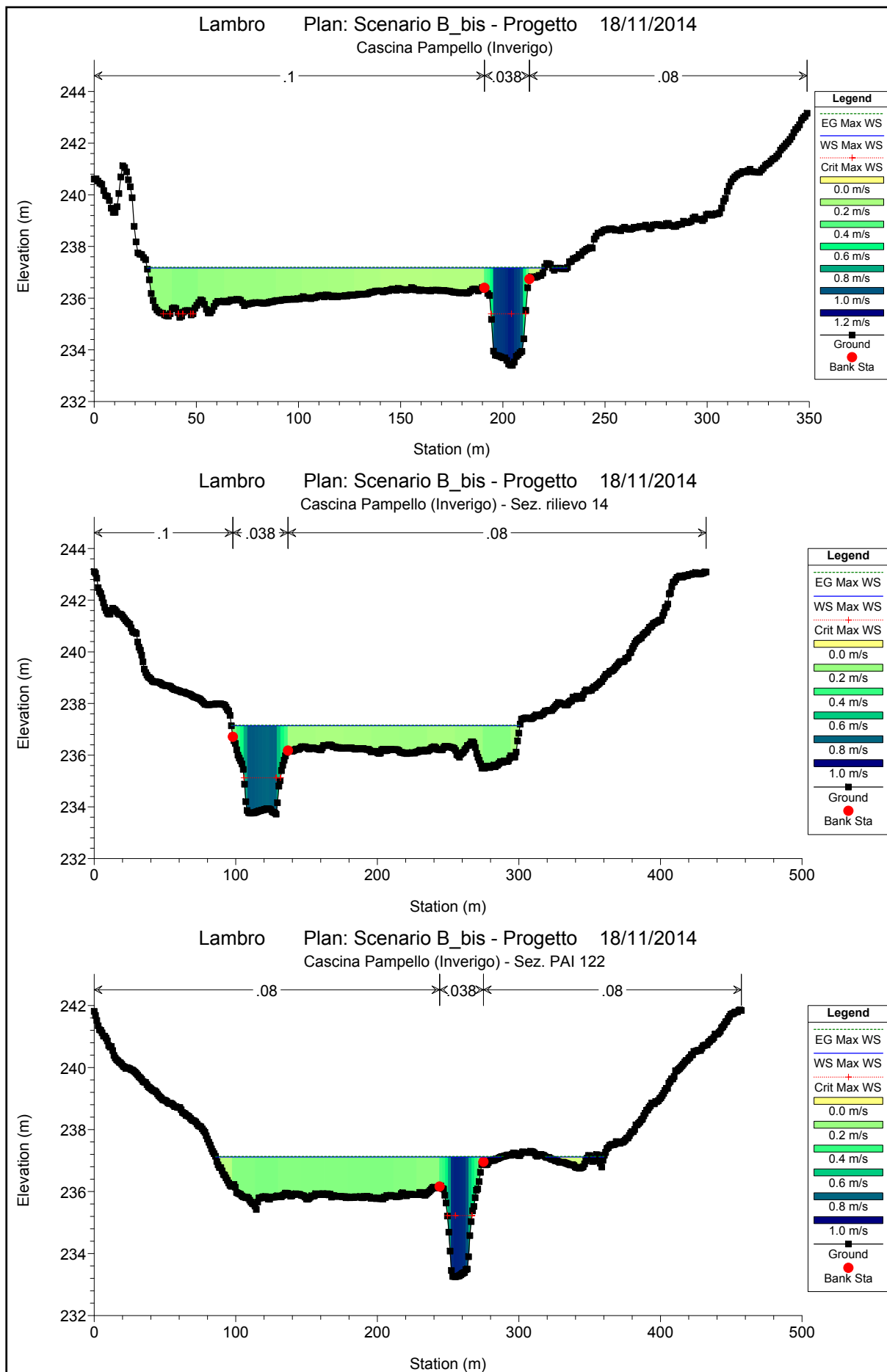


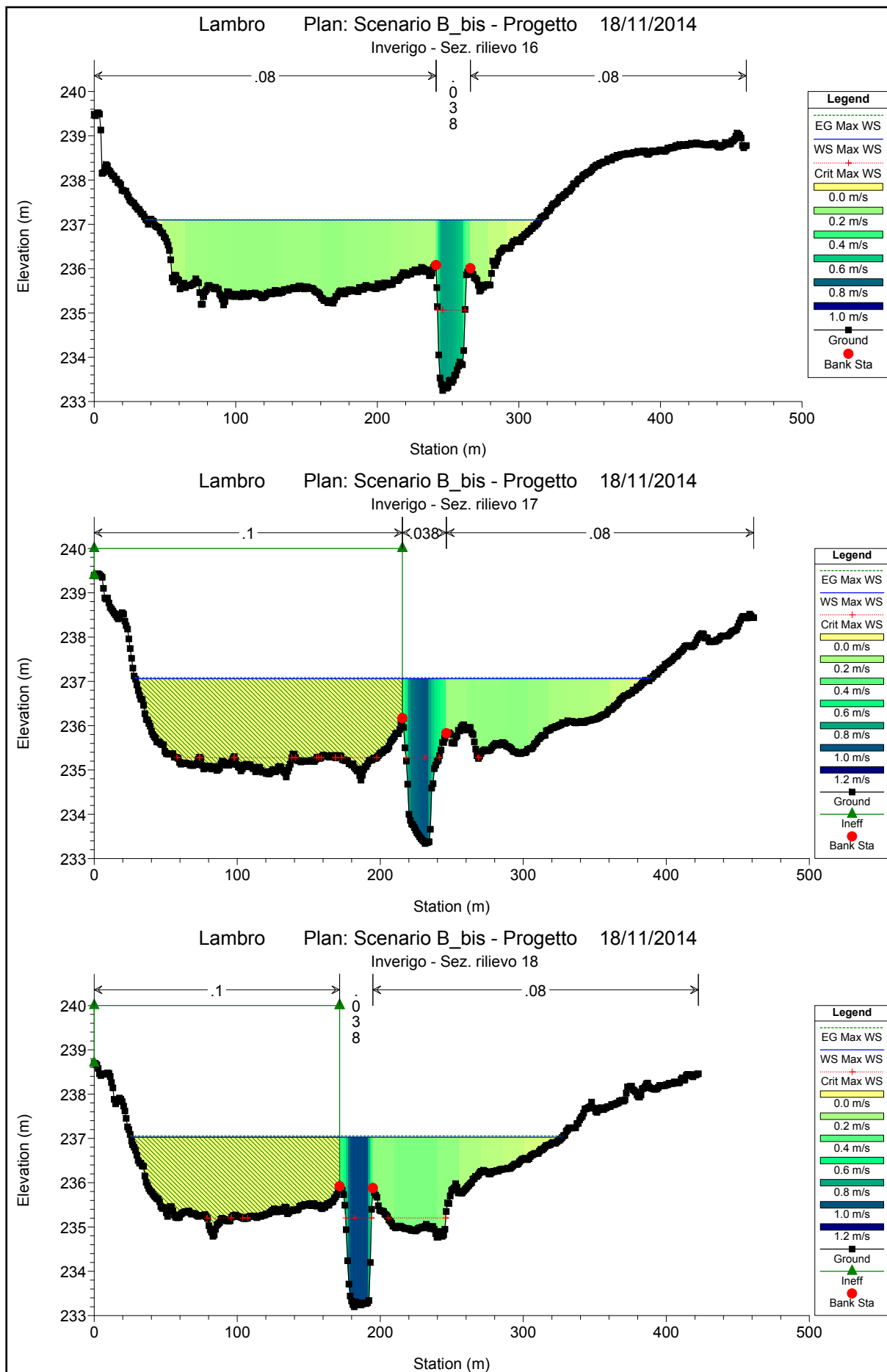


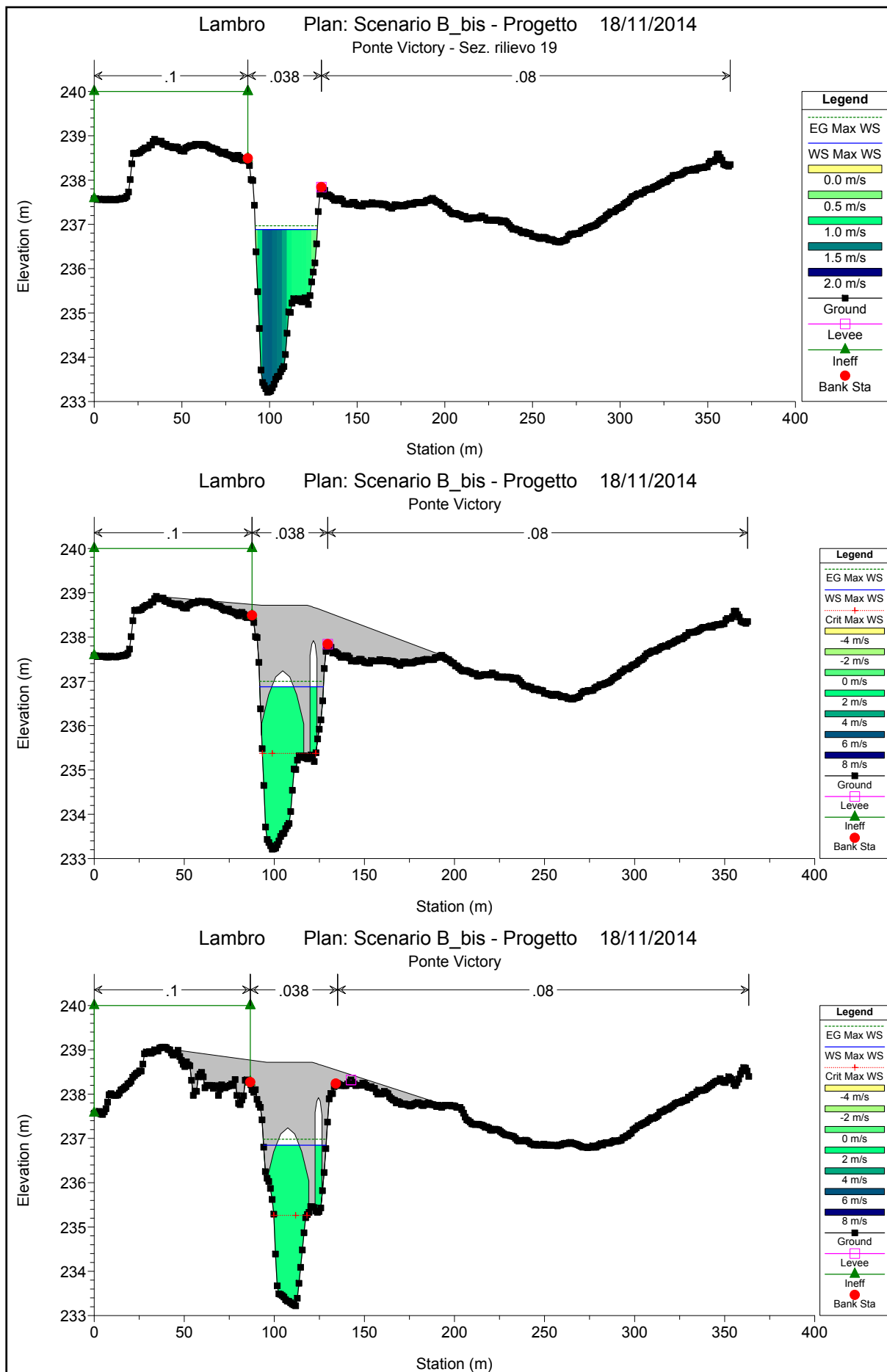


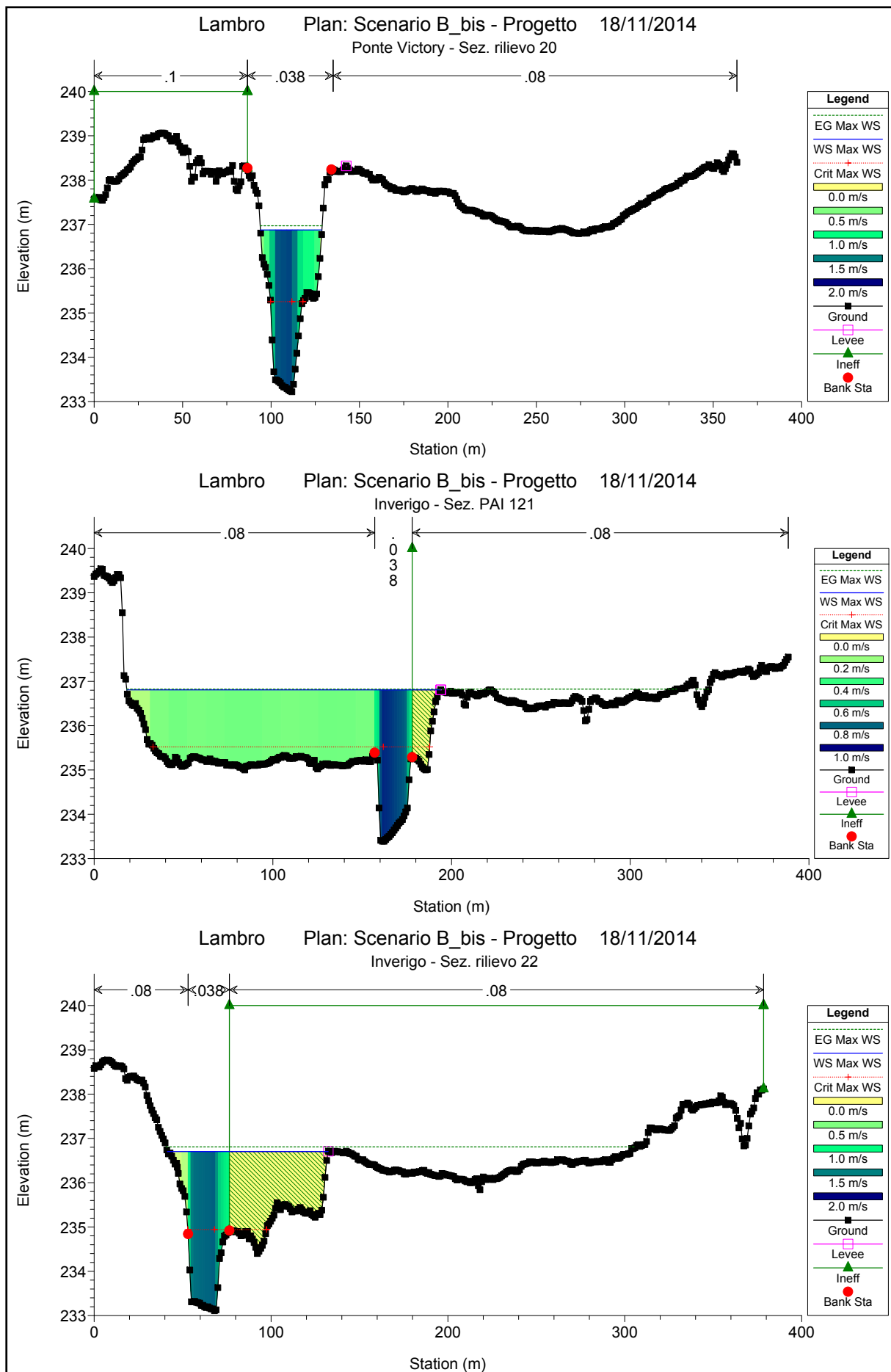


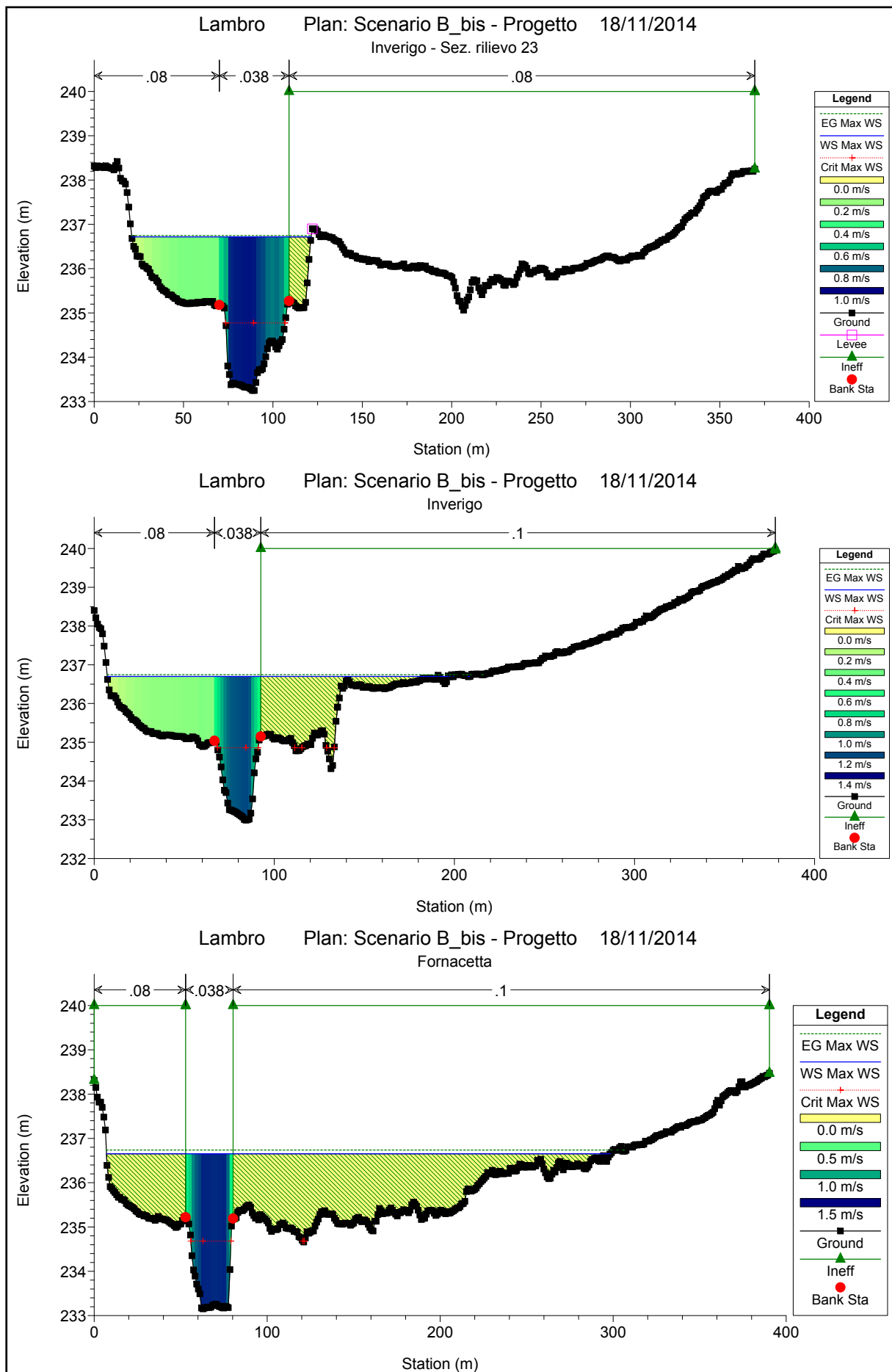


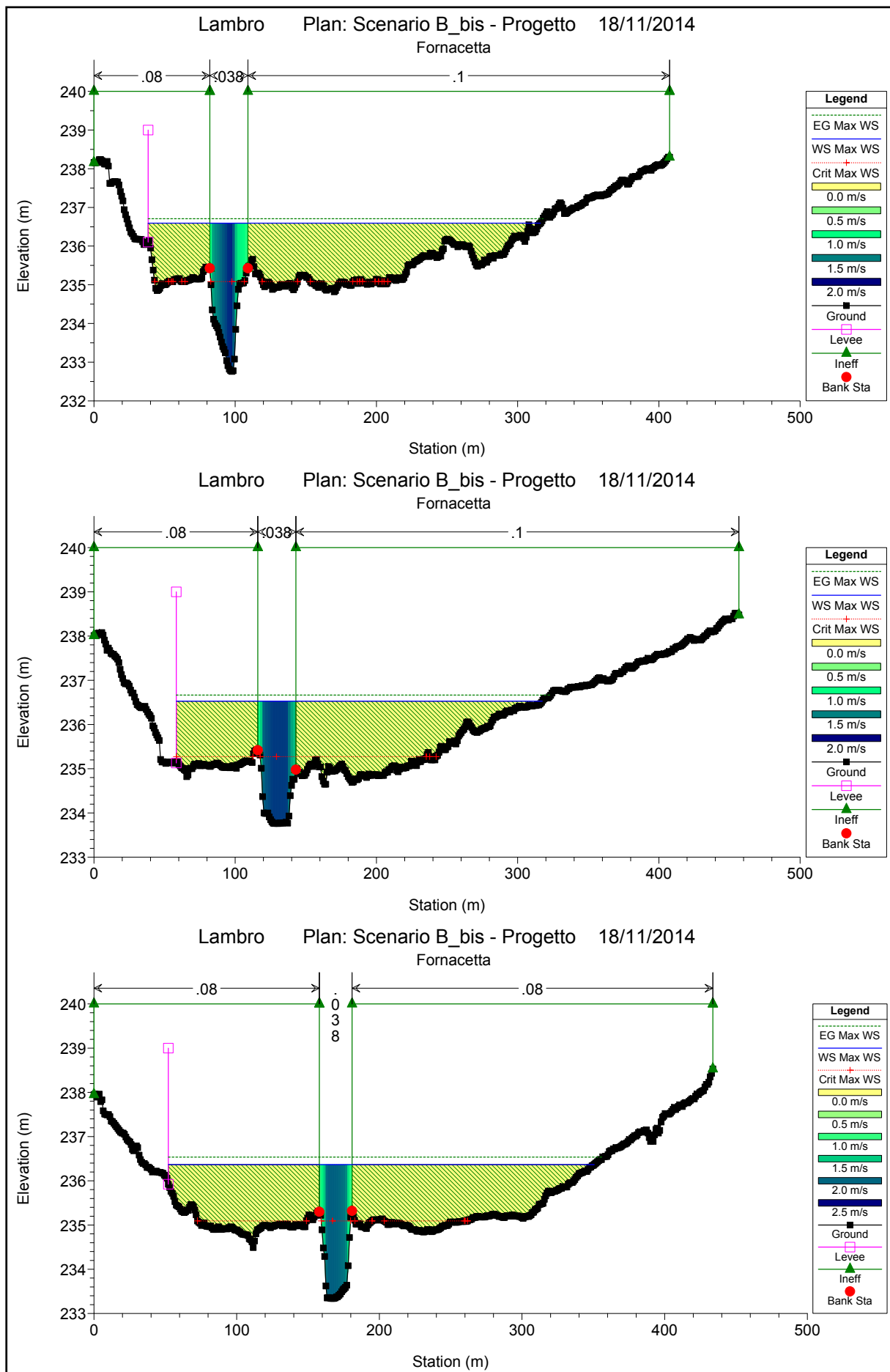


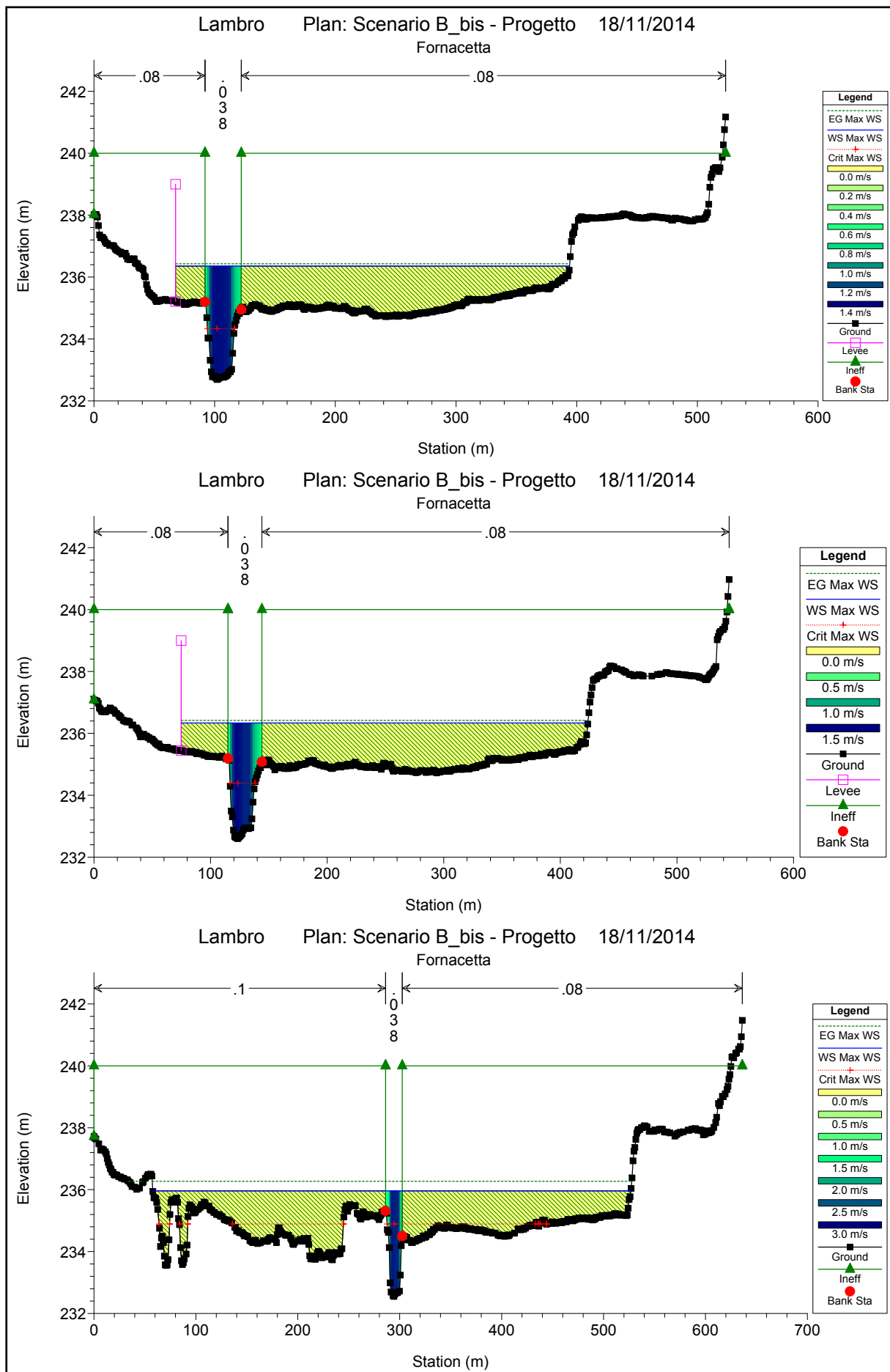


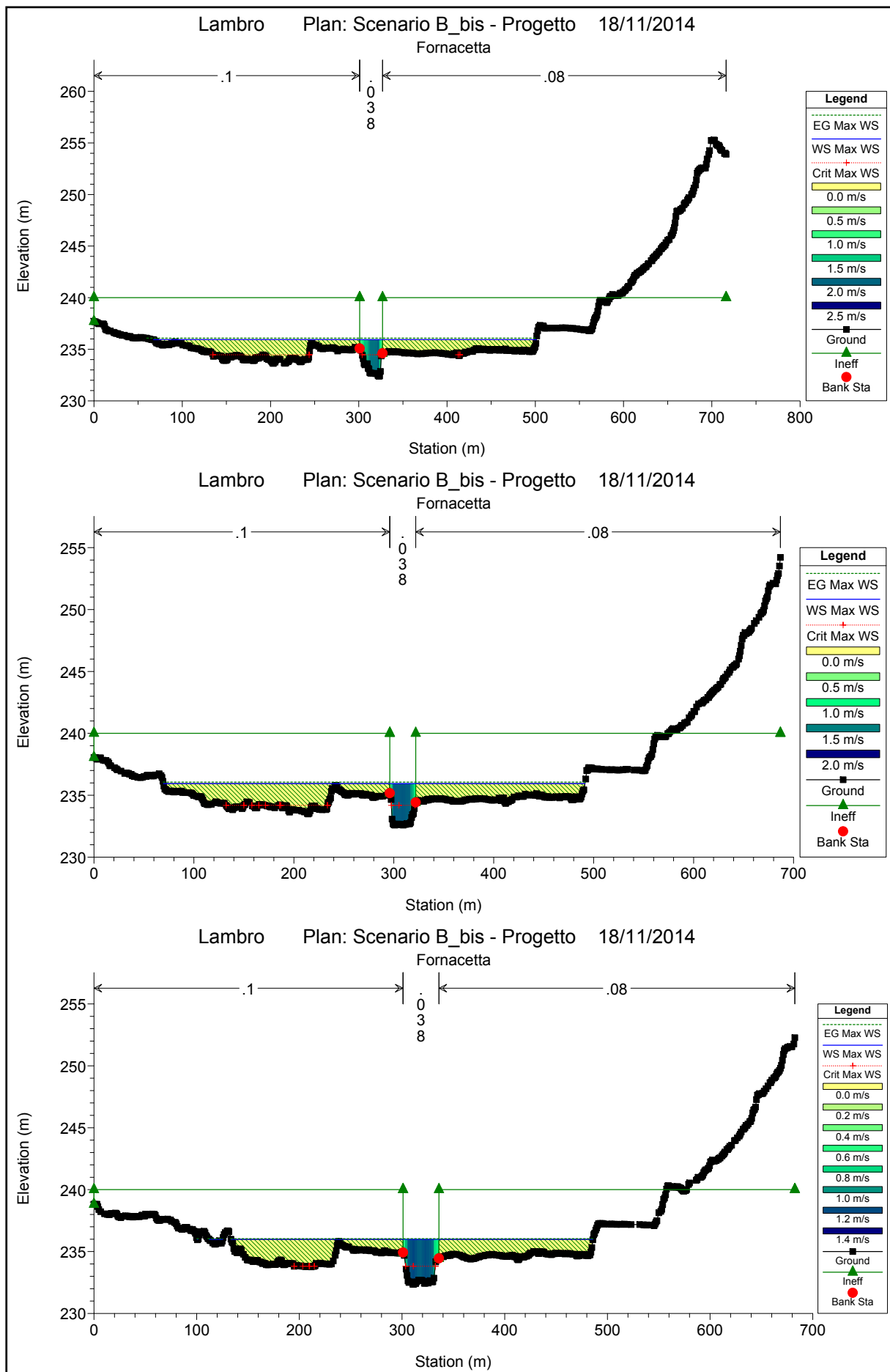


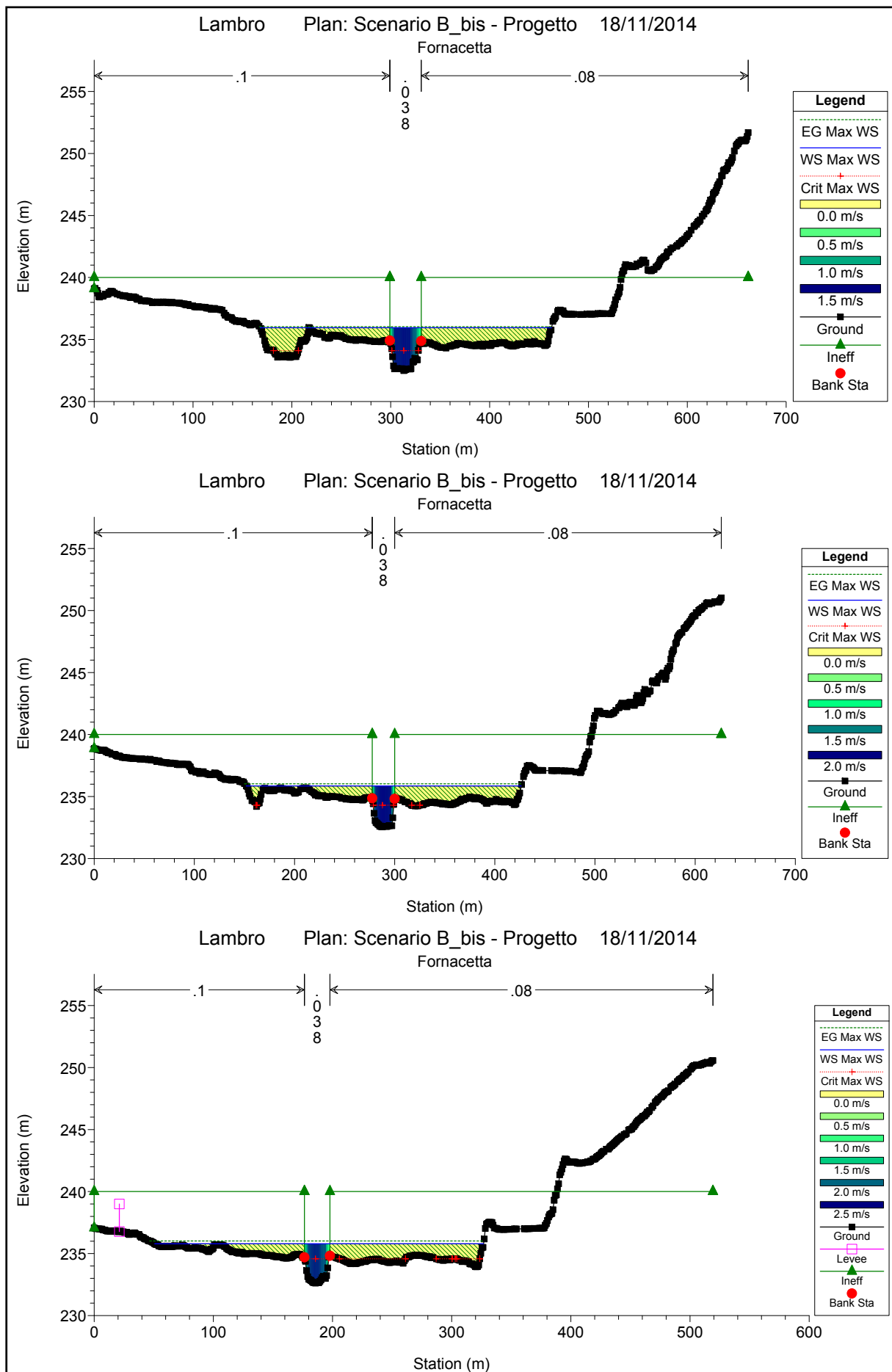


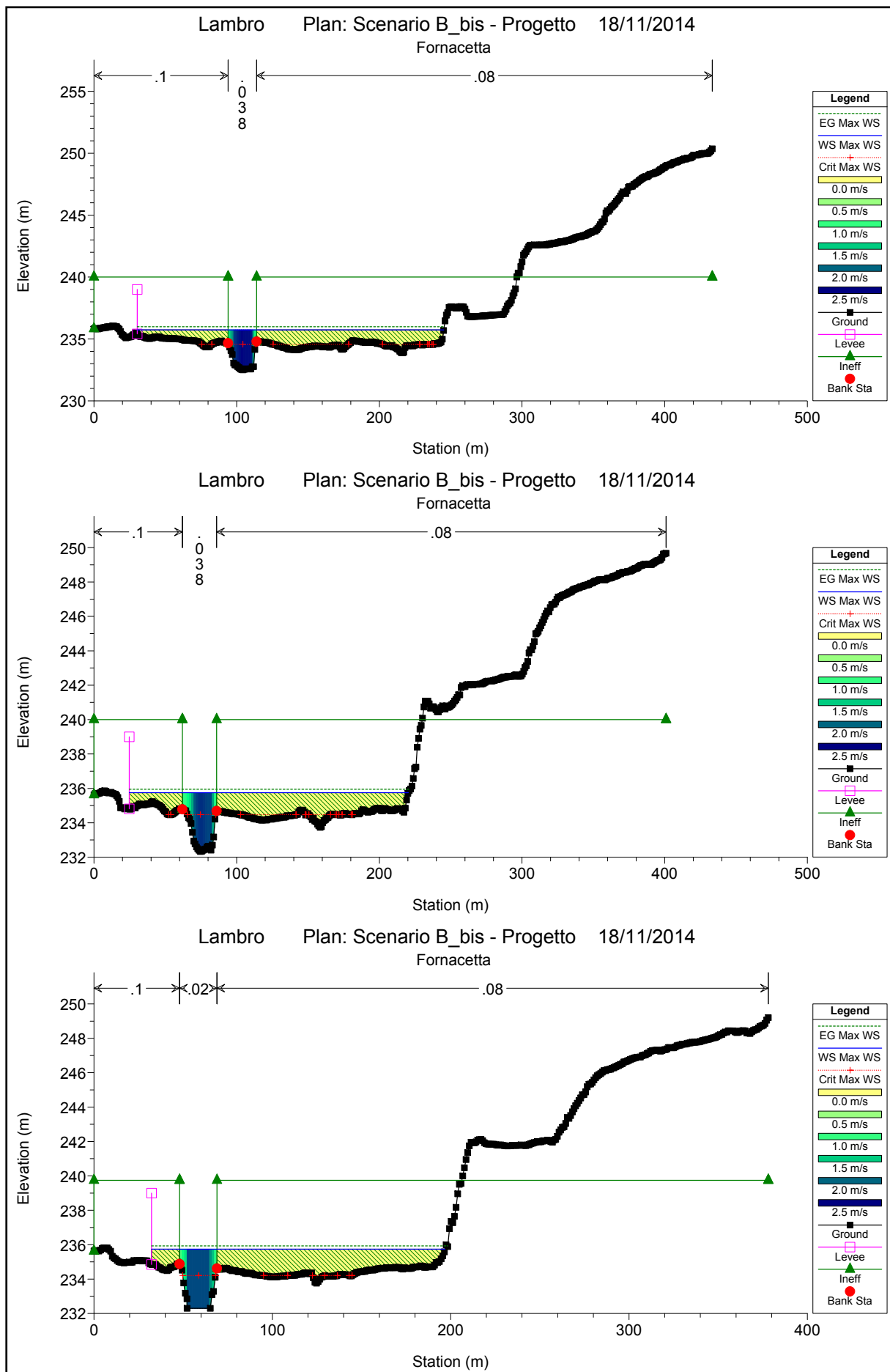


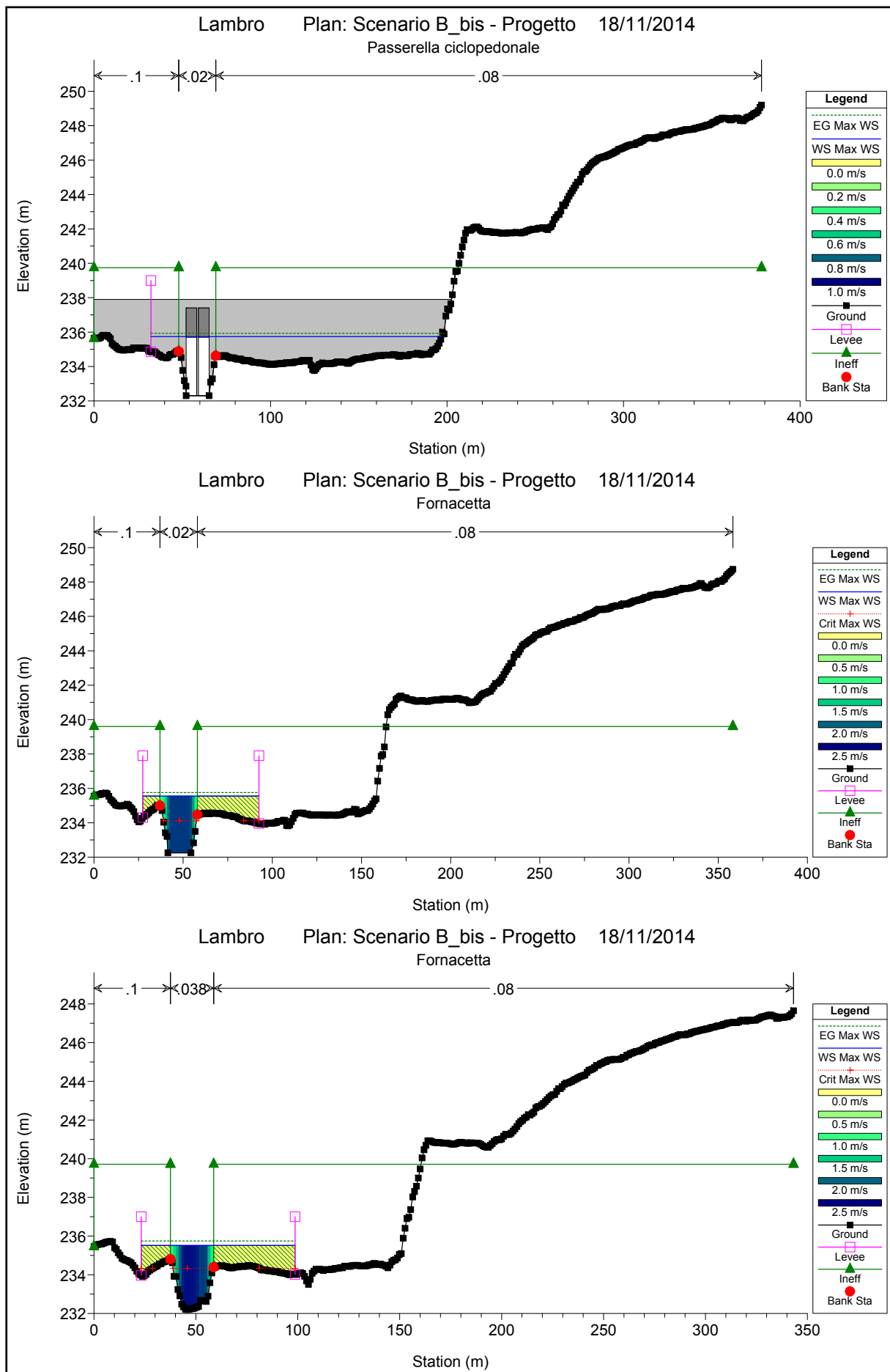


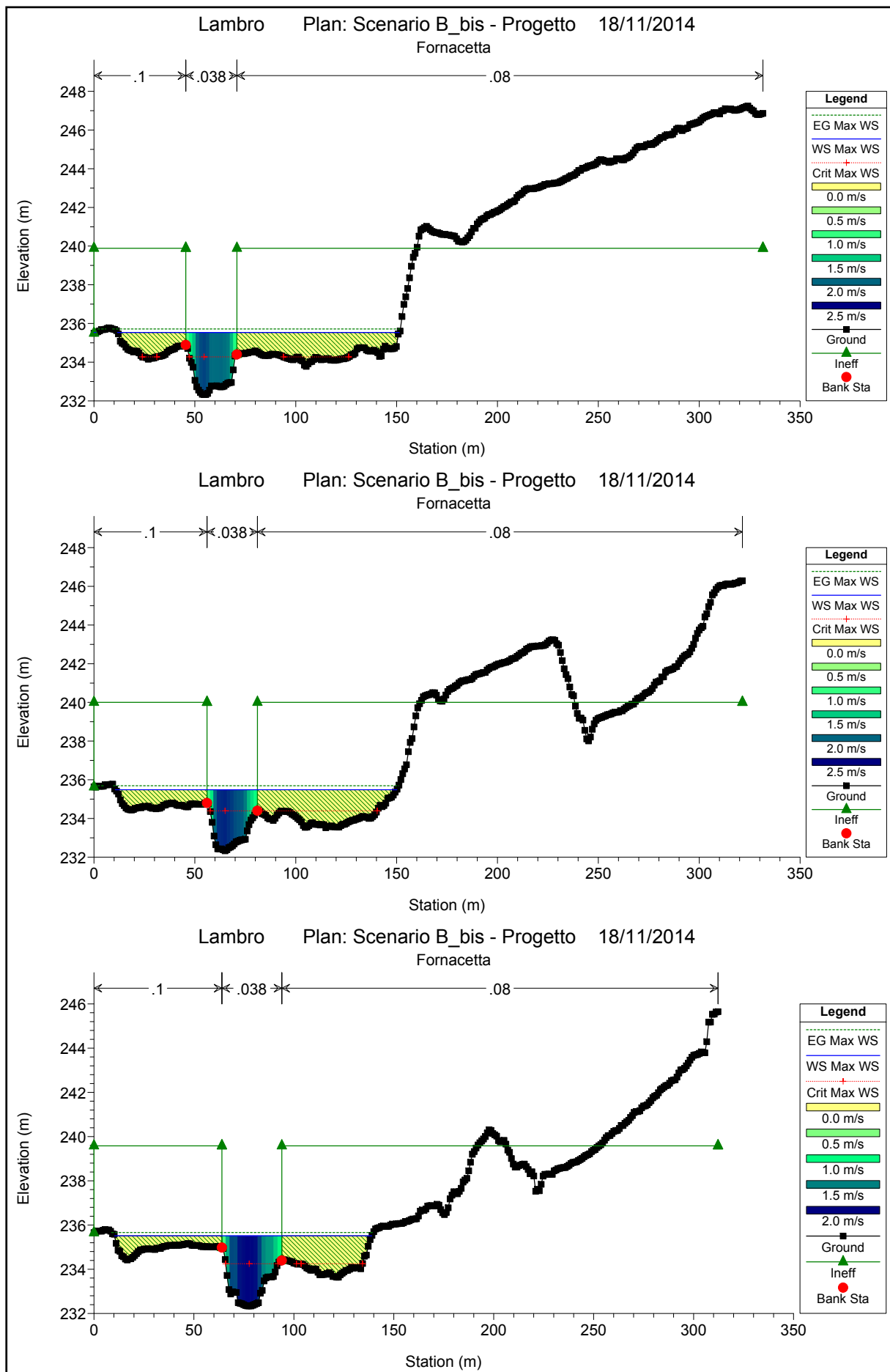


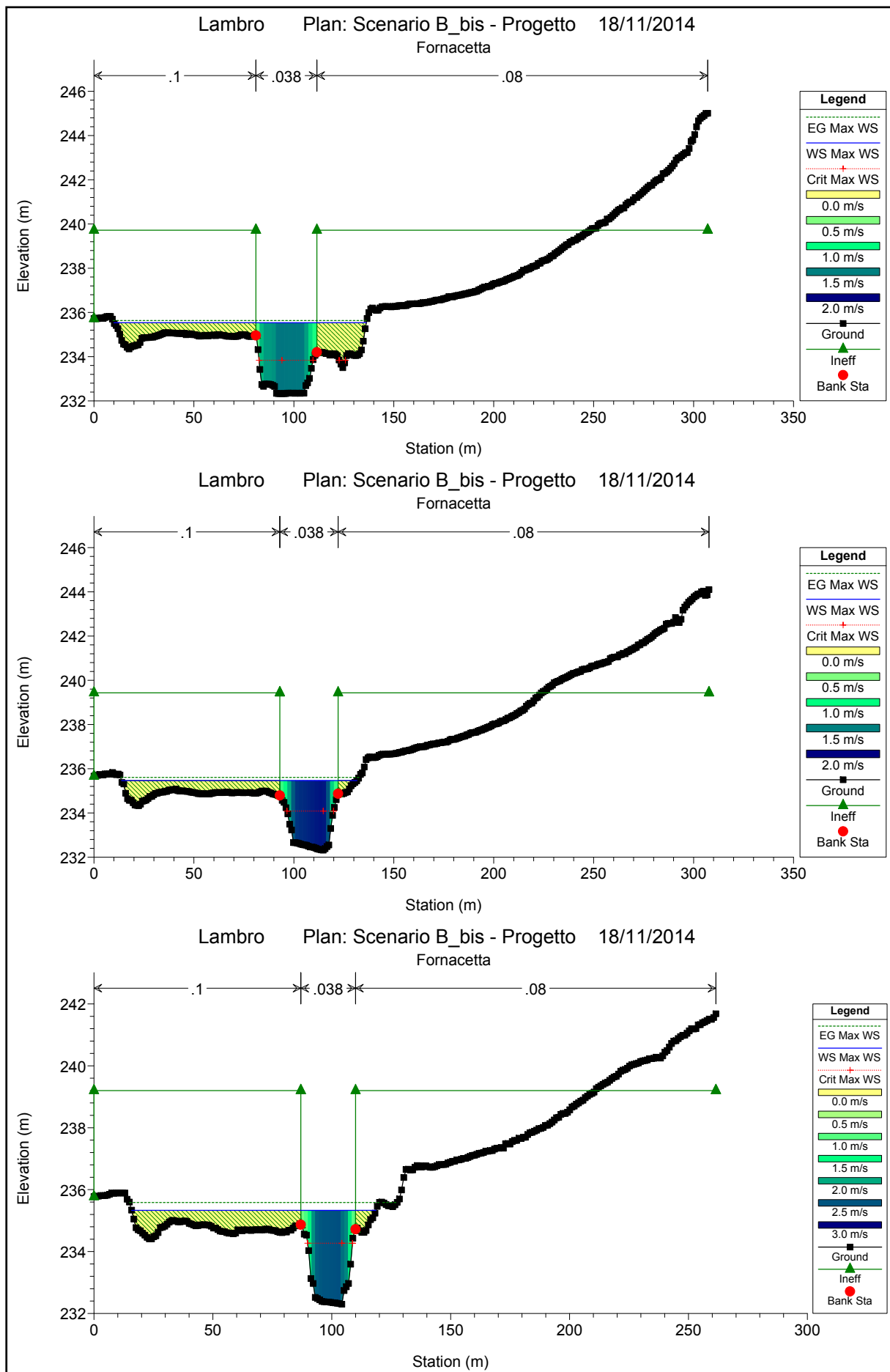


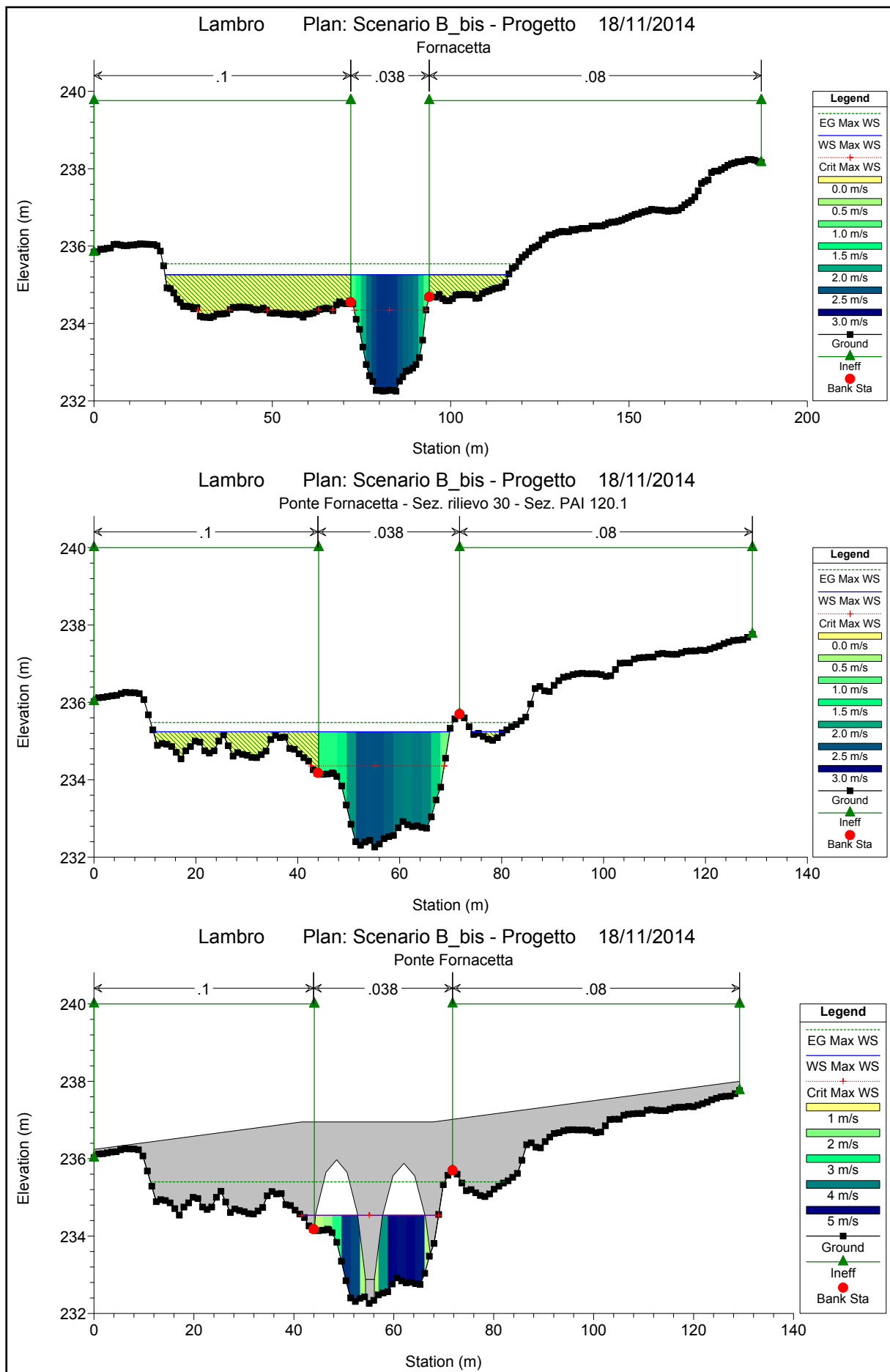


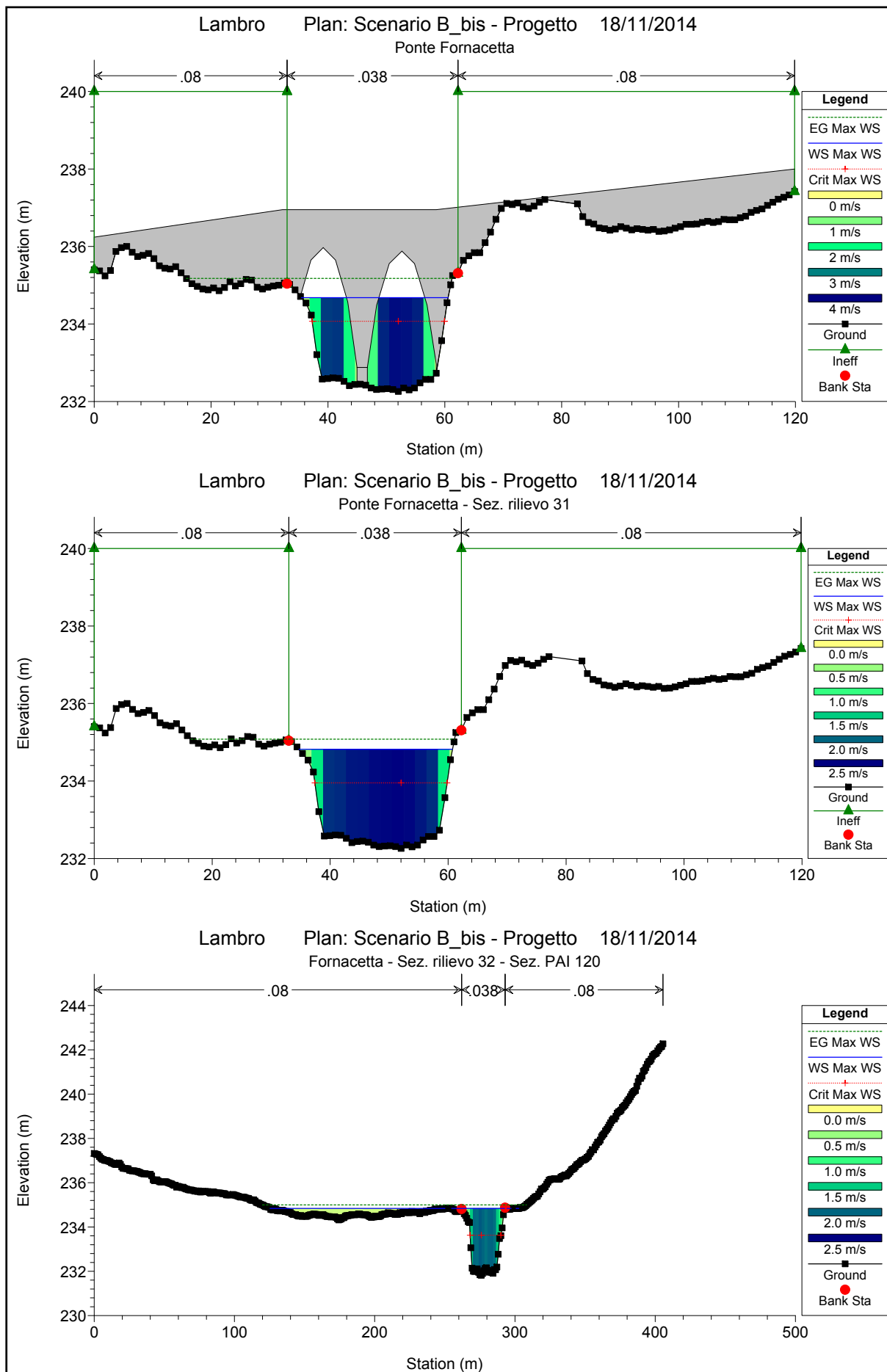


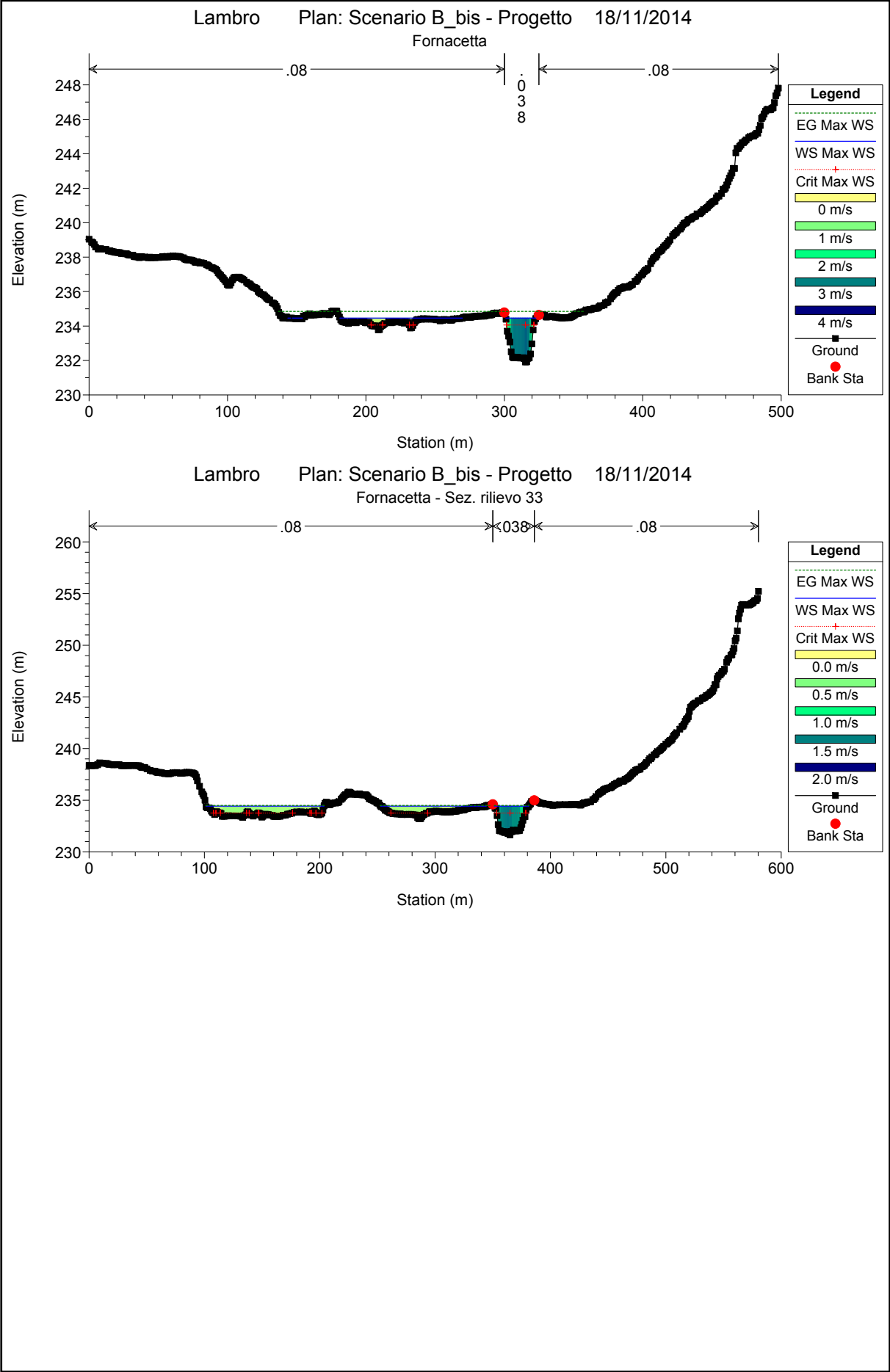














PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo

SRIA
s.r.l.
STUDIO ROSSO
INGEGNERI ASSOCIATI

ALLEGATO 5

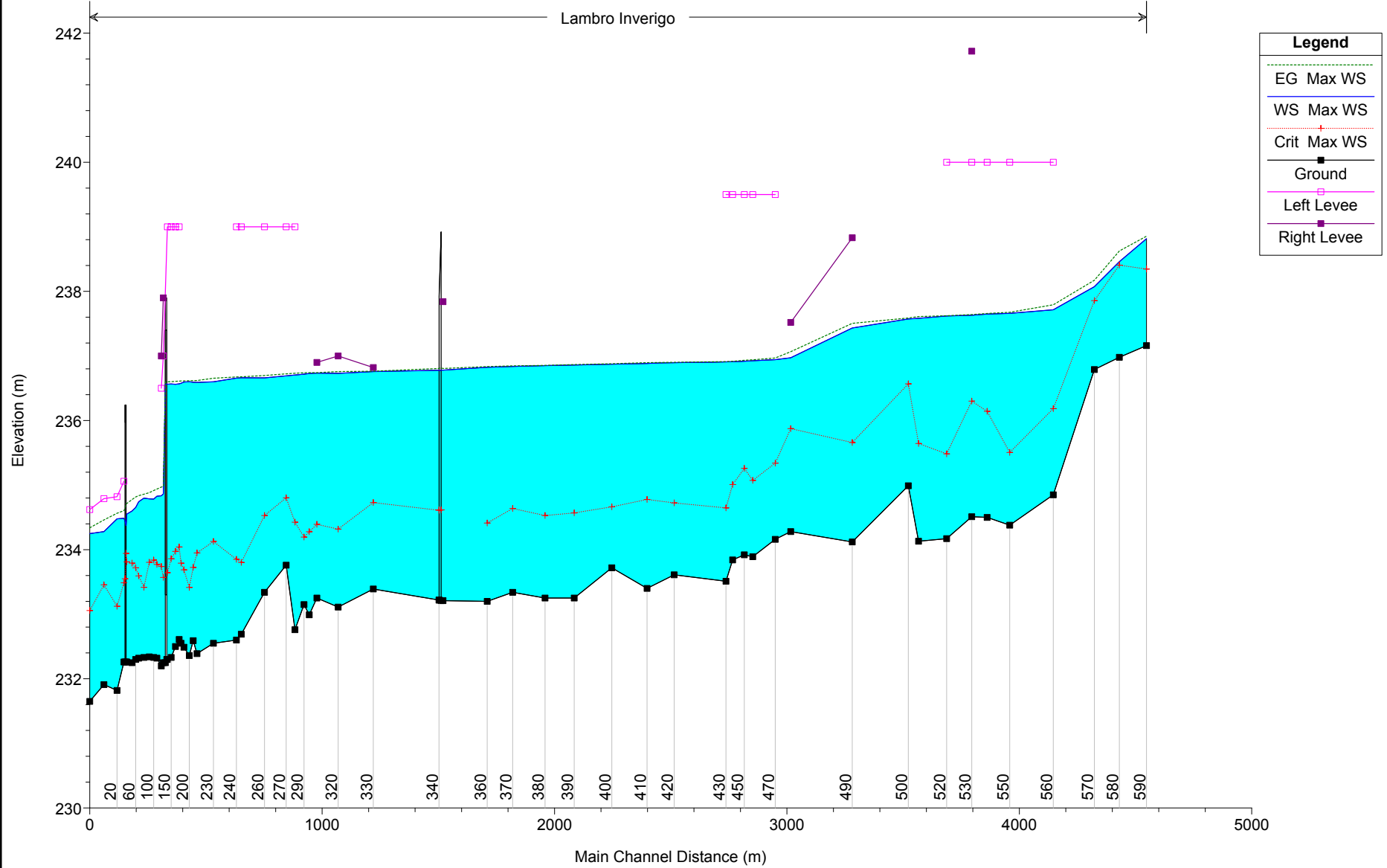
– Risultati simulazione idraulica: scenario D – Benefici su portate sottobacini

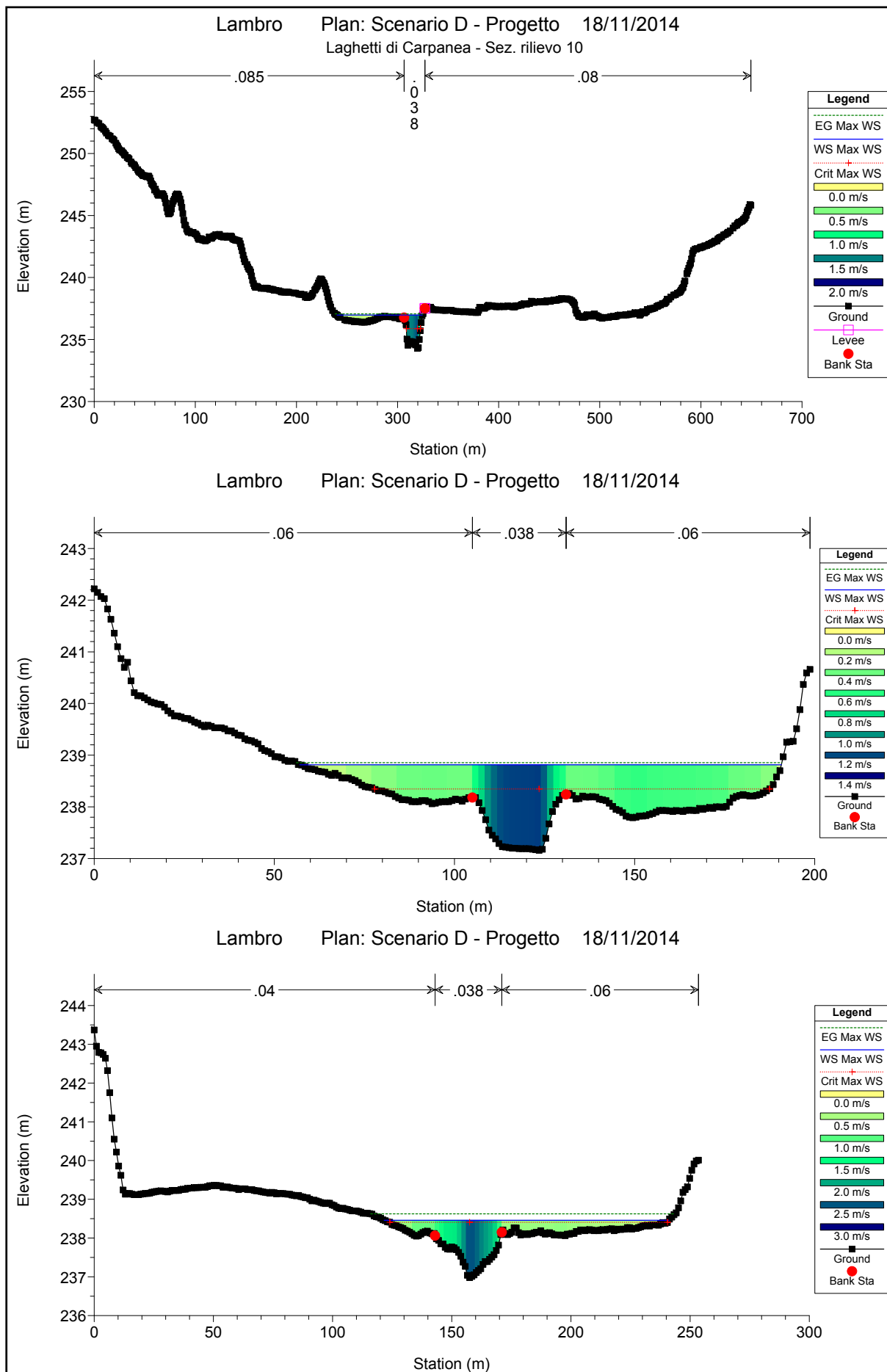
HEC-RAS Plan: D - Progetto River: Lambro Reach: Inverigo Profile: Max WS

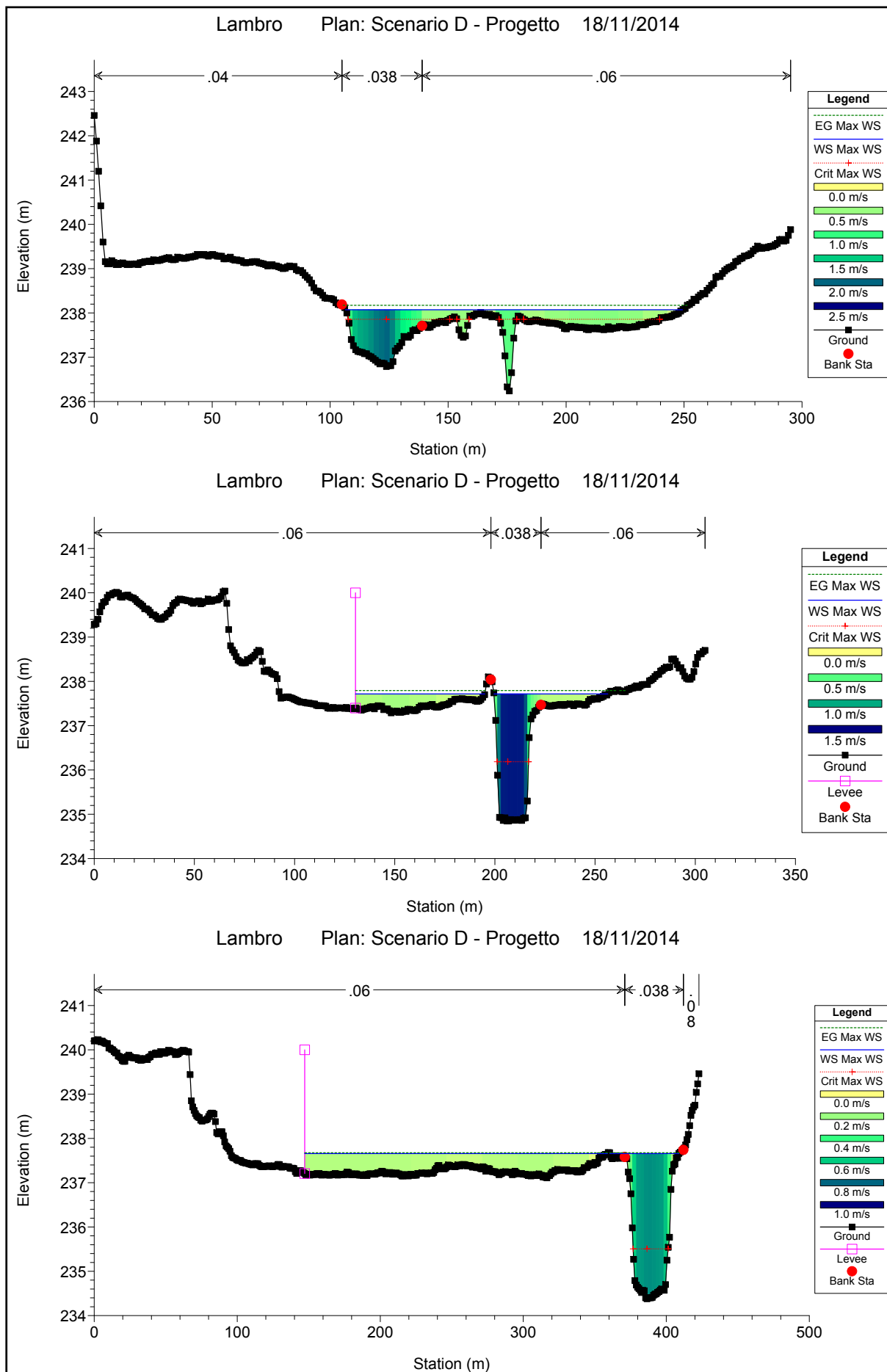
Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
Inverigo	4547.057 590	Max WS	66.94	237.16	238.82	238.35	238.85	0.001256	1.10	101.10	133.67	0.31
Inverigo	4430.646 580	Max WS	66.90	236.98	238.46	238.41	238.63	0.006387	2.01	49.93	119.45	0.66
Inverigo	4322.79 570	Max WS	66.93	236.79	238.07	237.86	238.17	0.004933	1.65	65.23	142.82	0.57
Inverigo	4146.27 560	Max WS	65.31	234.85	237.72	236.18	237.79	0.001062	1.28	70.89	121.37	0.29
Inverigo	3958.712 550	Max WS	65.72	234.38	237.66	235.51	237.68	0.000223	0.65	169.94	260.03	0.14
Inverigo	3861.219 540	Max WS	65.93	234.50	237.65	236.14	237.66	0.000224	0.62	243.75	291.23	0.13
Inverigo	3795.401 530	Max WS	65.70	234.51	237.63	236.30	237.64	0.000228	0.62	191.40	195.41	0.14
Inverigo	3687.068 520	Max WS	66.15	234.17	237.62	235.48	237.62	0.000054	0.33	246.12	291.76	0.07
Inverigo	3566.631 510	Max WS	66.58	234.13	237.58	235.64	237.61	0.000509	0.79	109.00	217.64	0.20
Inverigo	3522.358 500	Max WS	66.75	234.99	237.57	236.57	237.59	0.000459	0.74	158.05	257.88	0.19
Inverigo	3281.337 490	Max WS	67.10	234.12	237.43	235.66	237.50	0.000802	1.19	56.21	25.92	0.26
Inverigo	3016.292 480	Max WS	51.74	234.28	236.97	235.88	237.07	0.001472	1.43	55.13	84.36	0.34
Inverigo	2949.954 470	Max WS	51.39	234.16	236.94	235.34	236.97	0.000333	0.77	141.49	262.54	0.17
Inverigo	2852.912 460	Max WS	51.40	233.89	236.93	235.07	236.94	0.000261	0.65	177.18	267.32	0.15
Inverigo	2816.748 450	Max WS	51.48	233.92	236.92	235.26	236.93	0.000327	0.71	179.62	260.44	0.16
Inverigo	2766.457 440	Max WS	51.45	233.84	236.91	235.01	236.92	0.000129	0.47	267.73	287.08	0.10
Inverigo	2737.543 430	Max WS	51.53	233.51	236.91	234.65	236.91	0.000083	0.41	286.01	302.12	0.09
Inverigo	2514.769 420	Max WS	51.87	233.61	236.90	234.72	236.90	0.000079	0.42	305.37	277.44	0.08
Inverigo	2398.189 410	Max WS	51.89	233.40	236.88	234.78	236.90	0.000183	0.62	199.78	192.11	0.12
Inverigo	2246.646 400	Max WS	52.05	233.72	236.87	234.66	236.88	0.000105	0.45	206.32	202.51	0.10
Inverigo	2084.842 390	Max WS	52.14	233.25	236.86	234.57	236.87	0.000126	0.49	215.60	194.73	0.10
Inverigo	1959.351 380	Max WS	52.44	233.25	236.85	234.53	236.85	0.000055	0.37	336.37	261.11	0.07
Inverigo	1819.658 370	Max WS	52.75	233.34	236.84	234.64	236.85	0.000114	0.50	198.38	348.65	0.10
Inverigo	1710.393 360	Max WS	52.92	233.20	236.82	234.41	236.83	0.000113	0.53	195.45	288.15	0.10
Inverigo	1520.357 350	Max WS	53.30	233.21	236.78		236.80	0.000261	0.69	77.02	35.15	0.15
Inverigo	1511.685 345		Mult Open									
Inverigo	1503.015 340	Max WS	53.25	233.22	236.78	234.61	236.81	0.000309	0.74	72.36	34.45	0.16
Inverigo	1219.906 330	Max WS	53.53	233.39	236.76	234.73	236.76	0.000075	0.43	261.47	174.58	0.08
Inverigo	1068.842 320	Max WS	53.71	233.11	236.73	234.32	236.76	0.000190	0.74	78.11	91.25	0.14
Inverigo	977.0419 310	Max WS	53.89	233.25	236.73	234.39	236.74	0.000072	0.43	166.42	100.40	0.08
Inverigo	944.2654 300	Max WS	53.95	232.99	236.73	234.28	236.74	0.000101	0.54	157.97	196.65	0.10
Inverigo	921.7176 290	Max WS	53.99	233.15	236.72	234.19	236.74	0.000143	0.65	83.70	294.10	0.12
Inverigo	883.1097 280	Max WS	54.06	232.76	236.70	234.43	236.73	0.000221	0.74	73.05	279.66	0.14
Inverigo	844.9036 270	Max WS	54.12	233.76	236.69	234.80	236.72	0.000267	0.79	68.55	265.69	0.16
Inverigo	752.0323 260	Max WS	54.29	233.34	236.66	234.53	236.70	0.000277	0.85	64.02	309.19	0.16
Inverigo	652.2289 250	Max WS	54.46	232.69	236.66	233.80	236.68	0.000104	0.57	95.74	327.11	0.10
Inverigo	631.1052 240	Max WS	54.51	232.60	236.66	233.85	236.68	0.000117	0.60	91.44	349.57	0.11
Inverigo	532.0892 230	Max WS	54.51	232.55	236.60	234.13	236.65	0.000359	1.03	52.89	510.97	0.18
Inverigo	461.4436 220	Max WS	65.28	232.39	236.59	233.95	236.62	0.000186	0.77	85.33	478.94	0.13
Inverigo	444.964 210	Max WS	65.38	232.59	236.59	233.72	236.62	0.000139	0.70	93.17	444.77	0.12
Inverigo	428.3983 200	Max WS	65.48	232.36	236.60	233.42	236.62	0.000069	0.51	128.23	386.28	0.09
Inverigo	405.128 190	Max WS	65.60	232.49	236.59	233.69	236.61	0.000104	0.60	109.62	324.27	0.10
Inverigo	392.612 180	Max WS	65.67	232.55	236.58	233.79	236.61	0.000188	0.81	80.65	302.42	0.14
Inverigo	384.5591 170	Max WS	65.72	232.61	236.57	234.04	236.61	0.000246	0.90	72.83	293.94	0.16
Inverigo	368.98 160	Max WS	65.83	232.50	236.56	233.97	236.61	0.000267	0.95	69.60	215.88	0.16
Inverigo	350.5163 150	Max WS	65.97	232.33	236.57	233.86	236.60	0.000212	0.83	79.73	199.00	0.14
Inverigo	333.7652 140	Max WS	66.12	232.30	236.56	233.64	236.60	0.000056	0.85	78.10	166.73	0.14
Inverigo	325		Inl Struct									
Inverigo	316.6304 130	Max WS	66.10	232.25	234.86	233.57	234.98	0.000367	1.51	43.80	61.59	0.33
Inverigo	307.8002 120	Max WS	66.17	232.20	234.83	233.74	234.97	0.001739	1.63	40.58	75.50	0.38
Inverigo	288.6484 110	Max WS	66.26	232.32	234.83	233.77	234.94	0.001526	1.48	44.86	131.22	0.35
Inverigo	275.1218 100	Max WS	66.34	232.33	234.78	233.84	234.92	0.001968	1.61	41.28	127.62	0.40
Inverigo	256.351 90	Max WS	66.40	232.34	234.79	233.80	234.88	0.001446	1.38	48.27	80.71	0.34
Inverigo	233.2564 80	Max WS	66.46	232.33	234.80	233.42	234.86	0.000683	1.08	61.49	63.74	0.24
Inverigo	210.6123 70	Max WS	66.57	232.32	234.74	233.59	234.84	0.001360	1.36	48.78	39.99	0.33
Inverigo	197.713 60	Max WS	66.68	232.30	234.65	233.72	234.82	0.002359	1.78	37.46	42.09	0.43
Inverigo	181.8634 50	Max WS	66.80	232.25	234.60	233.79	234.78	0.002743	1.87	35.76	71.42	0.46
Inverigo	159.4336 40	Max WS	66.93	232.26	234.55	233.81	234.71	0.002868	1.80	37.21	27.68	0.47
Inverigo	153.24 35		Bridge									
Inverigo	147.0547 30	Max WS	66.93	232.26	234.49	233.49	234.60	0.001619	1.53	43.88	23.93	0.36
Inverigo	117.4892 20	Max WS	67.15	231.82	234.48	233.12	234.56	0.001099	1.30	51.56	26.62	0.30
Inverigo	60.7408 10	Max WS	67.52	231.91	234.28	233.46	234.46	0.002635	1.89	35.79	20.52	0.46
Inverigo	0 0	Max WS	67.52	231.65	234.25	233.06	234.34	0.001210	1.33	50.83	27.78	0.31

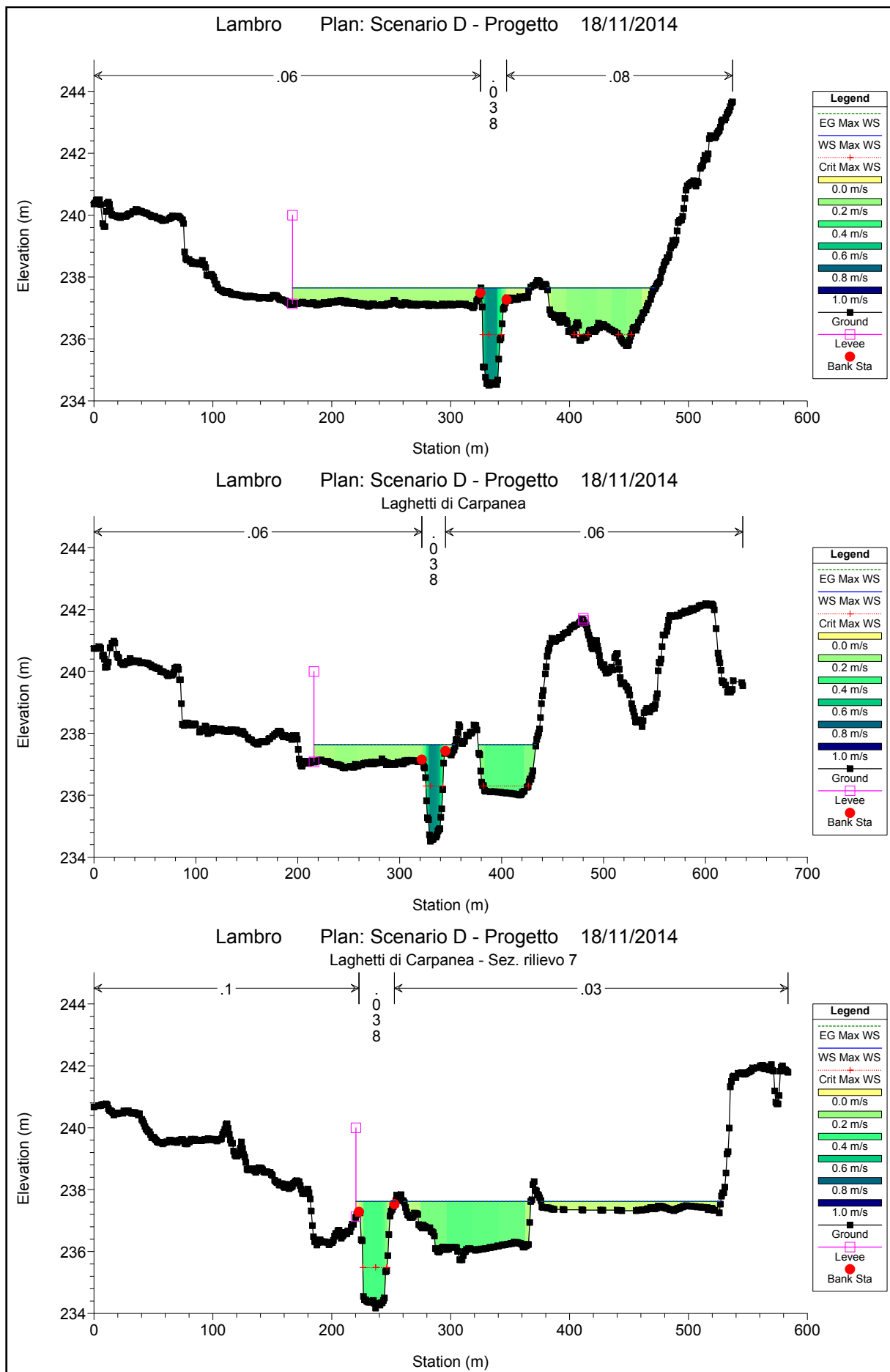
Lambro Plan: Scenario D - Progetto 18/11/2014

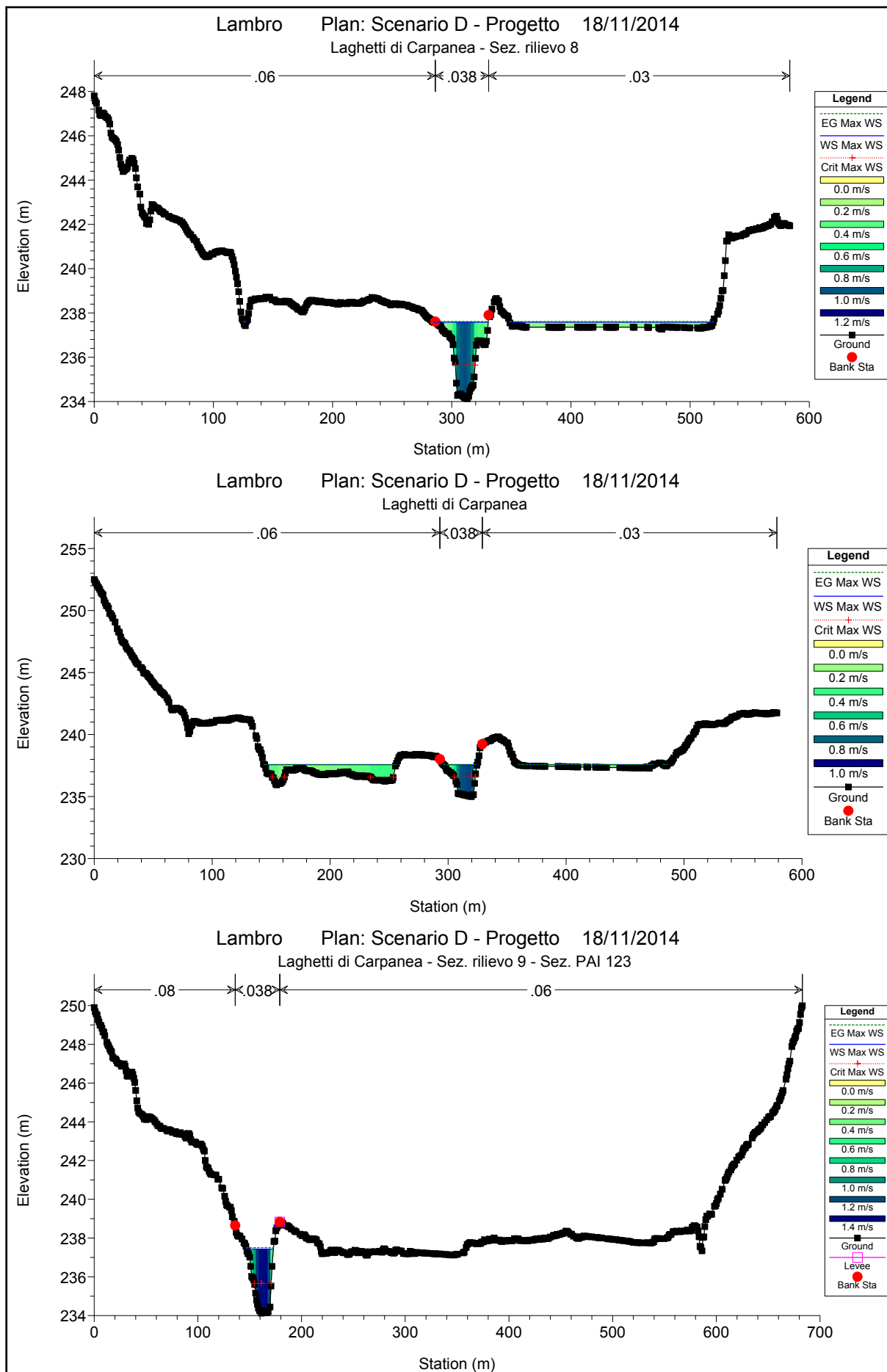
Lambro Inverigo

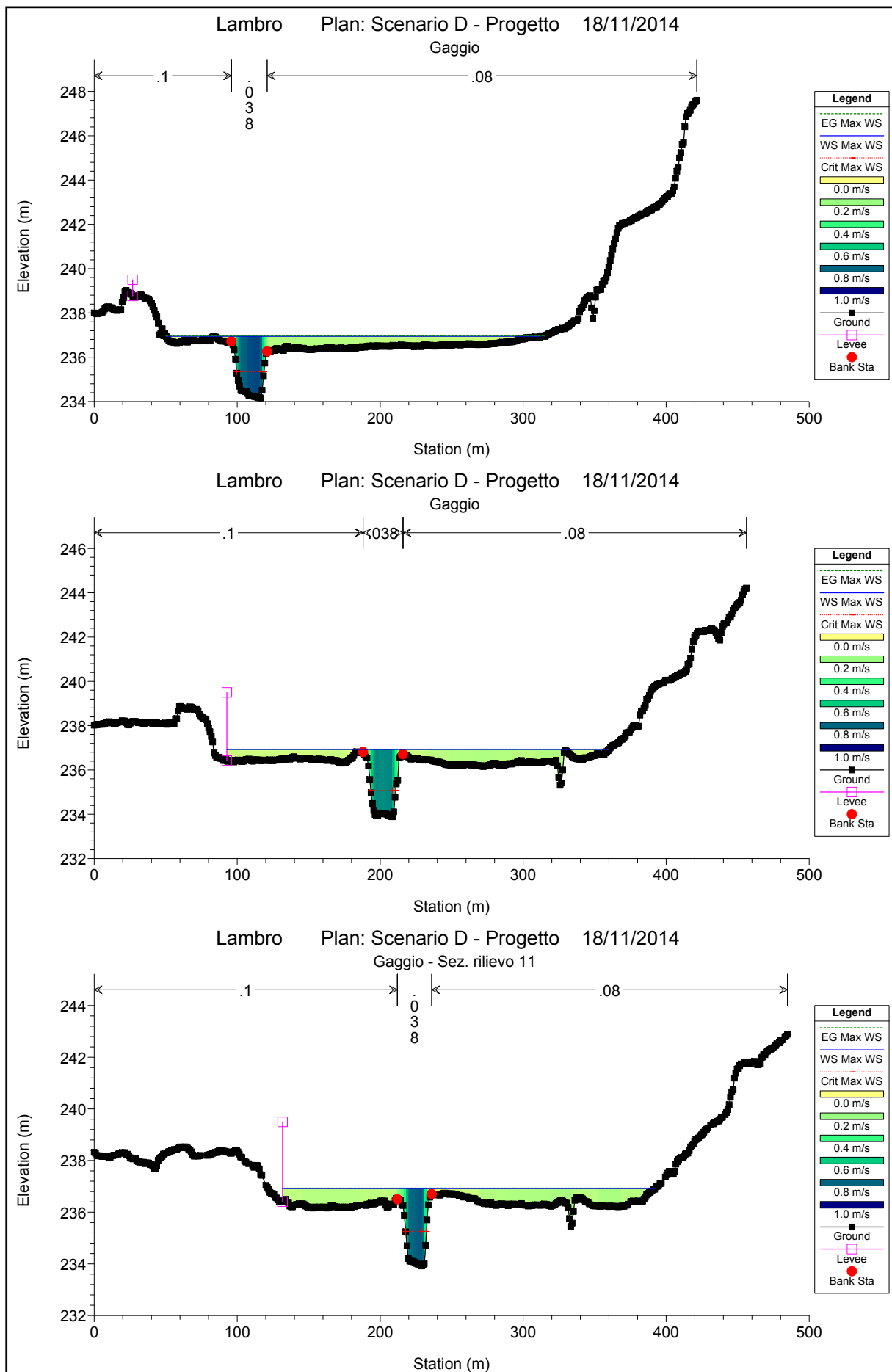


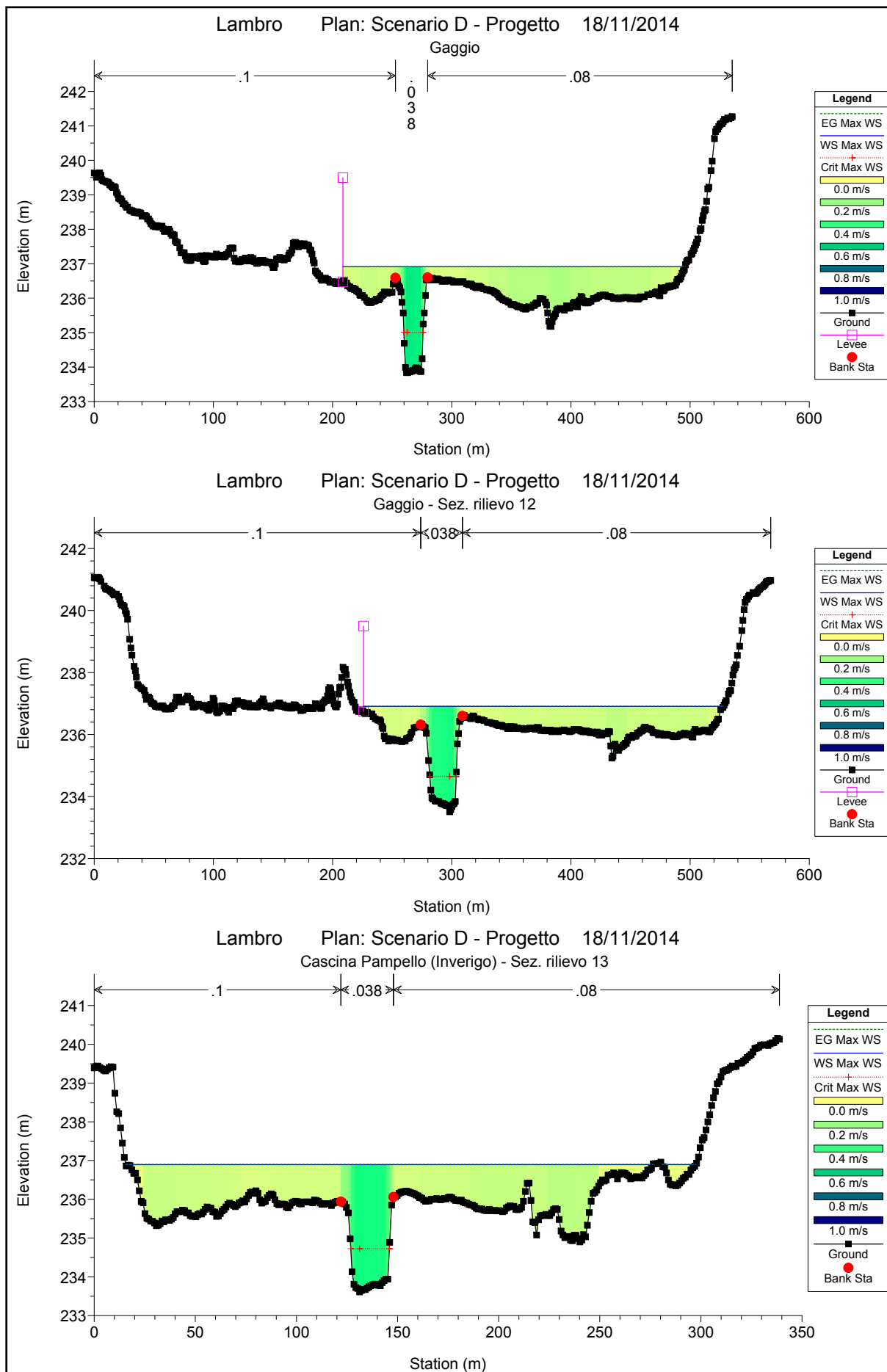


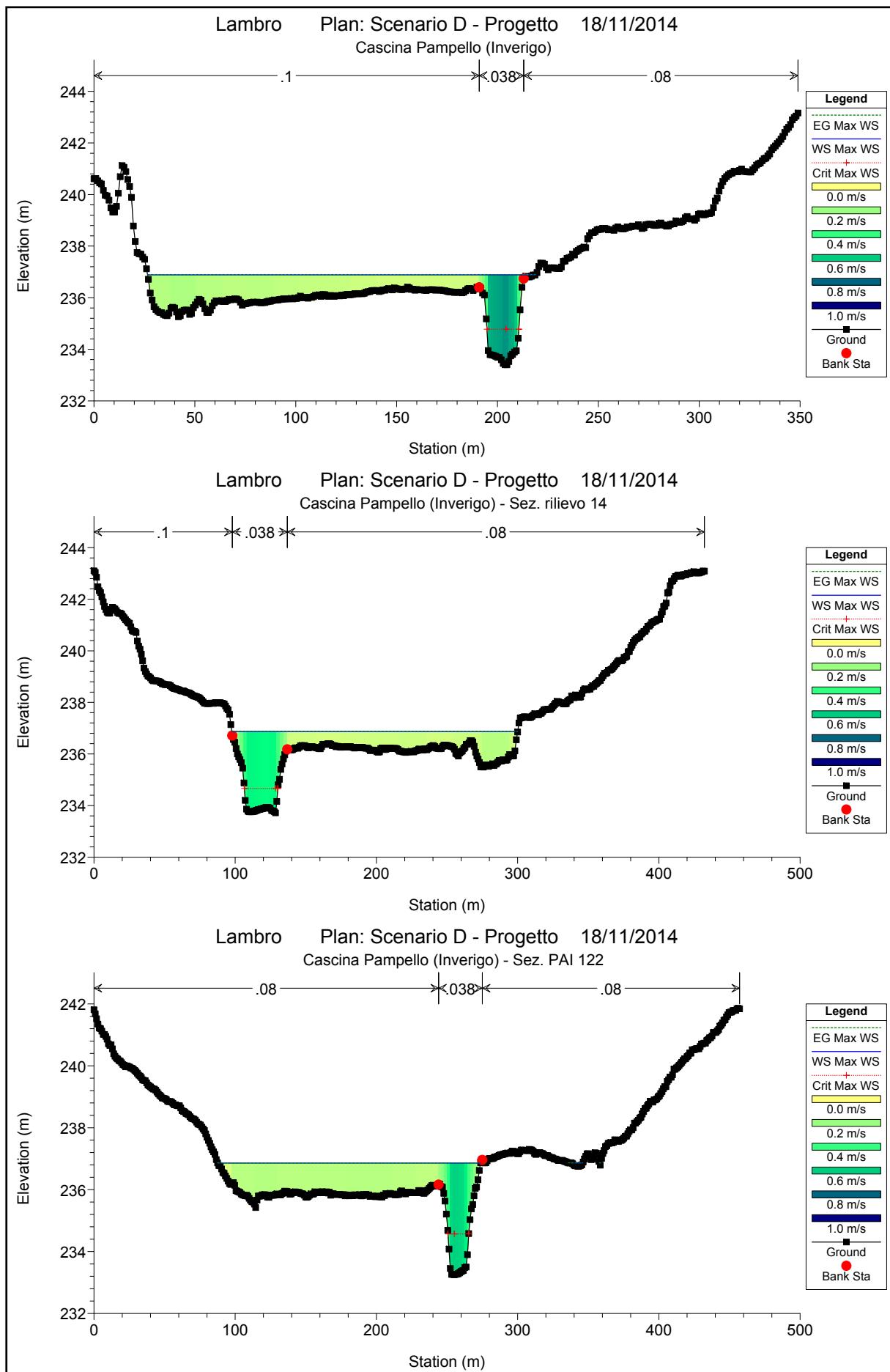


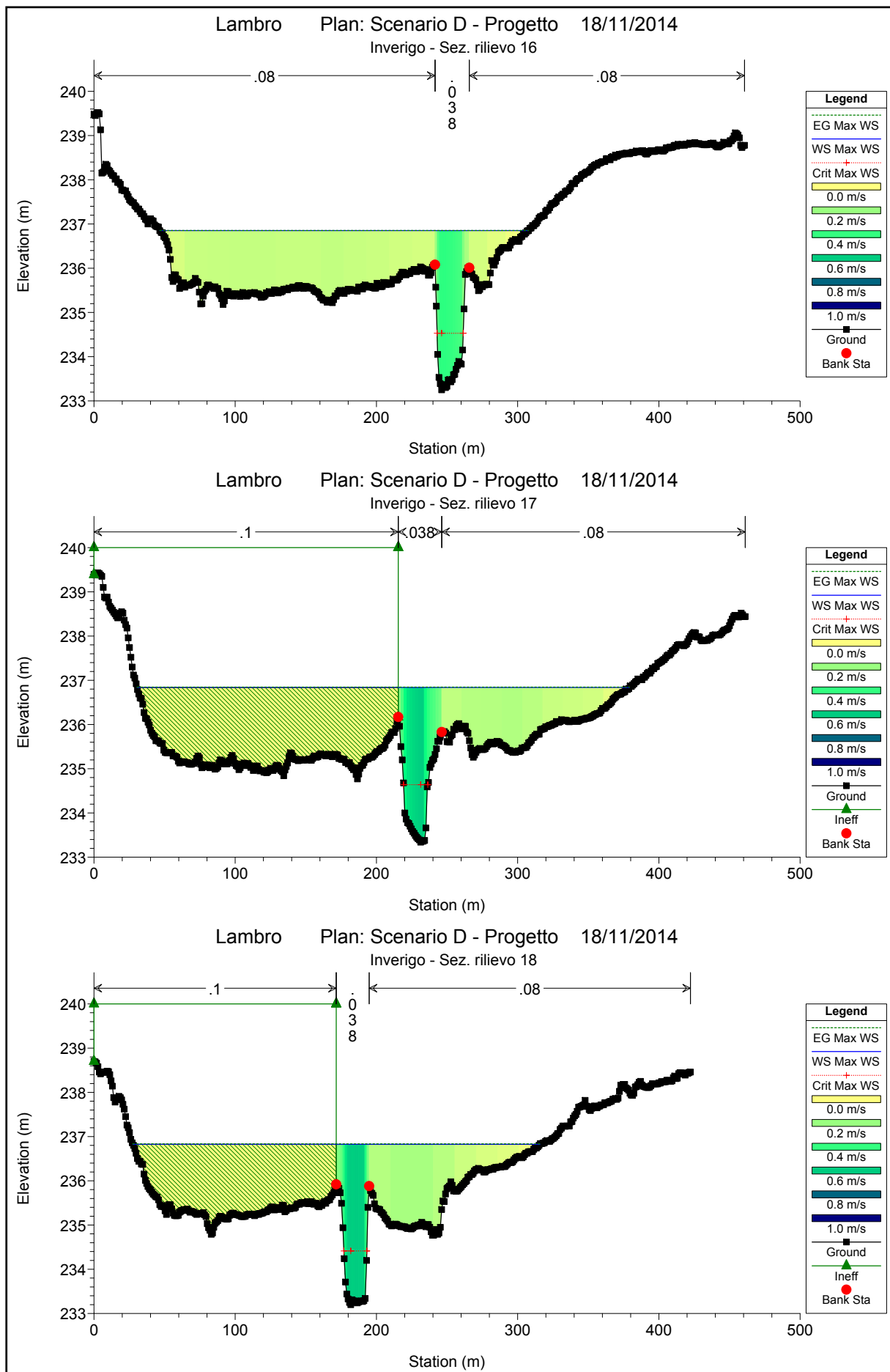


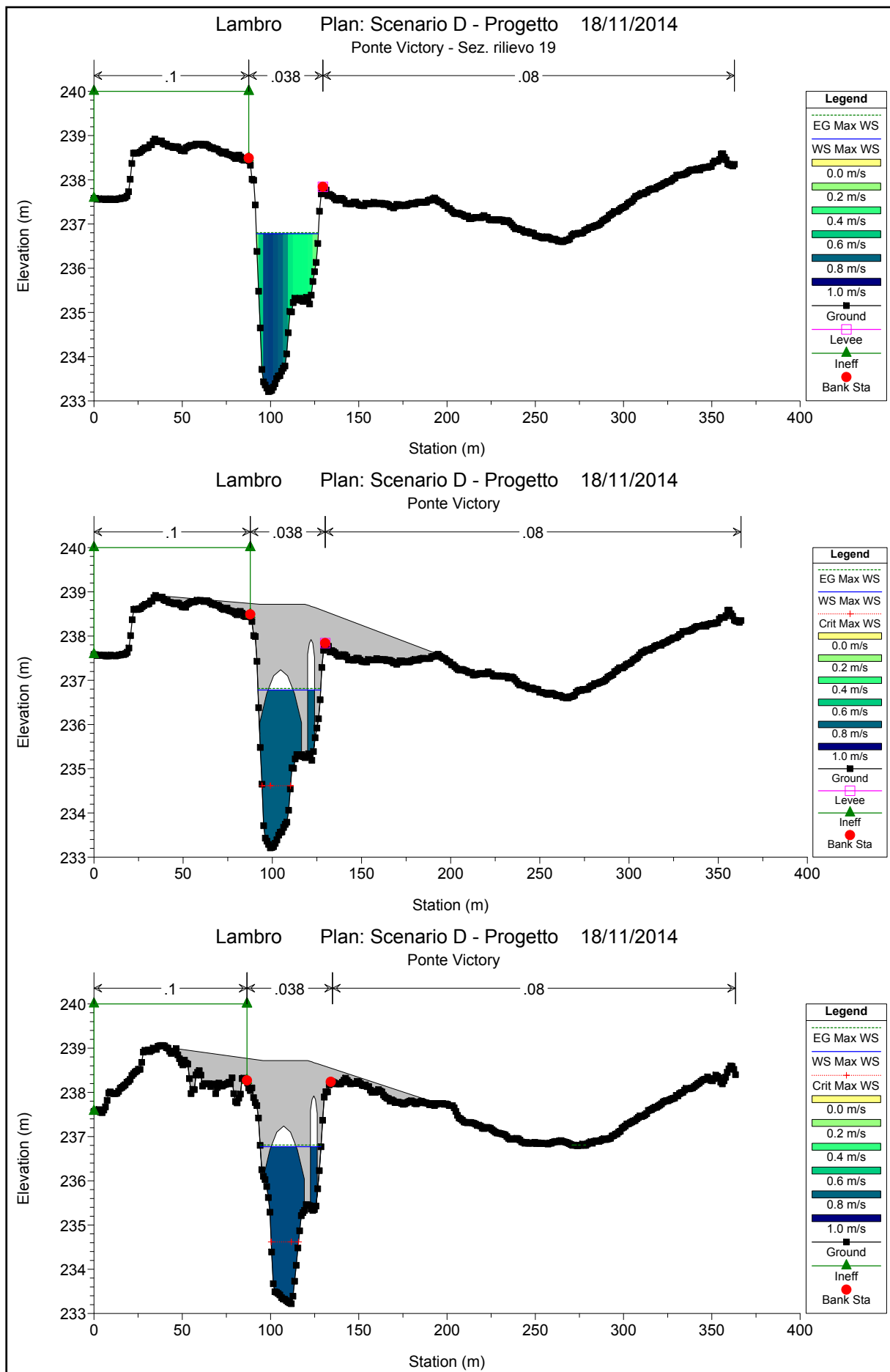


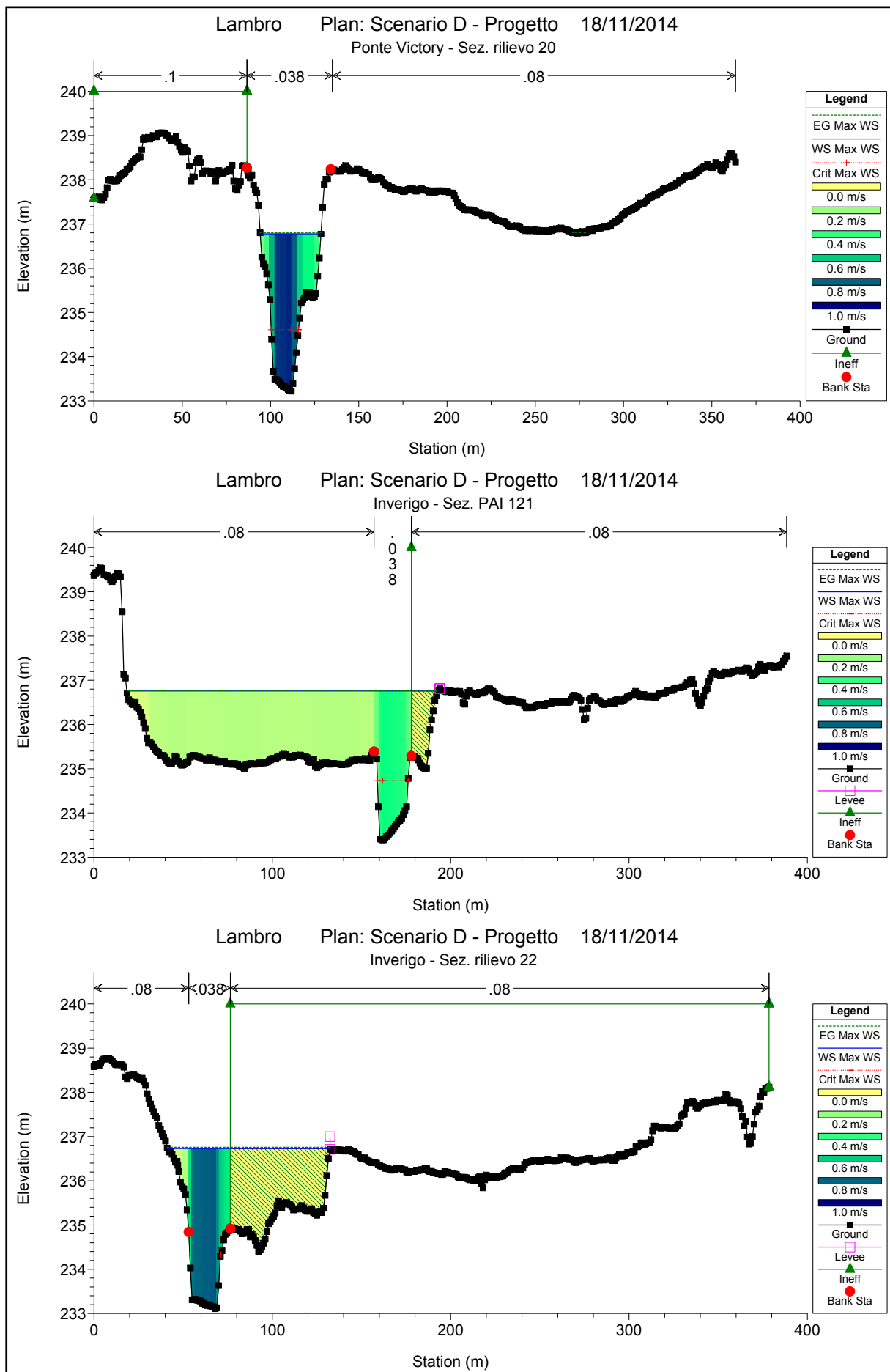


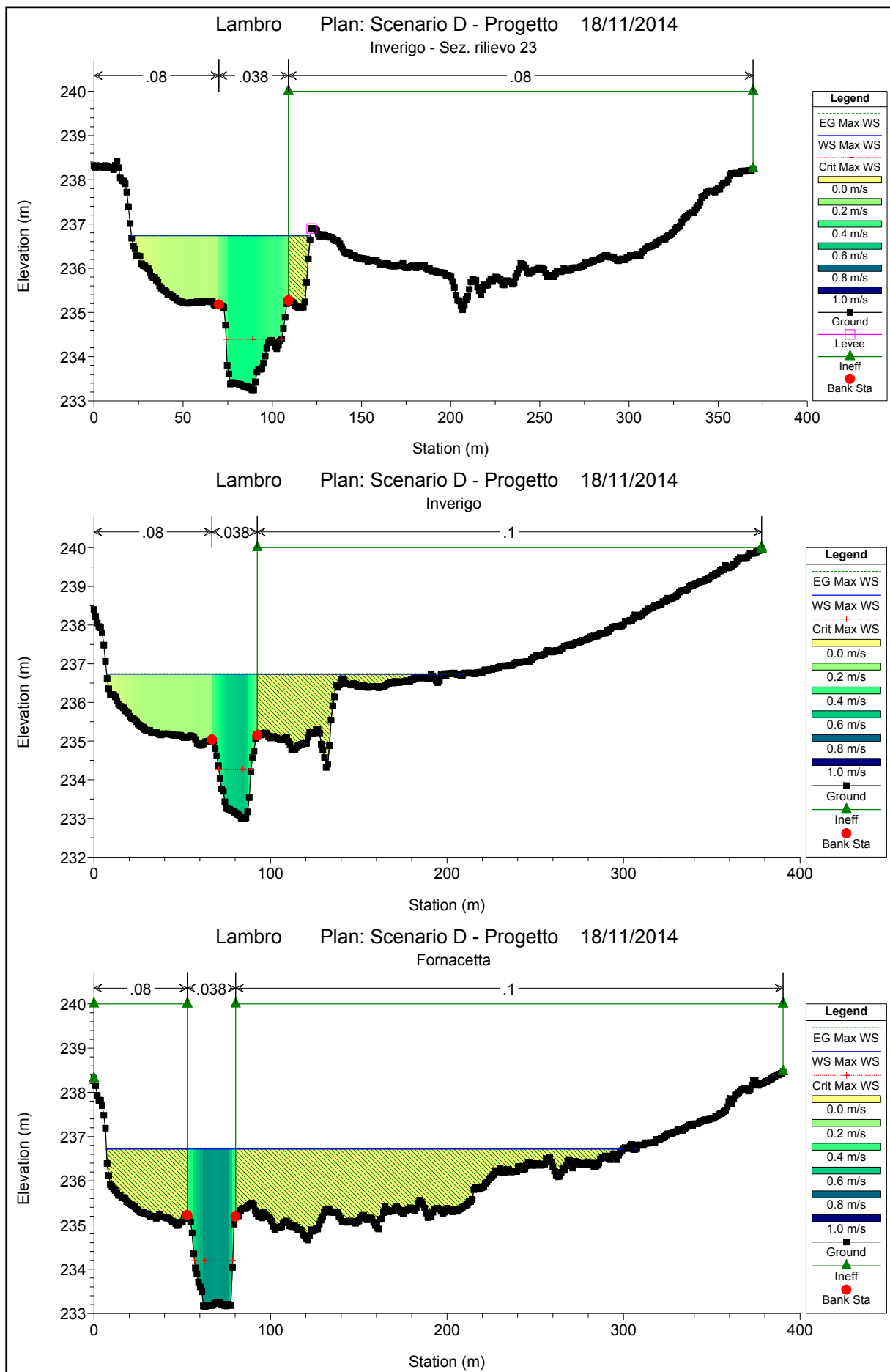


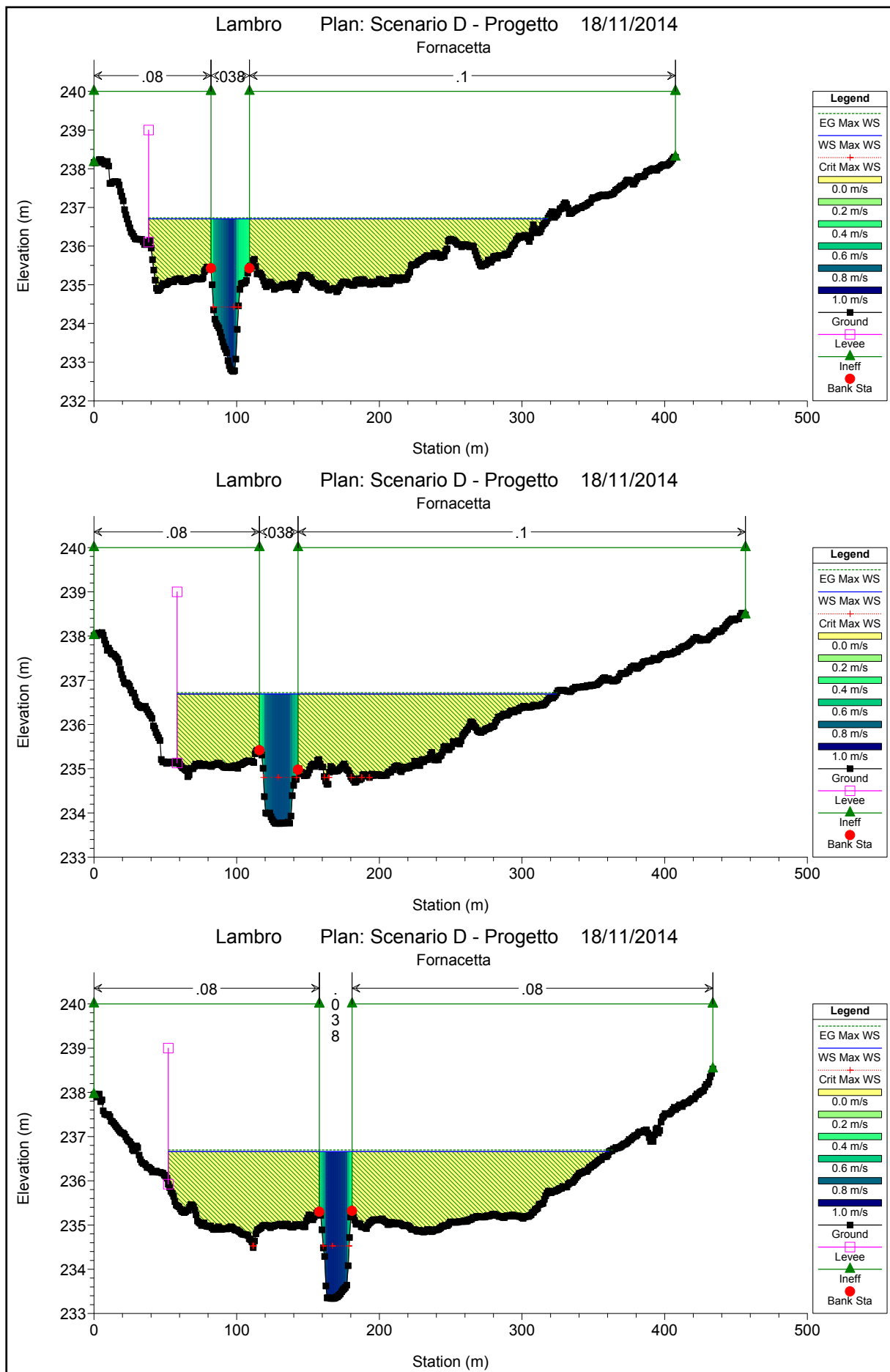


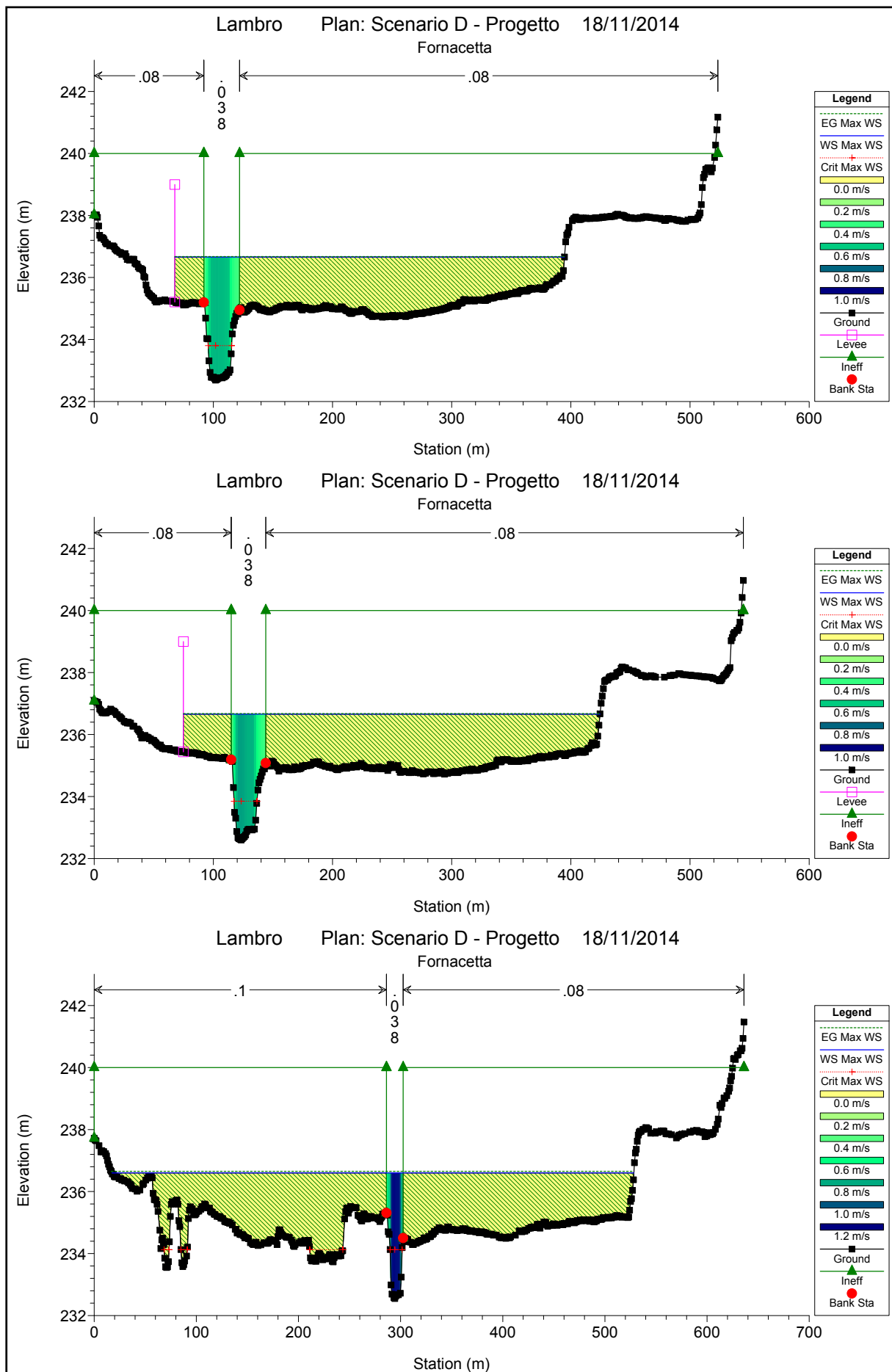


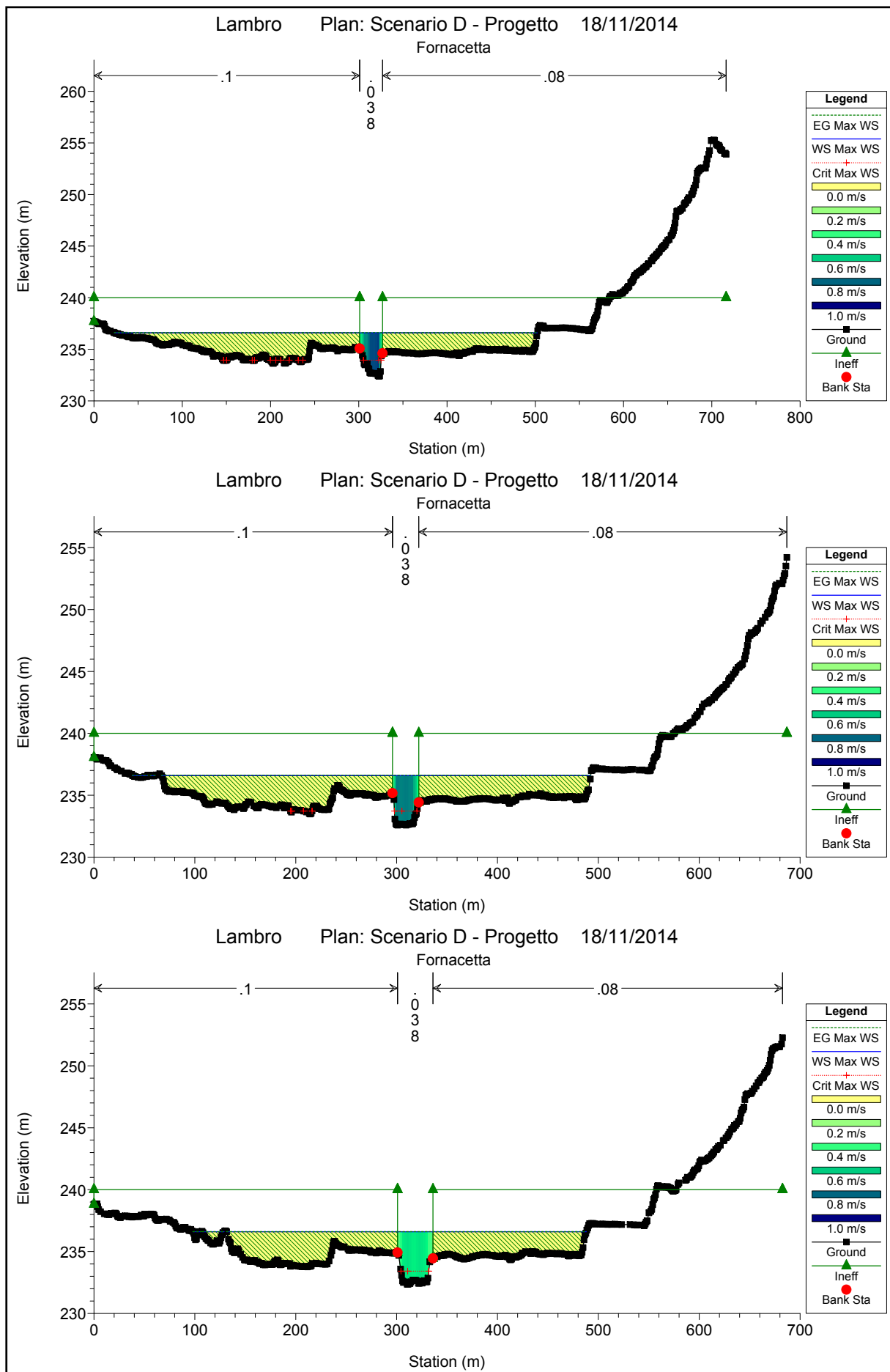


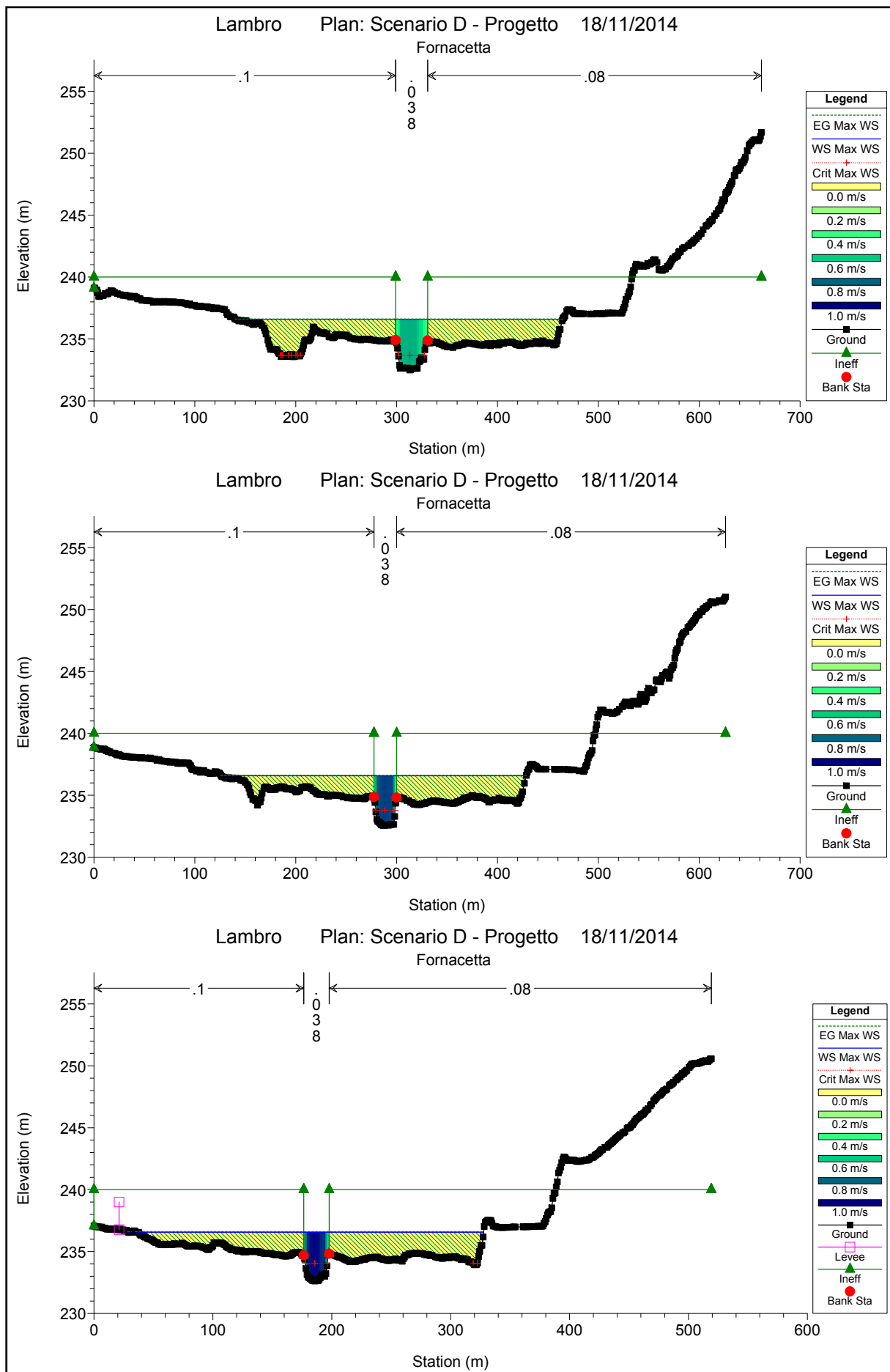


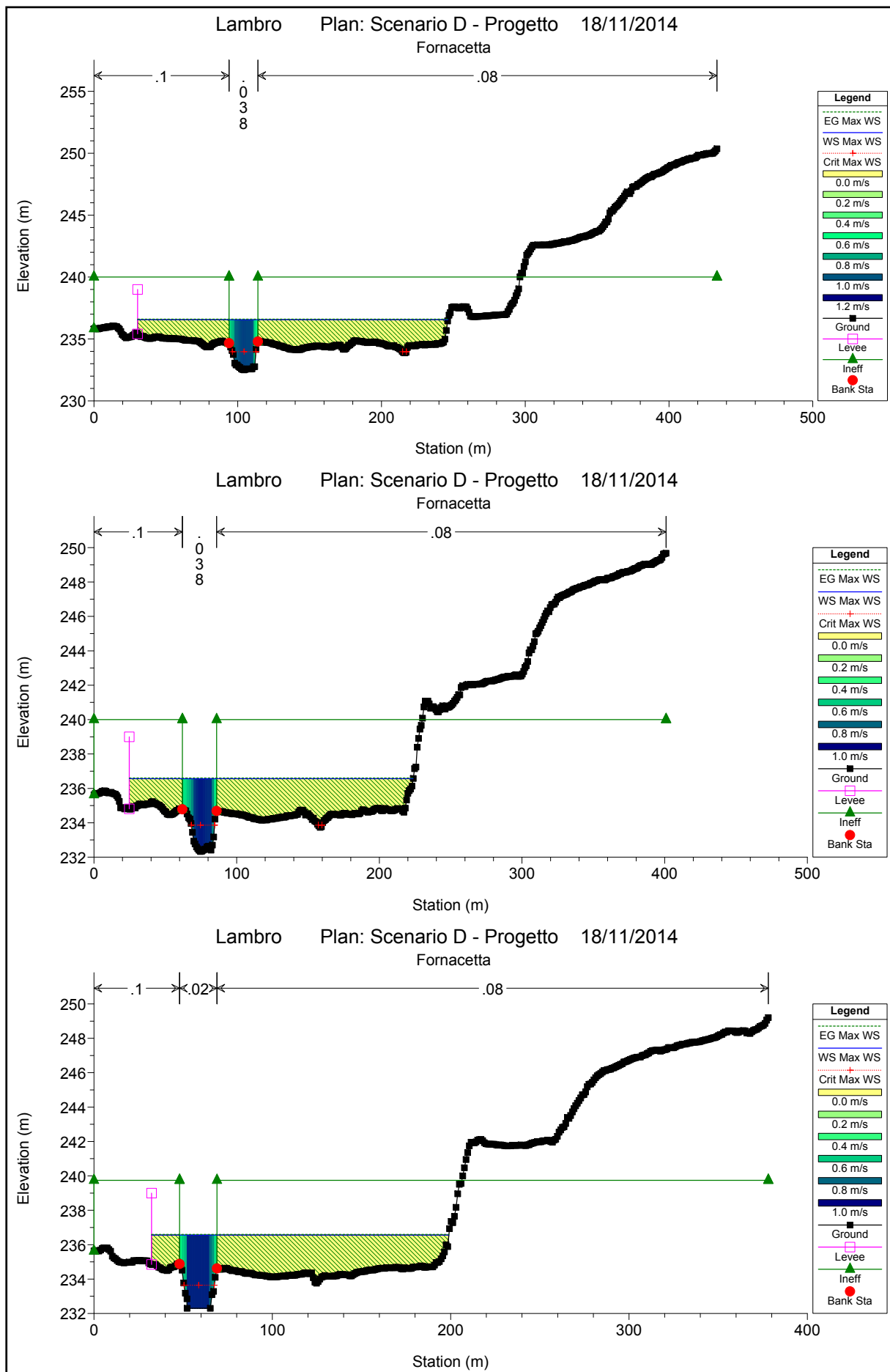


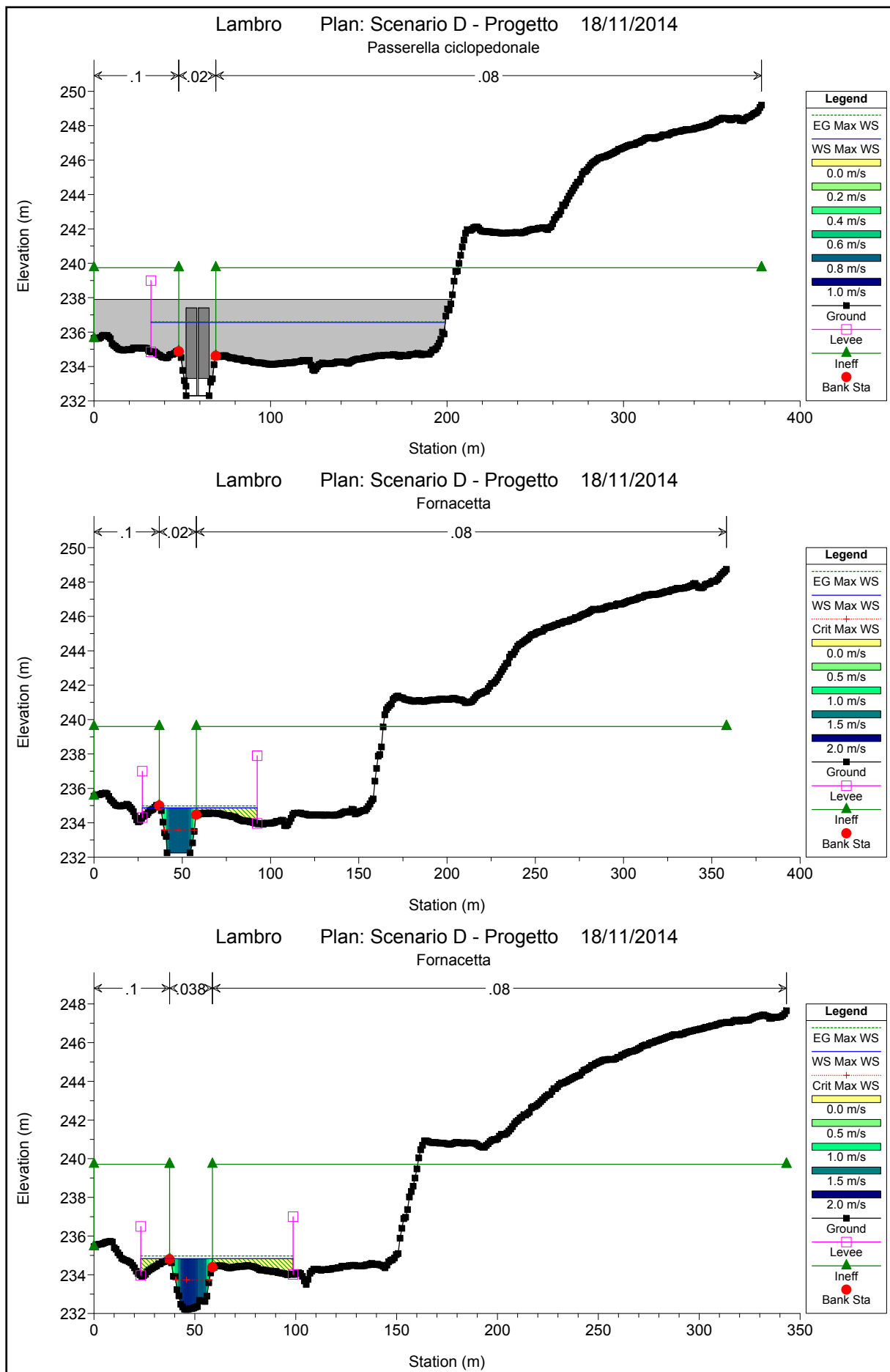


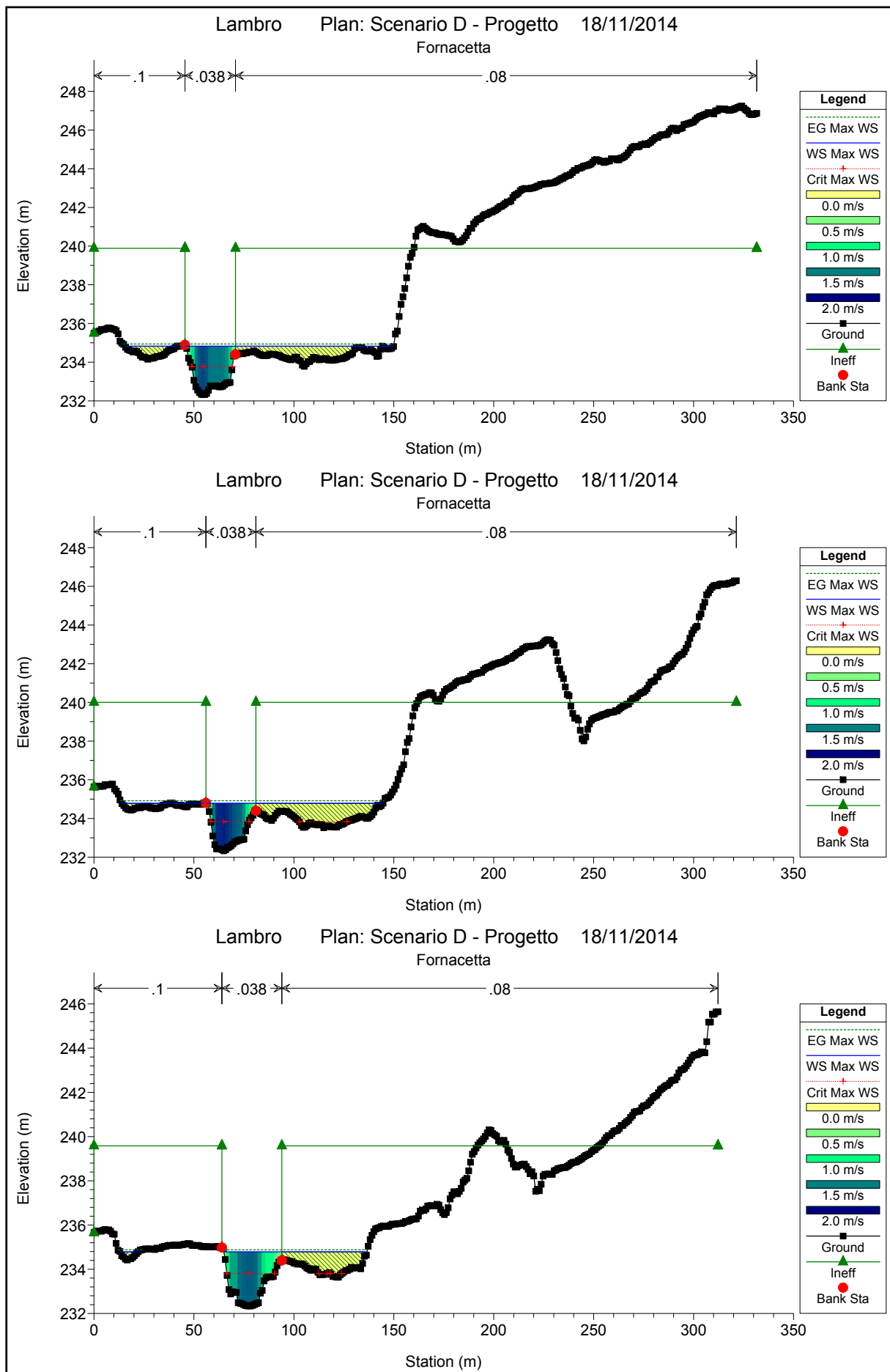


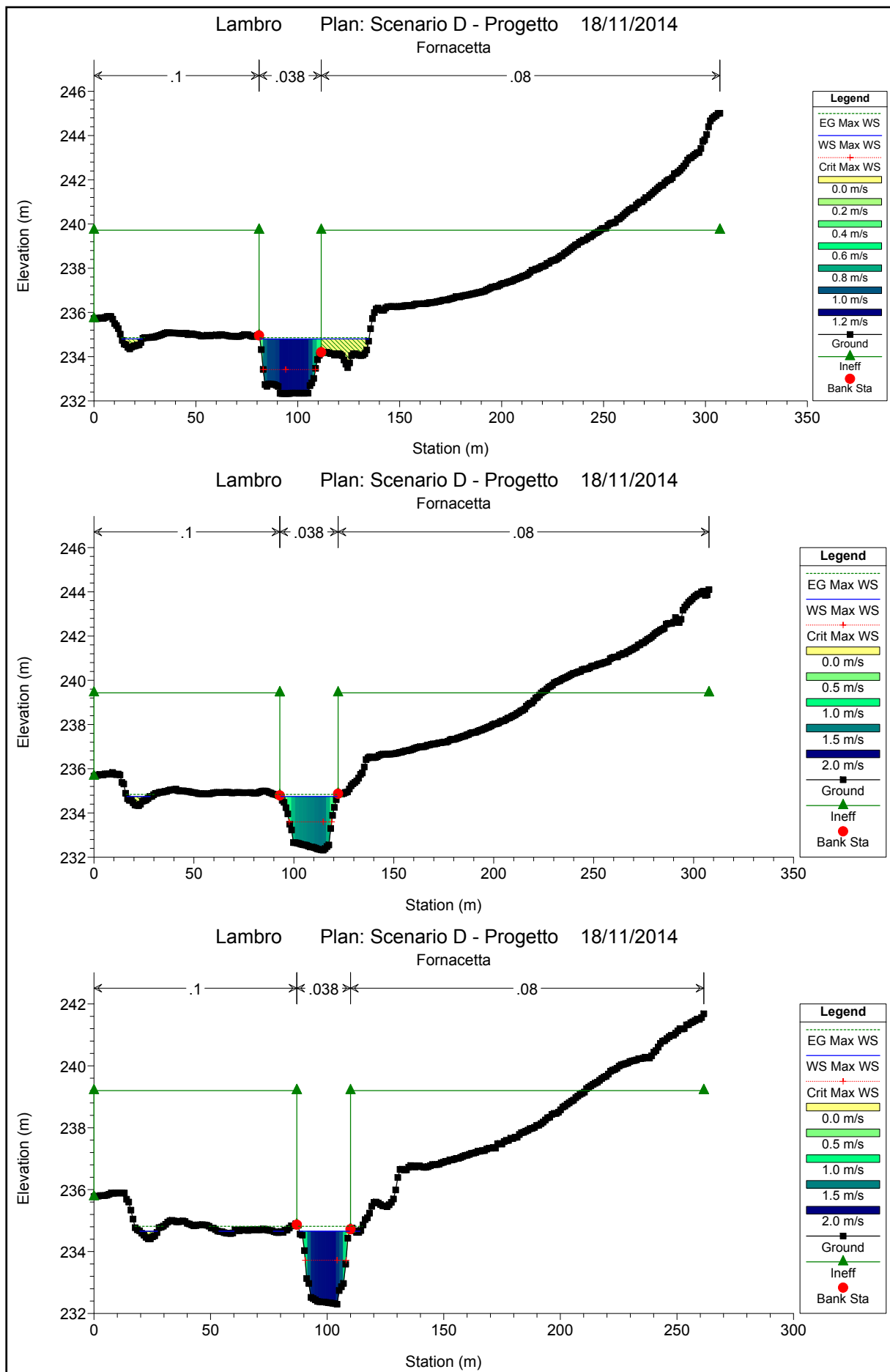


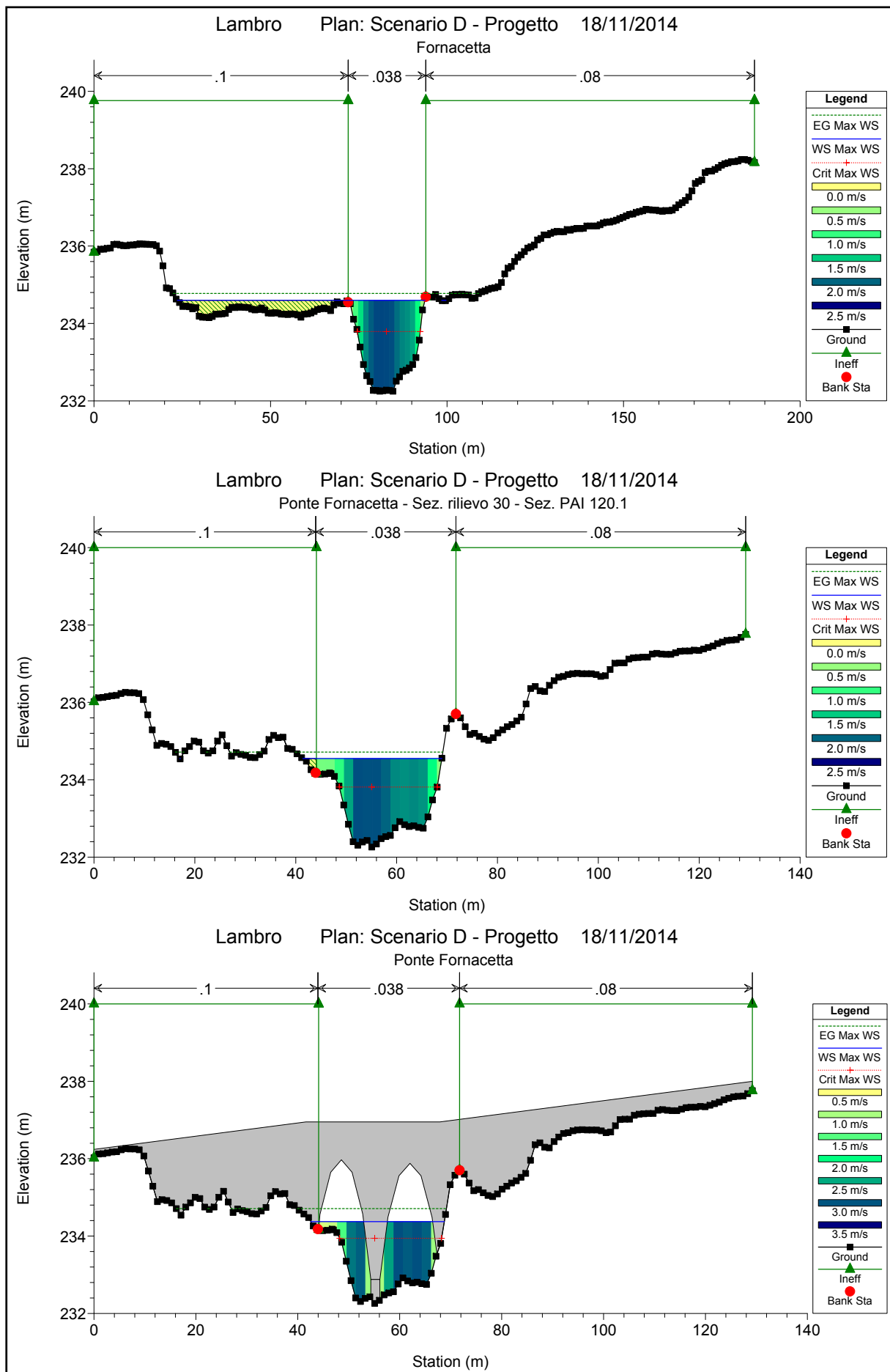


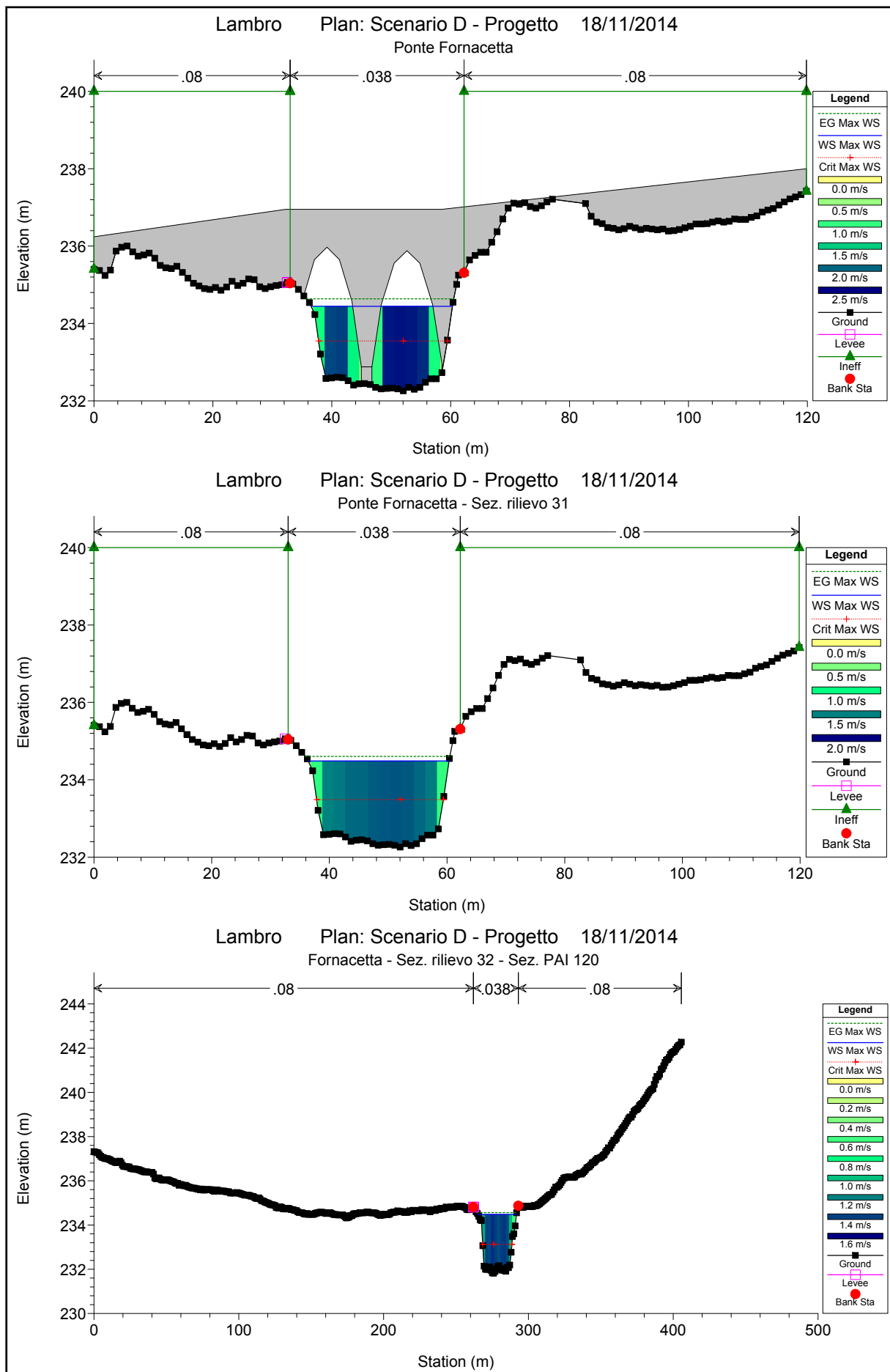


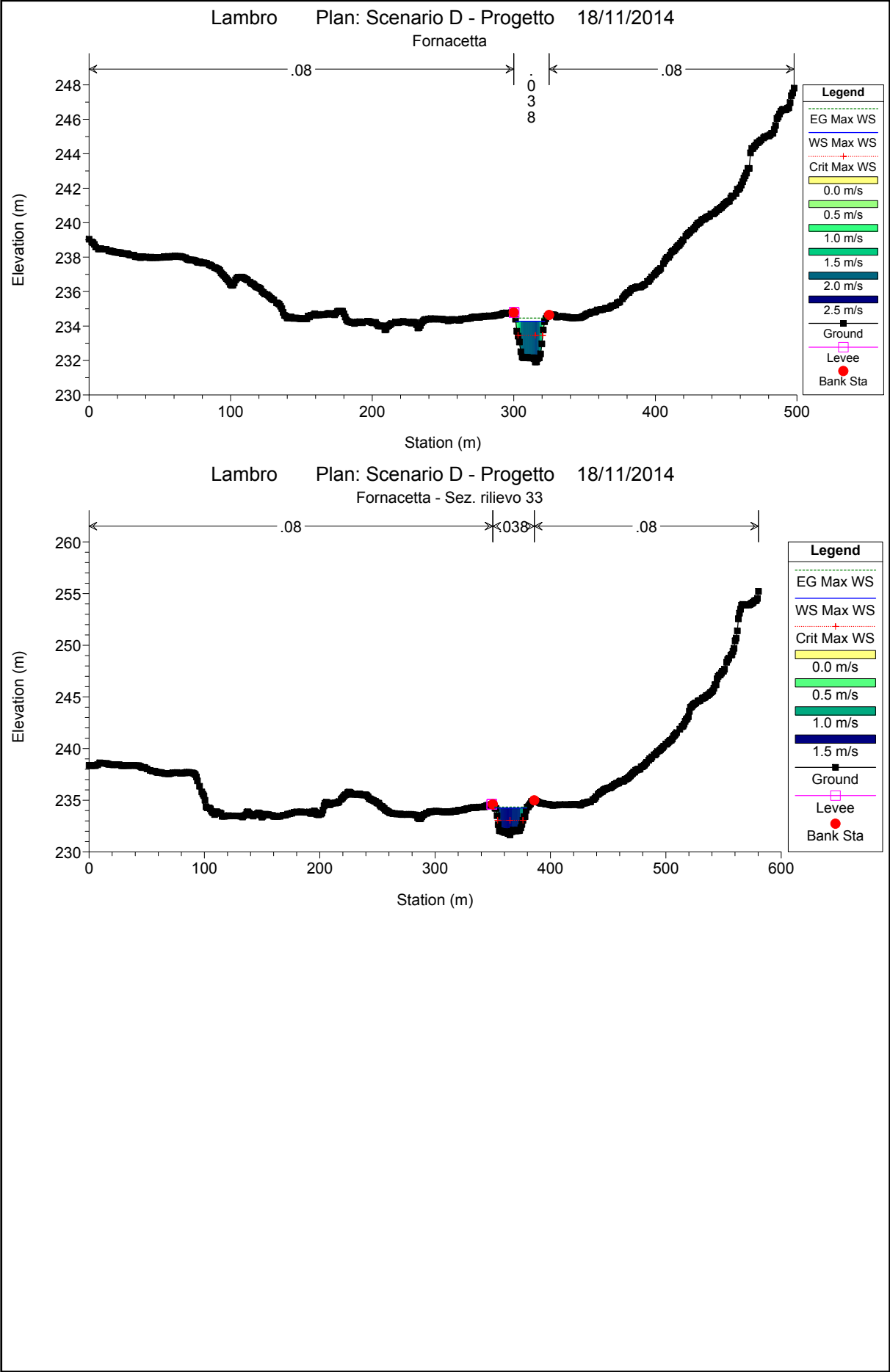














PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo

SRIA
s.r.l.
STUDIO ROSSO
INGEGNERI ASSOCIATI

ALLEGATO 6

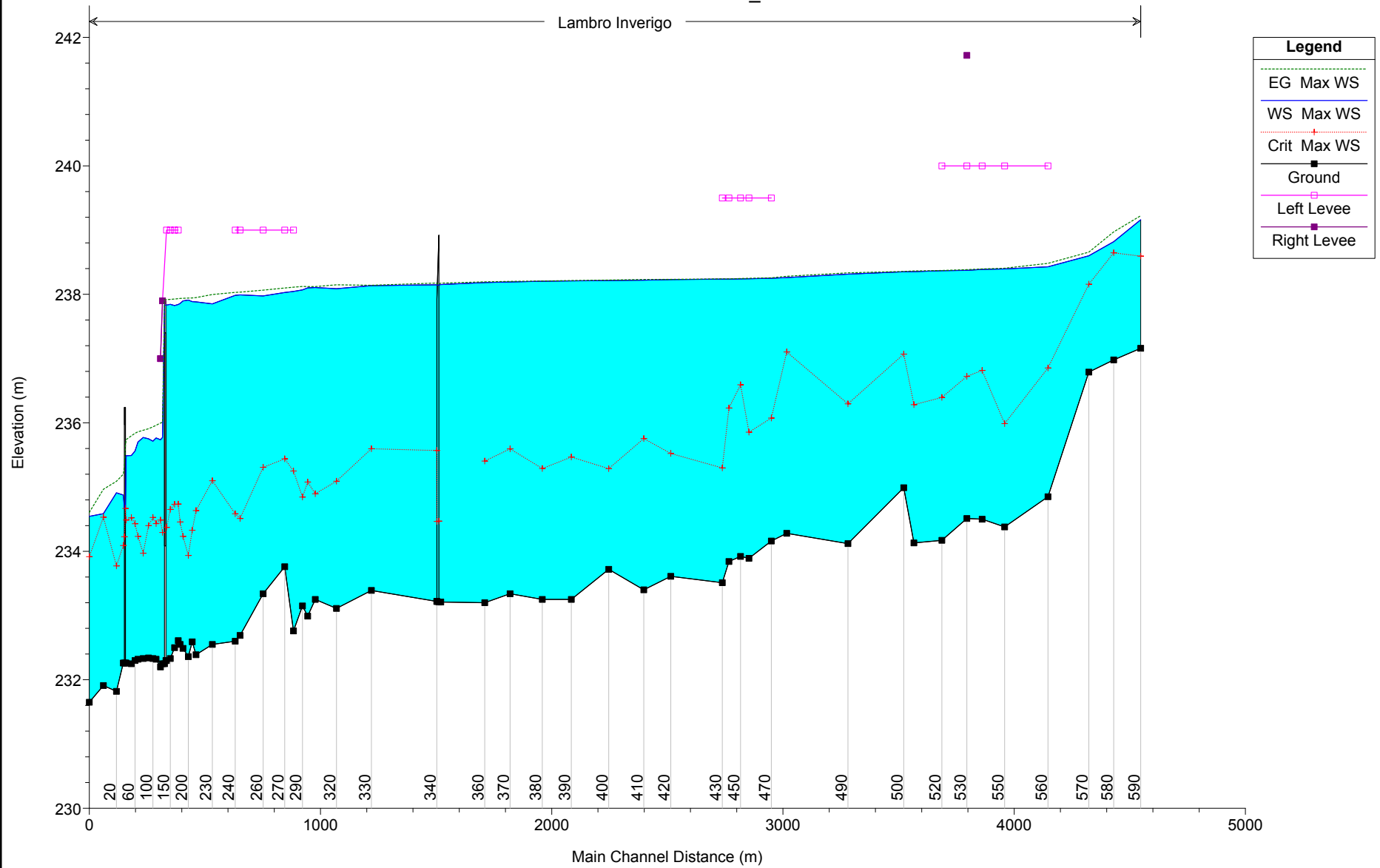
– Scenario B_bis: verifiche ai sensi del D.M. 26/06/2014

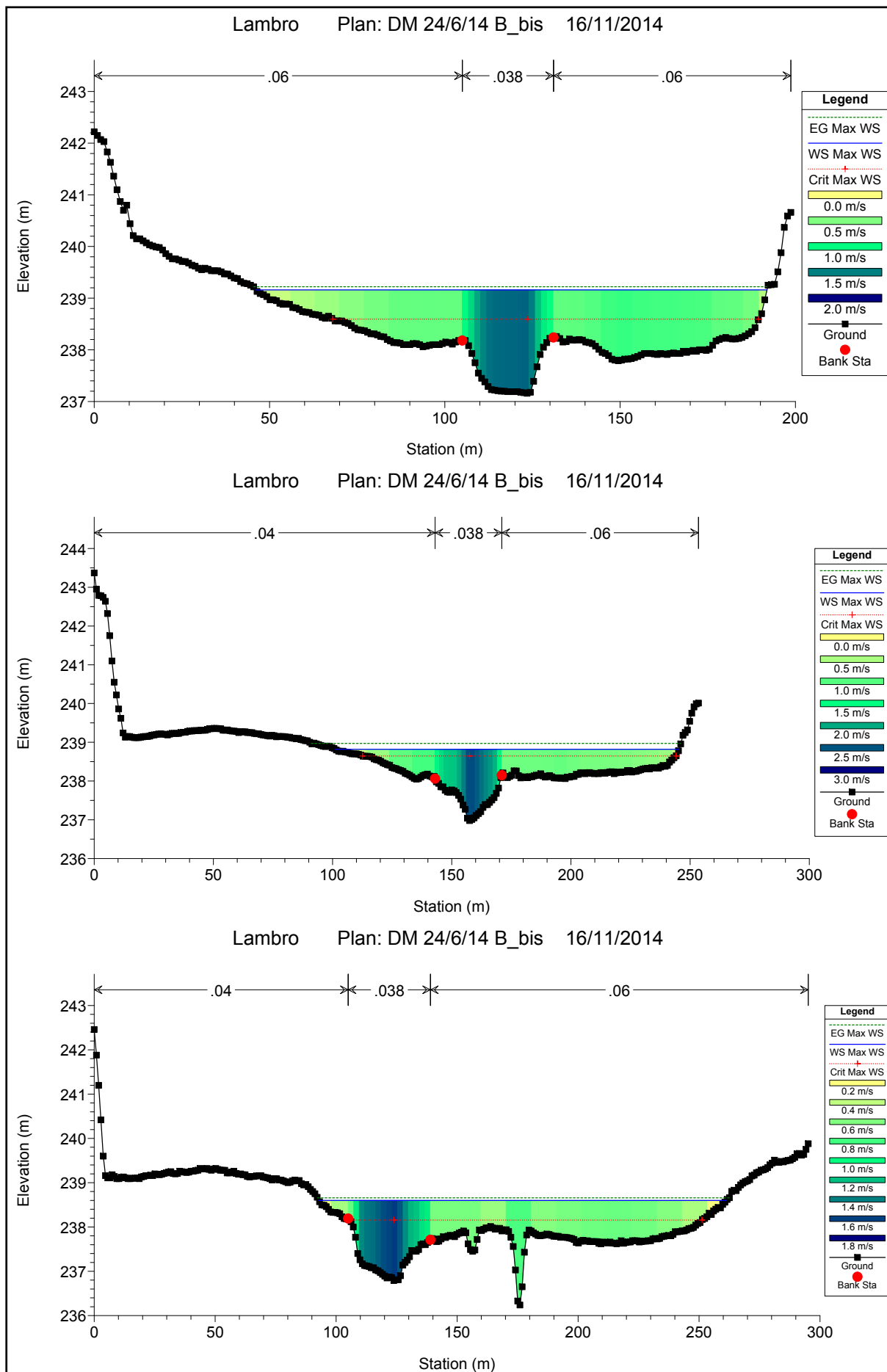
HEC-RAS Plan: DM - B_bis River: Lambro Reach: Inverigo Profile: Max WS

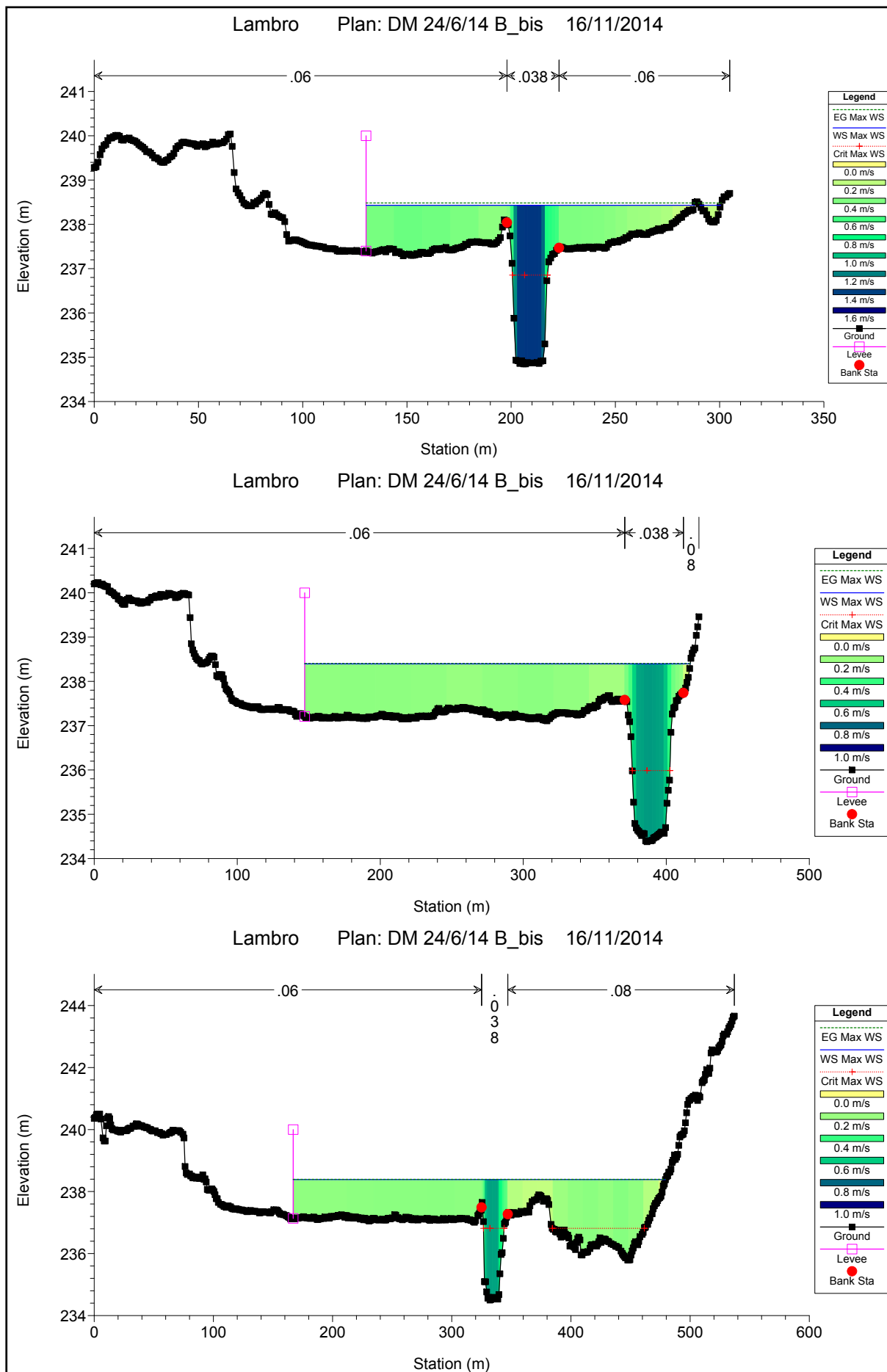
Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
Inverigo	4547.057 590	Max WS	129.10	237.16	239.16	238.59	239.22	0.001588	1.45	149.53	145.78	0.36
Inverigo	4430.646 580	Max WS	127.45	236.98	238.82	238.65	238.97	0.004619	2.12	97.06	144.20	0.59
Inverigo	4322.79 570	Max WS	125.93	236.79	238.60	238.16	238.66	0.001881	1.38	147.64	168.48	0.38
Inverigo	4146.27 560	Max WS	124.12	234.85	238.43	236.85	238.48	0.000711	1.25	176.68	167.49	0.25
Inverigo	3958.712 550	Max WS	123.38	234.38	238.40	235.99	238.41	0.000145	0.61	366.61	269.54	0.12
Inverigo	3861.219 540	Max WS	123.53	234.50	238.39	236.81	238.40	0.000136	0.59	471.26	312.40	0.11
Inverigo	3795.401 530	Max WS	123.24	234.51	238.37	236.72	238.38	0.000178	0.68	347.58	221.95	0.13
Inverigo	3687.068 520	Max WS	123.46	234.17	238.37	236.39	238.37	0.000037	0.32	474.12	310.85	0.06
Inverigo	3566.631 510	Max WS	123.21	234.13	238.35	236.28	238.36	0.000136	0.53	296.85	276.94	0.11
Inverigo	3522.358 500	Max WS	123.30	234.99	238.35	237.07	238.36	0.000131	0.48	377.03	311.15	0.11
Inverigo	3281.337 490	Max WS	122.98	234.12	238.31	236.30	238.33	0.000345	0.80	318.46	405.23	0.17
Inverigo	3016.292 480	Max WS	122.24	234.28	238.26	237.10	238.28	0.000316	0.89	363.11	331.45	0.17
Inverigo	2949.954 470	Max WS	122.41	234.16	238.25	236.07	238.26	0.000103	0.59	517.97	302.12	0.10
Inverigo	2852.912 460	Max WS	122.56	233.89	238.24	235.85	238.25	0.000092	0.54	544.72	288.48	0.10
Inverigo	2816.748 450	Max WS	122.63	233.92	238.24	236.59	238.25	0.000102	0.56	538.64	281.46	0.10
Inverigo	2766.457 440	Max WS	122.73	233.84	238.24	236.23	238.24	0.000056	0.43	659.77	301.37	0.07
Inverigo	2737.543 430	Max WS	122.78	233.51	238.24	235.30	238.24	0.000043	0.40	695.10	312.67	0.07
Inverigo	2514.769 420	Max WS	122.64	233.61	238.23	235.52	238.23	0.000048	0.44	688.45	292.82	0.07
Inverigo	2398.189 410	Max WS	122.76	233.40	238.22	235.75	238.23	0.000112	0.64	481.05	224.14	0.10
Inverigo	2246.646 400	Max WS	122.90	233.72	238.21	235.29	238.22	0.000066	0.49	505.30	266.95	0.08
Inverigo	2084.842 390	Max WS	123.07	233.25	238.21	235.47	238.21	0.000064	0.47	587.78	312.51	0.08
Inverigo	1959.351 380	Max WS	123.32	233.25	238.20	235.29	238.21	0.000039	0.40	743.11	341.23	0.06
Inverigo	1819.658 370	Max WS	123.24	233.34	238.19	235.59	238.20	0.000085	0.58	459.63	426.30	0.09
Inverigo	1710.393 360	Max WS	123.47	233.20	238.18	235.40	238.19	0.000098	0.64	434.80	379.98	0.10
Inverigo	1520.357 350	Max WS	123.80	233.21	238.15		238.17	0.000191	0.75	304.53	267.54	0.13
Inverigo	1511.685 345		Mult Open									
Inverigo	1503.015 340	Max WS	123.56	233.22	238.15	235.57	238.18	0.000260	0.80	268.46	260.58	0.15
Inverigo	1219.906 330	Max WS	123.82	233.39	238.13	235.60	238.14	0.000063	0.52	483.48	372.43	0.08
Inverigo	1068.842 320	Max WS	123.96	233.11	238.09	235.09	238.15	0.000269	1.13	134.30	347.34	0.17
Inverigo	977.0419 310	Max WS	124.11	233.25	238.11	234.90	238.12	0.000083	0.61	290.00	342.20	0.10
Inverigo	944.2654 300	Max WS	124.16	232.99	238.10	235.08	238.12	0.000115	0.74	277.44	300.55	0.11
Inverigo	921.7176 290	Max WS	124.05	233.15	238.07	234.84	238.12	0.000223	1.03	120.71	368.55	0.16
Inverigo	883.1097 280	Max WS	124.11	232.76	238.05	235.25	238.11	0.000304	1.14	109.27	358.57	0.18
Inverigo	844.9036 270	Max WS	124.16	233.76	238.03	235.44	238.10	0.000343	1.19	104.63	375.43	0.19
Inverigo	752.0323 260	Max WS	124.32	233.34	237.98	235.31	238.06	0.000402	1.32	94.13	372.07	0.21
Inverigo	652.2289 250	Max WS	124.58	232.69	237.99	234.51	238.03	0.000171	0.92	135.65	432.25	0.14
Inverigo	631.1052 240	Max WS	124.62	232.60	237.98	234.58	238.03	0.000189	0.96	129.91	438.81	0.14
Inverigo	532.0892 230	Max WS	124.59	232.55	237.85	235.10	238.00	0.000632	1.70	73.31	550.37	0.26
Inverigo	461.4436 220	Max WS	134.14	232.39	237.88	234.63	237.95	0.000259	1.13	118.95	567.04	0.17
Inverigo	444.964 210	Max WS	134.23	232.59	237.89	234.33	237.94	0.000210	1.06	126.83	546.48	0.15
Inverigo	428.3983 200	Max WS	134.33	232.36	237.91	233.93	237.94	0.000106	0.77	174.03	514.78	0.11
Inverigo	405.128 190	Max WS	134.43	232.49	237.90	234.23	237.94	0.000150	0.89	150.88	437.98	0.13
Inverigo	392.612 180	Max WS	134.49	232.55	237.86	234.46	237.94	0.000286	1.23	109.28	426.67	0.18
Inverigo	384.5591 170	Max WS	134.54	232.61	237.84	234.74	237.93	0.000357	1.34	100.10	359.90	0.20
Inverigo	368.98 160	Max WS	134.64	232.50	237.82	234.73	237.93	0.000398	1.42	94.89	260.44	0.21
Inverigo	350.5163 150	Max WS	134.77	232.33	237.84	234.65	237.92	0.000299	1.22	110.41	201.39	0.18
Inverigo	333.7652 140	Max WS	134.89	232.30	237.83	234.37	237.92	0.000087	1.29	104.78	170.18	0.18
Inverigo	325		Inl Struct									
Inverigo	316.6304 130	Max WS	134.89	232.25	235.77	234.29	236.01	0.000477	2.15	62.84	65.12	0.40
Inverigo	307.8002 120	Max WS	134.95	232.20	235.74	234.49	236.00	0.001991	2.26	59.75	75.50	0.43
Inverigo	288.6484 110	Max WS	135.03	232.32	235.76	234.43	235.96	0.001565	1.97	68.58	151.10	0.38
Inverigo	275.1218 100	Max WS	135.09	232.33	235.72	234.53	235.94	0.001867	2.09	64.56	146.87	0.42
Inverigo	256.351 90	Max WS	135.15	232.34	235.75	234.40	235.91	0.001321	1.75	77.03	136.94	0.35
Inverigo	233.2564 80	Max WS	135.21	232.33	235.77	233.97	235.88	0.000778	1.48	91.10	133.65	0.27
Inverigo	210.6123 70	Max WS	135.30	232.32	235.70	234.23	235.86	0.001296	1.76	76.70	121.91	0.35
Inverigo	197.713 60	Max WS	135.39	232.30	235.56	234.43	235.84	0.002452	2.33	58.13	109.90	0.47
Inverigo	181.8634 50	Max WS	135.50	232.25	235.49	234.52	235.80	0.002666	2.45	55.40	98.82	0.49
Inverigo	159.4336 40	Max WS	135.62	232.26	235.49	234.49	235.74	0.002474	2.22	61.08	69.74	0.47
Inverigo	153.24 35		Bridge									
Inverigo	147.0547 30	Max WS	135.61	232.26	234.88	234.09	235.20	0.003882	2.53	53.66	26.79	0.57
Inverigo	117.4892 20	Max WS	135.80	231.82	234.91	233.77	235.09	0.002238	1.95	105.95	182.96	0.43
Inverigo	60.7408 10	Max WS	136.13	231.91	234.59	234.53	234.97	0.005778	2.88	77.00	166.08	0.68
Inverigo	0 0	Max WS	136.13	231.65	234.54	233.92	234.61	0.001220	1.38	207.84	236.88	0.32

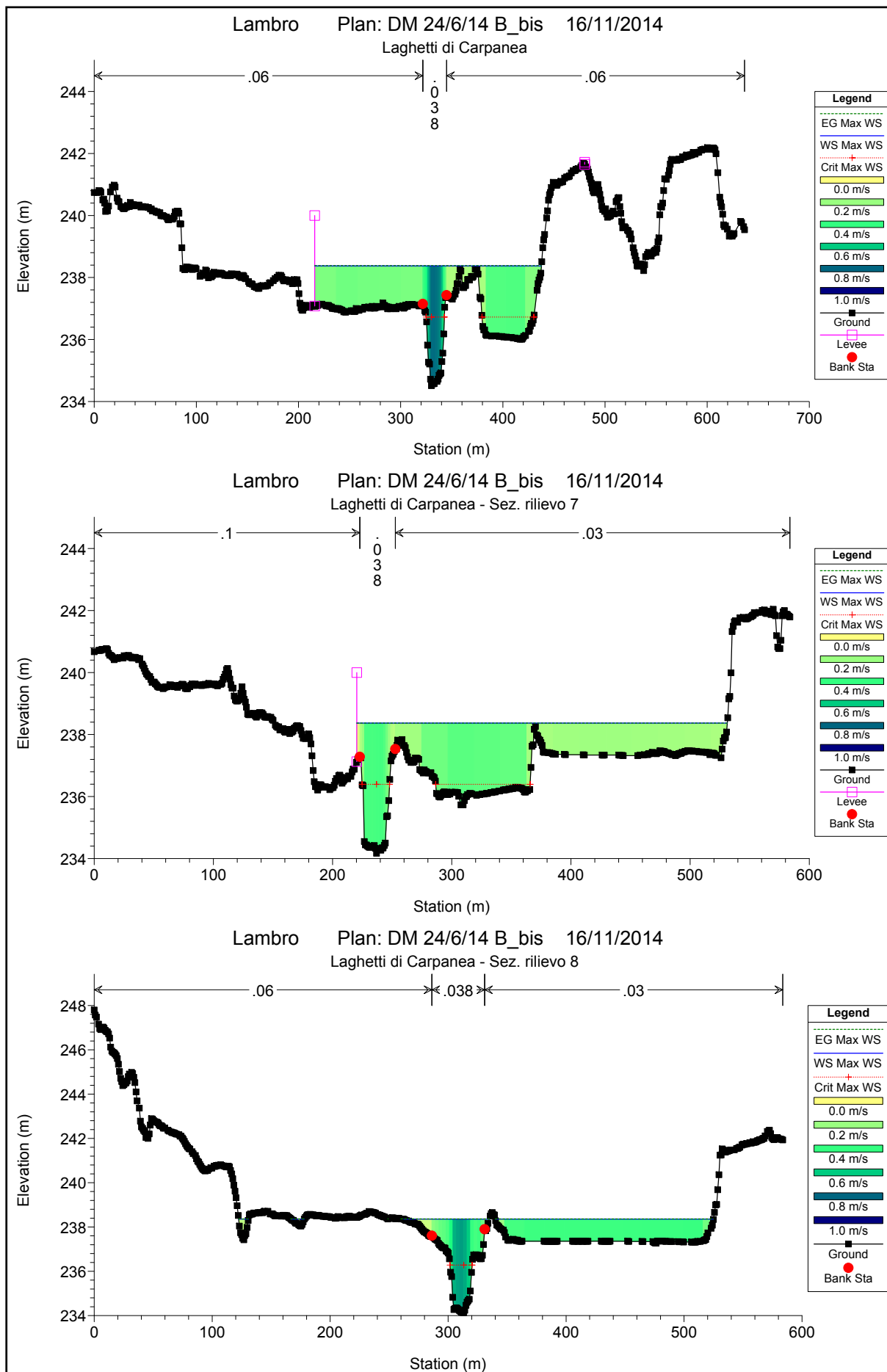
Lambro Plan: DM 24/6/14 B_bis 16/11/2014

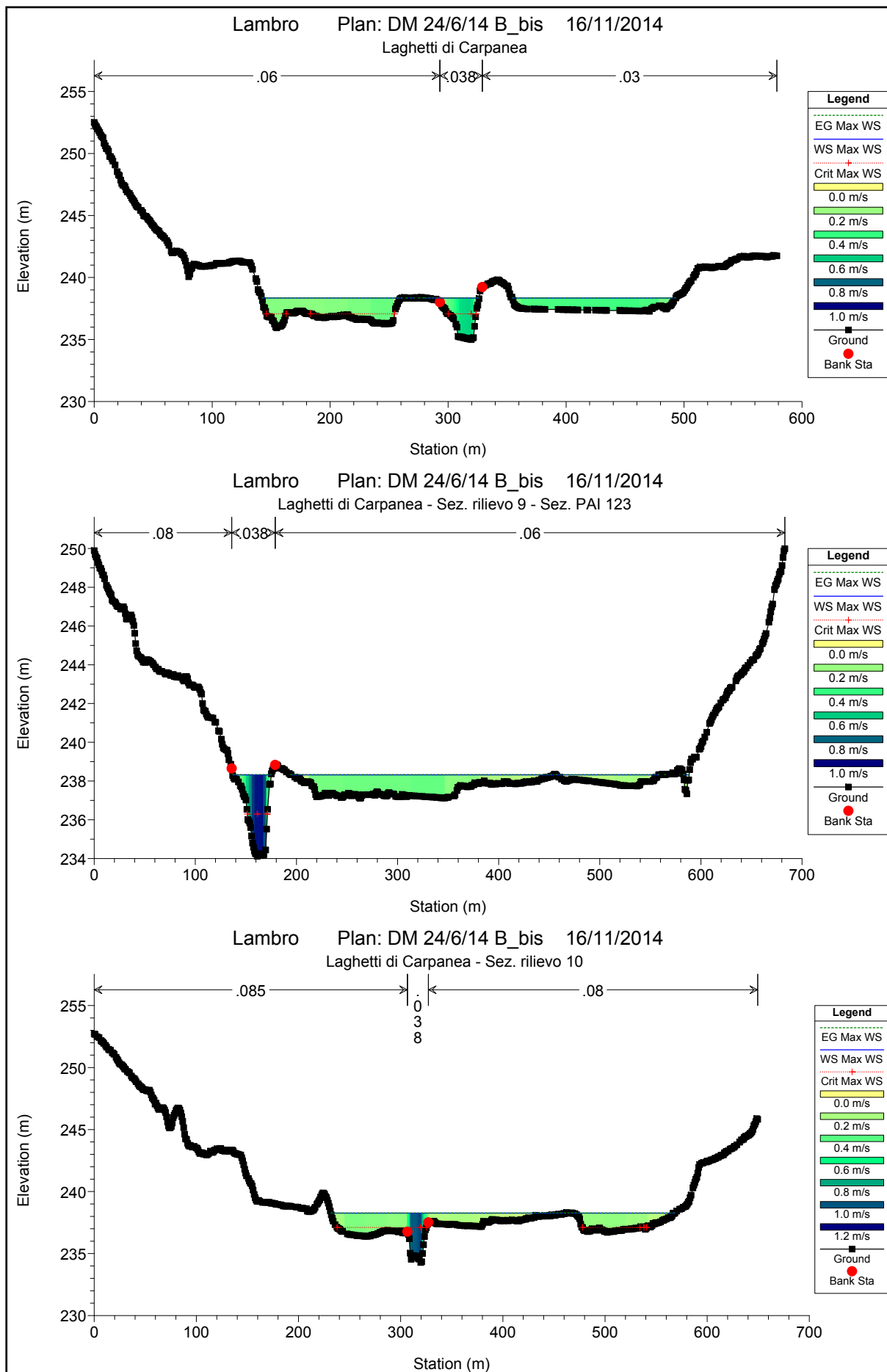
Lambro Inverigo

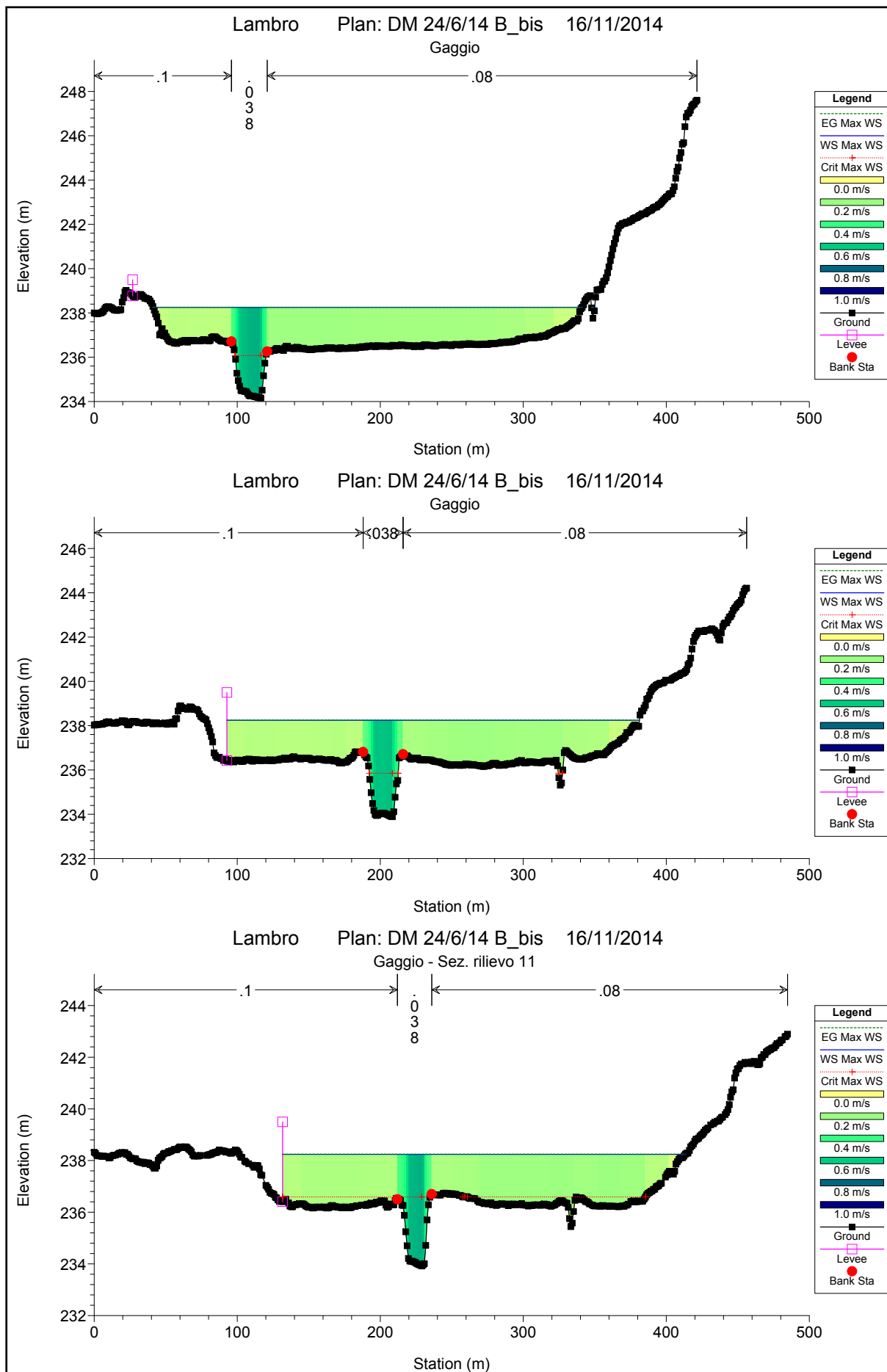


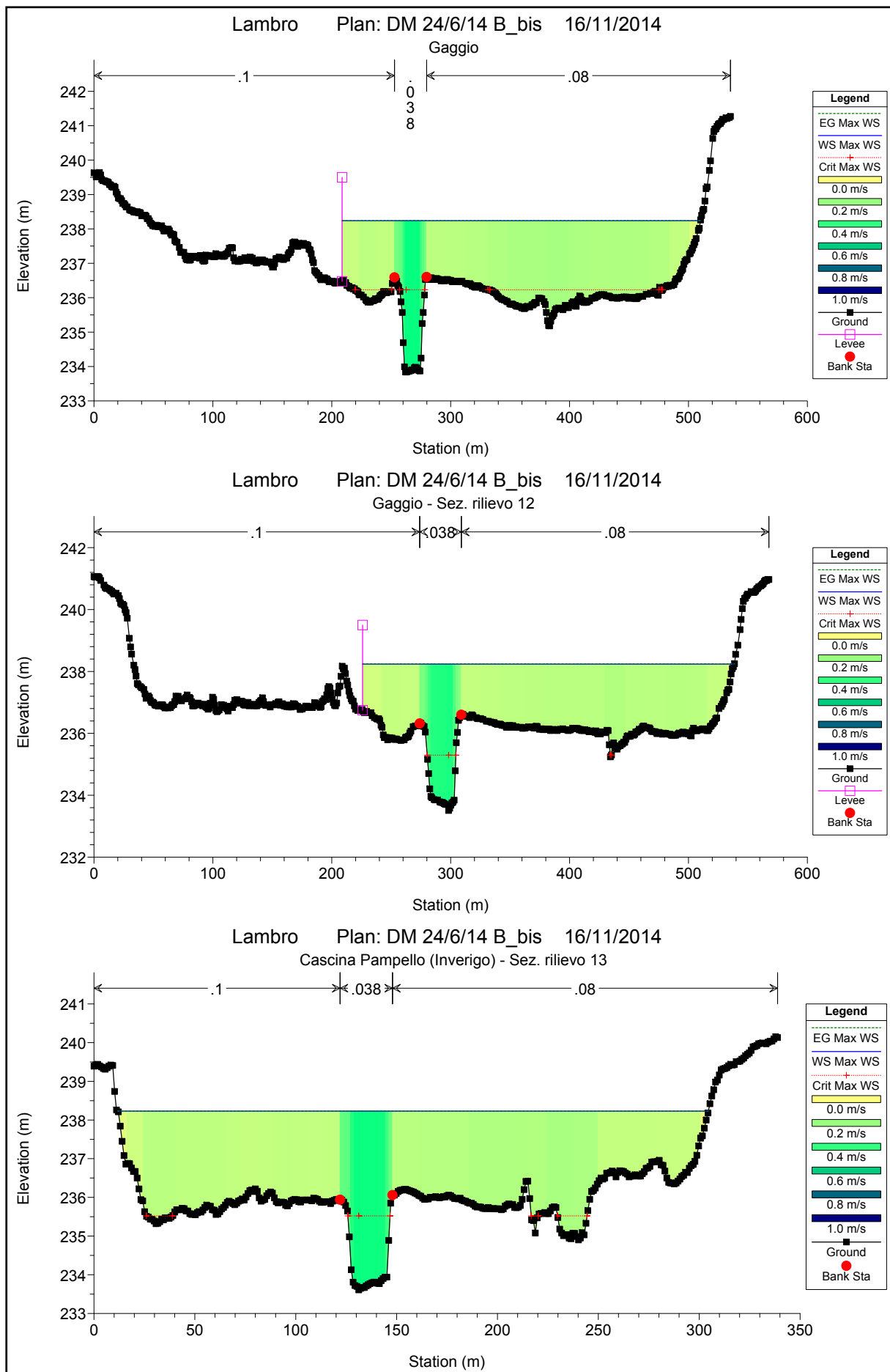


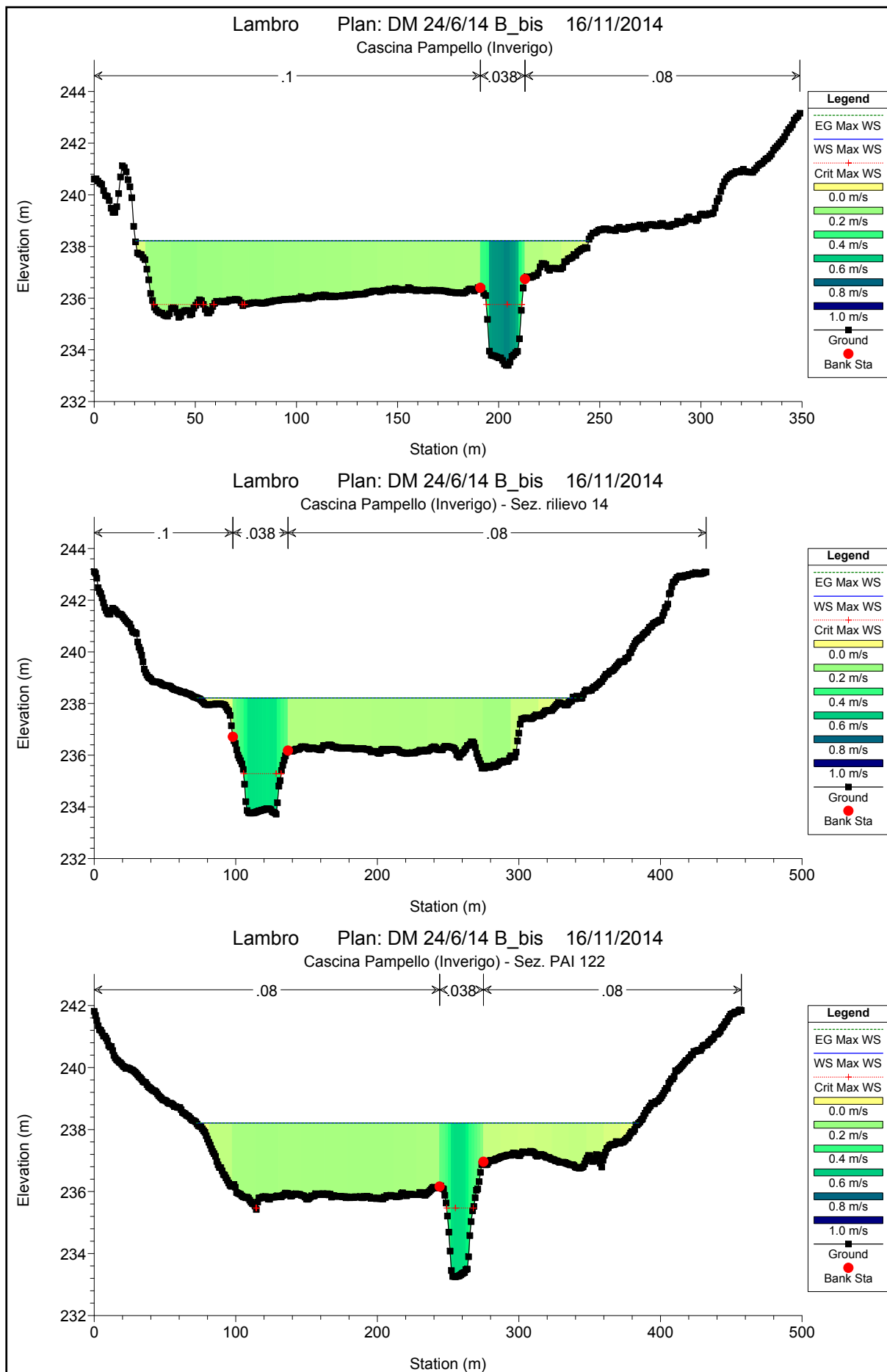


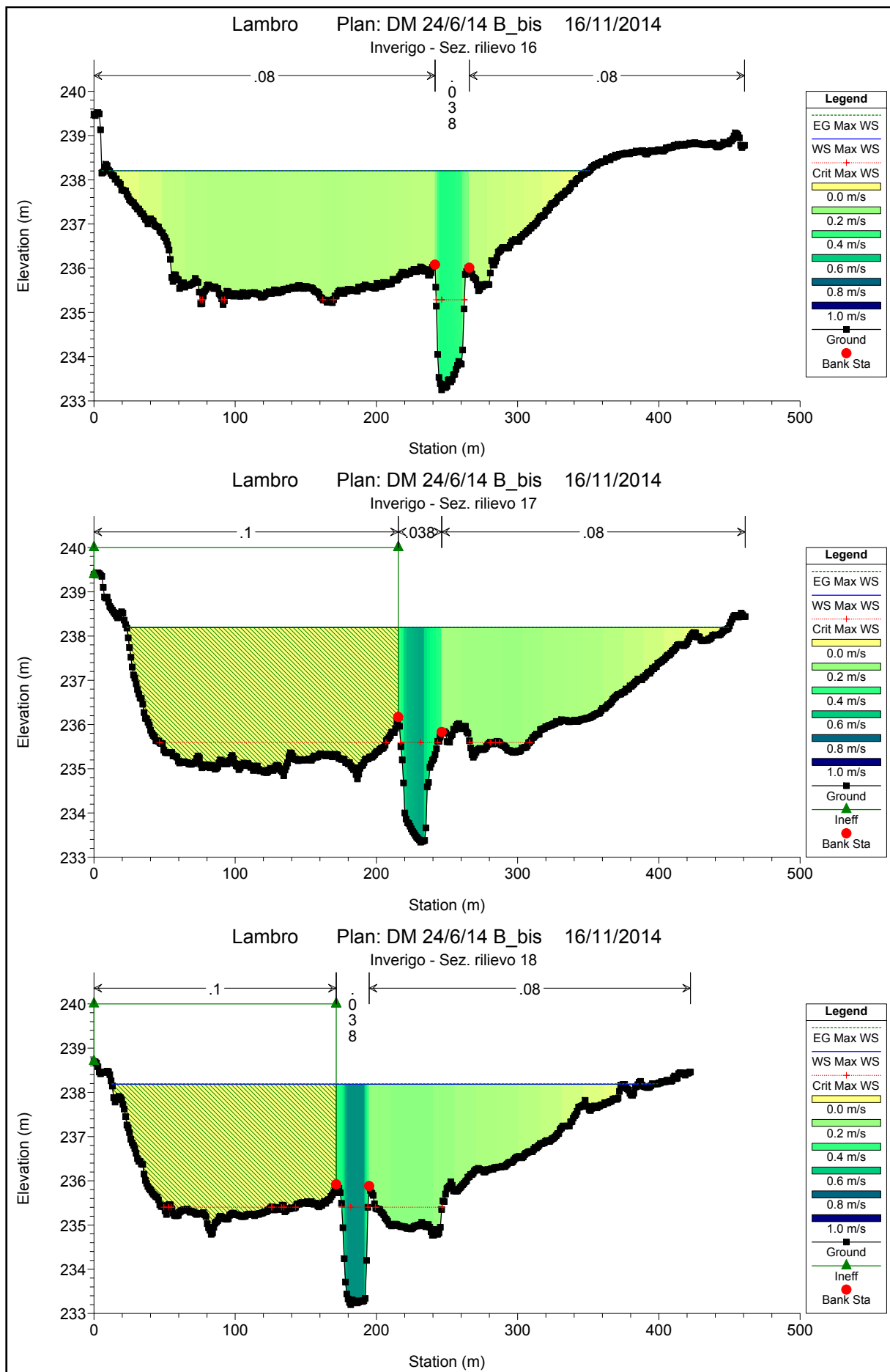


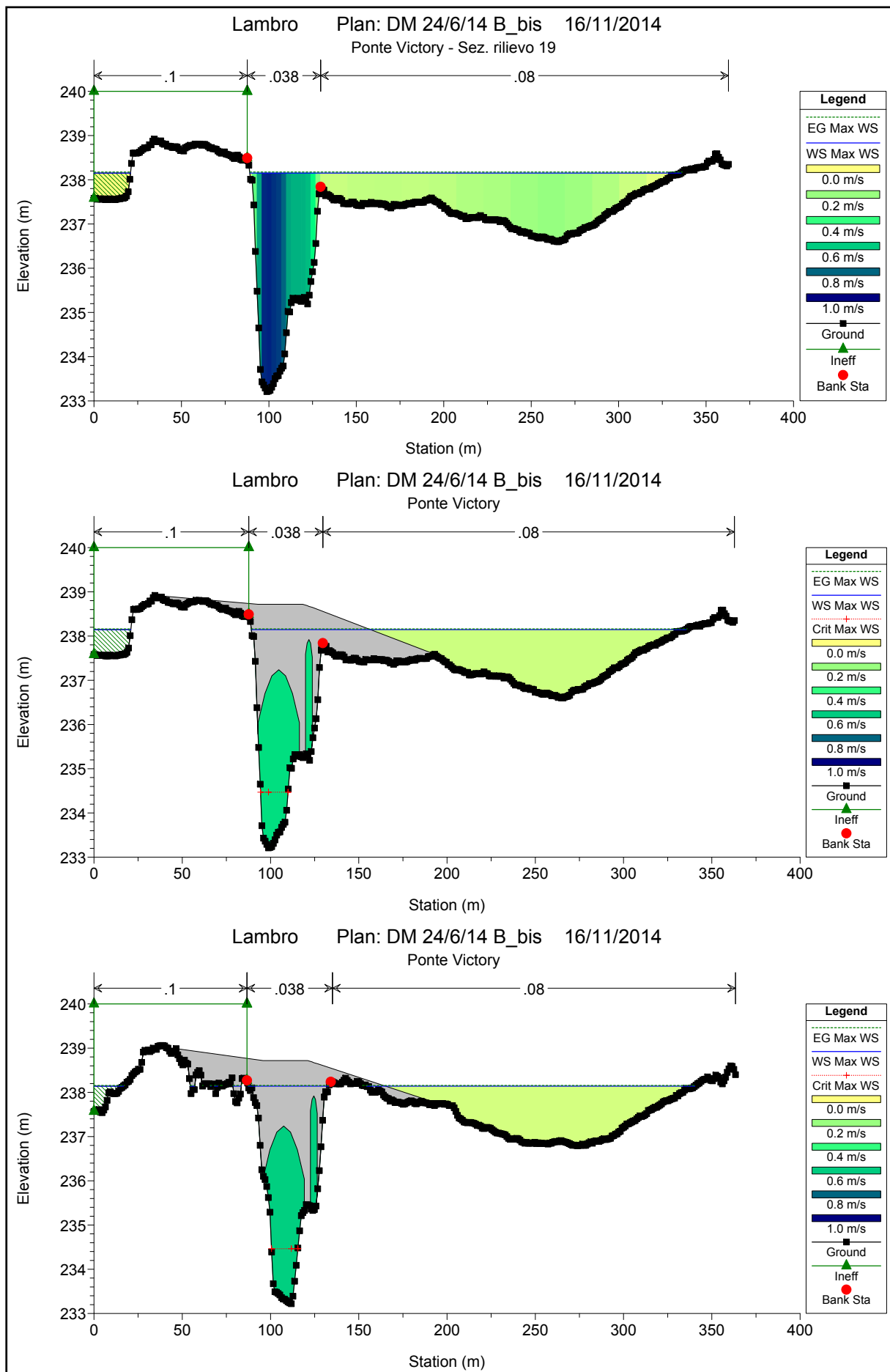


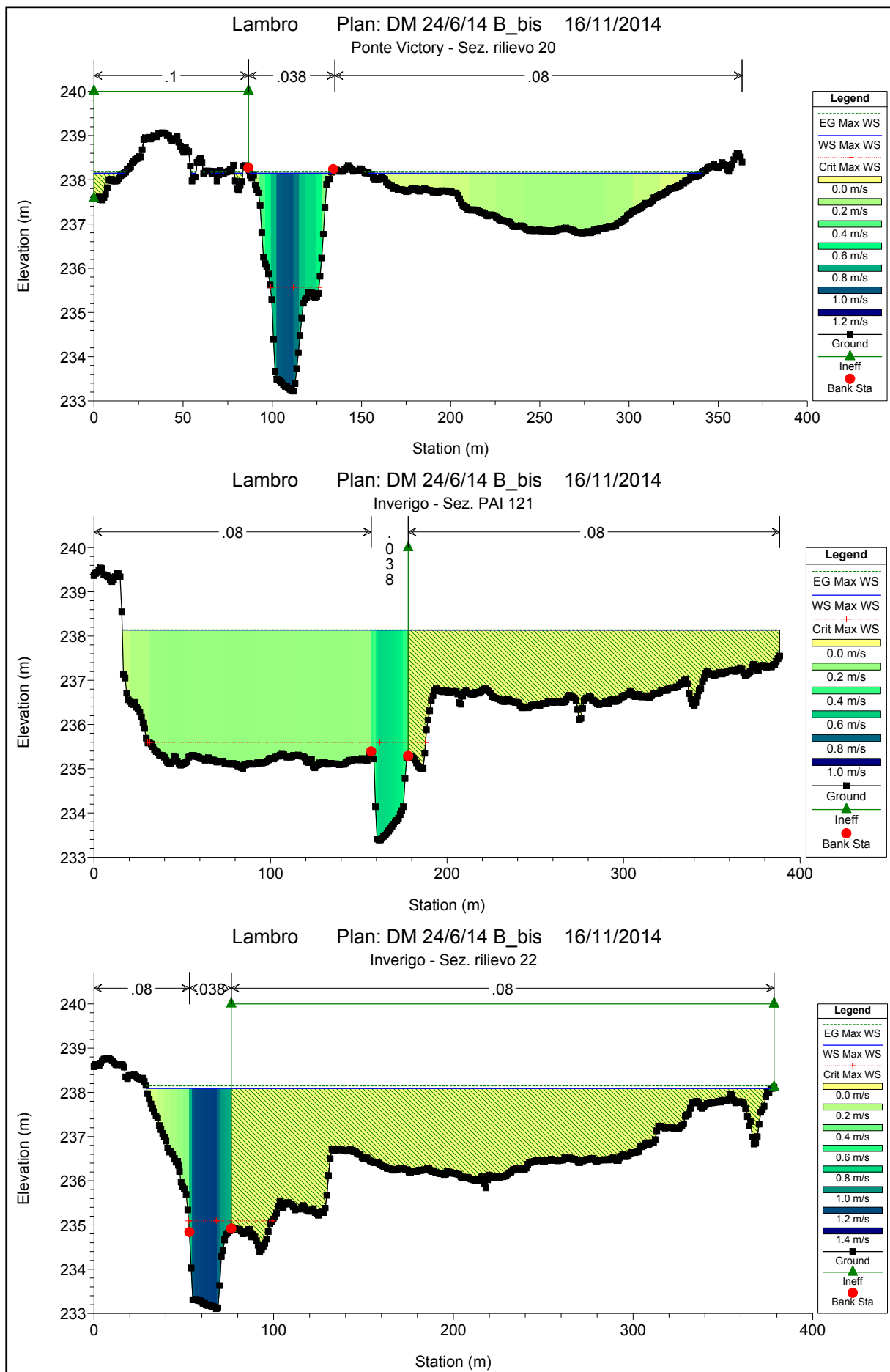


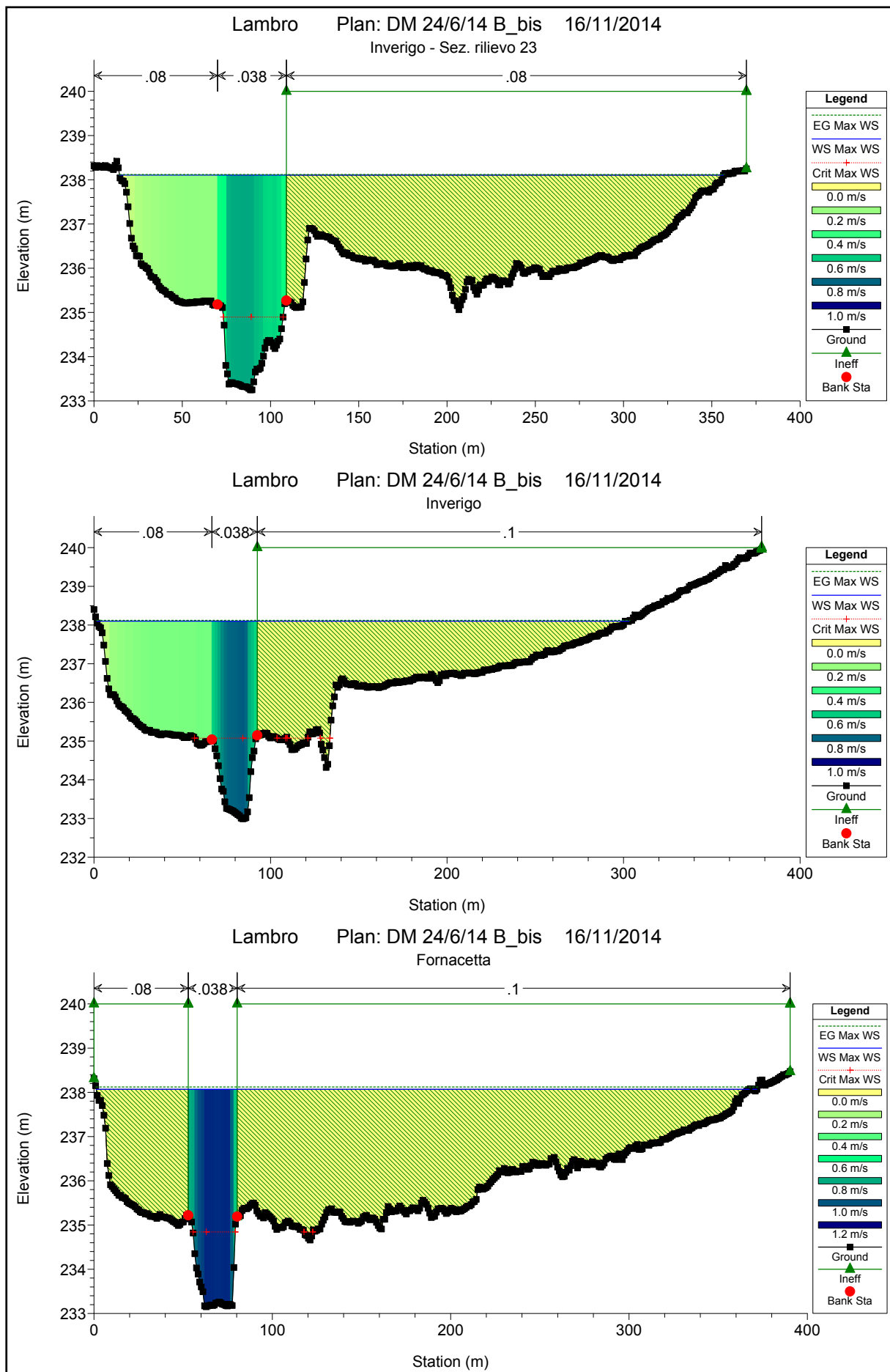


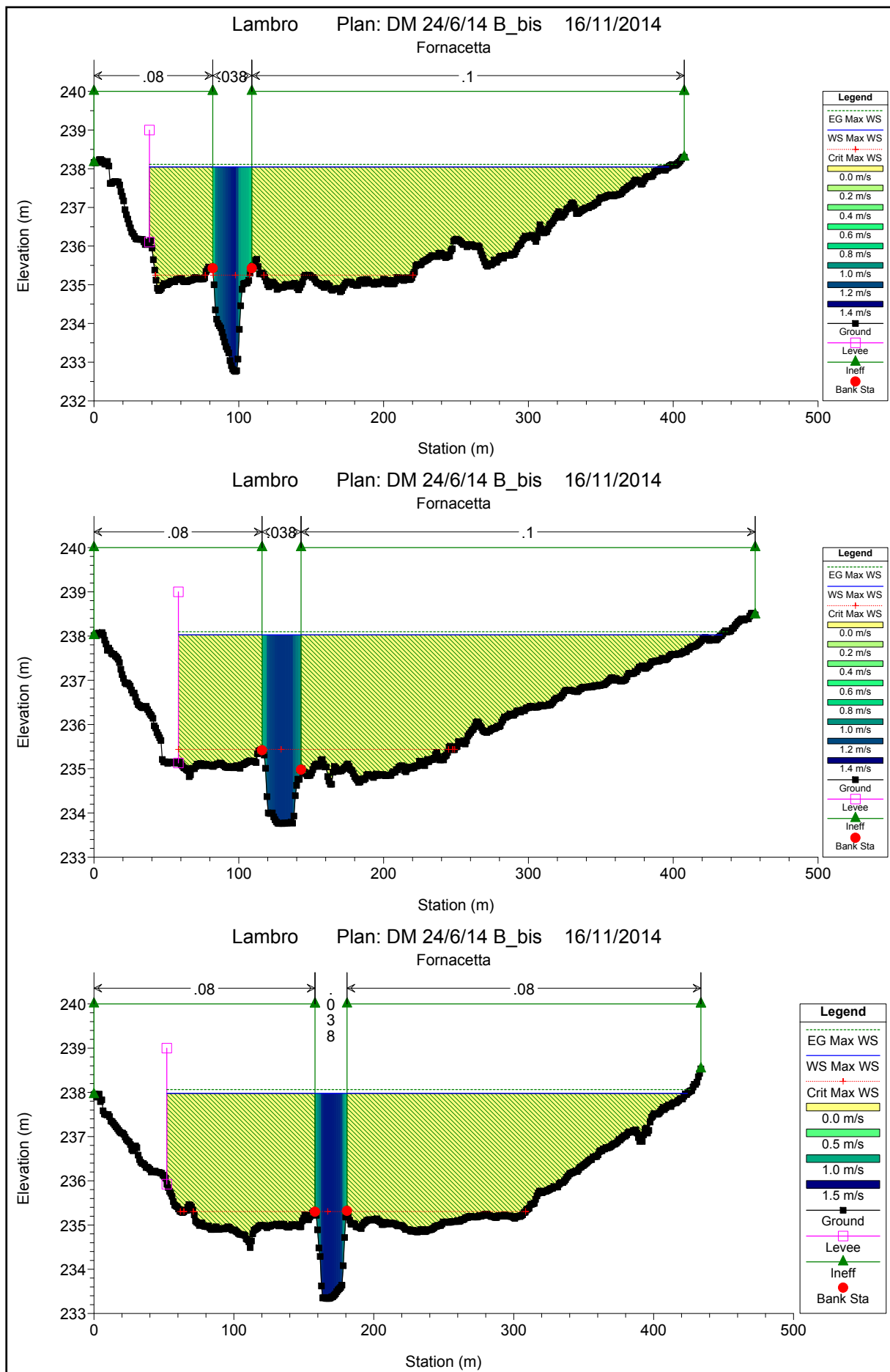


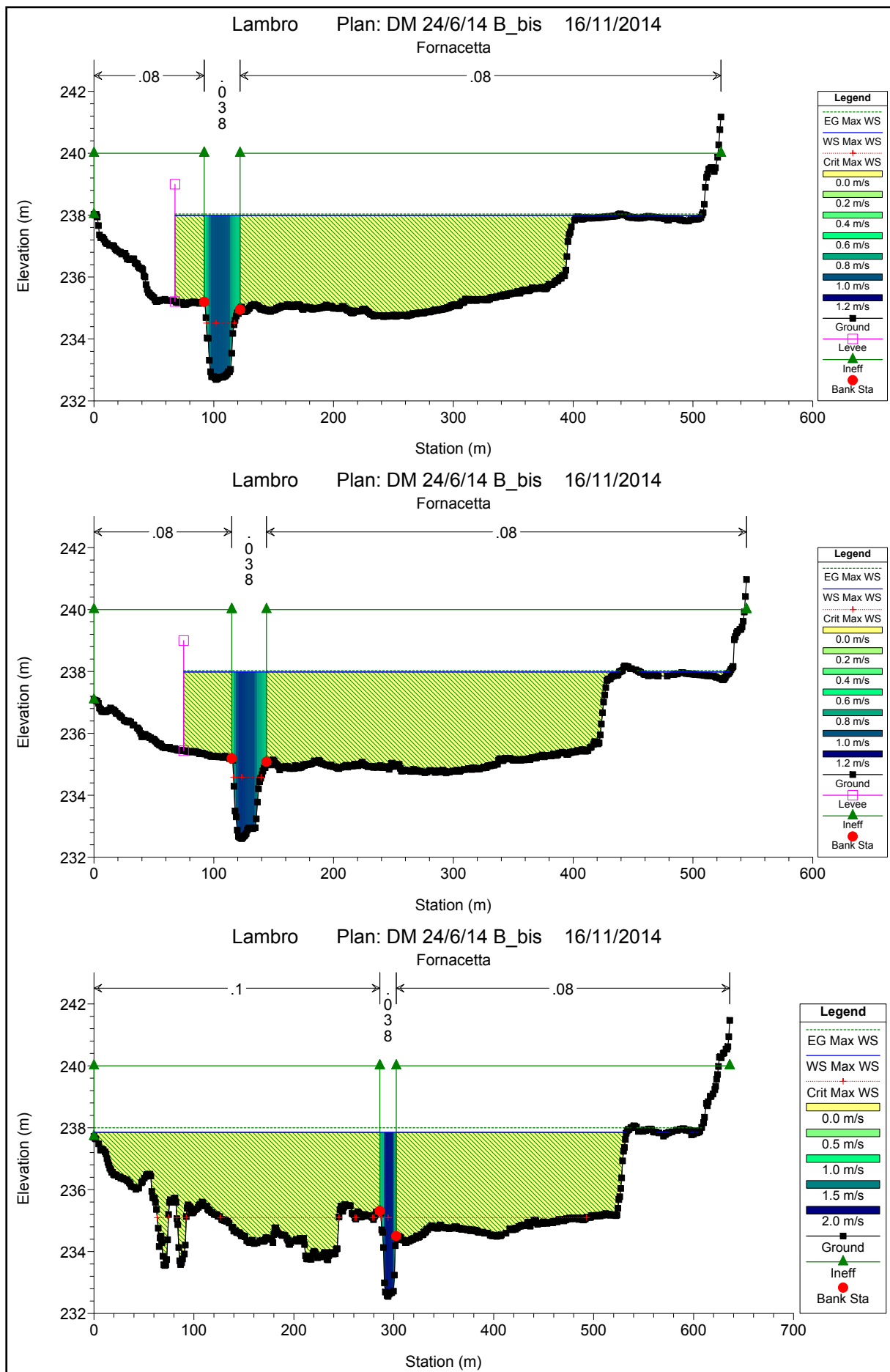


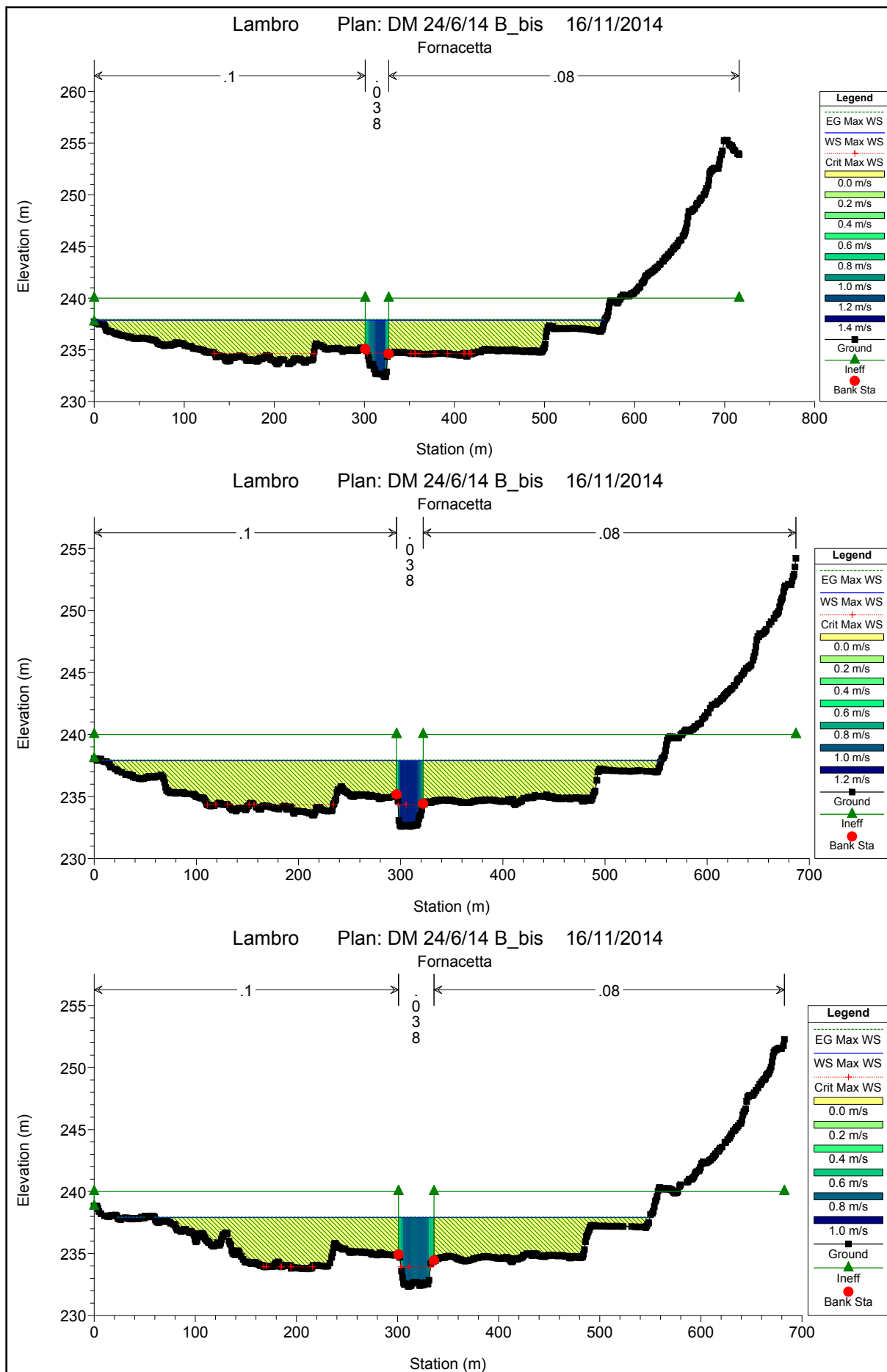


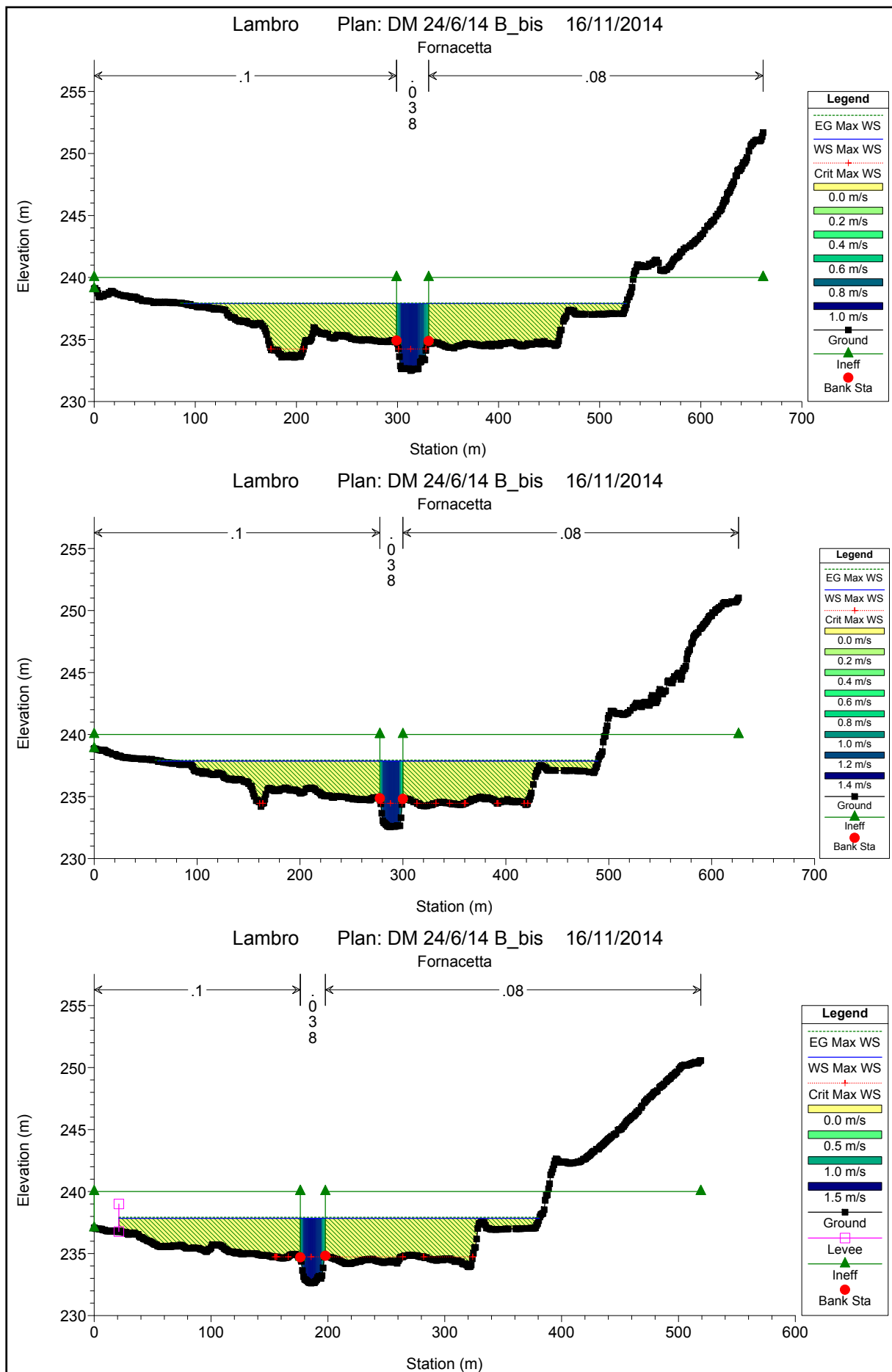


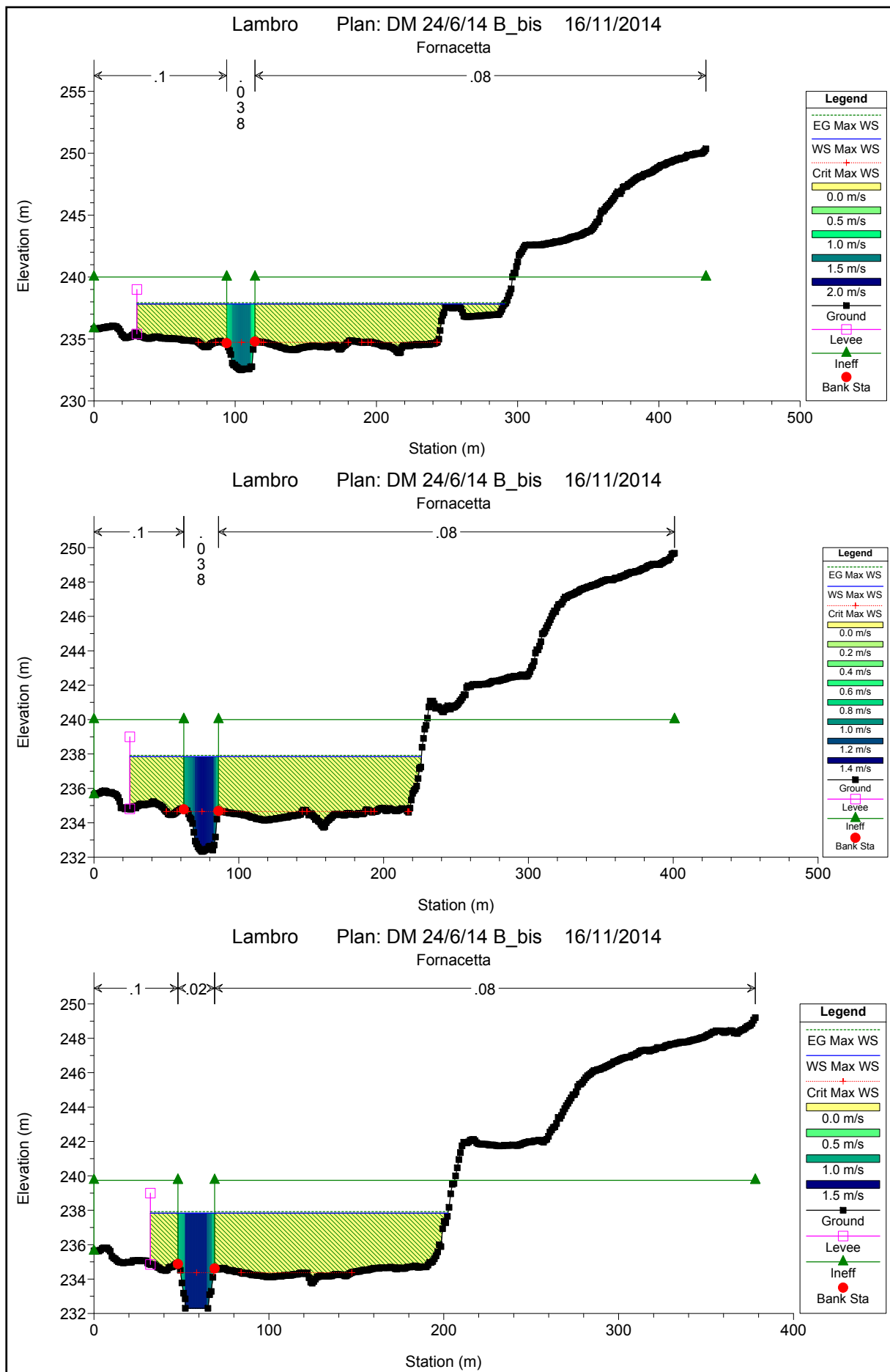


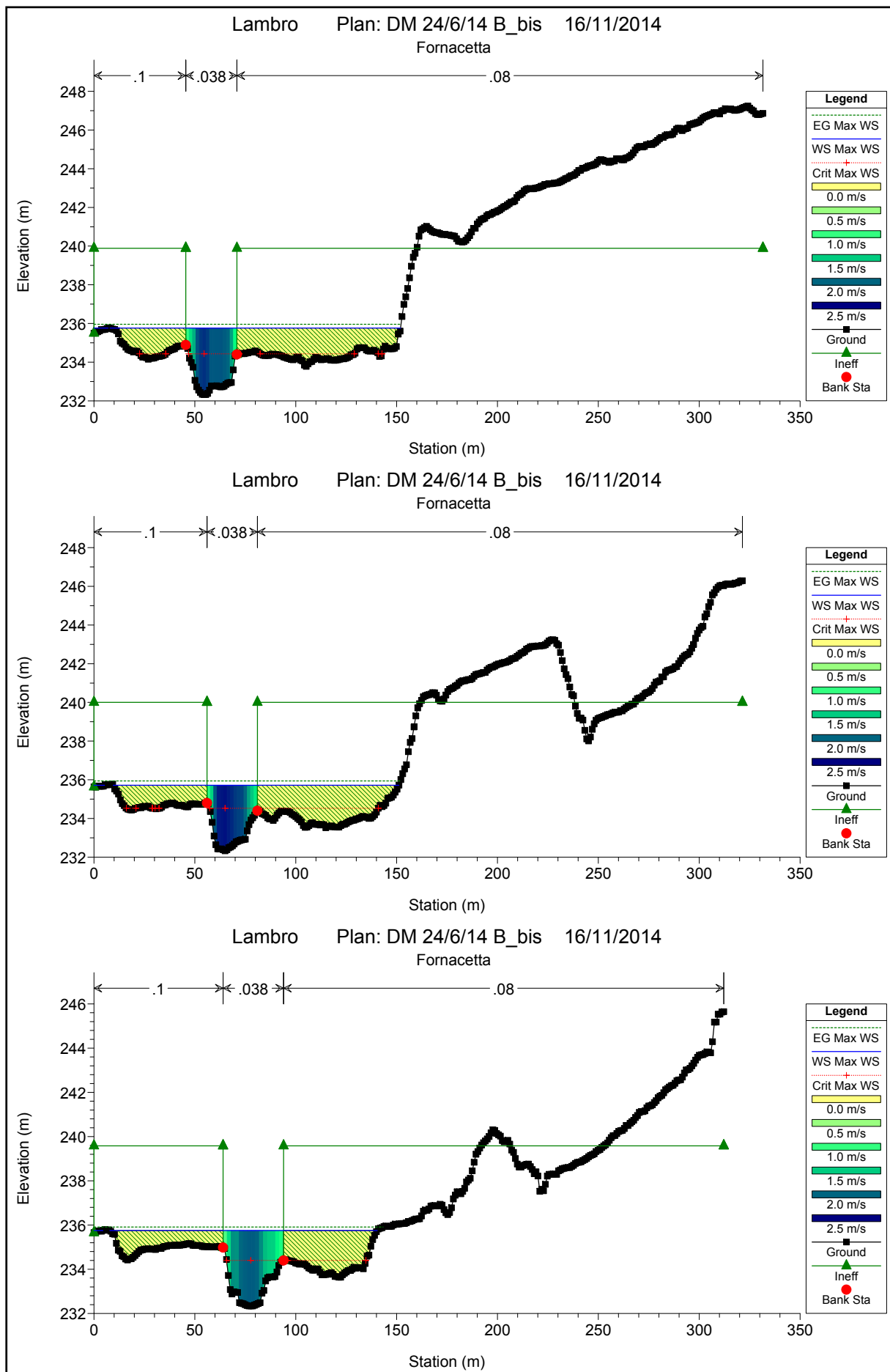


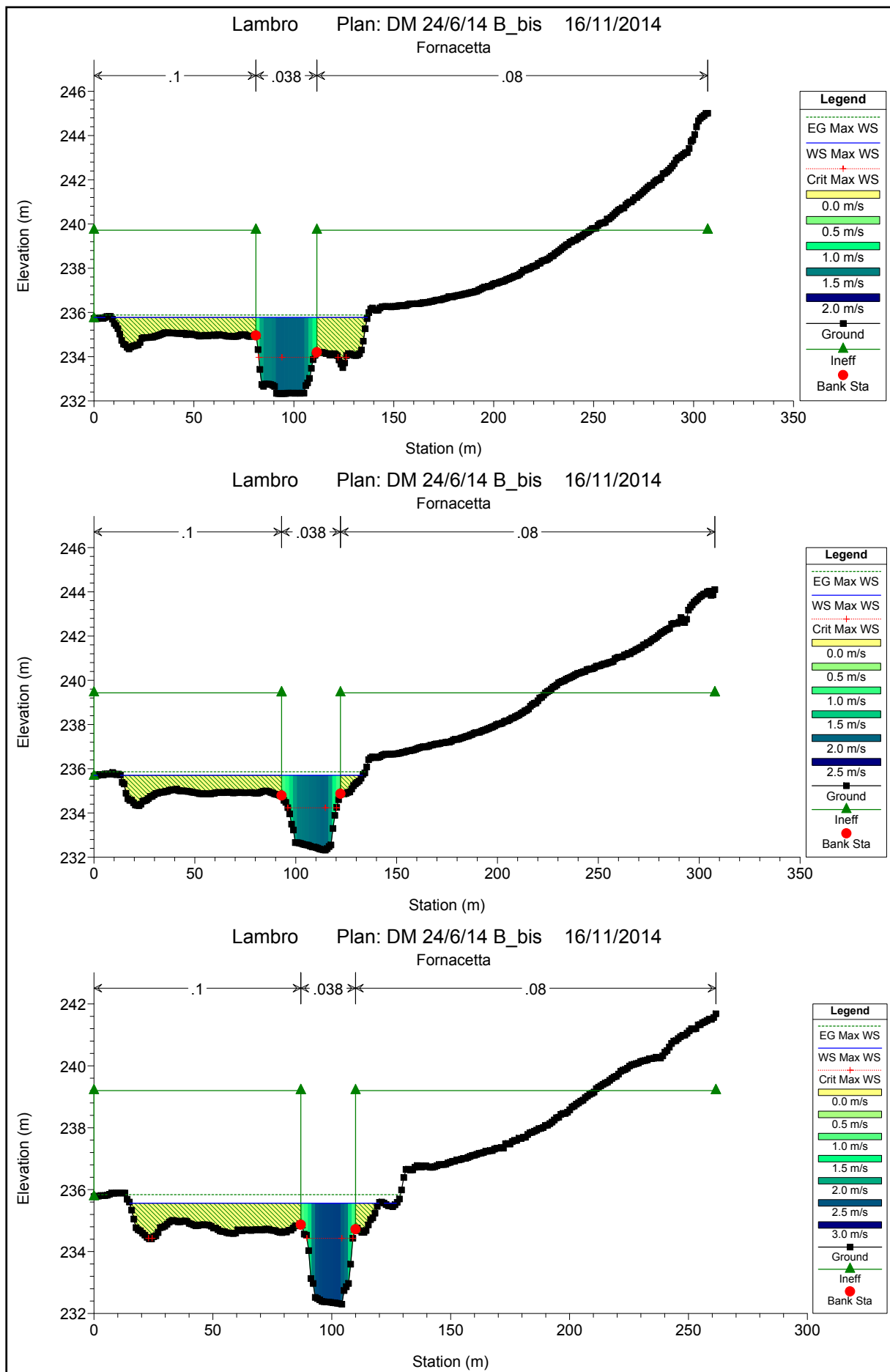


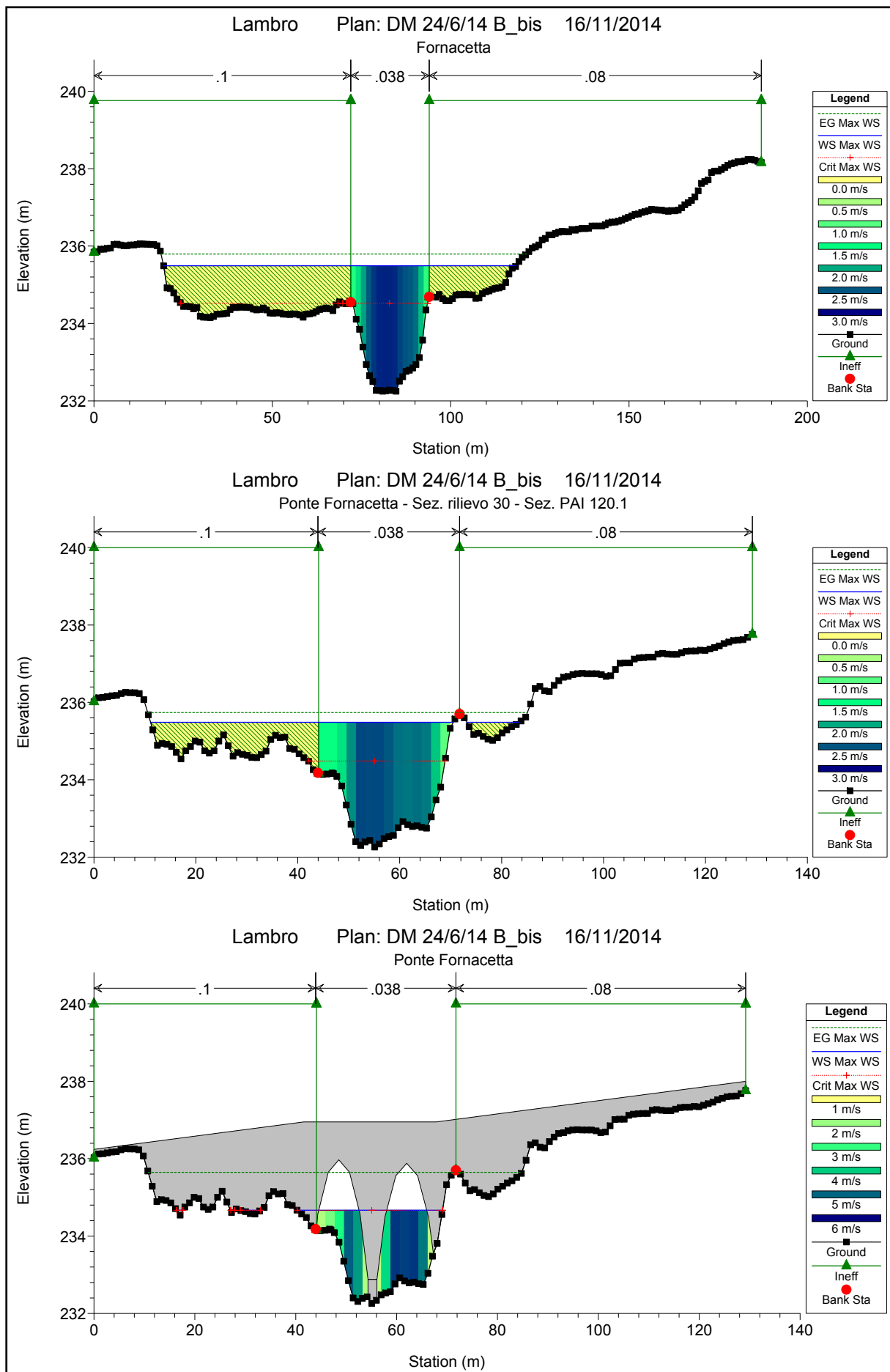


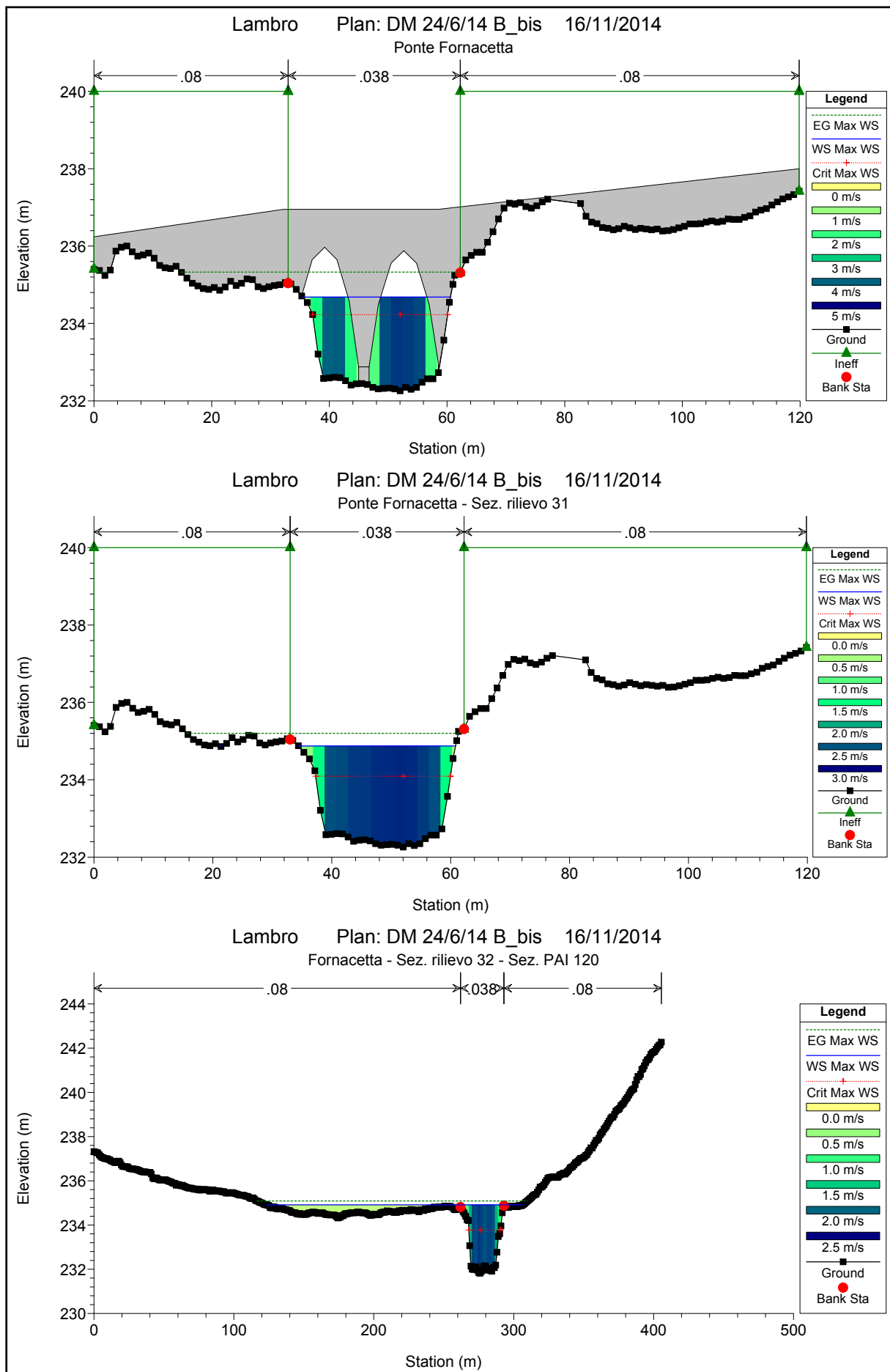


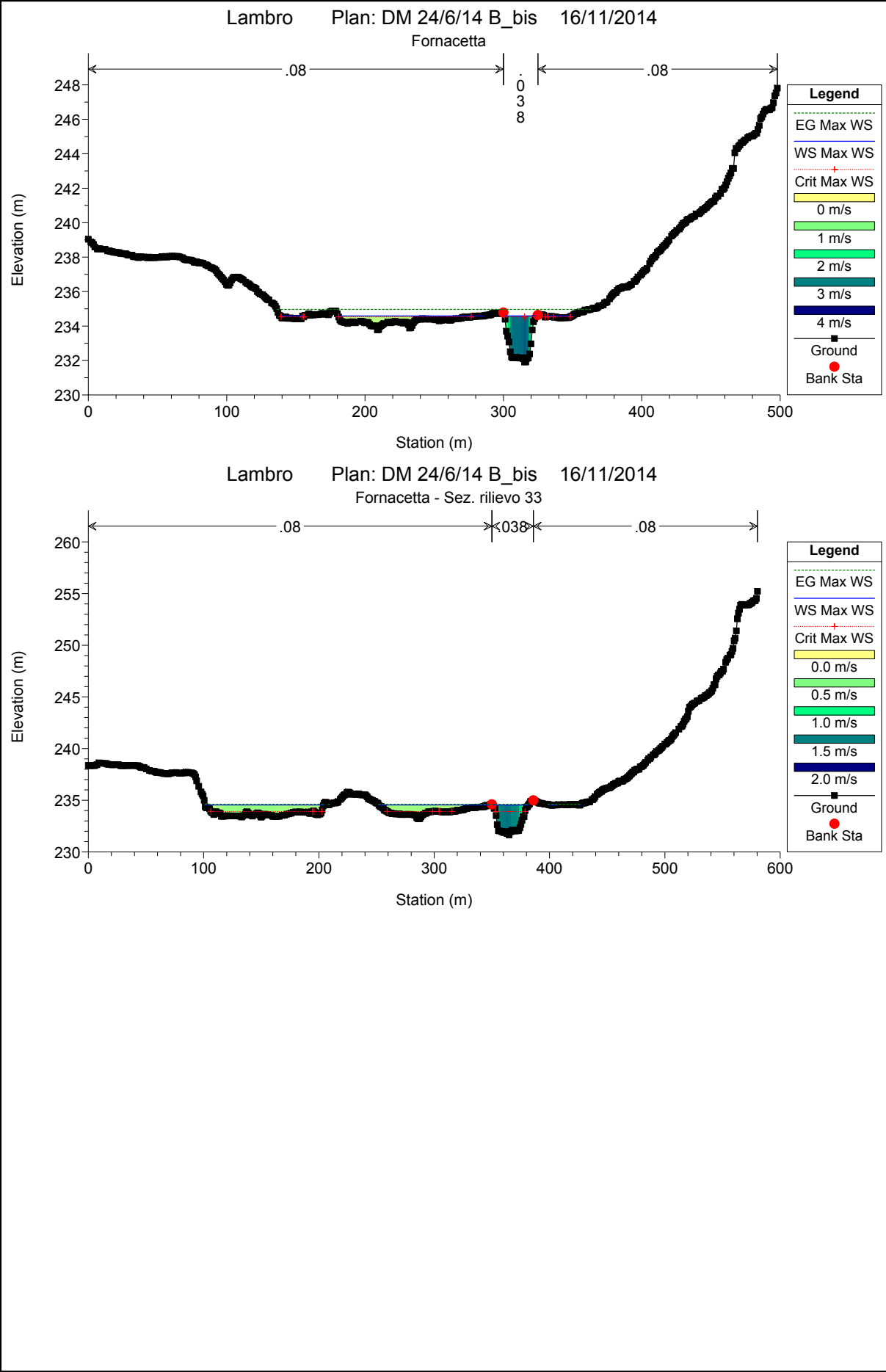














PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

Progetto Definitivo

SRIA
s.r.l.
STUDIO ROSSO
INGEGNERI ASSOCIATI

ALLEGATO 7

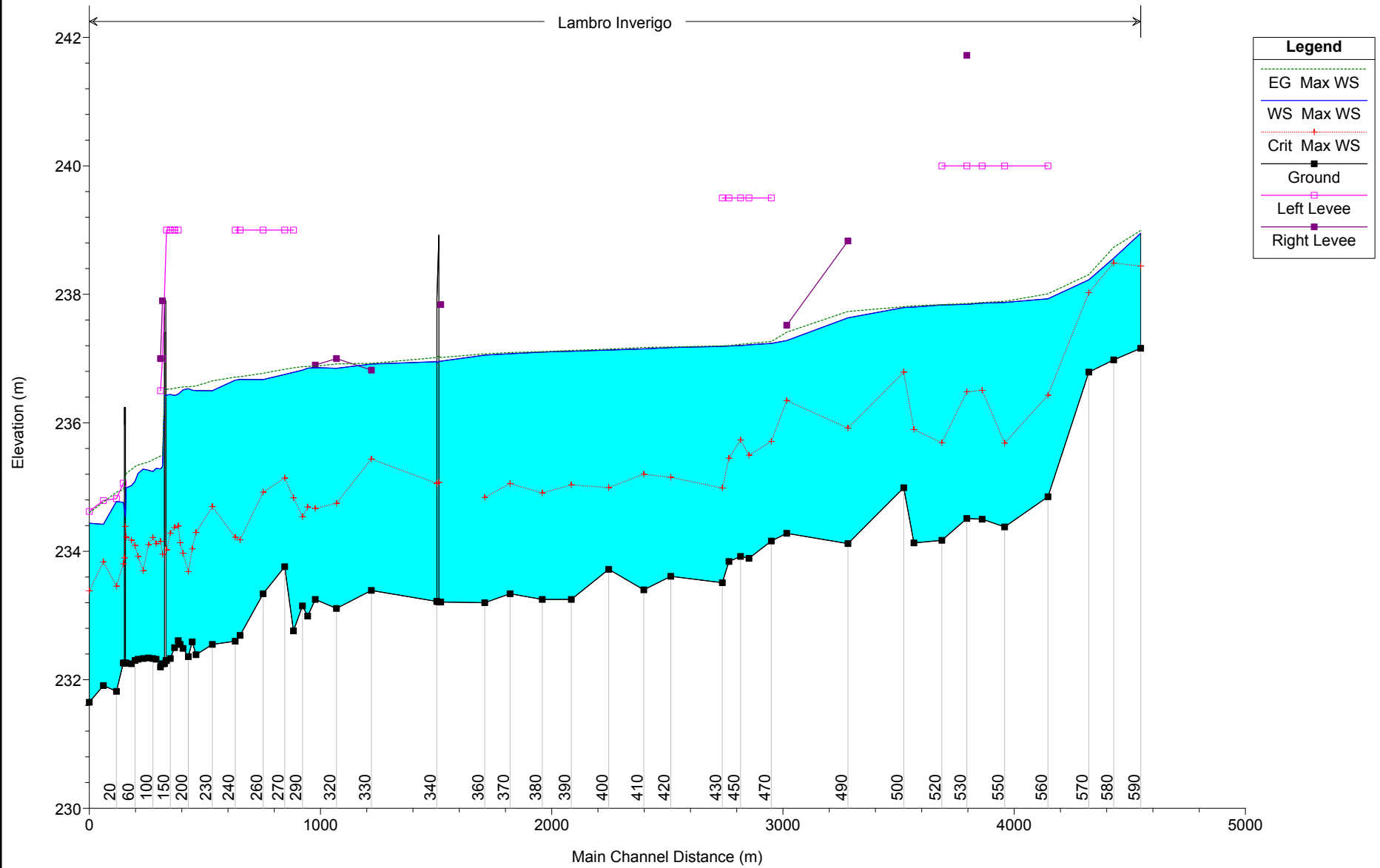
– Scenario C: verifiche ai sensi del D.M. 26/06/2014

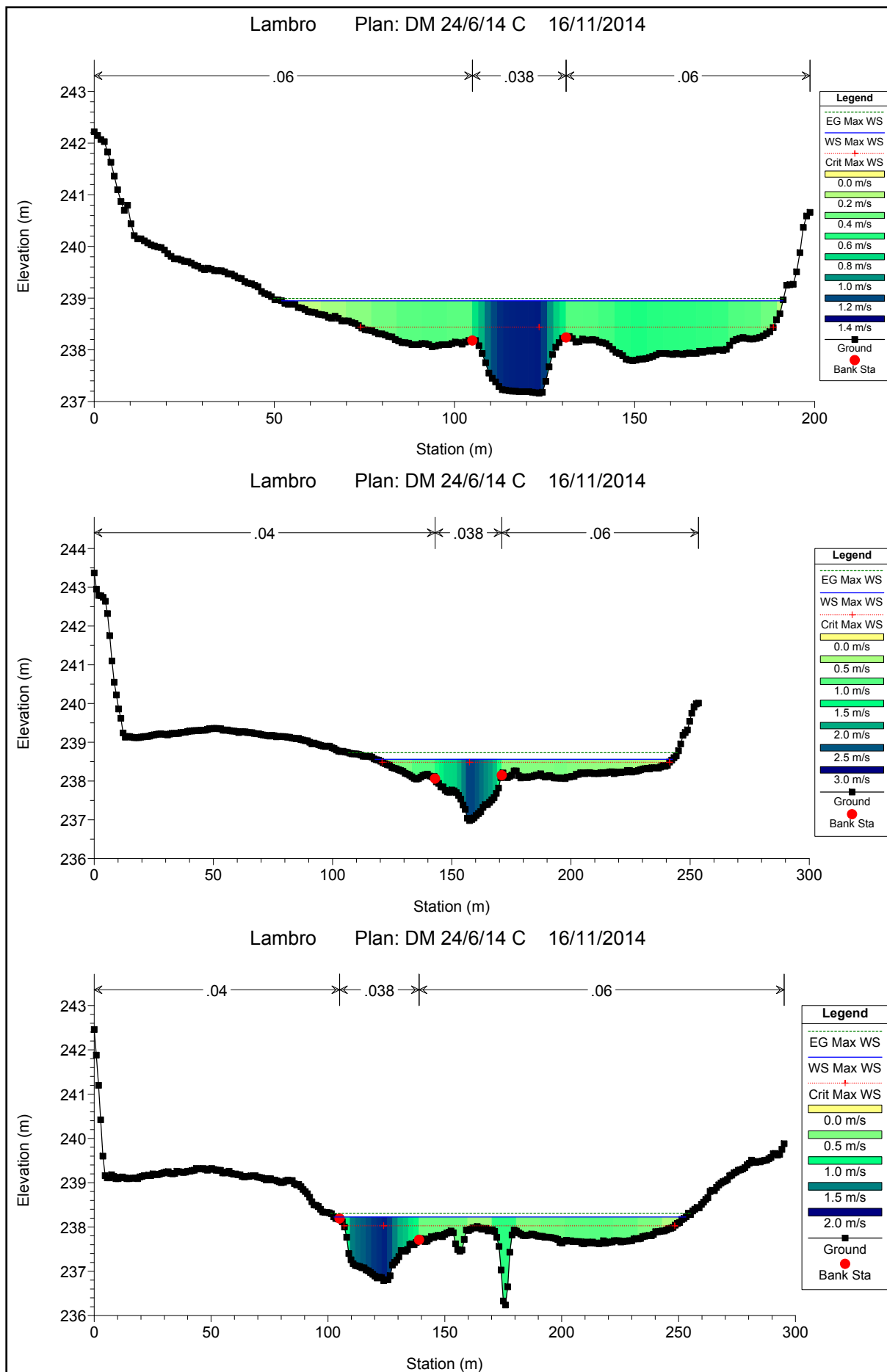
HEC-RAS Plan: DM - C River: Lambro Reach: Inverigo Profile: Max WS

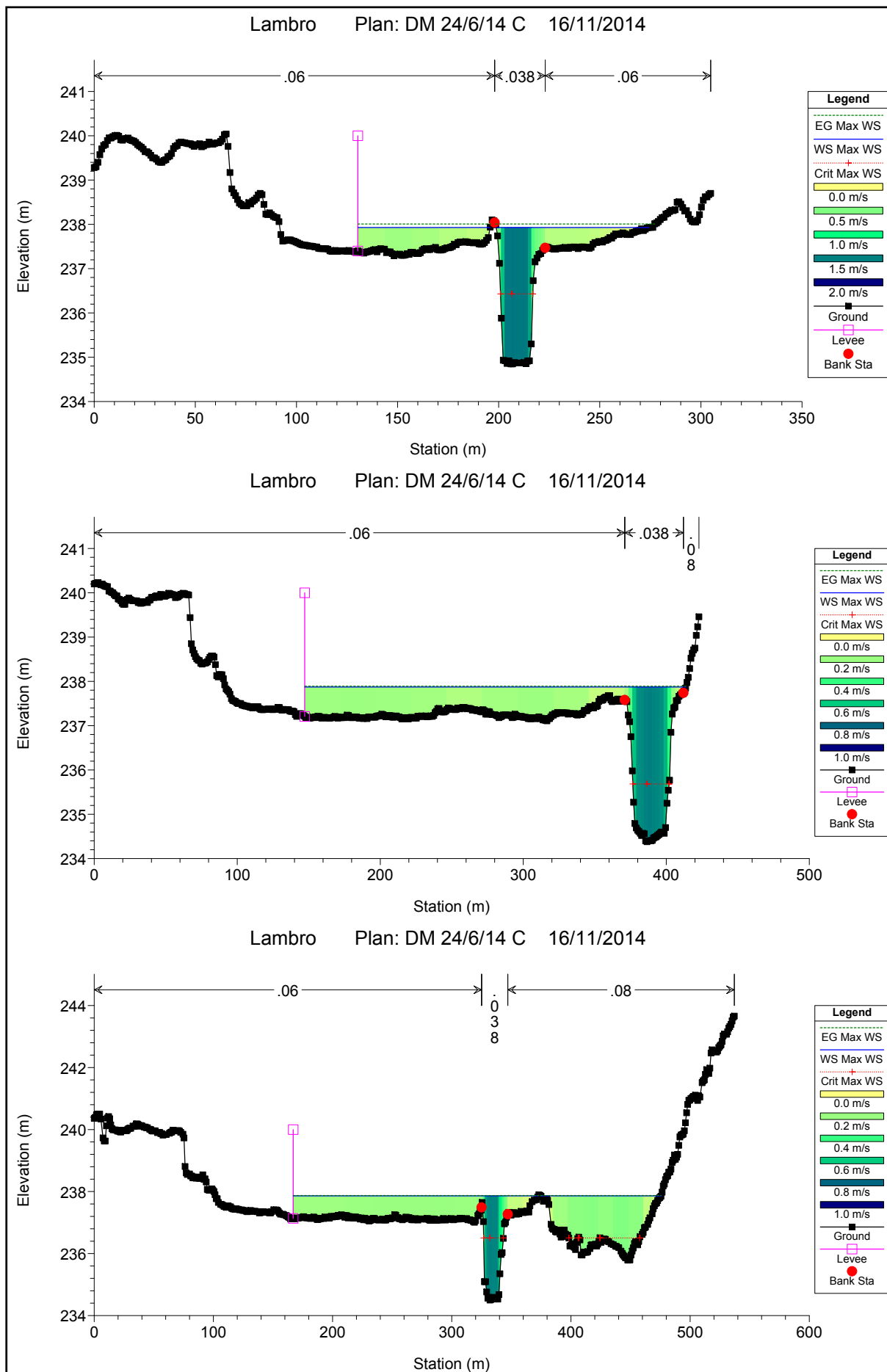
Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
Inverigo	4547.057 590	Max WS	84.80	237.16	238.95	238.44	238.99	0.001282	1.19	119.40	139.19	0.32
Inverigo	4430.646 580	Max WS	84.78	236.98	238.56	238.49	238.73	0.006120	2.10	62.33	124.85	0.66
Inverigo	4322.79 570	Max WS	84.78	236.79	238.22	238.03	238.31	0.003717	1.56	87.54	150.59	0.51
Inverigo	4146.27 560	Max WS	84.93	234.85	237.93	236.43	238.01	0.001077	1.36	99.07	140.92	0.30
Inverigo	3958.712 550	Max WS	85.23	234.38	237.87	235.69	237.89	0.000228	0.66	226.80	266.51	0.14
Inverigo	3861.219 540	Max WS	85.36	234.50	237.86	236.50	237.87	0.000213	0.64	308.34	306.89	0.13
Inverigo	3795.401 530	Max WS	85.59	234.51	237.84	236.48	237.86	0.000231	0.67	234.31	203.23	0.14
Inverigo	3687.068 520	Max WS	85.88	234.17	237.84	235.69	237.84	0.000052	0.34	310.06	302.90	0.07
Inverigo	3566.631 510	Max WS	86.15	234.13	237.80	235.89	237.82	0.000366	0.72	158.13	230.55	0.17
Inverigo	3522.358 500	Max WS	86.26	234.99	237.79	236.79	237.81	0.000340	0.66	218.02	277.57	0.16
Inverigo	3281.337 490	Max WS	86.36	234.12	237.63	235.92	237.73	0.001046	1.40	61.53	27.17	0.30
Inverigo	3016.292 480	Max WS	85.34	234.28	237.28	236.35	237.41	0.002014	1.78	82.05	89.61	0.40
Inverigo	2949.954 470	Max WS	85.44	234.16	237.24	235.71	237.27	0.000406	0.93	221.06	278.14	0.19
Inverigo	2852.912 460	Max WS	85.60	233.89	237.21	235.50	237.23	0.000330	0.80	254.78	273.64	0.17
Inverigo	2816.748 450	Max WS	85.60	233.92	237.20	235.73	237.22	0.000392	0.85	254.72	265.77	0.18
Inverigo	2766.457 440	Max WS	85.71	233.84	237.19	235.45	237.20	0.000175	0.59	349.60	291.25	0.12
Inverigo	2737.543 430	Max WS	85.78	233.51	237.19	234.98	237.20	0.000120	0.53	371.57	305.26	0.11
Inverigo	2514.769 420	Max WS	86.09	233.61	237.17	235.15	237.18	0.000124	0.57	383.14	284.44	0.11
Inverigo	2398.189 410	Max WS	86.16	233.40	237.15	235.20	237.17	0.000292	0.83	251.56	198.82	0.16
Inverigo	2246.646 400	Max WS	86.30	233.72	237.13	234.99	237.15	0.000168	0.62	259.39	203.82	0.12
Inverigo	2084.842 390	Max WS	86.50	233.25	237.11	235.03	237.13	0.000205	0.65	271.01	238.35	0.14
Inverigo	1959.351 380	Max WS	86.77	233.25	237.10	234.91	237.11	0.000095	0.51	403.40	277.02	0.09
Inverigo	1819.658 370	Max WS	87.01	233.34	237.08	235.05	237.09	0.000202	0.70	238.62	361.44	0.14
Inverigo	1710.393 360	Max WS	87.24	233.20	237.05	234.84	237.07	0.000214	0.77	230.13	302.65	0.14
Inverigo	1520.357 350	Max WS	87.57	233.21	236.96		237.02	0.000552	1.05	83.35	35.53	0.22
Inverigo	1511.685 345		Mult Open									
Inverigo	1503.015 340	Max WS	87.57	233.22	236.95	235.06	237.02	0.000654	1.12	78.42	34.99	0.24
Inverigo	1219.906 330	Max WS	87.84	233.39	236.91	235.44	236.93	0.000155	0.65	286.51	322.23	0.12
Inverigo	1068.842 320	Max WS	88.00	233.11	236.85	234.75	236.92	0.000446	1.17	82.36	269.66	0.21
Inverigo	977.0419 310	Max WS	88.16	233.25	236.86	234.67	236.88	0.000163	0.67	177.54	101.21	0.13
Inverigo	944.2654 300	Max WS	88.23	232.99	236.85	234.69	236.88	0.000229	0.83	168.25	217.51	0.15
Inverigo	921.7176 290	Max WS	88.25	233.15	236.82	234.54	236.87	0.000342	1.02	86.51	304.73	0.18
Inverigo	883.1097 280	Max WS	88.33	232.76	236.79	234.83	236.86	0.000534	1.17	75.26	282.76	0.22
Inverigo	844.9036 270	Max WS	88.38	233.76	236.75	235.14	236.83	0.000656	1.26	70.23	268.63	0.25
Inverigo	752.0323 260	Max WS	88.54	233.34	236.67	234.92	236.77	0.000726	1.38	64.30	309.78	0.26
Inverigo	652.2289 250	Max WS	88.70	232.69	236.67	234.18	236.72	0.000273	0.92	96.15	327.14	0.16
Inverigo	631.1052 240	Max WS	88.74	232.60	236.66	234.22	236.71	0.000307	0.97	91.65	349.59	0.17
Inverigo	532.0892 230	Max WS	88.75	232.55	236.50	234.70	236.65	0.001057	1.73	51.26	508.72	0.31
Inverigo	461.4436 220	Max WS	98.84	232.39	236.50	234.29	236.57	0.000467	1.19	83.01	474.69	0.21
Inverigo	444.964 210	Max WS	98.93	232.59	236.51	234.04	236.57	0.000346	1.09	90.94	433.56	0.19
Inverigo	428.3983 200	Max WS	99.02	232.36	236.53	233.68	236.56	0.000170	0.79	125.73	380.96	0.13
Inverigo	405.128 190	Max WS	99.12	232.49	236.51	233.97	236.56	0.000256	0.93	107.03	321.46	0.16
Inverigo	392.612 180	Max WS	99.18	232.55	236.47	234.13	236.55	0.000473	1.27	78.26	299.68	0.22
Inverigo	384.5591 170	Max WS	99.22	232.61	236.45	234.39	236.55	0.000632	1.41	70.23	289.40	0.25
Inverigo	368.98 160	Max WS	99.32	232.50	236.43	234.37	236.54	0.000694	1.48	66.91	215.63	0.26
Inverigo	350.5163 150	Max WS	99.45	232.33	236.44	234.28	236.53	0.000549	1.30	76.71	198.74	0.23
Inverigo	333.7652 140	Max WS	99.57	232.30	236.43	234.02	236.52	0.000142	1.32	75.34	166.61	0.22
Inverigo	325		Inl Struct									
Inverigo	316.6304 130	Max WS	99.71	232.25	235.32	233.96	235.50	0.000452	1.87	53.27	65.12	0.38
Inverigo	307.8002 120	Max WS	99.76	232.20	235.28	234.15	235.48	0.001957	1.99	50.10	75.50	0.41
Inverigo	288.6484 110	Max WS	99.83	232.32	235.29	234.12	235.45	0.001622	1.76	56.60	138.12	0.38
Inverigo	275.1218 100	Max WS	99.89	232.33	235.24	234.21	235.43	0.002003	1.89	52.74	136.43	0.42
Inverigo	256.351 90	Max WS	99.94	232.34	235.26	234.10	235.39	0.001461	1.60	62.36	127.00	0.35
Inverigo	233.2564 80	Max WS	99.99	232.33	235.28	233.70	235.37	0.000775	1.31	76.07	123.78	0.27
Inverigo	210.6123 70	Max WS	100.08	232.32	235.21	233.92	235.34	0.001409	1.60	62.42	113.42	0.35
Inverigo	197.713 60	Max WS	100.18	232.30	235.09	234.09	235.32	0.002676	2.12	47.26	100.61	0.47
Inverigo	181.8634 50	Max WS	100.29	232.25	235.02	234.17	235.27	0.002914	2.23	45.03	94.76	0.50
Inverigo	159.4336 40	Max WS	100.41	232.26	234.99	234.22	235.21	0.002816	2.08	48.22	51.99	0.48
Inverigo	153.24 35		Bridge									
Inverigo	147.0547 30	Max WS	100.41	232.26	234.76	233.81	234.96	0.002475	1.98	50.68	25.64	0.45
Inverigo	117.4892 20	Max WS	100.62	231.82	234.78	233.46	234.92	0.001736	1.68	60.03	30.03	0.38
Inverigo	60.7408 10	Max WS	100.96	231.91	234.42	233.84	234.77	0.004806	2.61	38.74	21.47	0.62
Inverigo	0 0	Max WS	100.96	231.65	234.44	233.39	234.60	0.002131	1.80	56.21	29.91	0.42

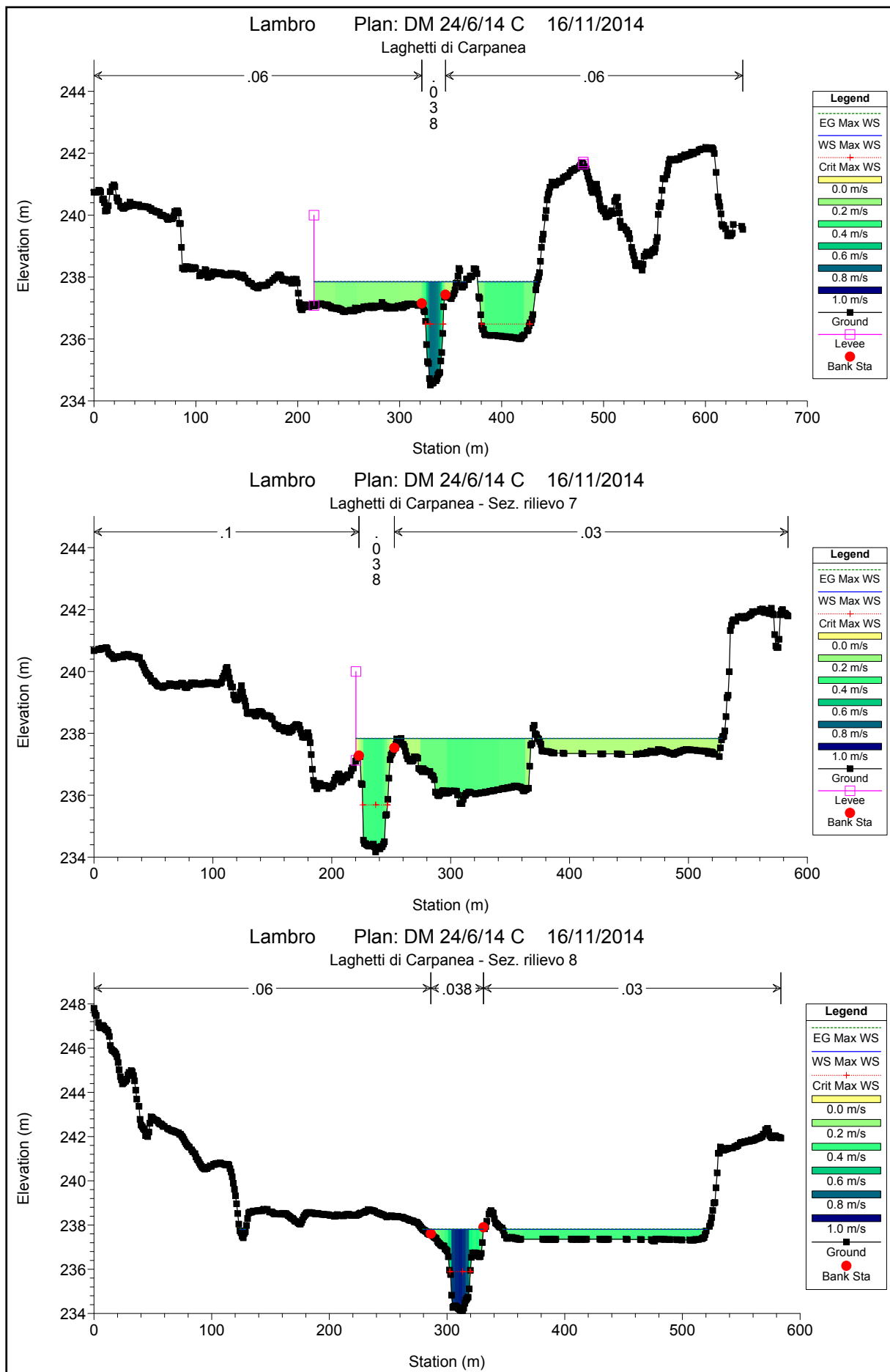
Lambro Plan: DM 24/6/14 C 16/11/2014

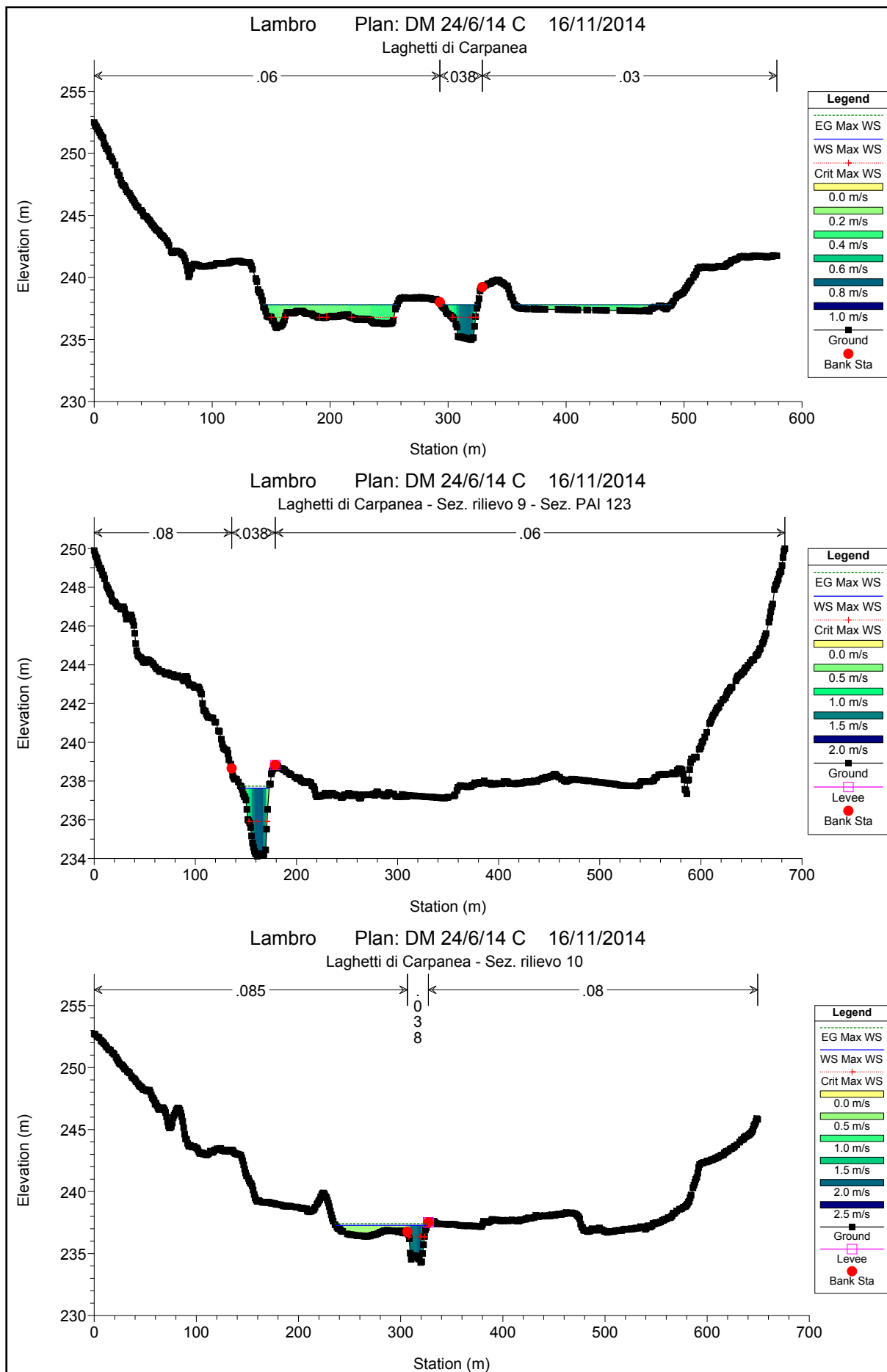
Lambro Inverigo

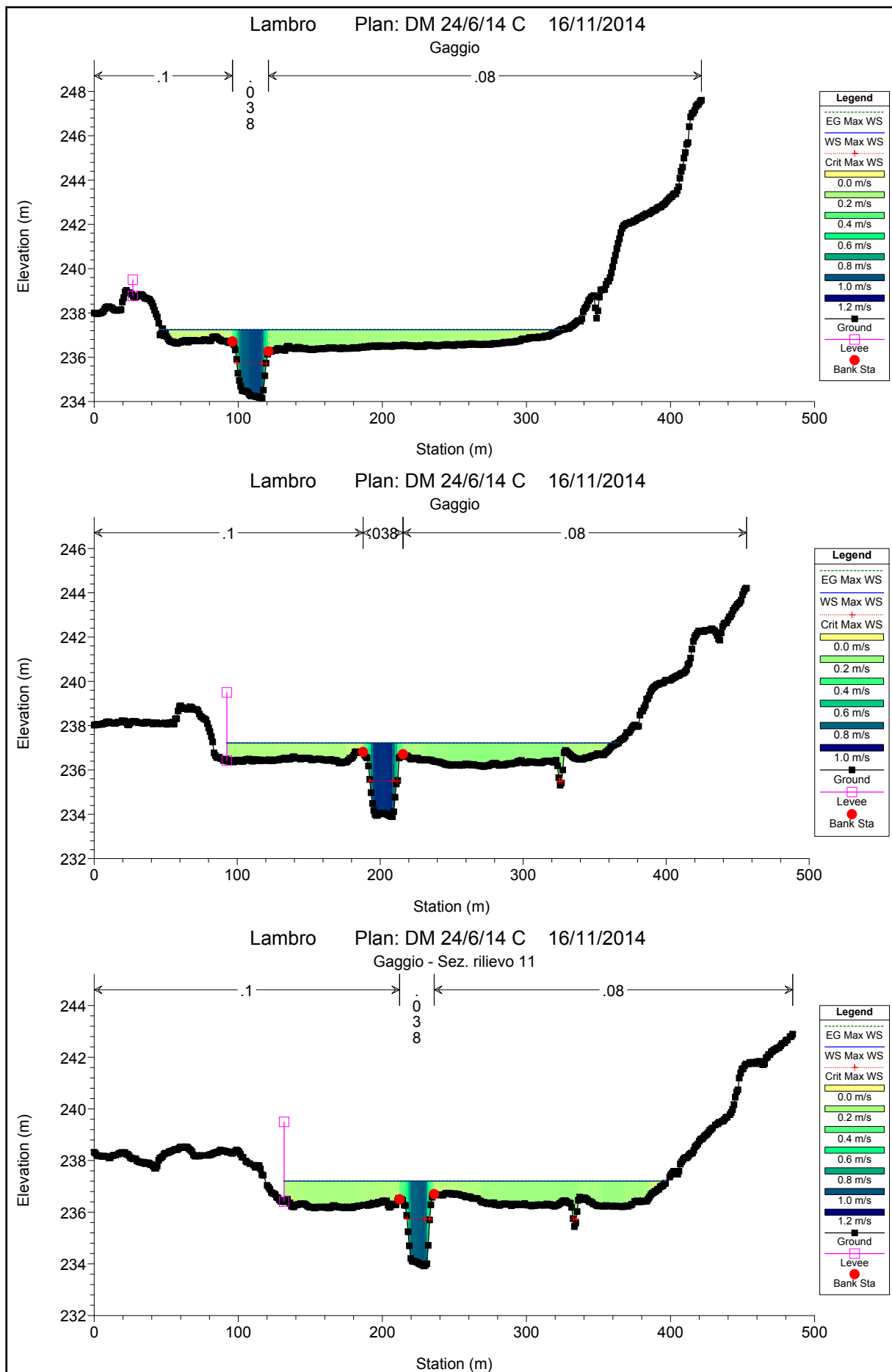


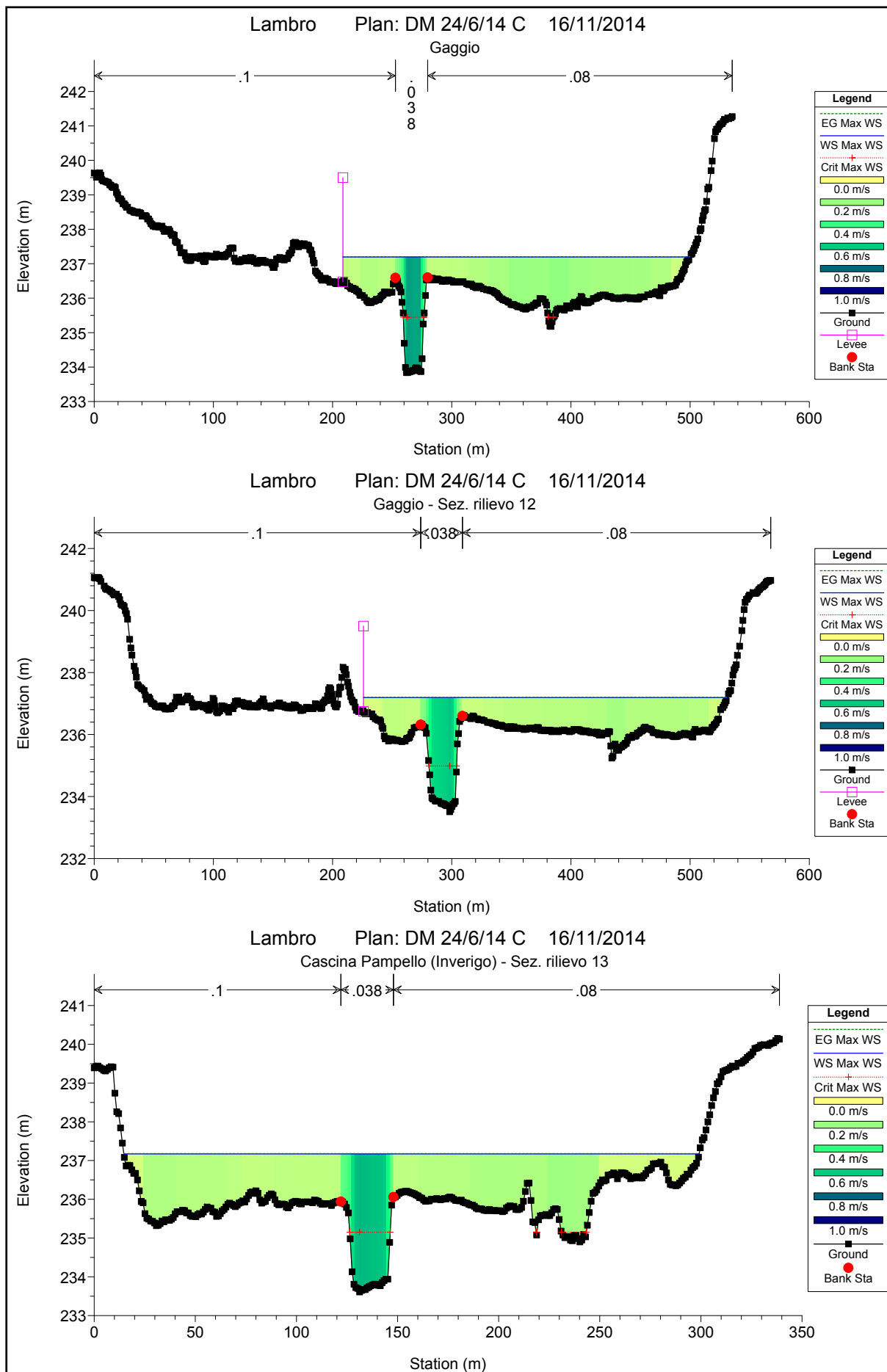


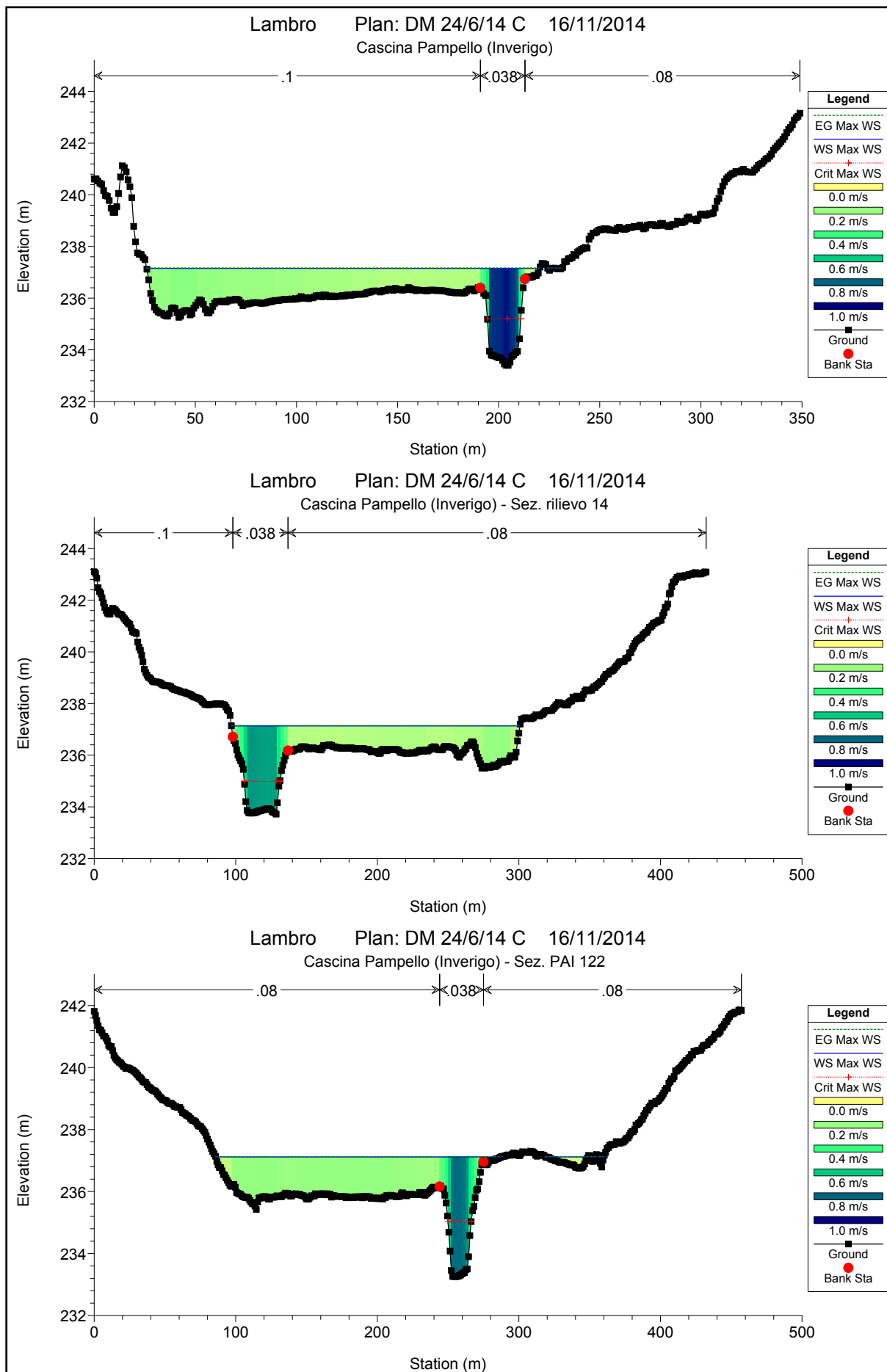


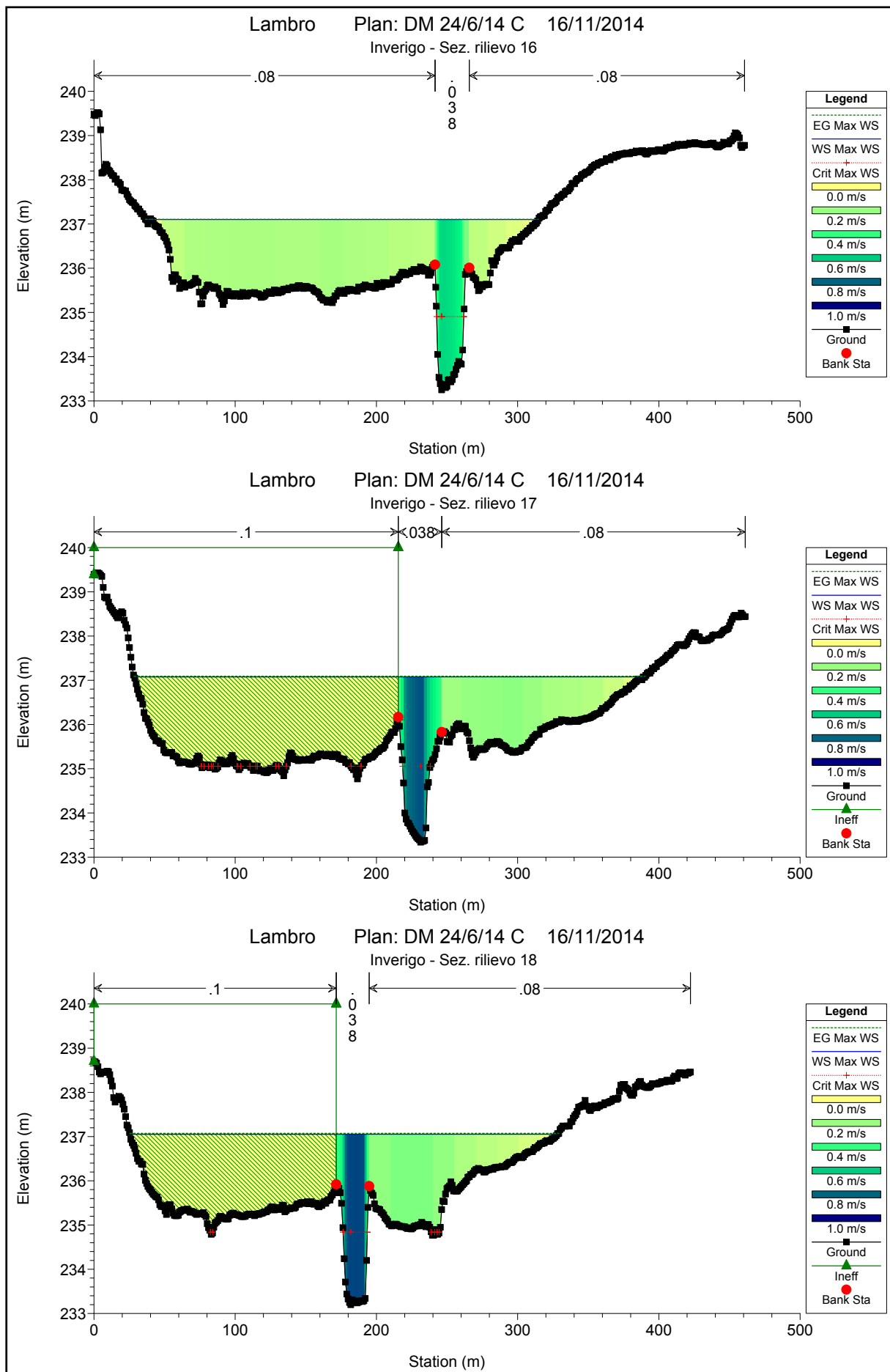


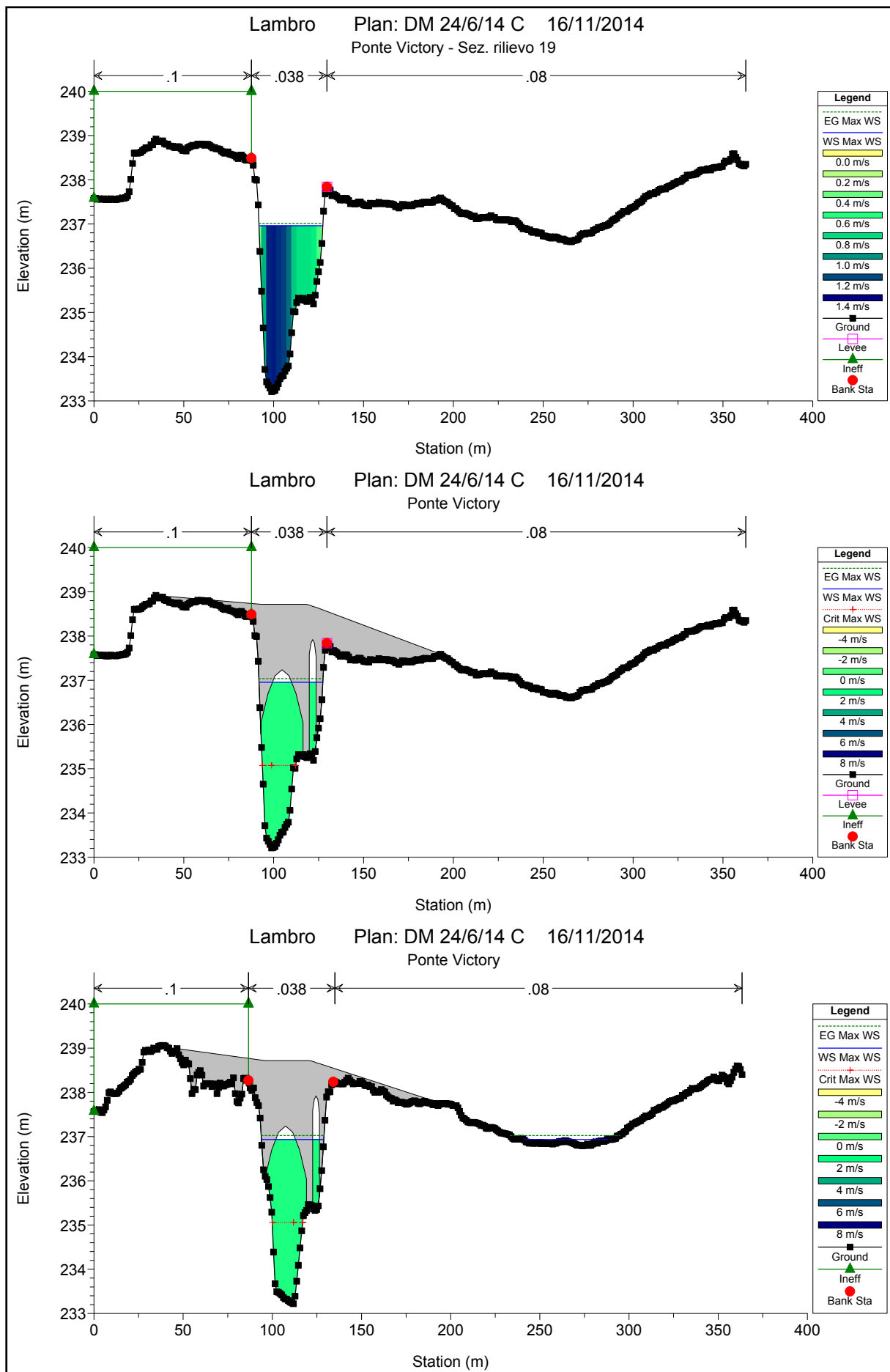


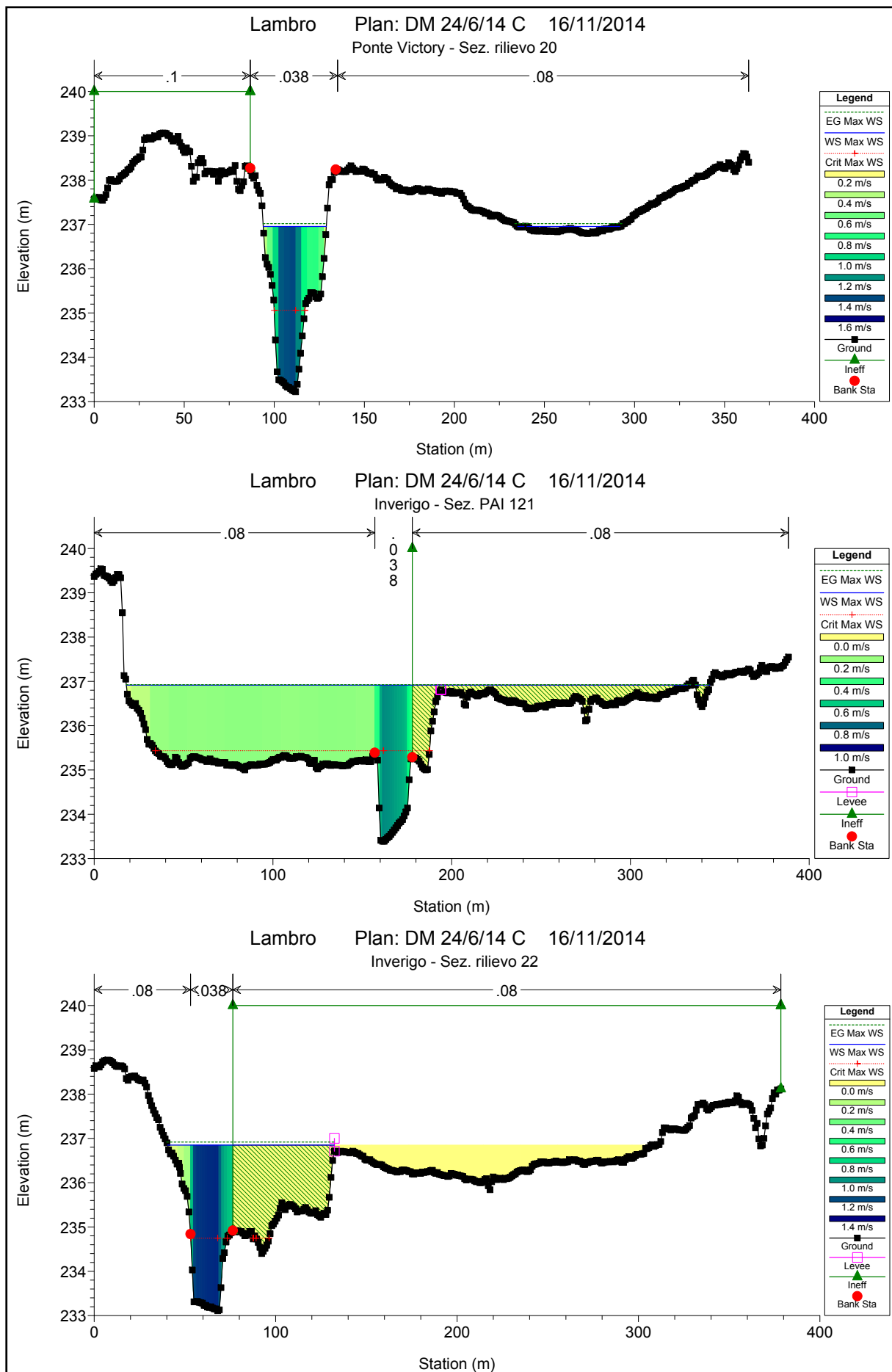


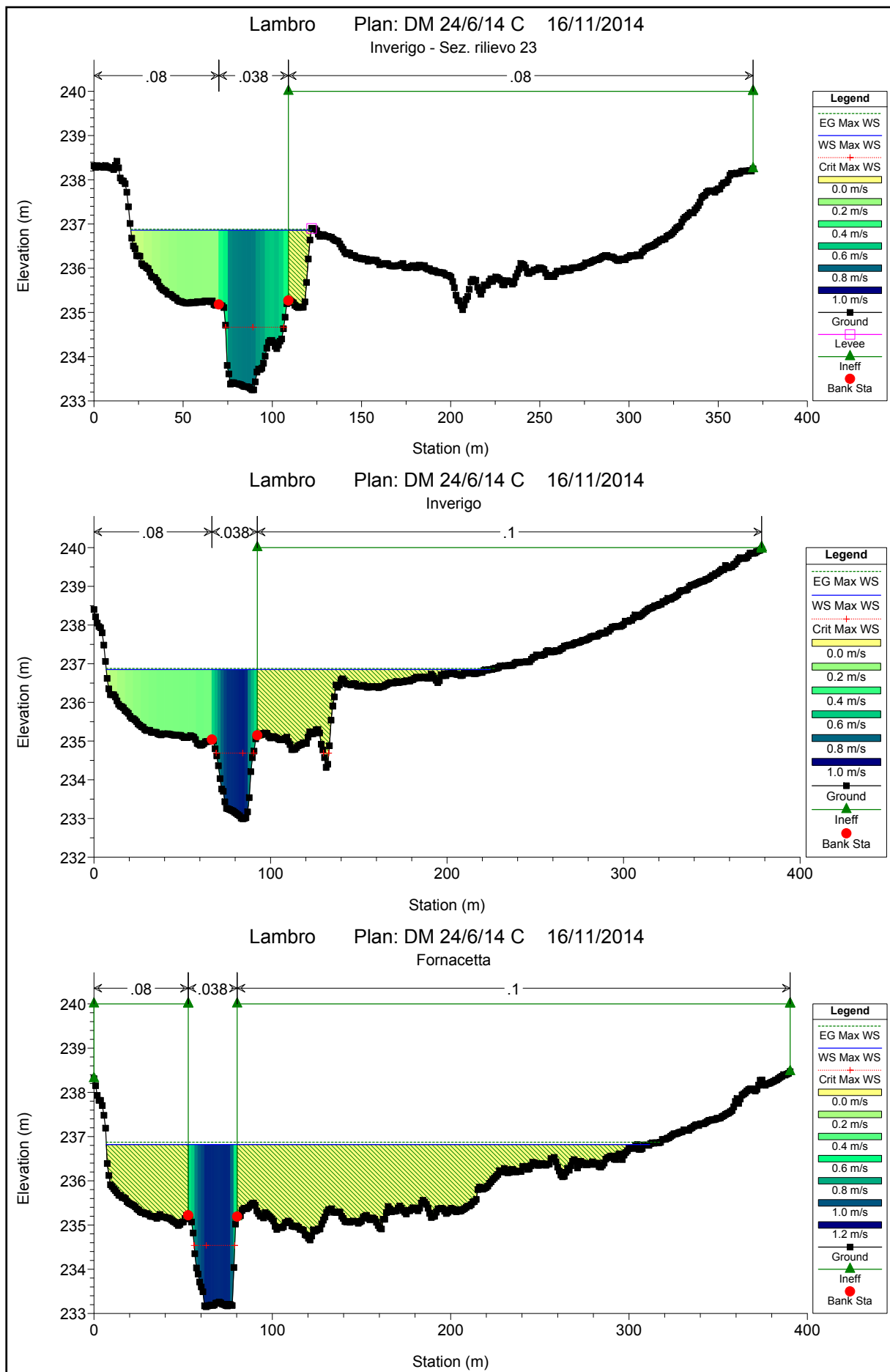


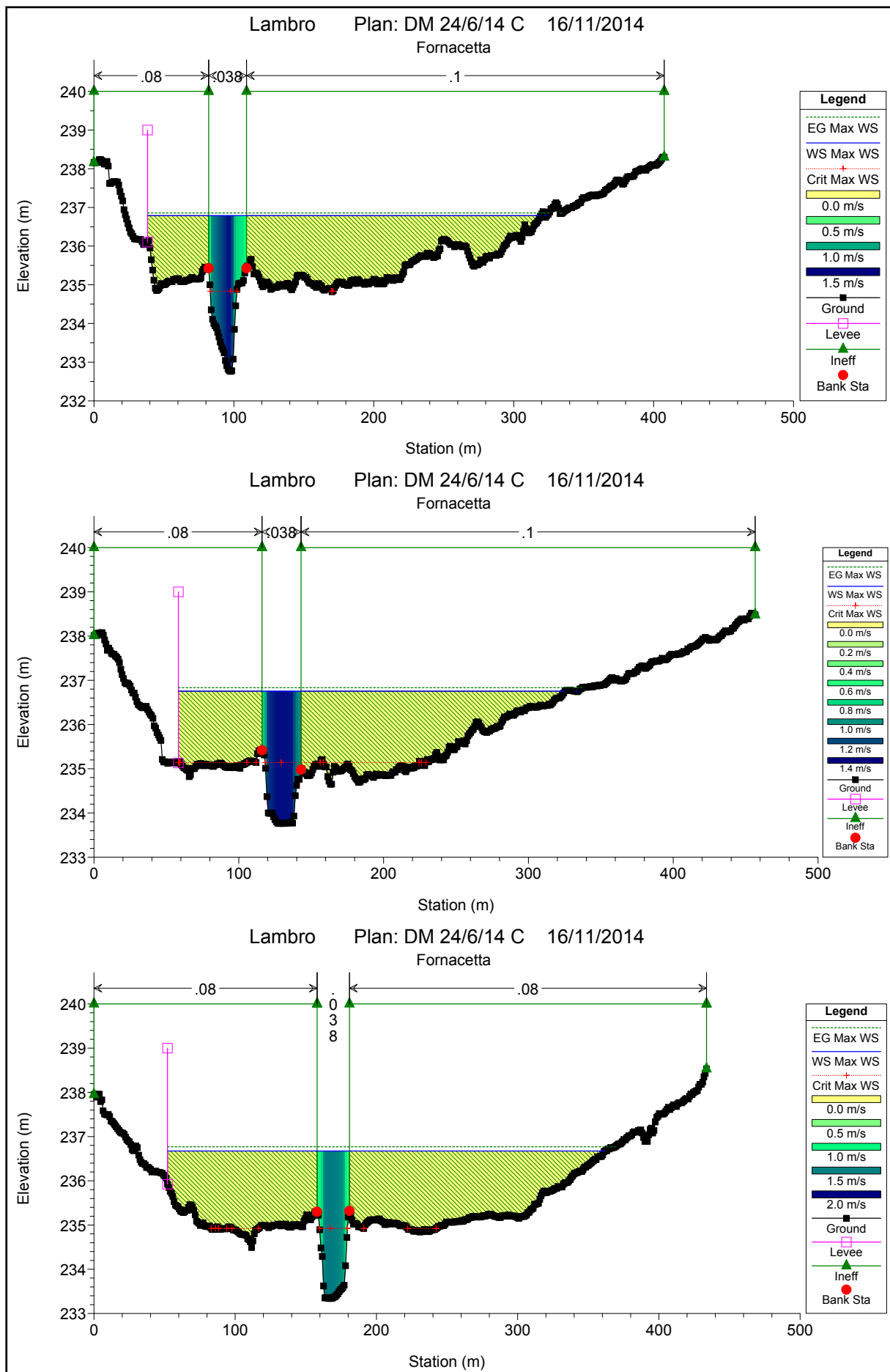


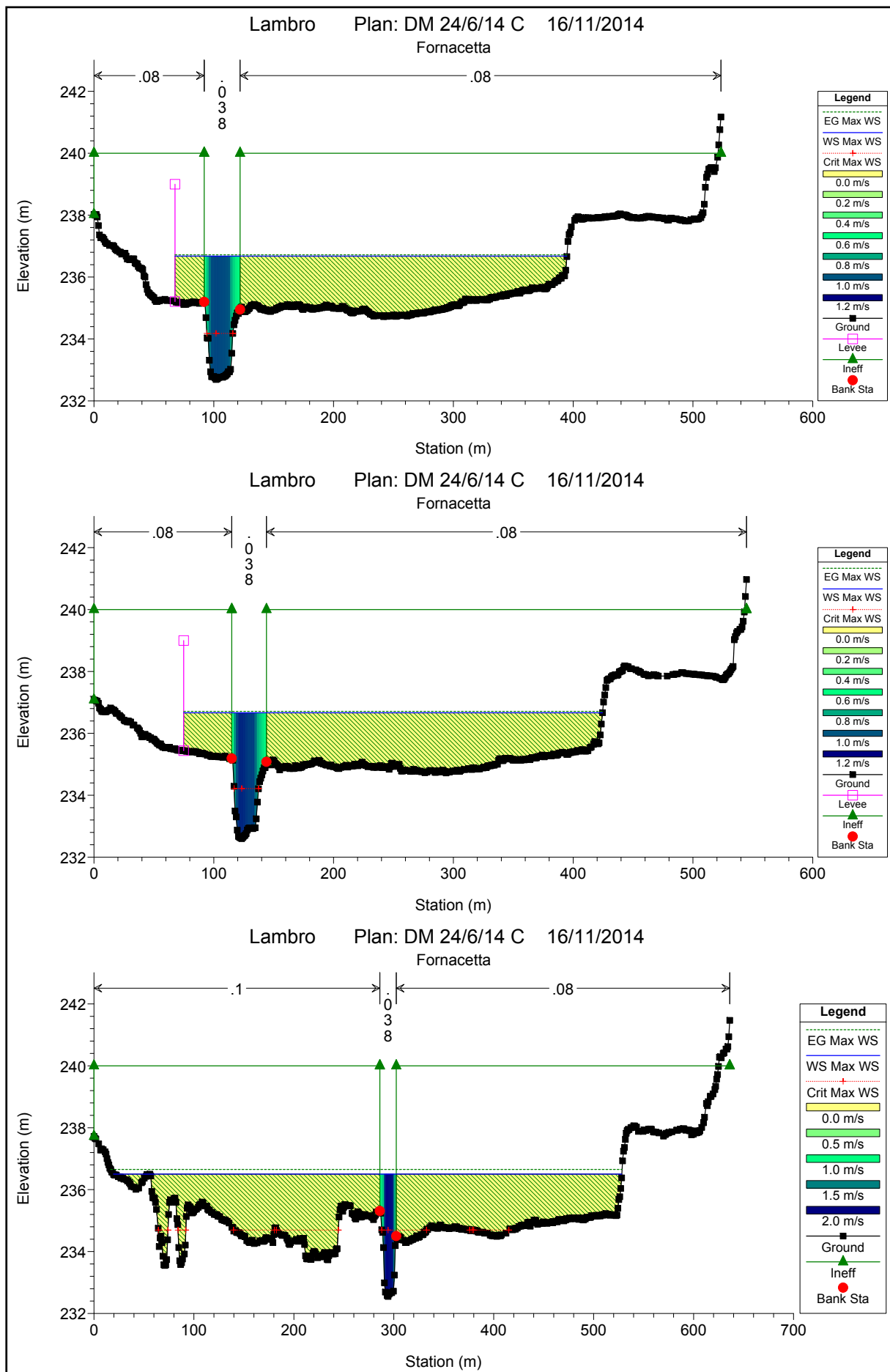


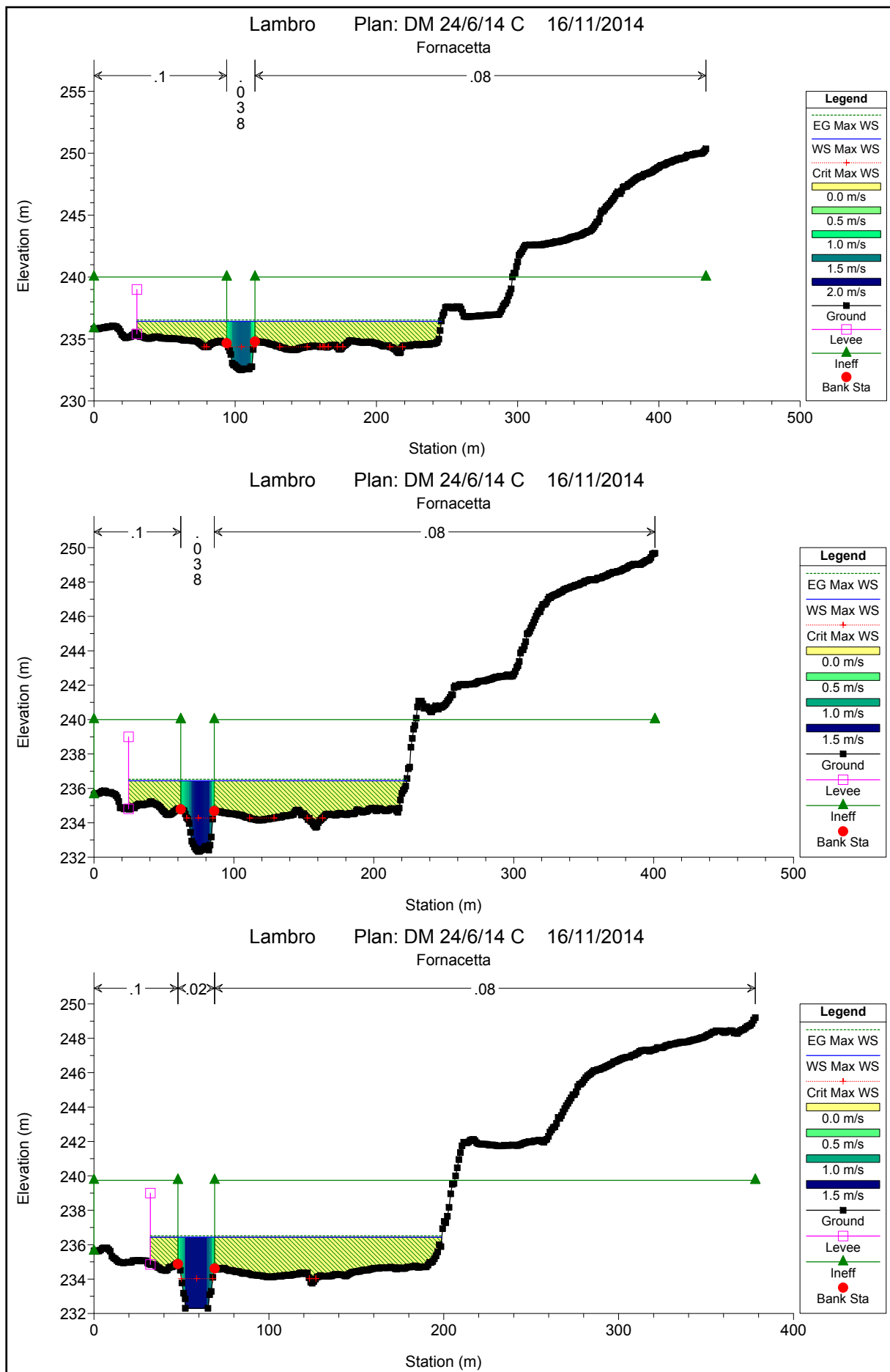


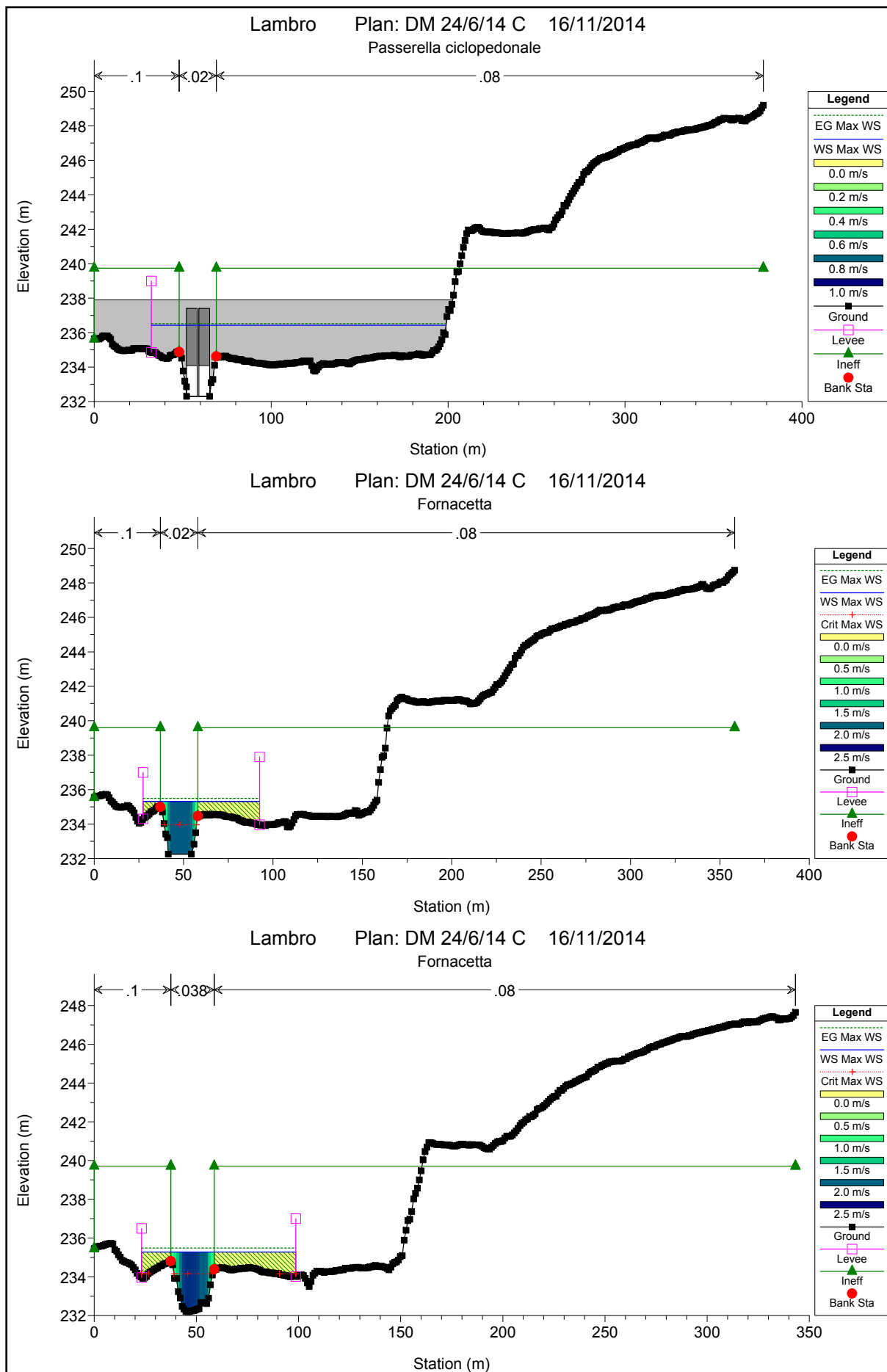


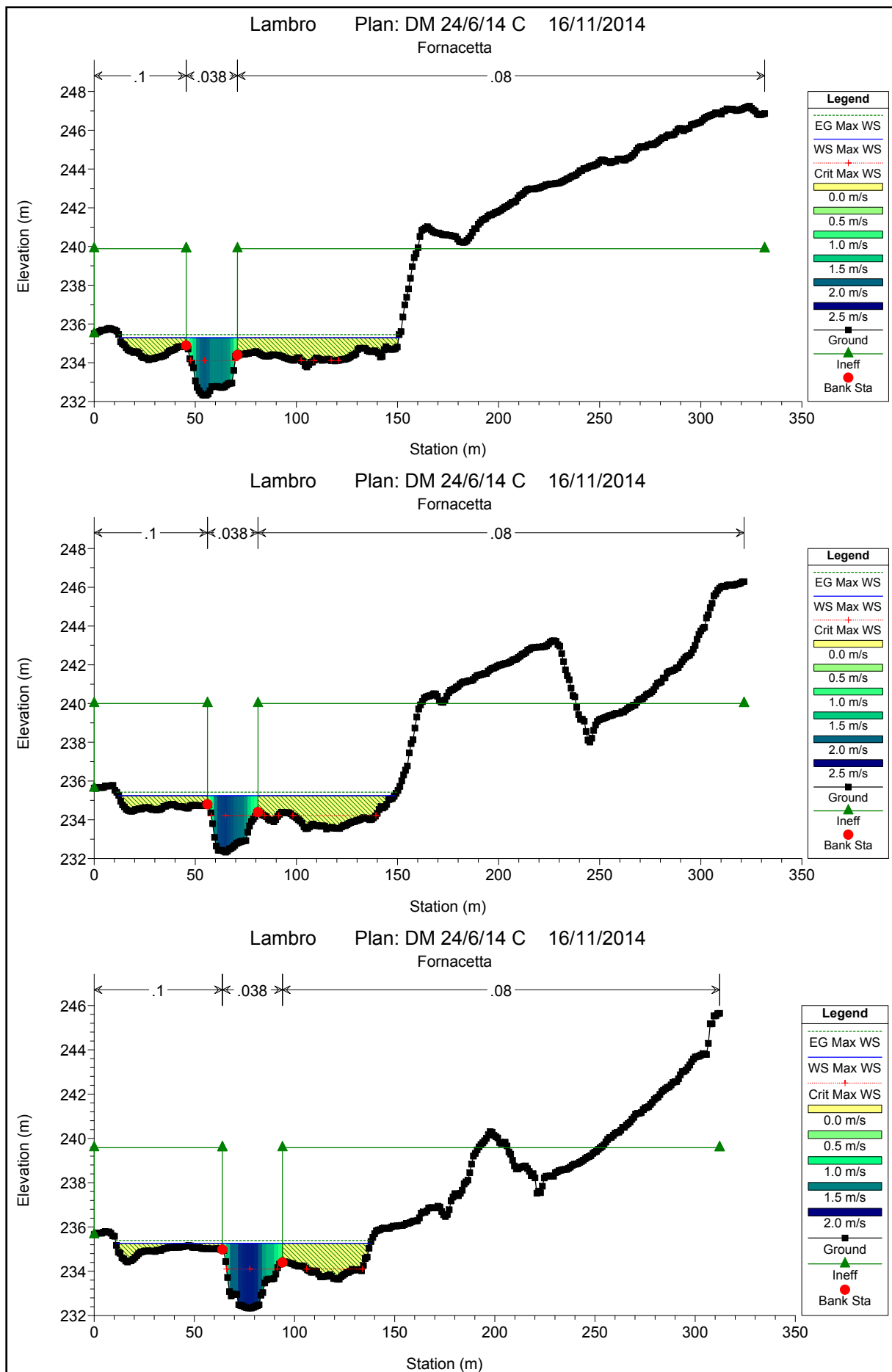


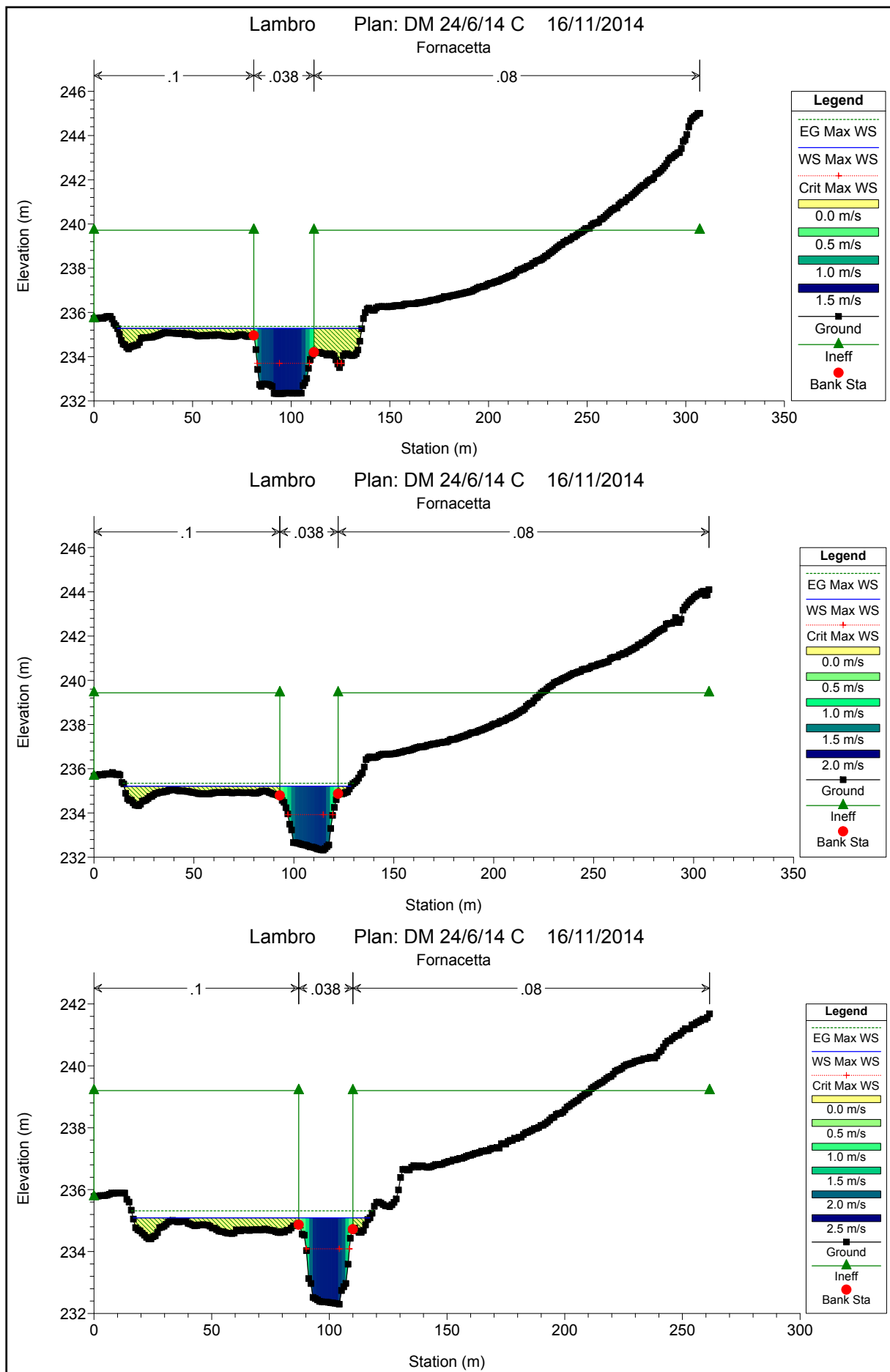


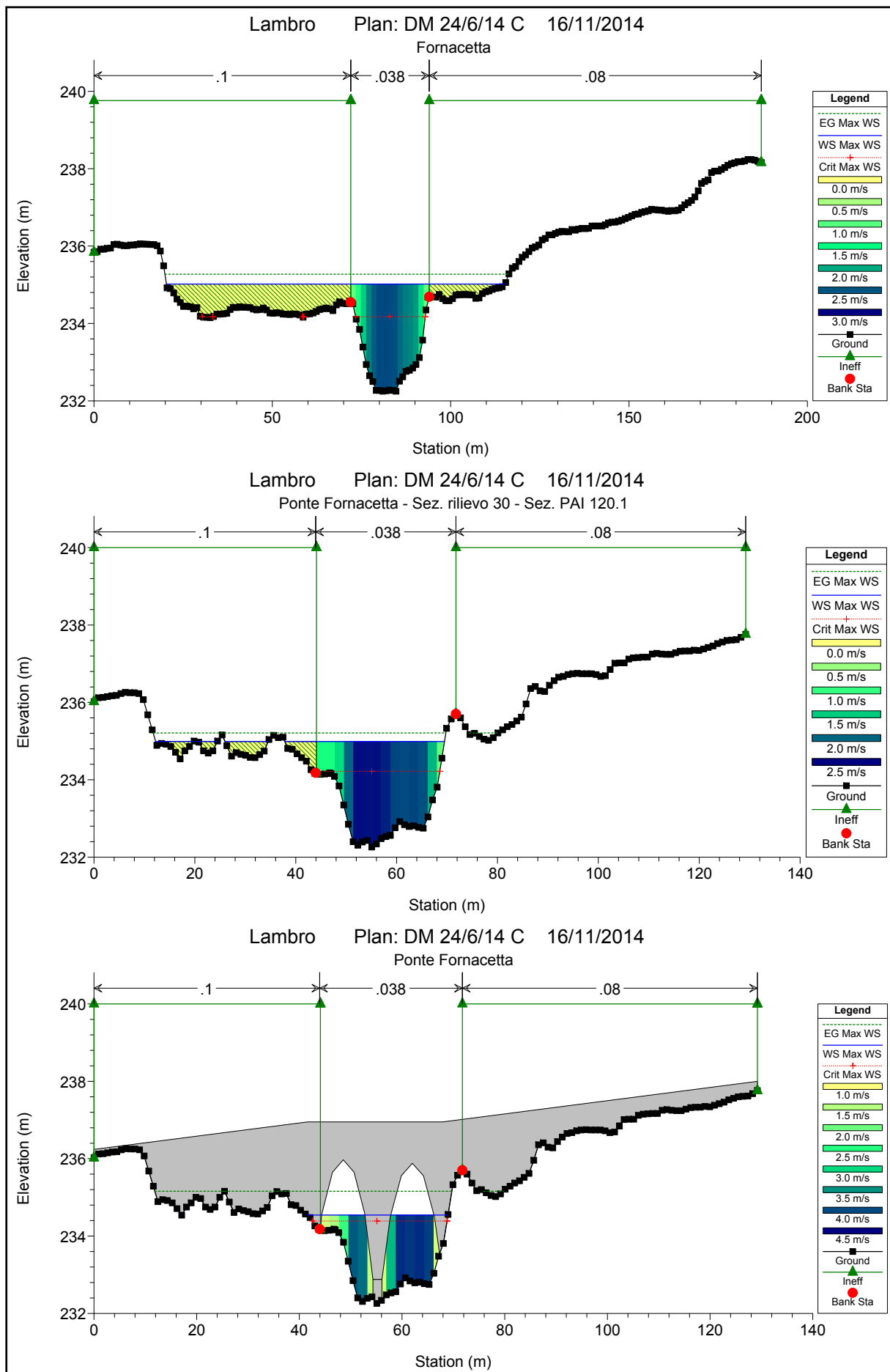


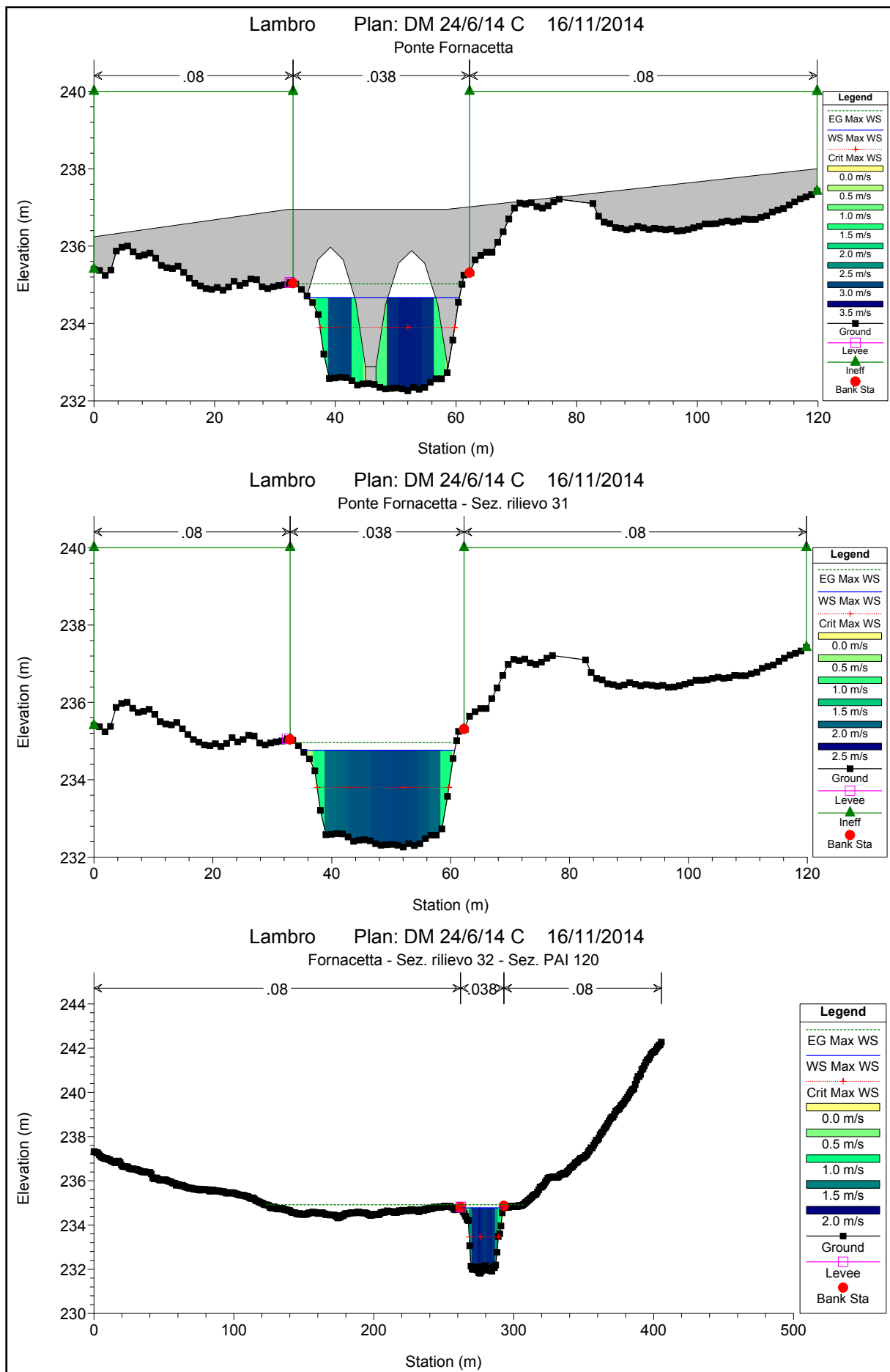












ALLEGATO 3: Studio idrologico-idraulico dell'evento alluvionale occorso sul Lambro nel Novembre 2014 in corrispondenza dell'area di laminazione di Inverigo (CO)



Regione
Lombardia



Parco Regionale
Valle del Lambro

*Il Commissario Straordinario
delegato all'attuazione degli interventi
di mitigazione del rischio idrogeologico*

Comuni di Inverigo (CO), Nibionno (LC) e Veduggio con Colzano (MB)



Oggetto

AREA DI LAMINAZIONE DI INVERIGO

INTERVENTI IDRAULICI E DI RIQUALIFICAZIONE FLUVIALE NEI TERRITORI DI
INVERIGO, NIBIONNO E VEDUGGIO CON COLZANO

CONSULENZA TECNICA

Studio idrologico-idraulico dell'evento alluvionale occorso sul fiume Lambro
nel novembre 2014 in corrispondenza dell'area di laminazione di Inverigo (CO).

STUDIO IDROLOGICO-IDRAULICO

Progettisti -Timbri e Firme



PARCO REGIONALE DELLA
VALLE DEL LAMBRO

Via Veneto 19
TRIUGGIO

web: www.parcovalldelambro.it
web: www.progettolambro.it



Consulenze

prof.ing. Maurizio ROSSO - ing. Santo LA FERLITA

VERSIONE N°	DATA	DESCRIZIONE REVISIONE E RIFERIMENTI DOCUMENTI SOSTITUTIVI	Elaborato
0	MARZO 2015	EMISSIONE	1



INDICE

1. PREMESSA.....	2
2. ANALISI IDROLOGICA DELL'EVENTO DEL NOVEMBRE 2014	3
2.1 ANALISI IDROMETRICA E DEFINIZIONE DELLE PORTATE	3
2.2 ANALISI PLUVIOMETRICA	10
2.2.1 CONFRONTO TRA LA PLUVIOMETRIA DEGLI EVENTI 2002 E 2014	12
2.3 RICOSTRUZIONE DEGLI IDROGRAMMI IN INGRESSO AL MODELLO	14
2.3.1 IDROGRAMMA DI PIENA IN INGRESSO ALL'AREA DI LAMINAZIONE DI INVERIGO (SEZIONE LA124.3)	16
2.3.2 CONTRIBUTI DI PORTATA PROVENIENTI DALLA BEVERA DI VEDUGGIO E DAI SOTTOBACINI LAM6 E LAM7	17
3. ANALISI IDRAULICA E RICOSTRUZIONE DELL'EVENTO	19
3.1 DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO	19
3.2 VALIDAZIONE DEL MODELLO MEDIANTE BACK-ANALYSIS	20
3.2.1 MASSIMI BATTENTI/LIVELLI IDRICI RAGGIUNTI NELL'AREA D'INTERESSE IN OCCASIONE DELL'EVENTO ALLUVIONALE	20
3.2.2 VERIFICA PRELIMINARE DELLA SIMULAZIONE NUMERICA DI "BACK-ANALYSIS"	23
3.2.3 AFFINAMENTO DELLA SIMULAZIONE NUMERICA DI "BACK-ANALYSIS"	25
4. CONCLUSIONI	31

ALLEGATI

- ALLEGATO 1 – Nota AdBPo prot. n. 8779/3.1 del 22 dicembre 2014
- ALLEGATO 2 – Corografia con individuazione delle sezioni di calcolo del modello numerico idraulico
- ALLEGATO 3 – Risultati simulazione di "back analysis" dell'evento novembre 2014
- ALLEGATO 4 – "Back analysis": carta dei battenti idrici (a: monte; b: valle)
- ALLEGATO 5 – "Back analysis": carta delle velocità di deflusso (a: monte; b: valle)



1. PREMESSA

Le attività descritte nella presente relazione tecnica si collocano nell'ambito degli studi connessi alla progettazione delle opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "*Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano*".

Nel mese di novembre 2014 intense precipitazioni hanno investito con continuità il bacino del Lambro, determinando un generale innalzamento dei livelli idrici nell'asta principale, negli affluenti e nel sistema lacuale (Alserio, Pusiano, etc.).

Gli elevati livelli idrici hanno determinato l'insorgere di situazioni di criticità, affrontate in emergenza e non senza difficoltà dal sistema di Protezione Civile e dagli Enti preposti.

Per questa ragione ed anche per dar seguito alla nota prodotta dall'Autorità di Bacino del fiume Po in sede di Conferenza dei Servizi che ha approvato il citato progetto (prot. n. 8779/3.1 del 22 dicembre 2014, cfr. ALLEGATO 1), il Parco Regionale della Valle del Lambro ha ritenuto utile che si eseguisse il presente studio.

Affidato agli Scriventi, esso consiste nell'esecuzione delle seguenti attività, così come auspicato anche dall'AdBPo:

1. Studio idrologico volto alla definizione delle portate defluenti nel tratto d'interesse del fiume Lambro in occasione del citato evento alluvionale;
2. Studio idraulico corredato da opportune simulazioni numeriche idrauliche in moto vario volto ad offrire una più aggiornata validazione del modello numerico idraulico allestito per le condizioni ante-operam del Lambro nell'ambito del citato progetto di regolazione delle portate di piena del corso d'acqua lombardo.

Nell'ambito delle attività integrative descritte in questa relazione sono stati utilizzati e si intendono altresì richiamati i contenuti del Progetto Definitivo redatto dagli Scriventi nel maggio 2014.



2. ANALISI IDROLOGICA DELL'EVENTO DEL NOVEMBRE 2014

Il presente capitolo descrive le attività condotte per la definizione delle portate defluenti nel tratto d'interesse del fiume Lambro in occasione del citato evento alluvionale.

L'analisi idrometrica e pluviometrica si è sviluppata acquisendo innanzitutto i dati pluviometrici e idrometrici misurati e registrati dalla Rete di Monitoraggio meteo-pluviometrico gestita dal Servizio Idrografico di ARPA Lombardia.

Grazie alle scale di deflusso disponibili per ciascuna delle stazioni idrometriche è stato quindi possibile ricostruire gli idrogrammi relativi a ciascuna sezione di misura: essi presentano un andamento bi-modale, in ragione del doppio picco di portata i cui colmi si sono manifestati nei giorni 13 e 16 novembre 2014.

Considerando il fatto che gli idrometri esistenti sono collocati soltanto sulle aste del Lambro e della Bevera di Molteno, si è reso necessario valutare anche la distribuzione spaziale delle precipitazioni per stimare i contributi idrici generatisi in corrispondenza degli altri singoli sottobacini (es. Bevera di Veduggio, etc.): il calcolo è stato effettuato grazie ai dati pluviometrici, le cui stazioni di misura sono più diffuse e meglio distribuite di quelle idrometriche.

Alla luce dell'elaborazione dei dati disponibili, i cui risultati sono descritti in dettaglio nei paragrafi successivi, è stato possibile appurare una sostanziale uniformità della distribuzione spaziale delle precipitazioni nell'area d'interesse nel corso dell'evento.

2.1 ANALISI IDROMETRICA E DEFINIZIONE DELLE PORTATE

L'esecuzione degli approfondimenti idraulici modellistici richiede la preventiva definizione di specifici parametri di input in grado di consentire una quanto più precisa e attendibile simulazione numerica ("back analysis") di quanto avvenuto nel corso dell'evento alluvionale del novembre 2014 in termini di battenti idrici, velocità di deflusso e di ogni altro elemento in grado di quantificare gli effetti generati dal fenomeno di piena, manifestatisi sul territorio perifluviale d'interesse.

Detta simulazione numerica ha quale principale obiettivo quello di verificare la corretta taratura del modello numerico a suo tempo allestito in sede di Progetto Definitivo delle opere di regolazione delle portate per il loro dimensionamento.

Come accennato in precedenza, il primo step dell'attività è dunque finalizzato alla definizione degli idrogrammi associati alle portate di piena che si sono manifestate in ingresso all'area di laminazione di Inverigo nel corso dell'evento.

In Figura 1 sono mostrate delle riprese aeree della zona d'interesse sulle quali è tracciata l'idrografia principale e l'ubicazione delle stazioni idrometriche e pluviometriche ritenute utili e adottate per le analisi.

Per ciascuna di esse il Servizio Idrografico di ARPA Lombardia distribuisce i dati giornalieri misurati in automatico dai sensori dislocati sul territorio.

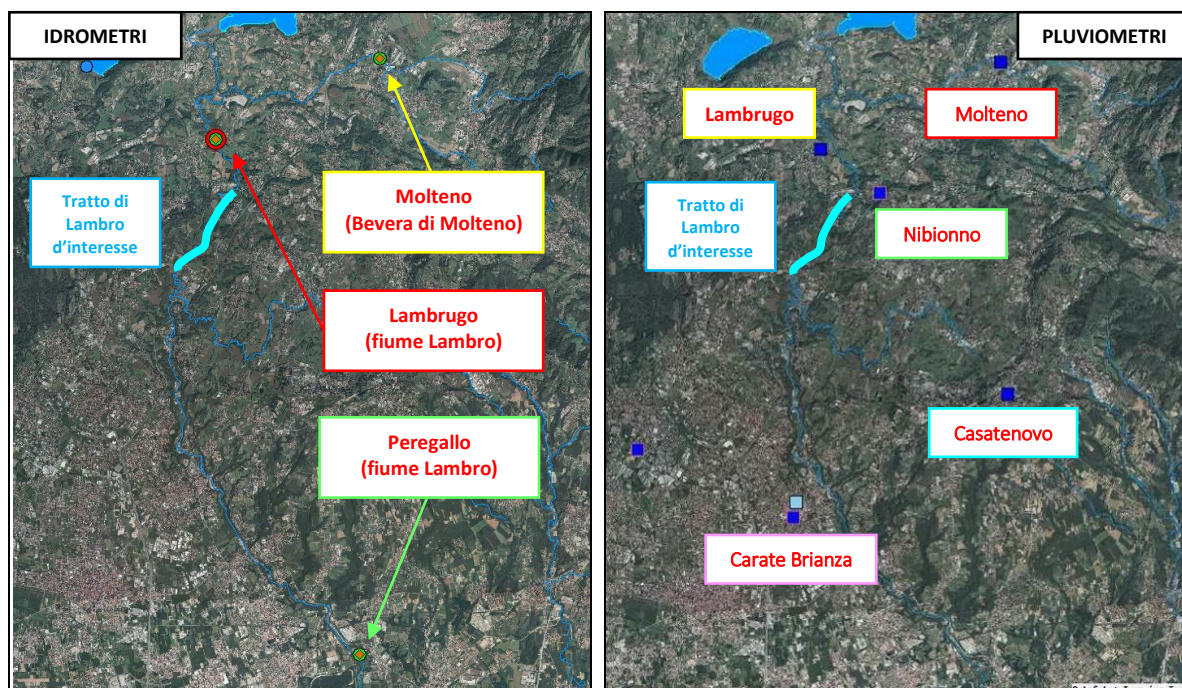


Figura 1 – Rete idrometrica (a sx) e pluviometrica (a dx) esistente nel tratto in studio.

La prima fase di analisi è quindi consistita nell'elaborazione dei dati idrometrici misurati dai sensori di Lambrugo, posto poco a monte dell'area di laminazione di Inverigo, e di Peregallo, a valle.

L'intervallo temporale dei dati analizzati copre integralmente il periodo nel corso del quale si sono manifestati i principali effetti sul territorio. Le portate associate ai livelli idrici misurati dagli idrometri sono state calcolate utilizzando le scale di deflusso definite e pubblicate dal Servizio idrografico di ARPA Lombardia, assumendone la validità anche oltre il range indicato.

L'ipotesi si ritiene corretta considerando che le stesse sono state aggiornate a fine novembre 2014 (cfr. Tabella 1) – quindi successivamente all'evento d'interesse – e che la stessa assunzione era stata operata anche dalla Protezione Civile regionale in alcune valutazioni ufficiose condotte sugli eventi idrologici che si erano manifestati nelle stesse aree nel periodo compreso tra la fine di giugno e la prima decade di luglio 2014.

Tabella 1 – Equazione della scala di deflusso e associati range di validità per la stazione idrometrica di Lambrugo

Sezione	Fonte scala	Equazione
Lambrugo	IDROGRAFICO	$Q = 24,261 \cdot (h - 0,348)^{0,992}$

Range di validità' [metri]	Periodo di validità'	Codice scala	Stato	Ultima modifica
$0,38 < h(m) < 1,41$	dal 01/01/2001	2001.1	attiva	30/11/2014



Tabella 2 – Equazioni della scala di deflusso e associati range di validità per la stazione idrometrica di Peregallo

Sezione	Fonte scala	Equazione
Peregallo	CISE	$Q = 14.124 \cdot (h+0.119)^{2.492}$
Peregallo	IDROGRAFICO	$Q = 3.465 \cdot (h+0.725)^{5.631}$
Peregallo	IDROGRAFICO	$Q = 28.12 \cdot (h+0.037)^{1.787}$
Peregallo	IDROGRAFICO	$Q = 26.367 \cdot (h+0.181)^{1.682}$
Peregallo	IDROGRAFICO	$Q = 93.151 \cdot (h-1.168)^{0.2903}$

Range di validità' [metri]	Periodo di validità'	Codice scala	Stato	Ultima modifica
$-0.11 < h(m) < 3$	dal 1/1/1988 al 31/12/2004	1988.1	storica	30/11/2014
$-0.5 < h(m) < = 0.25$	dal 1/1/2007 al 3/5/2010	2007.1	storica	30/11/2014
$0.25 < h(m) < = 2$	dal 1/1/2007 al 3/5/2010	2007.1	storica	30/11/2014
$-0.07 < h(m) < 1.3$	dal 3/5/2010	2010.1	attiva	30/11/2014
$1.3 < = h(m) < 1.85$	dal 3/5/2010	2010.1	attiva	30/11/2014

Tabella 3 – Equazioni della scala di deflusso e associati range di validità per la stazione idrometrica di Peregallo

Sezione	Fonte scala	Equazione
Molteno	IDROGRAFICO	$Q = 3.757 \cdot (h+0.205)^{1.831}$
Molteno	IDROGRAFICO	$Q = 4.782 \cdot (h+0.075)^{1.316}$

Range di validità' [metri]	Periodo di validità'	Codice scala	Stato	Ultima modifica
$-0.2 < = h(m) < = 1.5$	dal 3/10/2008	2008.1	storica	30/11/2014
$0 < = h(m) < = 1.97$	dal 01/07/2013	2013.1	attiva	30/11/2014

La Figura 2 e la Figura 3 mostrano l'andamento dei livelli del Fiume Lambro nel corso dell'anno solare 2014 in corrispondenza dei due idrometri considerati per l'analisi, posti rispettivamente a monte e a valle dell'area d'interesse.

E' evidente il susseguirsi di numerosi eventi piena, almeno due dei quali particolarmente intensi e già a prima vista contraddistinti da picchi più elevati di quelli che caratterizzano l'anno idrologico medio: si osservi infatti come anche nei primi giorni di luglio si sia manifestato un evento idrologico considerevole, sebbene meno intenso e più impulsivo di quello del successivo (novembre), oggetto del presente studio.

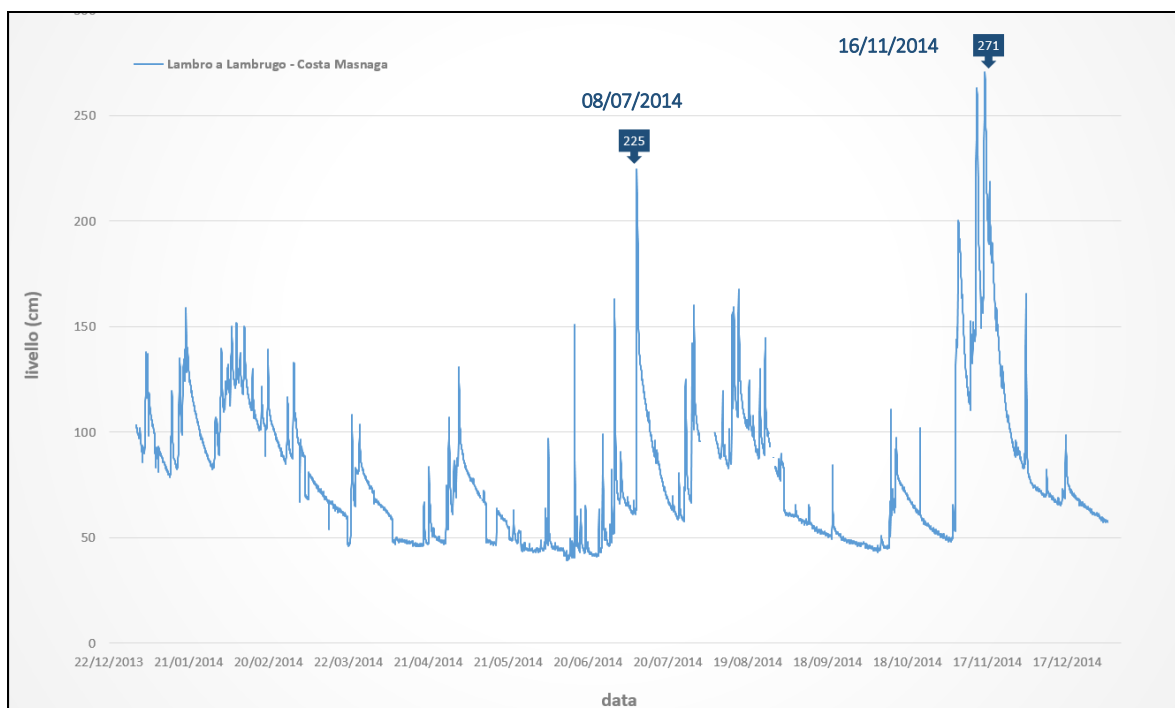


Figura 2 – Andamento dei livelli idrometrici registrati all'idrometro di Lambrugo nell'anno 2014

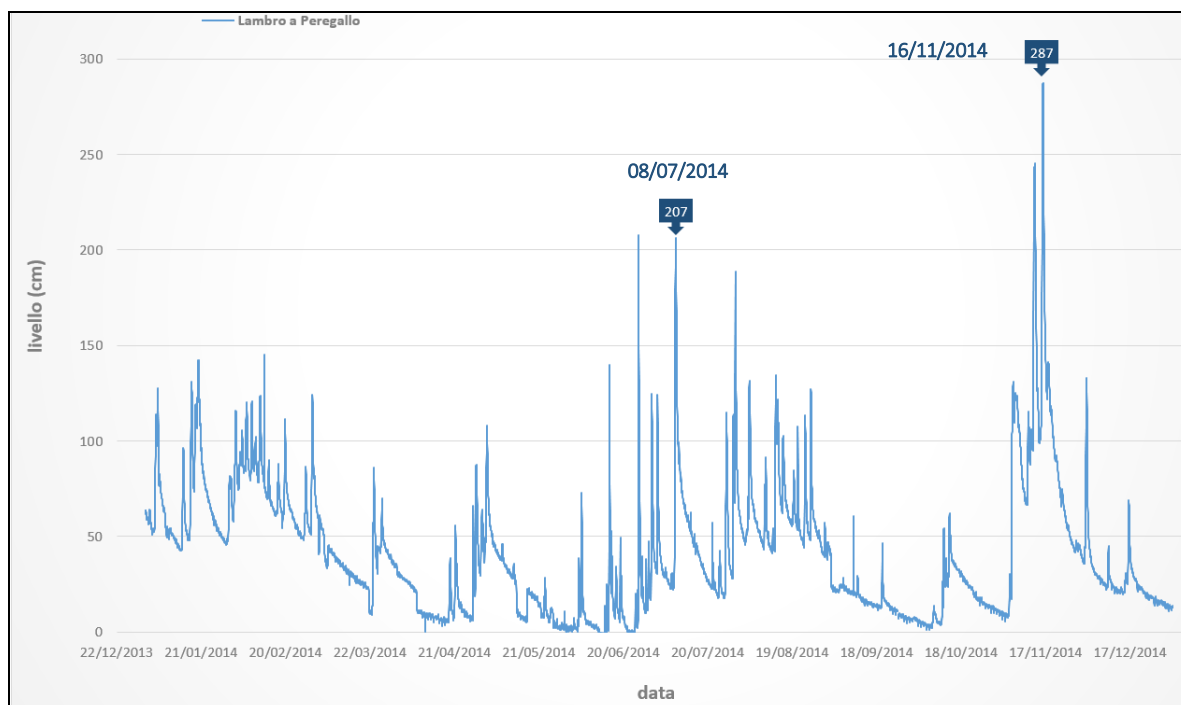


Figura 3 – Andamento dei livelli idrometrici registrati all'idrometro di Peregallo nell'anno 2014



E' inoltre palese il fatto che alla gravosità dell'evento d'interesse abbia contribuito la manifestazione di numerose onde di piena, almeno 4, nell'arco di un periodo molto breve: l'osservazione dei grafici precedenti certifica come almeno due di esse siano state caratterizzate da portate associate a battenti idrici all'incirca pari o superiori a 2,5 m in corrispondenza di ciascun idrometro.

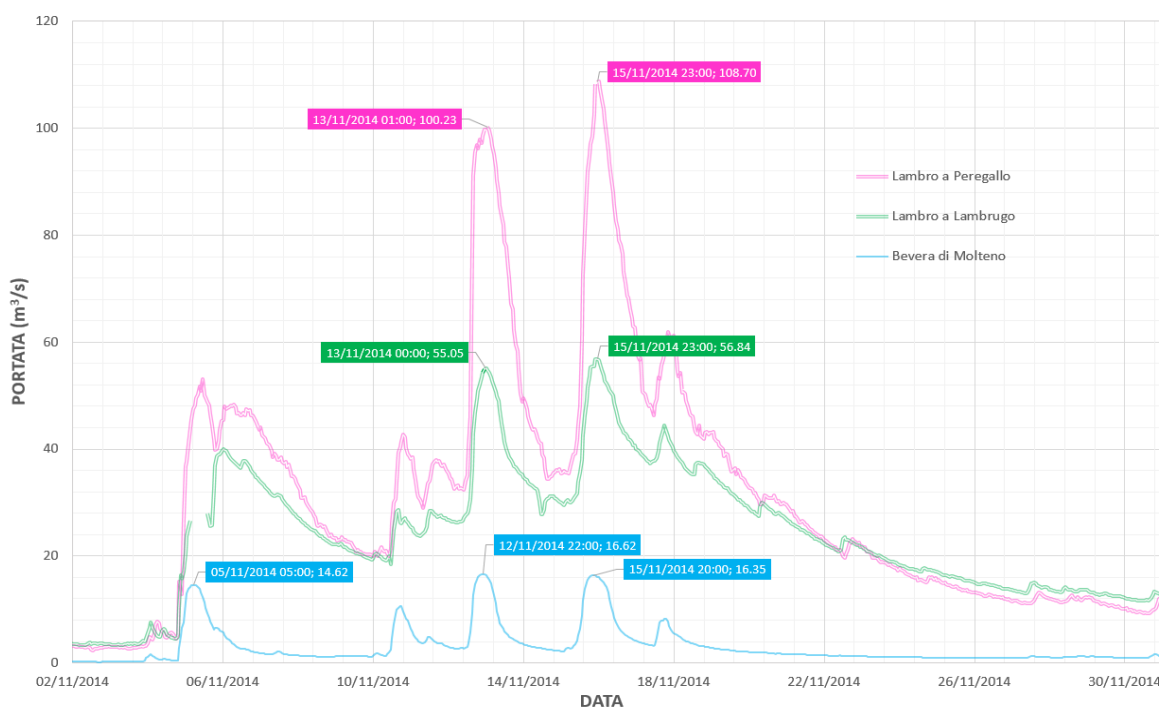


Figura 4 – Andamento delle portate del Fiume Lambro e dell'affluente Bevera di Molteno calcolate in corrispondenza degli idrometri d'interesse nel mese di novembre 2014.
I dati idrometrici forniti dall'ARPA sono stati elaborati applicando le scale di deflusso di Tabella 1.

La precedente Figura 4 mostra l'andamento delle portate defluite nel mese di novembre 2014 in corrispondenza degli idrometri di Lambrugo e Peregallo, sul fiume Lambro, e di Molteno, sull'omonima Bevera. La trasformazione tra livelli idrici misurati e portate defluenti è stata eseguita applicando le formulazioni delle scale di deflusso riportate in Tabella 1.

Il grafico evidenzia la doppia pulsazione nell'andamento della portata che ha caratterizzato l'evento: i valori al colmo sono pressoché simili, anche se all'idrometro di Peregallo il secondo picco è di poco più intenso del primo.

E' ragionevole ipotizzare che l'intervallo di tregua, sebbene molto limitato, abbia consentito all'asta fluviale del Lambro di smaltire almeno in parte le portate, evitandone la concentrazione in un periodo più breve, il che avrebbe di certo determinato la manifestazione di colmi di piena più gravosi.

E' inoltre possibile che l'esperienza accumulata nella gestione dell'opera di regolazione del Lago di Pusiano ("Cavo Diotti"), unitamente ai benefici prodotti dai recentissimi lavori di ristrutturazione, ancorché in quel



momento non ancora ultimati, abbiano consentito di limitare considerevolmente l'entità degli effetti negativi sul territorio perfluviale del Lambro.

Altrimenti è probabile che i danni registrati avrebbero potuto assumere proporzioni simili a quelle occorse nel novembre 2002: a questo proposito, nel paragrafo § 2.2.1 sono riportate alcune considerazioni sul confronto della pluviometria tra i due recenti eventi alluvionali (2002 e 2014).

Assumendo come valide le scale di deflusso pubblicate dall'ARPA per ciascuna delle stazioni idrometriche esistenti sul Lambro nell'intorno dell'area d'interesse, ecco i valori di picco di portata stimati dagli Scriventi e raggiunti nel corso dell'evento del **novembre 2014**:

- **Fiume Lambro a Lambrugo: ~ 57 m³/s;**
- **Fiume Lambro a Peregallo: ~ 110 m³/s;**

A titolo di confronto, di seguito si riportano quelle stimate dagli estensori dello "Studio di Fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua naturali e artificiali all'interno dell'ambito idrografico di pianura Lambro – Olona", pubblicato dall'AdBPo, per l'evento occorso nel **novembre 2002**:

- **Fiume Lambro a Lambrugo: ~ 100 m³/s;**
- **Fiume Lambro a Peregallo: ~ 140 m³/s.**

E' evidente la consistente riduzione dei colmi di piena occorsi nell'evento più recente (novembre 2014) rispetto a quanto avvenuto nel 2002. Le cause sono innanzitutto da ricercarsi nella differente manifestazione dei fenomeni pluviometrici (cfr. paragrafo § 2.2.1) e, con tutta probabilità, anche nei benefici ottenuti grazie alla migliore regolazione del Lago di Pusiano.

Al fine di valutare l'effetto della laminazione è possibile analizzare il confronto tra l'oscillazione del livello del Lago all'idrometro di Bosisio – Parini nel corso dell'evento del novembre 2014 (fonte ARPA Lombardia) e i livelli misurati all'idrometro di Lambrugo, che con riferimento alla Figura 1 rappresenta il primo idrometro sull'asta del F. Lambro posto a valle del Lago stesso.

A livello qualitativo è possibile operare un confronto tra la forma dell'idrogramma di Lambrugo, la forma dell'idrogramma di Caslino d'Erba a monte del Lago e la forma dell'idrogramma della Bevera di Molteno, che si immette nel F. Lambro a valle del lago di Pusiano e a monte di Lambrugo (cfr. Figura 1).

L'andamento dei livelli registrati all'idrometro di Lambrugo permette di osservare quanto segue:

- la posizione dei picchi, certamente influenzata dal contributo impulsivo della Bevera di Molteno, corrisponde alla posizione del picco "idrologico": per ciascuna pulsazione dell'evento, la curva di crescita dei livelli è pressoché analoga per Caslino, Molteno e Lambrugo;
- al contrario, la curva di esaurimento di ciascuna pulsazione dell'evento per l'idrometro di Lambrugo si differenzia dagli idrometri indipendenti dall'effetto della laminazione del Lago (Caslino e Molteno): l'andamento di tale esaurimento è molto più graduale e associato all'andamento della decrescita dei livelli nel Lago.

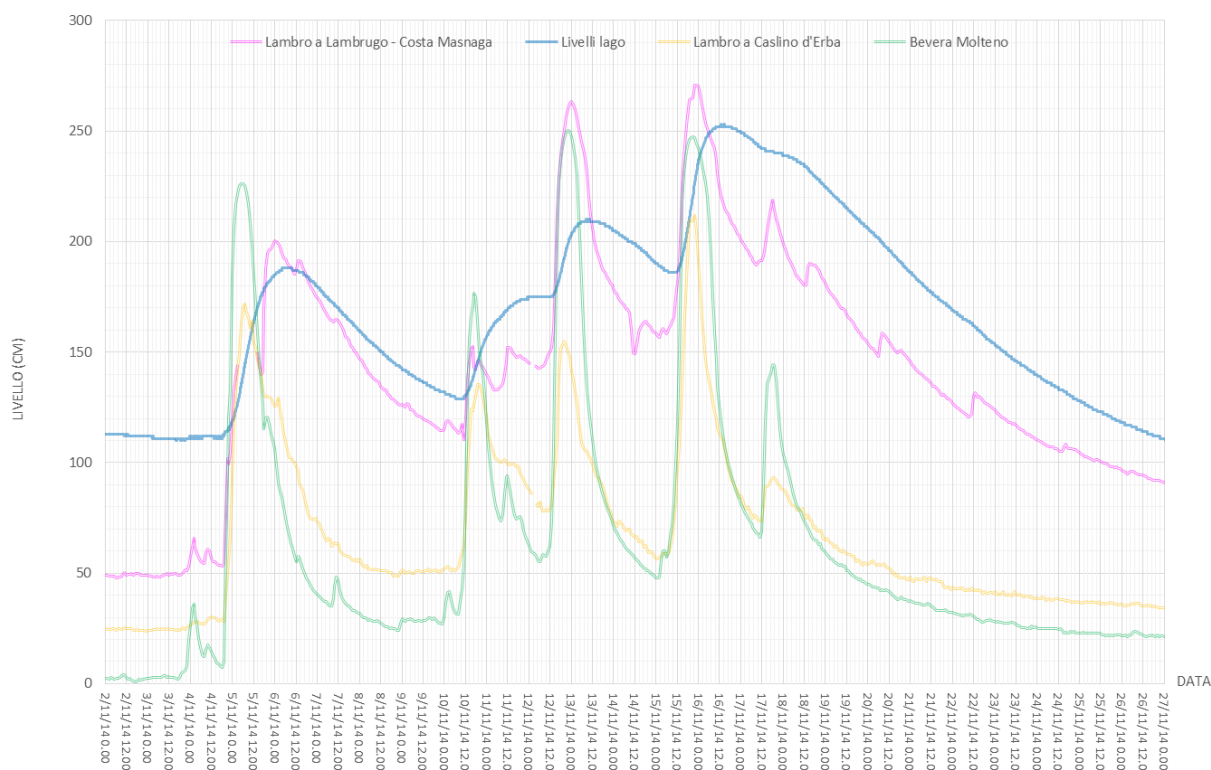


Figura 5 – Andamento dei livelli del F. Lambro a monte e a valle del Lago di Pusiano e confronto con le oscillazioni del Lago misurate a Bosisio-Parini nel corso dell'evento del novembre 2014.

Da un semplice confronto qualitativo dell'andamento dei livelli, è quindi possibile verificare il beneficio, in termini di laminazione dei picchi di piena, offerto dalla regolazione controllata del Lago di Pusiano: in assenza di laminazione il livello raggiunto all'idrometro di Lambrugo e il conseguente valore di portata sarebbero stati senza dubbio superiori di quanto effettivamente verificatosi.

Sempre nell'ambito dello studio dell'AdBPo testé citato è stata prodotta una tabella di sintesi delle portate di piena attese in una serie di sezioni significative per diversi tempi di ritorno. Di seguito se ne riporta uno stralcio significativo relativo alle sezioni collocate in corrispondenza degli idrometri di Lambrugo e Peregallo sul fiume Lambro.

Tabella 4 – Estratto da “Studio di Fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua naturali e artificiali all'interno dell'ambito idrografico di pianura Lambro – Olona” – Tabella 5 a pag. 59.

Sezione	Descrizione	T=10		T=200		T=500	
		Livello (m s.l.m)	Portata (m³/s)	Livello (m s.l.m)	Portata (m³/s)	Livello (m s.l.m)	Portata (m³/s)
LA 127	Ponte via Dante - Lambrugo	241.07	30	243.20	120	243.95	160
LA 102	Ponte vecchio - Biassono	180.50	80	182.88	175	183.59	210



Il valore del tempo di ritorno associato ai picchi di portata stimati in precedenza per il recente evento alluvionale è stato definito mediante estrapolazione dalle curve di regressione appositamente ricostruite e mostrate in Figura 6. Tenendo in debita considerazione le imprecisioni insite nella procedura statistica applicata, ecco i valori ottenuti dagli Scriventi:

- **Fiume Lambro a Lambrugo: TR ~ 50 anni;**
- **Fiume Lambro a Peregallo: TR ~ 50 anni.**

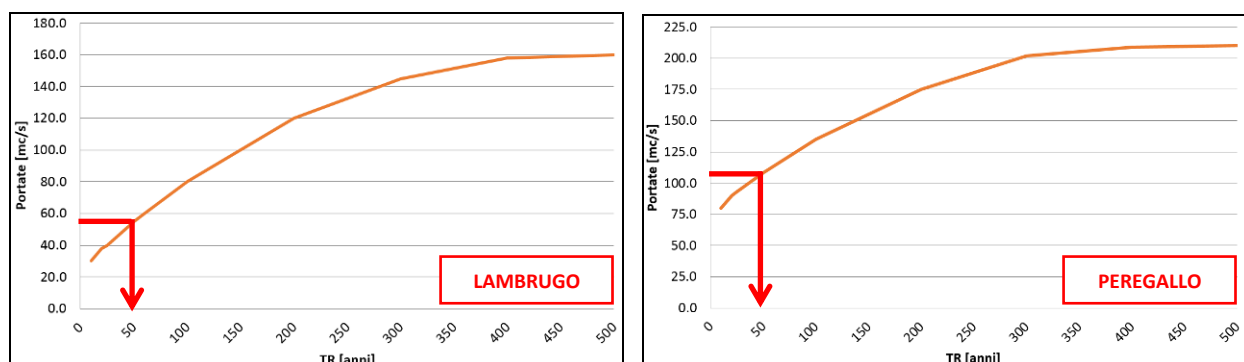


Figura 6 – Stima dei tempi di ritorno associati al picco di piena registrato agli idrometri di Lambrugo e Peregallo: entrambi circa 50 anni. La stima è stata effettuata per estrapolazione dalla curva di regressione.

2.2 ANALISI PLUVIOMETRICA

Come noto, gli idrometri disponibili nei pressi dell'area d'interesse sono al momento dislocati soltanto a Lambrugo e Peregallo, lungo il Lambro, e a Molteno, sull'omonima Bevera.

Al fine di ricostruire con la maggior precisione ed attendibilità possibile quanto accaduto nel corso dell'evento alluvionale del novembre 2014, si quindi è reso necessario definire una procedura in grado di stimare anche i contributi di portata convogliati al Lambro dai sottobacini direttamente sottesi dal corso d'acqua principale nel tratto d'interesse (LAM6 e LAM7) e dalla Bevera di Veduggio, che confluisce in Lambro poco a monte del luogo in cui sorgerà la nuova opera di regolazione.

Per questa ragione si è provveduto ad analizzare l'andamento delle precipitazioni che hanno investito i bacini d'interesse nel periodo indagato al fine di analizzare la distribuzione spaziale dell'evento idrologico.

Ciò è stato effettuato elaborando i dati di precipitazione giornaliera delle stazioni pluviometriche di Molteno, Lambrugo, Nibionno, Casatenovo e Carate Brianza.

Si è provveduto innanzitutto a calcolare le curve cumulate, rappresentandole graficamente per valutare già a prima vista l'andamento del fenomeno meteo-pluviometrico occorso (cfr. Figura 7).

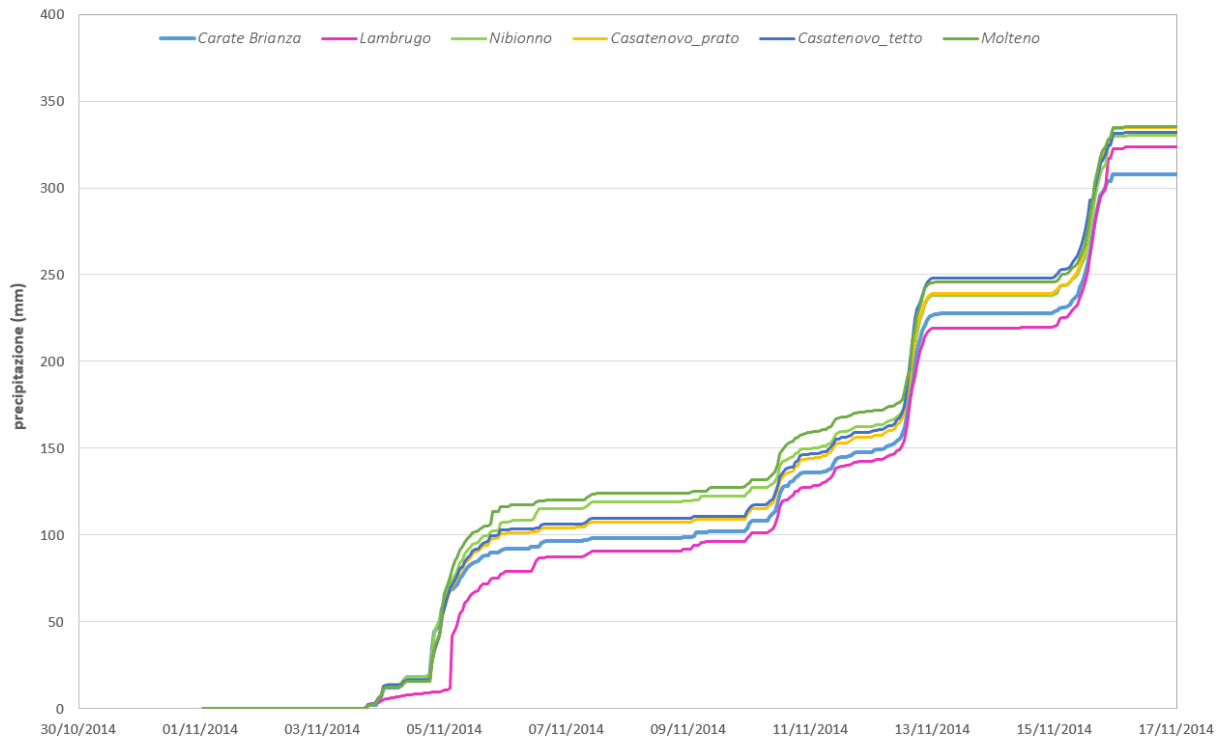


Figura 7 – Precipitazione giornaliera cumulata registrata dai pluviometri ubicati nell'area in studio nel periodo d'interesse

In primo luogo è facilmente osservabile una distribuzione assolutamente omogenea dell'evento pluviometrico, che ha registrato in tutte le stazioni di monitoraggio considerate lo stesso andamento e sostanzialmente la stessa cumulata: dai 308 mm di Carate Brianza ai 335 mm di Molteno.

Altra considerazione ritenuta significativa riguarda le caratteristiche dell'evento. L'apporto pluviometrico più significativo, che ha generato l'evento alluvionale oggetto di studio, è stato registrato tra il 12 ed il 16 novembre ed ha avuto una doppia pulsazione: due eventi precipitativi molto intensi (70-100 mm ciascuno) intervallati da poche ore di "tregua": ciò rispecchia l'andamento già rilevato e descritto in precedenza relativamente all'andamento dei livelli idrici in corrispondenza degli idrometri di Molteno, Lambrugo e Peregallo.

Si ribadisce che è stata proprio la cessazione delle precipitazioni in detto intervallo a configurarsi come una delle concause in grado determinare la probabile consistente attenuazione dei picchi di piena di cui si è già detto in precedenza.

In realtà il mese di novembre 2014 ha registrato anche altri due episodi pluviometrici intensi: il primo nei giorni 4-5 novembre e l'altro, meno intenso, nei giorni 10-11 novembre. L'evento principale ha fatto registrare una cumulata compresa tra i 90 mm di Carate Brianza e i 120 mm di Molteno.

Nella successiva Figura 8 è mostrato il dettaglio delle precipitazioni cumulate registrate in ciascuno dei pluviometri d'interesse nel periodo durante il quale si è originato l'evento alluvionale oggetto di studio.

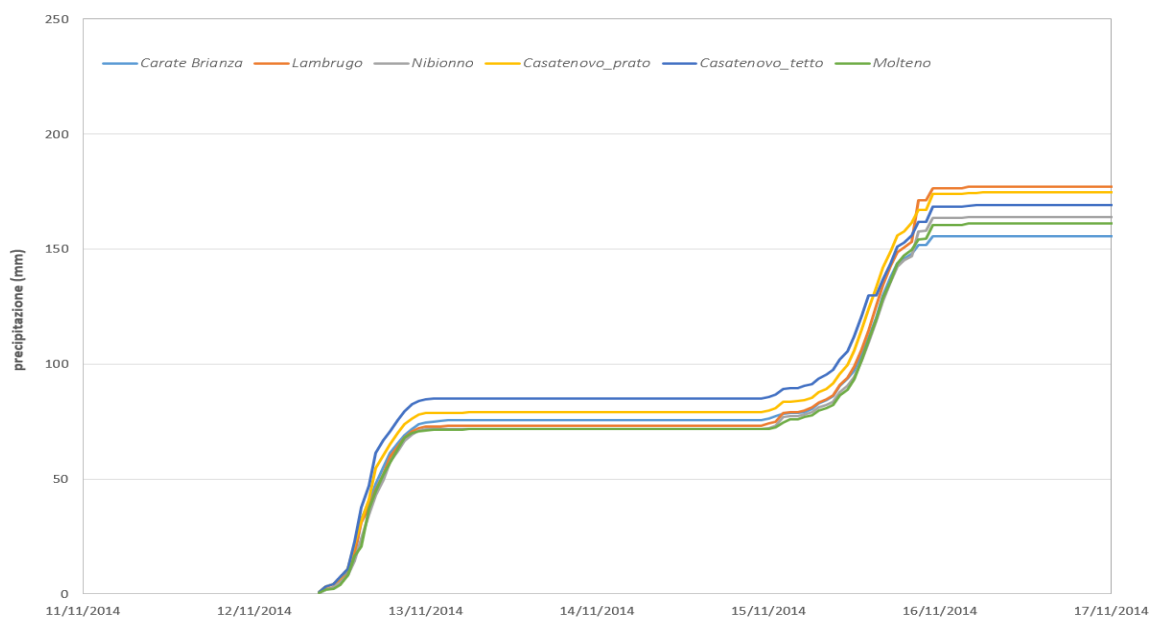


Figura 8 – Precipitazioni giornaliere cumulate dell'evento 12-16 novembre 2014.

L'aver accertato l'omogeneità delle distribuzioni nell'area d'interesse è uno degli elementi posti alla base delle valutazioni condotte per la definizione degli idrogrammi utilizzati quali condizioni al contorno di input del modello idraulico (cfr. § 2.3).

Tuttavia, prima di descrivere l'esito delle simulazioni idrauliche condotte dagli Scriventi, si ritiene utile effettuare un confronto tra le precipitazioni dell'evento 2014 con quelle registrate invece nel 2002, così come si era fatto e per le portate di piena.

2.2.1 Confronto tra la pluviometria degli eventi 2002 e 2014

A parte le intense precipitazioni che hanno diffusamente interessato il territorio d'interesse per quasi l'intero mese di novembre 2002, tra i giorni 24 ed il 27 un nucleo perturbato particolarmente intenso ha rovesciato una media di circa 200 mm di precipitazione, praticamente senza sosta, misurati in tutte le stazioni di misura considerate (cfr. Figura 9).

Pertanto, al di là della saturazione dei terreni e degli invasi disponibili, determinata dalle abbondanti precipitazioni verificatesi durante tutto il mese di novembre 2002, l'evento pluviometrico *clou* occorso nel periodo 24-27, che ha scatenato la disastrosa alluvione tristemente famosa, si è manifestato con intensità e distribuzione temporale decisamente più gravosa di quelle che hanno segnato il periodo 12-16 novembre 2014.

Avendo accertato la sostanziale uniformità spaziale della distribuzione, è possibile confermare quanto sopra affermato osservando il semplice confronto tra i dati pluviometrici dei due eventi registrati dal sensore di Molteno. Infatti **in Figura 10 si osserva come l'evento 2014 sia caratterizzato non soltanto da una cumulata di circa 150 mm, di circa il 25% inferiore a quella del 2002, ma mostri anche quella significativa interruzione**



delle precipitazioni, durata oltre 48 ore, che ha consentito il più volte citato ripristino di condizioni idrauliche meno critiche lungo i corsi d'acqua d'interesse.

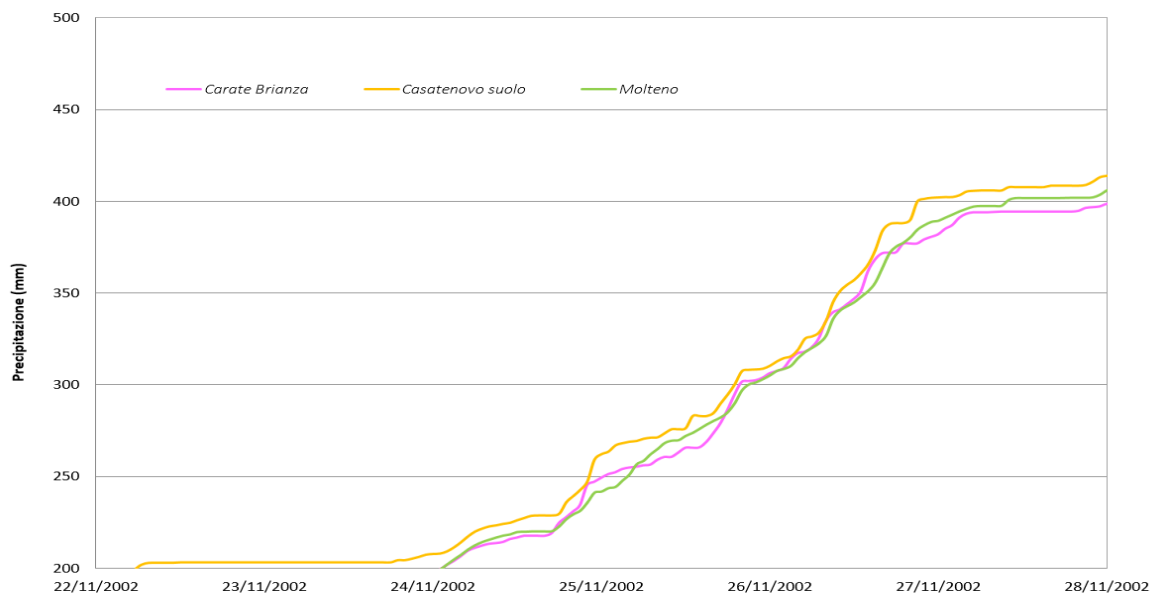


Figura 9 – Precipitazioni giornaliere cumulate dell'evento 24-27 novembre 2014

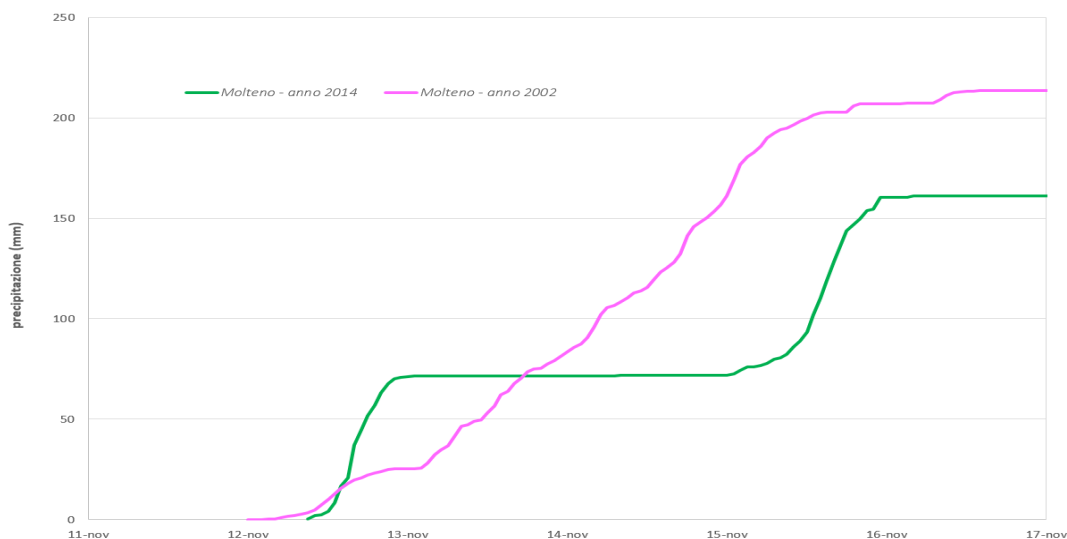


Figura 10 – Confronto tra le precipitazioni accumulate nel pluviometro di Molteno nel corso degli eventi del 2002 e del 2014.



2.3 RICOSTRUZIONE DEGLI IDROGRAMMI IN INGRESSO AL MODELLO

L'obiettivo dell'attività descritta nel presente paragrafo è stata la definizione degli idrogrammi utilizzati quali condizioni al contorno di input per il modello idraulico allestito per eseguire le simulazioni numeriche di "back analysis" richieste nel presente studio (cfr. capitolo §3).

Innanzitutto si ritiene utile riportare le portate di piena ufficiali per le condizioni attuali e per l'assetto di progetto così come definite nel PAI vigente (cfr. Figura 11).

Sezione	Progr.	Descrizione	Portata idrologica stato attuale (T=200)	Portata idraulica stato attuale (T=200)	Portata idraulica assetto progetto completo (T=200)	Valori limite delle portate di progetto scaricabili dagli affluenti naturali e dai recapiti urbani	Denominazione
	[m]		[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	
LA 132.19	21249	uscita Lago di Pusiano	70	50	15	15	Lago di Pusiano
LA 132.11	22545	Ponte S.P. 41 Merone	85	60	20		
LA 129.2	25528	confluenza Bevera Molteno	150	120	55	22	Bevera di Molteno
LA 127	27039	Ponte via Dante Lambrugo	150	120	65		
LA 124.3	28882	Ponte S.S. 342 (Briantea)	155	115	65		
LA 120.2						Attuale (36)	Bevera di Veduggio (viene laminata nell'area di Inverigo sul corso principale)
LA 120.1	33107	Ponte via Camisasca Inverigo	195	135	65		

Figura 11 – Valori delle portate di piena di riferimento in corrispondenza di alcune sezioni significative (fonte: AdBPo – P.A.I. fiume Lambro)

Di seguito si mostra anche lo schema idrografico del tratto d'interesse, tratto dal citato Studio di Fattibilità di sistemazione del Lambro.

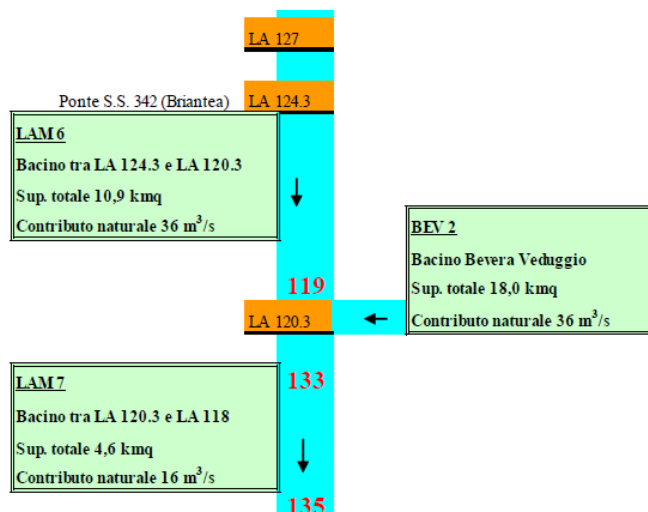


Figura 12 – Schema idrografico del fiume Lambro nel tratto d'interesse (fonte: AdBPo – S.d.F. fiume Lambro).



Con riferimento a quanto sopra, i contributi di portata di piena da definire per il presente studio sono i seguenti:

- **Fiume Lambro**: andamento dei deflussi di piena in ingresso all'area di laminazione di Inverigo. In condizioni antecedenti la realizzazione del complesso di opere volte alla regolazione delle portate di piena del Lambro (ad es. "Cavo Diotti"), il PAI vigente indica una portata di piena duecentennale di **115 m³/s** alla sezione LA124.3 (cfr. Figura 11). Essa è collocata in corrispondenza del ponte della SS342 "Briantea", poco a valle dell'idrometro di Lambrugo (sez. LA127);
- **Sottobacino LAM6**: contributo distribuito di portata proveniente dal bacino direttamente sotteso dal Lambro. Lo Studio di Fattibilità stima una portata di picco di **36 m³/s** per il tempo di ritorno duecentennale (cfr. Figura 12);
- **Bevera di Veduggio**: contributo concentrato di portata proveniente dall'affluente di sinistra del Lambro che confluisce nel corso d'acqua principale nei pressi della Cascina "Cattafame". Lo Studio di Fattibilità stima una portata di picco di **36 m³/s** per il tempo di ritorno duecentennale (cfr. Figura 12);
- **Sottobacino LAM7**: contributo distribuito di portata proveniente dal bacino direttamente sotteso dal Lambro. Lo Studio di Fattibilità stima una portata di picco di **16 m³/s** per il tempo di ritorno duecentennale (cfr. Figura 12);
- **Fiume Lambro**: andamento dei deflussi di piena in uscita dall'area di laminazione di Inverigo. In condizioni antecedenti la realizzazione del complesso di opere volte alla regolazione delle portate di piena del Lambro, il PAI vigente indica una portata di piena duecentennale di **135 m³/s** alla sezione LA120.1 (cfr. Figura 11), posta in corrispondenza del ponte di Fornacetta.

L'analisi idrometrica descritta in precedenza ha già consentito di definire l'idrogramma di piena defluente alla sezione di Lambrugo (LA127) nel corso dell'evento alluvionale del novembre 2014. Come detto, è quindi necessario definire numericamente anche gli altri idrogrammi di portata che costituiscono le informazioni di input per il modello numerico.

Considerando il fatto che l'analisi pluviometrica ha permesso di verificare la sostanziale omogeneità nella distribuzione delle precipitazioni, l'approccio metodologico adottato è stato il seguente:

1. Individuare la correlazione tra l'idrogramma di portata duecentennale alla sezione LA127 ($Q_{MAX} = 120 \text{ m}^3/\text{s}$, cfr. Figura 11), ossia ove è collocato l'idrometro di Lambrugo, e quello effettivamente defluito nel corso dell'evento del novembre 2014;
2. Estendere ed applicare proporzionalmente detta correlazione agli altri idrogrammi d'interesse che è necessario ricostruire per simulare quanto avvenuto nel novembre 2014:
 - Ingresso all'area di laminazione di Inverigo, sezione LA124.3;
 - Sottobacino LAM6, contributo distribuito di portata;
 - Bevera di Veduggio, contributo concentrato di portata;
 - Sottobacino LAM7, contributo distribuito di portata.



L'esecuzione delle simulazioni idrauliche descritte in dettaglio nel successivo capitolo (cfr. § 3), unitamente all'esperienza detenuta dagli Scriventi, ha permesso infine di definire l'idrogramma in uscita dall'area di laminazione di Inverigo, ossia in corrispondenza della sezione LA120.1, verificando la congruenza tra i livelli idrici ottenuti numericamente e quelli effettivamente manifestatisi nel corso dell'evento alluvionale del novembre 2014.

2.3.1 Idrogramma di piena in ingresso all'area di laminazione di Inverigo (sezione LA124.3)

L'idrogramma defluito nel novembre 2014 lungo il fiume Lambro alla sezione LA124.3, ossia quella collocata in corrispondenza della SS342 "Briantea" si può ritenere molto simile a quello definito per la sezione di Lambrugo (LA127), posta poco a monte, ove è situato l'idrometro.

L'assunzione trova conferma nelle portate ufficiali del PAI riportate in Figura 11:

- sezione LA127 - $Q_{MAX} = 120 \text{ m}^3/\text{s}$;
- sezione LA124.3 - $Q_{MAX} = 115 \text{ m}^3/\text{s}$.

La modesta riduzione del picco di piena in direzione di valle è spiegabile con moderati effetti di laminazione probabilmente esercitati dalle aree golenali. In Figura 13 è mostrato il confronto tra i due idrogrammi.

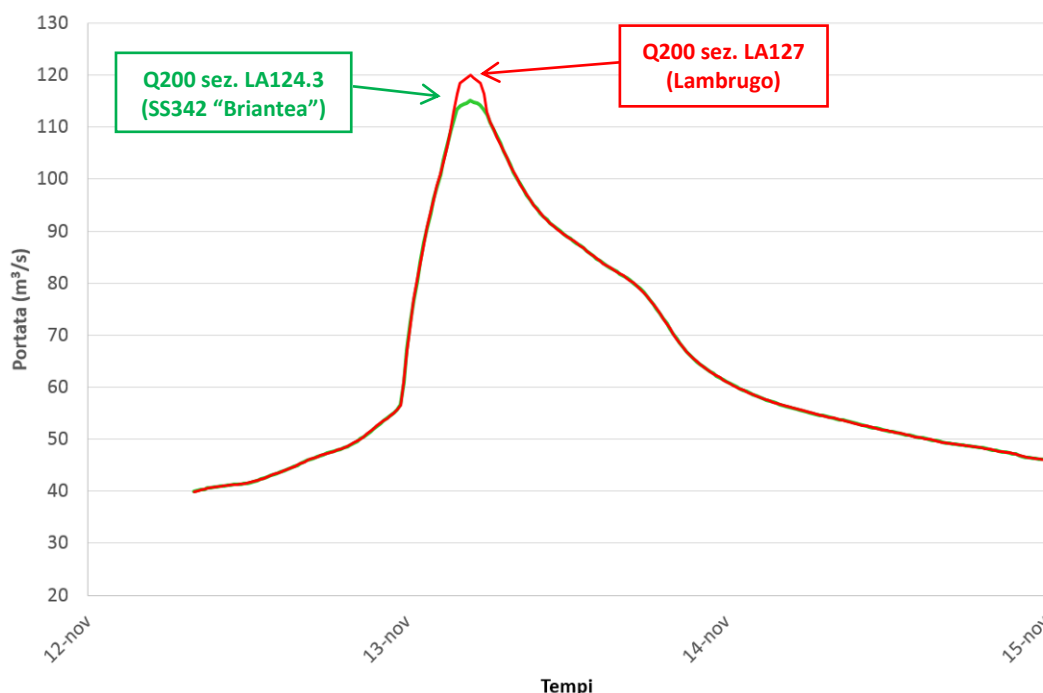


Figura 13 – Confronto tra gli idrogrammi di piena duecentennale il cui colmo di portata è definito nel PAI per la sezione LA127 (Lambrugo, $120 \text{ m}^3/\text{s}$) e la sezione LA124.3 (SS342, $115 \text{ m}^3/\text{s}$)

Considerando che il picco di portata stimato a Lambrugo nel novembre 2014 ammonta a circa $57 \text{ m}^3/\text{s}$ (cfr. §2.1), raggiunto tra le ore 22.00 e le 23.00 del giorno 15, è quindi possibile ipotizzare proporzionalmente che il colmo defluito più a valle in corrispondenza del ponte della SS342 fosse di circa $54 \text{ m}^3/\text{s}$.



Nella successiva Figura 14 è riportato il confronto tra l'idrogramma di piena i cui livelli associati sono stati effettivamente misurati dall'idrometro di Lambrugo (sez. LA127, $Q_{MAX} = 57 \text{ m}^3/\text{s}$) e l'idrogramma che si stima sia defluito in corrispondenza della sezione LA124.3 (SS342 "Briantea", $Q_{MAX} = 54 \text{ m}^3/\text{s}$).

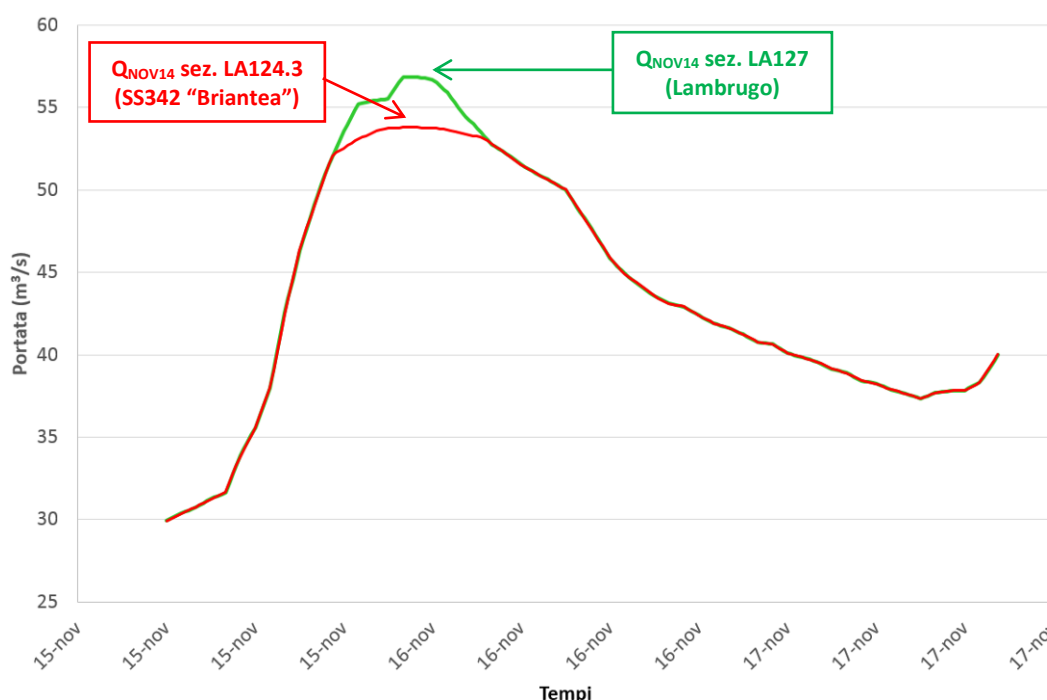


Figura 14 – Evento novembre 2014: confronto tra gli idrogrammi di piena in corrispondenza dell'idrometro di Lambrugo (sez. LA127, $Q_{MAX} = 57 \text{ m}^3/\text{s}$) e del ponte della SS342 "Briantea" (sez. LA124.3, $Q_{MAX} = 53 \text{ m}^3/\text{s}$)

Quanto mostrato nella precedente figura è ovviamente relativo al colmo di piena di una singola pulsazione dell'evento alluvionale che, come visto in precedenza, è stato invece caratterizzato da un doppio picco di portata d'entità pressoché uguale.

Il coefficiente di correlazione ottenuto comparando l'idrogramma relativo alla portata duecentennale (cfr. Figura 13) con quello stimato per l'evento idrologico d'interesse (cfr. Figura 14) è stato quindi utilizzato per la ricostruzione degli altri idrogrammi da utilizzare quali condizioni al contorno di input nel modello numerico idraulico.

2.3.2 Contributi di portata provenienti dalla Bevera di Veduggio e dai sottobacini LAM6 e LAM7

L'estensione e l'applicazione proporzionale della correlazione ai contributi idrici provenienti dalla Bevera di Veduggio e dai sottobacini LAM6 e LAM7 ha consentito di stimare i rispettivi idrogrammi che si suppone abbiano contribuito alla formazione dell'onda di piena del Lambro nel corso dell'evento del novembre 2014.

In ragione della distribuzione omogenea delle precipitazioni è ragionevole assumere che anche nei suddetti sottobacini si siano originati idrogrammi di piena a doppio e analogo picco di portata.



Nella successiva Figura 15 sono rappresentati gli idrogrammi stimati per ciascun sottobacino, così come adottati per le simulazioni idrauliche descritte nel successivo capitolo.

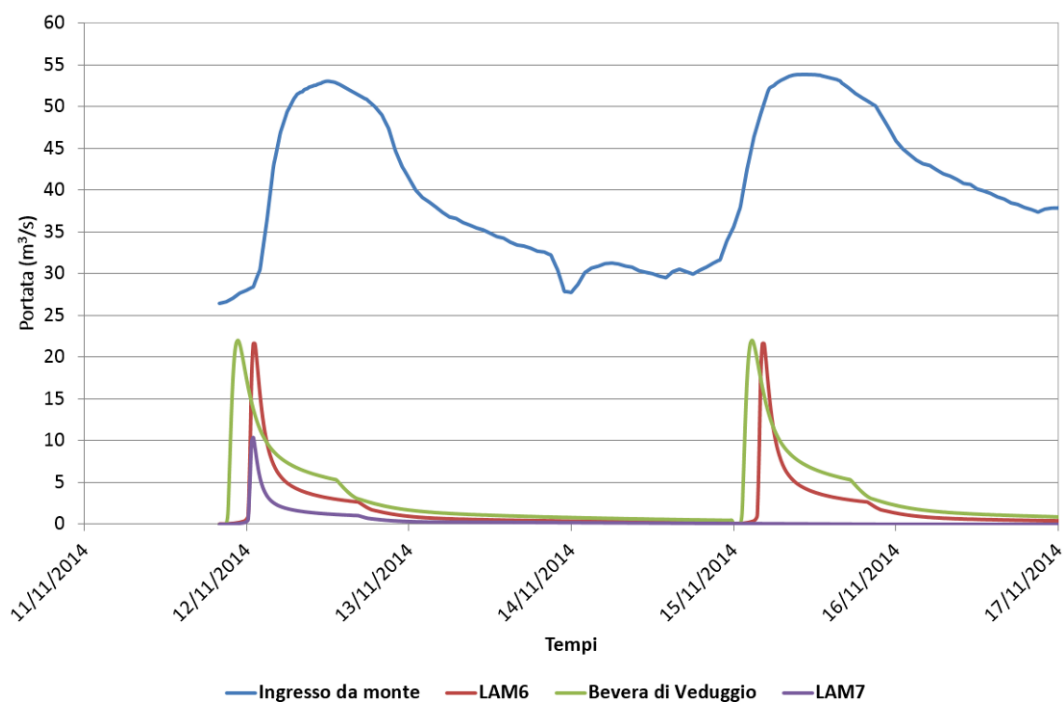


Figura 15 – Idrogrammi di input del modello numerico idraulico



3. ANALISI IDRAULICA E RICOSTRUZIONE DELL'EVENTO

Lo studio idraulico è stato eseguito con il supporto di simulazioni numeriche in moto vario ed ha consentito di offrire, mediante la back-analysis di un evento reale, una più aggiornata validazione del modello numerico idraulico allestito per le condizioni ante-operam del Lambro nell'ambito del citato progetto di regolazione delle portate di piena del corso d'acqua lombardo.

3.1 DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO

Le simulazioni numeriche sopra citate sono state condotte grazie alla predisposizione di un modello numerico idraulico in moto vario.

L'allestimento del modello è avvenuto mediante l'utilizzo del codice di calcolo HEC-RAS River Analysis System, sviluppato dall'U.S. Army Corps of Engineering – Hydrologic Engineering Center. La versione del software utilizzata è la 4.1, aggiornata al mese di gennaio 2010.

HEC-RAS consente il calcolo idraulico monodimensionale di canali naturali e artificiali, sia in condizioni di moto permanente che di moto vario, tenendo conto dell'influenza sul moto di manufatti di vario tipo (ponti, tombini, briglie, sfioratori, luci servite da paratoie, ecc.) eventualmente presenti nel sistema. Possono essere modellati sia canali singoli che reti di canali naturali o artificiali, chiusi o aperti, con l'integrazione di profili di corrente lenta, veloce o di tipo "misto".

Un evento di piena è idraulicamente descritto dalle equazioni del moto vario per correnti a pelo libero. Esse costituiscono un sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali del primo ordine, non lineare e non integrabile analiticamente, dette equazioni di De Saint Venant.

La procedura di calcolo utilizzata per la risoluzione delle equazioni di De Saint Venant si basa su uno schema implicito alle differenze finite, applicato a celle di calcolo a quattro nodi. In questo schema le derivate spaziali e i valori delle funzioni sono calcolati in un punto interno alla cella, di coordinate $[0,5; (n + \theta)]$.

Il sistema di equazioni viene così trasformato, per ogni tronco di corso d'acqua, in una successione di equazioni algebriche calcolate all'interno di ogni cella. Si perviene così a una soluzione simultanea su tutto il tronco, in cui l'intervallo temporale di calcolo può essere maggiore rispetto a un analogo schema di tipo esplicito. Le analisi di stabilità di Von Neumann mostrano che lo schema implicito è incondizionatamente stabile (teoricamente) per $0,5 < \theta < 1$ e condizionatamente stabile per $\theta = 0,5$.

La prima fase necessaria all'implementazione del modello consiste nel creare la geometria del sistema, ossia nel rappresentare l'alveo da analizzare, tracciando il sistema dei corsi d'acqua e le loro connessioni, secondo la direzione di scorrimento dell'acqua. Successivamente si provvede ad inserire le sezioni trasversali estratte dalle basi topografiche disponibili, definendo le quote e le distanze progressive dal punto di origine di ciascuna sezione, convenzionalmente individuato in sponda sinistra, e ad indicare le distanze reciproche procedendo in senso contrario a quello dello scorrimento dell'acqua. Per ogni sezione si identificano, mediante l'inserimento della distanza progressiva specifica, l'alveo e le zone golenali.



L'operazione prosegue con l'inserimento dei dati di scabrezza dell'alveo e delle sponde, secondo il coefficiente n di Manning. Il programma, al termine dell'inserimento delle informazioni geometriche, restituisce il grafico delle sezioni e il profilo altimetrico dell'alveo.

All'interno della geometria che schematizza il sistema si inseriscono inoltre le strutture già presenti lungo il corso d'acqua, come ponti o soglie, e/o quelle previste in progetto.

Il calcolo del livello del pelo libero si basa sulla risoluzione dell'equazione monodimensionale dell'energia, che calcola le perdite di carico mediante l'equazione di Manning e tiene conto delle perdite localizzate a mezzo di opportuni coefficienti moltiplicativi del termine cinetico. L'equazione del momento è utilizzata ogni volta in cui il profilo del moto subisce brusche variazioni, ad esempio in corrispondenza di ponti, confluenze o risalti idraulici.

3.2 VALIDAZIONE DEL MODELLO MEDIANTE BACK-ANALYSIS

La ricostruzione (o "back-analysis") delle caratteristiche idrauliche dell'evento alluvionale occorso nel novembre 2014 è avvenuta attraverso l'attuazione dei seguenti passaggi:

- definizione degli idrogrammi di input, così come descritto nel precedente capitolo;
- raccolta delle informazioni disponibili sui massimi livelli/battenti idrici raggiunti in corrispondenza di alcune sezioni di controllo definite nell'area d'interesse;
- simulazione numerica preliminare eseguita adottando la schematizzazione geometrica a suo tempo implementata per le verifiche idrauliche condotte nell'ambito del Progetto Definitivo delle opere di regolazione (cfr. paragrafo 5.4.1 – Scenario "A" dell'Elaborato R02 – Relazione idrologico-idraulica, maggio 2014);
- verifica di congruenza tra i risultati ottenuti in termini di battenti/livelli idrici con i dati effettivamente osservati;
- ulteriori simulazioni numeriche con adozione di accorgimenti in grado di massimizzare detta congruenza.

Nei successivi paragrafi ciascuno dei punti precedenti è affrontato con maggior grado di dettaglio, a meno del primo che è stato diffusamente trattato nella prima parte del presente documento.

3.2.1 Massimi battenti/livelli idrici raggiunti nell'area d'interesse in occasione dell'evento alluvionale

In data 16/12/2014 le Associazioni locali "Orrido di Inverigo" e "Le contrade" hanno prodotto una nota tecnica volta a produrre una serie di osservazioni inerenti il citato Progetto Definitivo delle opere di regolazione che a quel tempo era oggetto di esame da parte della Conferenza dei Servizi. Così come gli Scriventi hanno avuto modo di rilevare e sottolineare nel proprio commento a detta nota, trasmesso alla CdS in data 22/12/2014, essa comprende una numerosa serie di inesattezze di vario genere sulle quali in questa sede si ritiene di sorvolare. Tuttavia, proprio nei giorni in cui si verificava l'evento alluvionale d'interesse, gli estensori del documento avevano svolto dei sopralluoghi sia presso il ponte di Fornacetta d'Inverigo, sia presso la c.na



Cattafame la quale, come noto, è sita nei pressi della confluenza in Lambro della Bevera di Veduggio. Avendo documentato le visite con diverse riprese fotografiche, le stesse si rivelano utili per stimare i massimi battenti/livelli idrici raggiunti nei luoghi citati in occasione dell'evento di piena.



Figura 16 – Ripresa fotografica del ponte di Fornacetta in data 15/11/2014 ore 17.00 circa e stima dei livelli idrici (fonte: nota tecnica del 16/12/2014, Associazioni "Orrido di Inverigo" e "Le contrade")

Ad esempio, la precedente figura mostra il livello idrico raggiunto dal Lambro a valle del ponte di Fornacetta intorno alle ore 17.00: i redattori della nota stimano una differenza di quota di circa 100 cm tra l'intradosso dell'arcata destra del ponte e il pelo libero del Lambro.

Considerando che la quota dell'intradosso è di 235,88 m s.l.m., si può dedurre che **il livello idrico del Lambro in quel frangente si attestasse a 234,88 m s.l.m.** Ciò determina un **franco idraulico di oltre 2,0 m** rispetto alla livelletta stradale del ponte, che è posta a circa 237,00 m s.l.m.

Analogamente, nella successiva Figura 17 è riportata la ripresa fotografica di uno dei cancelli della recinzione perimetrica di C.na Cattafame.



Figura 17 – Ripresa fotografica di un cancello di C.na Cattafame in data 13/11/2014 ore 10.00: il materiale flottante incastrato su di esso indica qualitativamente il limite del massimo livello idrico raggiunto (in rosso) (fonte: nota tecnica del 16/12/2014, Associazioni "Orrido di Inverigo" e "Le contrade")

Il cancello mostrato in precedenza è collocato a circa 35 m dalla sponda sinistra del Lambro, il cui alveo si intravede sullo sfondo, delimitato dal filare d'alberi.

Sul cancello è visibile del materiale flottante (ramaglie, etc.) rimasto incastrato al decrescere dei livelli idrici, il cui massimo è stato raggiunto intorno alle ore 22.00 del 12/11/2014¹. Il limite superiore del deposito segnala qualitativamente il massimo livello idrico raggiunto sino a quel momento, che si ritiene possa essere associato con ragionevole certezza al primo dei due picchi di portata defluiti in Lambro in occasione dell'intero evento di piena.

Facendo riferimento allo stralcio del piano quotato mostrato in Figura 18, tratto dal rilievo topografico plano-altimetrico del fiume Lambro nei comuni di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano commissionato dal Parco del Lambro e redatto dall'arch. Buscaglia nell'aprile 2013, è possibile desumere quanto segue:

- quota piano campagna in corrispondenza del cancello: 235,05 m s.l.m.;
- quota del ciglio sommitale del muretto di destra: 235,77 m s.l.m.

¹ Si tratta di una dichiarazione degli abitanti della C.na Cattafame riportata sulla nota tecnica citata.

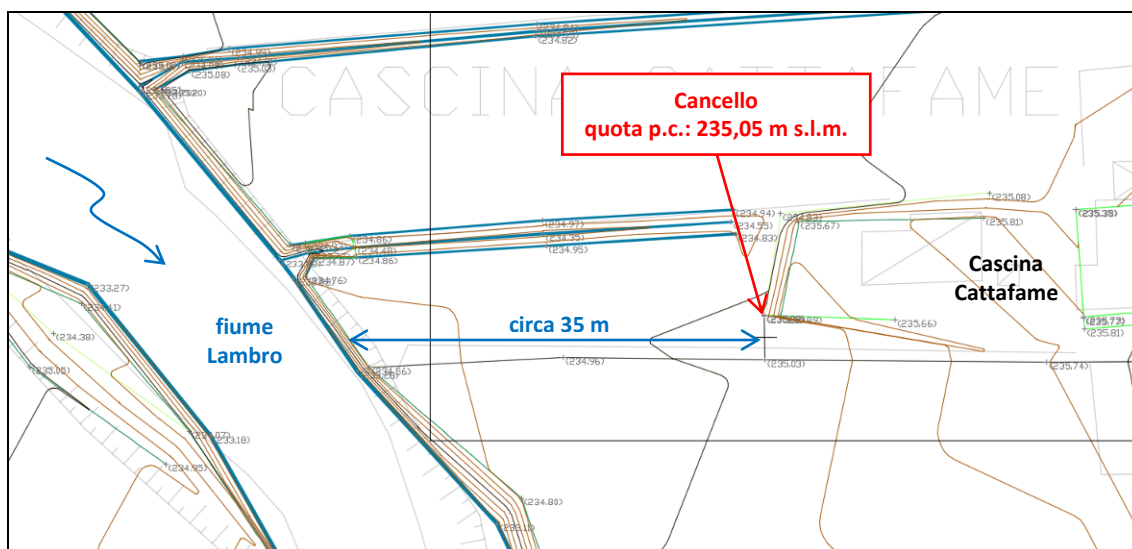


Figura 18 – Stralcio del piano quotato tratto dal rilievo topografico plano-altimetrico del fiume Lambro nei comuni di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano (fonte: Parco del Lambro)

Pertanto, il confronto tra la quota del ciglio del muretto e il limite massimo raggiunto dal livello idrico del Lambro (Figura 17, in rosso), consente agli Scriventi di confermare con ragionevole certezza che la quota di quest'ultimo si sia attestata sui **235,7 m s.l.m.**, così come testimoniato dagli abitanti della C.na Cattafame.

Gli stessi hanno dichiarato che durante il deflusso del secondo picco di piena, avvenuto circa 2 giorni dopo, il massimo livello raggiunto fosse pressoché simile.

Considerando inoltre che la quota del livello idrico mostrato in Figura 17 appare di circa 30 cm più bassa del livello massimo raggiunto e che per lo stesso intervallo di tempo un abbassamento analogo dei livelli è stato registrato all'idrometro di Lambrugo, anche se ovviamente differito, si ritiene ragionevole supporre che anche in corrispondenza del ponte di Fornacetta il massimo livello raggiunto fosse di circa 30 cm maggiore di quello mostrato in Figura 16, ossia di circa 235,20 m s.l.m.

Riassumendo, i massimi livelli stimati in occasione dell'evento alluvionale occorso sono i seguenti:

- **C.na Cattafame: 235,70 m s.l.m.;**
- **Ponte di Fornacetta: 235,20 m s.l.m.**

3.2.2 Verifica preliminare della simulazione numerica di "back-analysis"

La simulazione numerica preliminare di verifica di congruenza tra i livelli stimati in corso d'evento e quelli calcolati è stata eseguita adottando:

- la schematizzazione geometrica a suo tempo implementata per le verifiche idrauliche condotte nell'ambito del Progetto Definitivo delle opere di regolazione (cfr. paragrafo 5.4.1 – Scenario "A" dell'Elaborato R02 – Relazione idrologico-idraulica, maggio 2014);
- gli idrogrammi di input definiti nell'ambito del presente studio (cfr. §2.3).



Le verifiche sono state condotte utilizzando come riferimento i livelli idrici ottenuti in corrispondenza delle seguenti sezioni di calcolo:

- n. 260 per Cascina Cattafame;
- n. 35 per il ponte di Fornacetta.

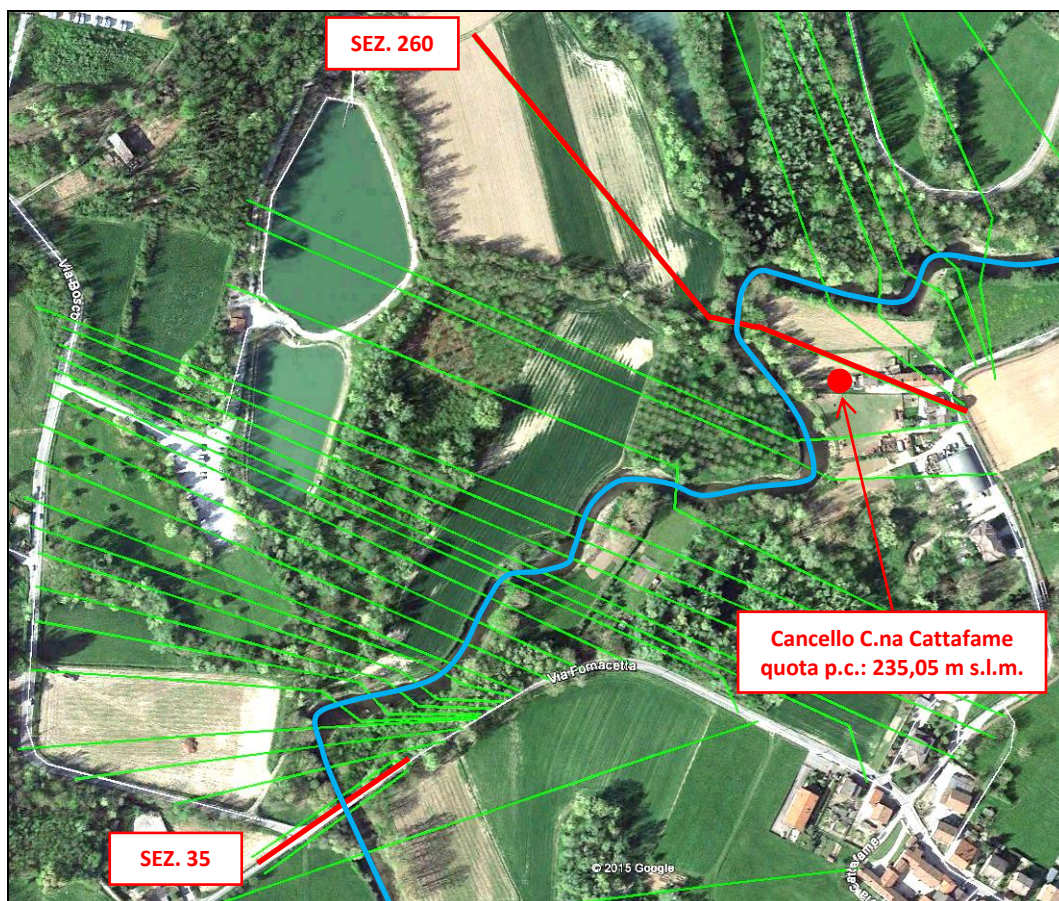


Figura 19 – Sezioni idrauliche di calcolo assunte quale riferimento per la verifica di congruenza della simulazione idraulica: sez. 260 per la c.na Cattafame e sez. 35 per il ponte di Fornacetta.

L'osservazione delle figure riportate di seguito consente di apprezzare una sostanziale congruenza per il confronto dei livelli eseguito in corrispondenza della sezione 260, ossia della c.na Cattafame: essi differiscono per soli 18 cm. Invece, il ponte di Fornacetta risente di fenomeni di rigurgito che probabilmente si originano più a valle, ma il cui effetto sostanzialmente si esaurisce ancor prima della c.na Cattafame, come confermato dalla precedente valutazione. Il franco idraulico riferito alla livelletta della carreggiata del ponte è di 1,80 m. Come descritto nel successivo paragrafo, si è quindi provveduto in seconda battuta ad adattare la condizione al contorno di valle del modello per ottimizzarne la congruenza con quanto osservato.

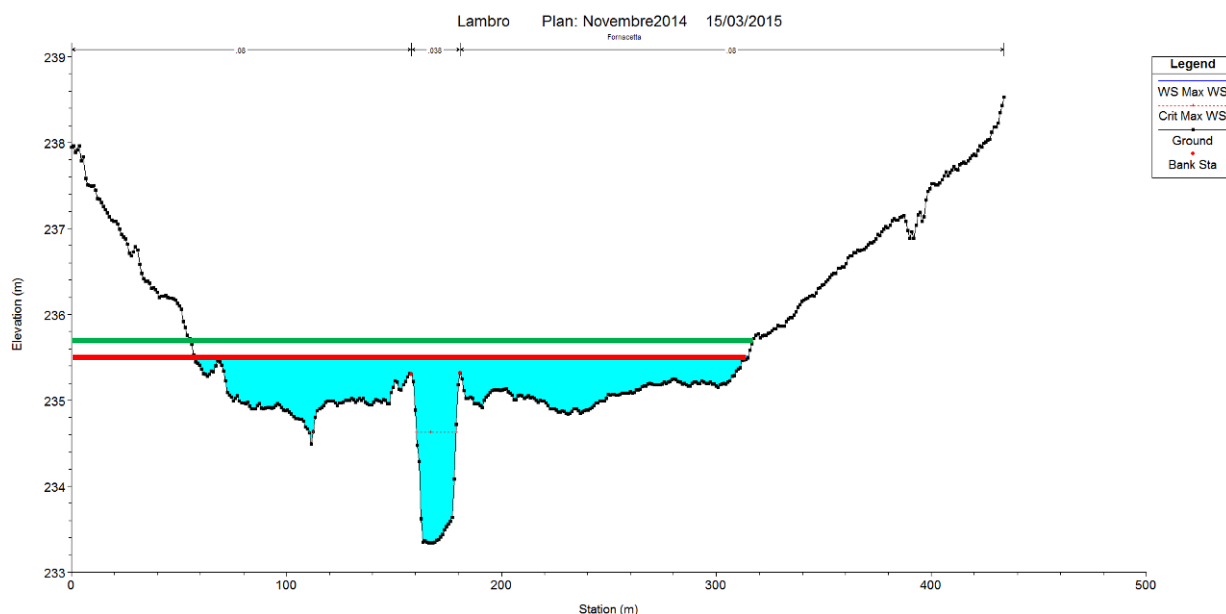


Figura 20 – Sezione di calcolo n.260 (c.na Cattafame): confronto tra il livello stimato in corso d'evento (235,70 m s.l.m., in verde) e quello calcolato in prima approssimazione con il modello numerico (235,52 m s.l.m., in rosso)

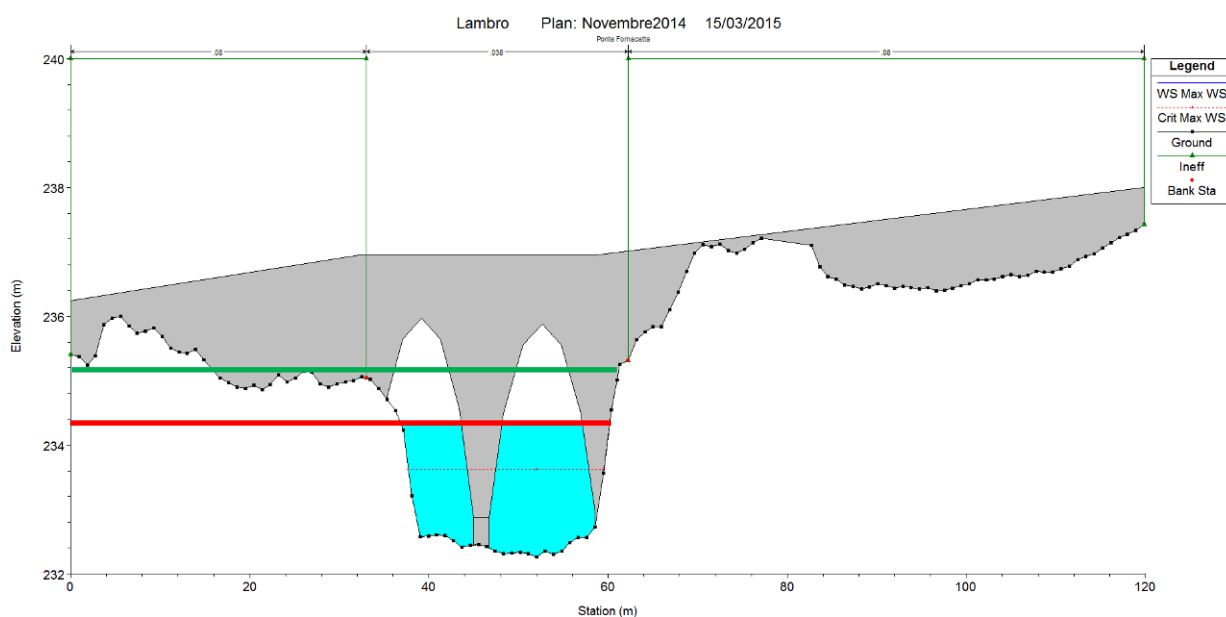


Figura 21 – Sezione di calcolo n.35 (ponte Fornacetta): confronto tra il livello stimato in corso d'evento (235,20 m s.l.m., in verde) e quello calcolato in prima approssimazione con il modello numerico (234,34 m s.l.m., in rosso)

3.2.3 Affinamento della simulazione numerica di “back-analysis”

Al fine di ottenere una miglior aderenza dei risultati della simulazione numerica con quanto osservato, si è quindi provveduto in seconda battuta ad adattare la condizione al contorno di valle del modello.



Come si può osservare nelle successive figure, l'accorgimento ha consentito di ottenere una perfetta corrispondenza tra i livelli stimati in corso d'evento e quelli calcolati mediante simulazione numerica in corrispondenza delle medesime sezioni di controllo: 260 e 35.

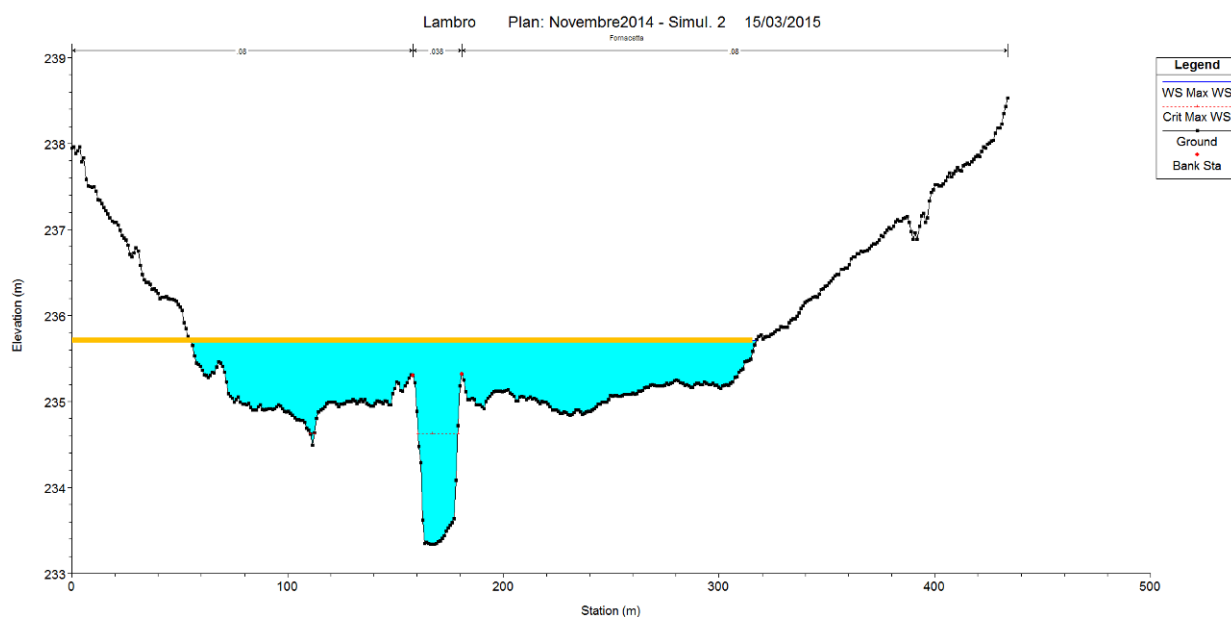


Figura 22 – Sezione di calcolo n.260 (c.na Cattafame): il livello stimato in corso d'evento (235,70 m s.l.m.) coincide sostanzialmente con quello calcolato con il modello numerico in seconda battuta (235,71 m s.l.m.)

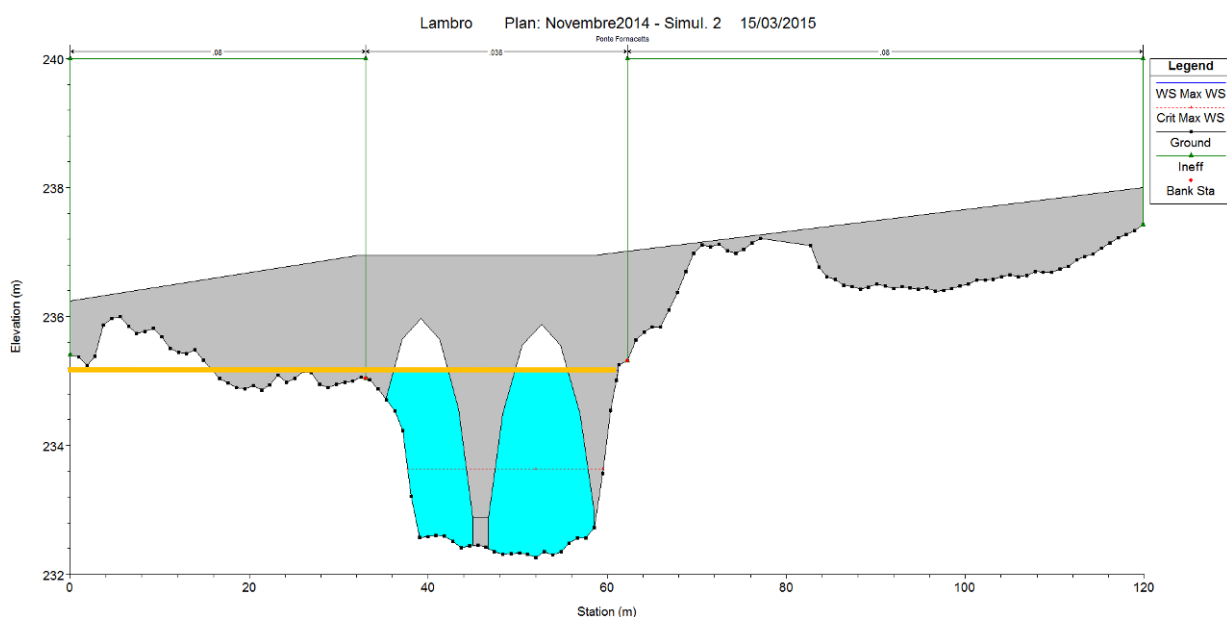


Figura 23 – Sezione di calcolo n.35 (ponte Fornacetta): il livello stimato in corso d'evento coincide esattamente con quello calcolato con il modello numerico in seconda battuta (235,20 m s.l.m.)



Rinviando allo specifico ALLEGATO 3 per il dettaglio dei risultati ottenuti, il confronto tra i profili idrici delle due simulazioni (prima e seconda approssimazione) consente di confermare quanto accennato in precedenza, ossia che l'effetto di rigurgito dei livelli che si genera a valle del ponte di Fornacetta può ritenersi assolutamente trascurabile già in corrispondenza della Cascina Cattafame, in corrispondenza della quale i livelli idrici mostrano discrepanze di circa 15 cm. Il delta rientra infatti nell'ordine di grandezza degli errori dovuti alle approssimazioni insite nella modellistica numerica.

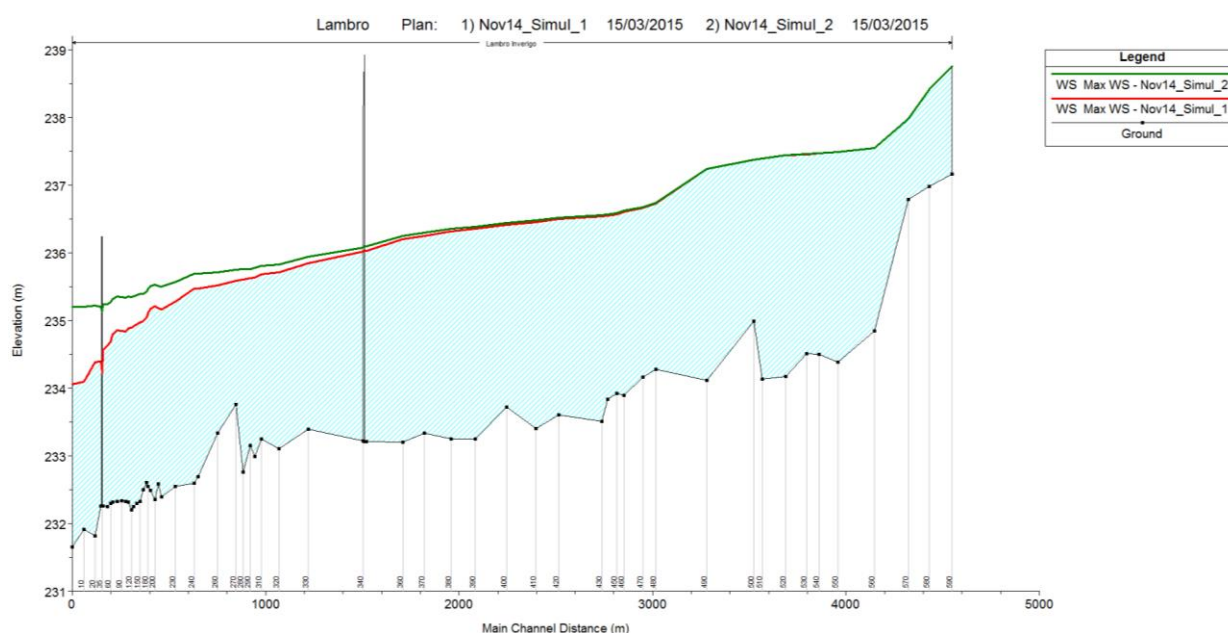


Figura 24 – Confronto tra i profili idrici ottenuti in prima (rosso) e in seconda approssimazione (verde): è evidente come l'influenza del fenomeno di rigurgito che si genera a valle del ponte di Fornacetta possa ritenersi trascurabile già in corrispondenza della Cascina Cattafame (delta < 15 cm).

Al contrario, l'aver appurato differenze così ridotte tra i risultati ottenuti mediante simulazione numerica e i livelli idrici effettivamente misurati lungo il Lambro depone senza alcun dubbio a favore dell'attendibilità delle simulazioni svolte in precedenza.

A questo proposito e per completezza di trattazione, si ritiene utile citare di seguito un estratto della risposta che gli Scriventi avevano presentato in Conferenza dei Servizi per fornire riscontro ad alcune osservazioni pervenute in detta sede:

"(...) gli Scriventi non hanno mai minimamente messo in dubbio la palese insufficienza idraulica del ponte di via Fornacetta e, men che meno, l'obiettivo dell'incarico ricevuto era quello di verificare la compatibilità idraulica delle infrastrutture di attraversamento esistenti, anche e soprattutto perché esiste una Pianificazione vigente in cui tutto ciò è già stato accertato da tempo e al di fuori di ogni dubbio.

Per questa ragione gli Scriventi hanno volutamente imposto quale condizione al contorno di valle in corrispondenza della sezione "0" quella di "normal depth", affinché i fenomeni di rigurgito che interessano estesamente il Lambro nell'area di interesse non interferissero con gli obiettivi delle simulazioni, ossia il



dimensionamento delle opere in progetto e le verifiche del rischio idraulico cui è soggetto il territorio perifluviale d'interesse sia in condizioni attuali che in quelle future, di progetto.

(...) gli scenari simulati (A, B, B_bis, C e D) non possiedono quale scopo principale quello di fornire indicazioni sulle modalità con le quali l'opera di regolazione dovrà essere gestita, ma solo ed esclusivamente garantire che anche per condizioni idrologiche e idrauliche estreme, ossia per portate di piena con tempo di ritorno bisecolare, le opere siano adeguatamente dimensionate e sia garantita la sicurezza degli insediamenti antropici esistenti nell'area.

E' del tutto palese che per condizioni reali, come ad esempio quelle verificatesi nello scorso mese di novembre 2014, le infinite possibili configurazioni di apertura offerte dal sistema di regolazione permetteranno di adattare in continuo le portate rilasciate alle condizioni idrologiche e idrauliche di volta in volta presenti lungo il fiume Lambro, a monte e a valle dell'area di espansione di Inverigo (...).

Inoltre gli Scriventi ritengono opportuno presentare alcuni ulteriori elementi che emergono dalle analisi svolte. Innanzitutto di seguito è mostrato l'idrogramma delle portate defluite a valle del ponte di Fornacetta in occasione del recente evento alluvionale: **il colmo di portata del secondo picco (il maggiore) ha dunque raggiunto il valore di circa 75 m³/s**, che è maggiore di quello che l'AdBPo considera compatibile con le condizioni morfologiche di valle (65 m³/s).

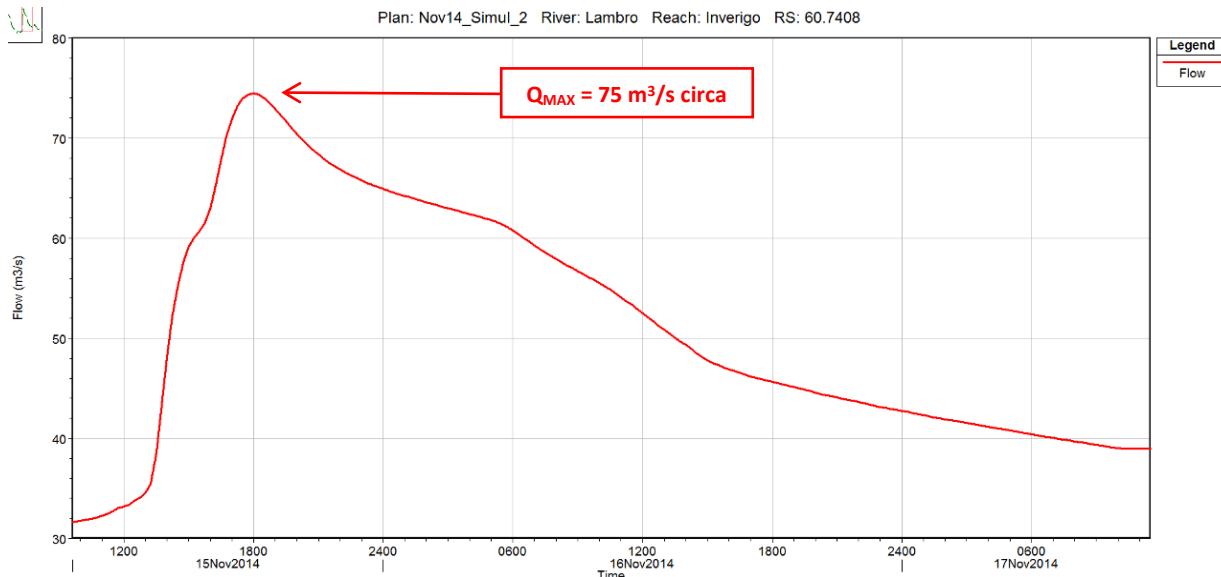


Figura 25 – Secondo e più intenso colmo di portata defluito a valle del ponte di Fornacetta durante l'evento alluvionale del novembre 2014

In secondo luogo il limite delle aree allagabili ricostruite dopo l'evento mostra un buon grado di congruenza con quelle rilevate in fase d'evento, così come si può apprezzare osservando gli elaborati grafici appositamente predisposti (cfr. ALLEGATO 4 e ALLEGATO 5)



Infine, si sottolinea come la Bevera di Veduggio sia esondata a monte del ponticello di via Cattafame, così come mostrato in Figura 26.



Figura 26 – Ripresa fotografica del 15/11/2014, ore 16.30 circa, del ponticello stradale e ciclopedonale di via Cattafame sulla Bevera di Veduggio. Si noti l'esteso allagamento presente a monte degli attraversamenti e il deflusso "in pressione" al di sotto di questi (fonte: nota tecnica del 16/12/2014, Associazioni "Orrido di Inverigo" e "Le contrade")

Considerando che:

- la quota della livelletta stradale di via Cattafame nel punto ripreso dalla fotografia di sinistra è di 236,50 m s.l.m. (detto valore aumenta sino a circa 236,90 m s.l.m. sul ponticello);
- il livello idrico appare in procinto di tracimare oltre il ciglio stradale;
- si può quindi ipotizzare che esso abbia almeno raggiunto una quota di circa **236,40 m s.l.m.** (non necessariamente la massima);
- il massimo livello idrico manifestatosi nel Lambro in corrispondenza della sezione di confluenza della Bevera di Veduggio, ossia tra le sezioni di calcolo n. 240 e 230, è stato di circa **235,63 m s.l.m.** (cfr. Figura 27),

si può desumere senza ragionevole ombra di dubbio che la Bevera di Veduggio sia esondata a monte non soltanto per eventuali effetti di rigurgito indotti dal Lambro, ma soprattutto per una manifesta insufficienza degli attraversamenti di via Cattafame: il livello idrico della Bevera a monte di via Cattafame era infatti almeno di quasi 80 cm più elevato di quello massimo raggiunto dal Lambro.

Inoltre, detta insufficienza si realizza probabilmente già per portate di piena molto ridotte dell'affluente.

Per quanto detto si ritiene utile che gli Enti competenti conducano uno studio idrologico-idraulico specifico volto alla definizione delle criticità esistenti lungo il corso d'acqua secondario.

Ciò anche perché, nonostante la prevista realizzazione dell'argine di Cascina Cattafame, detto insediamento sarebbe protetto dalle portate di piena del Lambro, ma soggetto ad un evidente rischio residuo indotto dalla



Bevera di Veduggio che potrebbe manifestarsi in maniera quasi del tutto indipendente dai livelli idrici del Lambro.

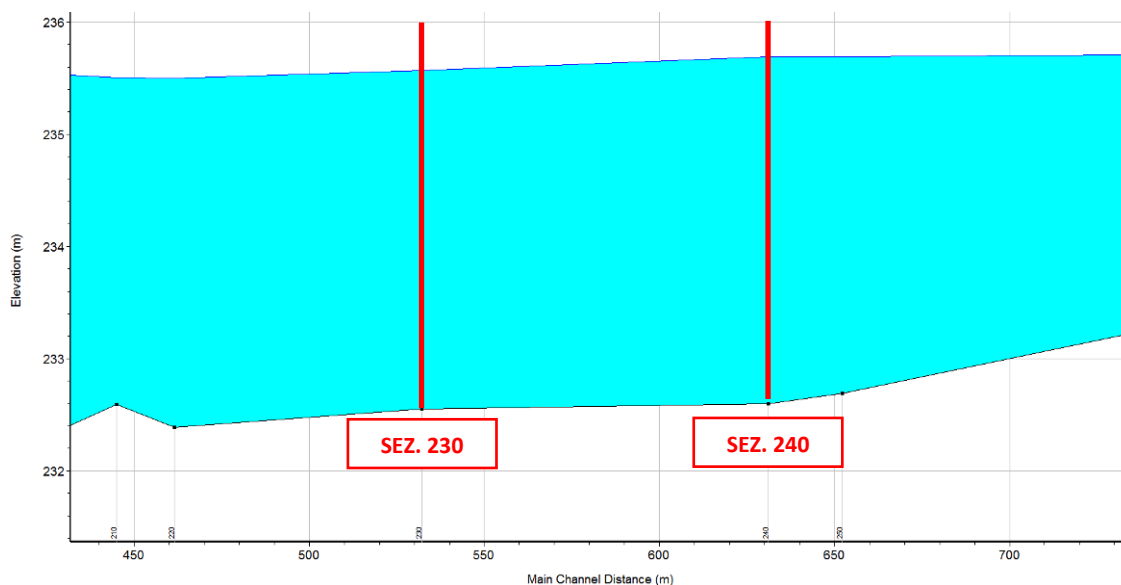


Figura 27 – Il livello idrico massimo raggiunto dal Lambro in corrispondenza dell'immissione della Bevera di Veduggio, ossia tra le sezioni di calcolo n.240 e 230 è di circa 235,63 m s.l.m.



4. CONCLUSIONI

Nel mese di novembre 2014 intense precipitazioni hanno investito con continuità il bacino del Lambro, determinando un generale innalzamento dei livelli idrici nell'asta principale, negli affluenti e nel sistema lacuale (Alserio, Pusiano, etc.).

Gli elevati livelli idrici hanno determinato l'insorgere di situazioni di criticità, affrontate in emergenza e non senza difficoltà dal sistema di Protezione Civile e dagli Enti preposti.

Per questa ragione si è resa necessaria l'esecuzione del presente studio idrologico-idraulico volto a quantificare e verificare gli effetti dell'evento in corrispondenza dell'area di laminazione di Inverigo.

Lo studio idrologico ha consentito di stimare con un adeguato grado di precisione l'andamento delle portate defluenti nel tratto d'interesse del fiume Lambro in occasione del citato evento alluvionale.

In particolare è stato ricostruito innanzitutto l'idrogramma di piena i cui livelli associati sono stati effettivamente misurati dall'idrometro di Lambrugo (sez. LA127): esso è caratterizzato da una portata al colmo di 57 m³/s associata ad un tempo di ritorno di 50 anni. Sulla base di ciò, si è quindi provveduto a stimare sia l'idrogramma defluito in corrispondenza della sezione LA124.3 (SS342 "Briantea", $Q_{MAX} = 54 \text{ m}^3/\text{s}$), posta all'ingresso di monte dell'area d'interesse, sia i contributi idrici provenienti dalla Bevera di Veduggio e dai sottobacini LAM6 e LAM7.

Questi dati sono stati adottati quali condizioni al contorno di input per alcune simulazioni idrauliche in moto vario appositamente eseguite per offrire una più aggiornata validazione del modello numerico idraulico allestito per le condizioni ante-operam del Lambro nell'ambito del citato progetto di regolazione delle portate di piena del corso d'acqua lombardo.

La congruenza dei risultati ottenuti è stata verificata in relazione alle informazioni disponibili sui massimi livelli/battenti idrici raggiunti in corrispondenza di alcune sezioni di controllo definite nell'area d'interesse e l'esito delle simulazioni conferma l'attendibilità delle simulazioni svolte in sede di Progetto Definitivo delle nuove opere.

In generale si ritiene comunque che la regola di gestione delle nuove opere di regolazione delle portate dovrà essere stabilita sia in funzione di un modello di previsione delle piene appositamente allestito, che consenta di stimare con adeguato anticipo l'entità dell'evento che si intende regolare, sia il contributo offerto dal complesso delle opere di laminazione previste dal PAI nell'area sublacuale del Lambro (Cavo Diotti, Bevera di Molteno, etc.).

Infine, è stata accertata la dinamica che ha causato l'esondazione della Bevera di Veduggio a monte del ponticello di via Cattafame. Infatti, il fenomeno si è verificato non soltanto per eventuali effetti di rigurgito indotti dal Lambro, ma soprattutto per una manifesta insufficienza degli attraversamenti di via Cattafame. Al momento dell'evento il livello idrico della Bevera a monte di via Cattafame era infatti almeno di quasi 80 cm più elevato di quello massimo raggiunto dal Lambro.