



*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](http://www.parcovalldelambro.it)  
web: [www.progettolambro.it](http://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

<b>1. PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
<b>2. STUDI PREGRESSI E DATI DISPONIBILI .....</b>	<b>4</b>
<b>3. DESCRIZIONE DELL'ASSETTO FLUVIALE NEL TRATTO D'INTERESSE .....</b>	<b>6</b>
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
<b>4. STUDIO IDROLOGICO .....</b>	<b>11</b>
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
<b>5. STUDIO IDRAULICO .....</b>	<b>19</b>
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
<b>6. DESCRIZIONE DELLE OPERE IN PROGETTO .....</b>	<b>41</b>
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
<b>7. VERIFICHE DI STABILITÀ DEI RILEVATI ARGINALI .....</b>	<b>48</b>
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



<b>8. VERIFICHE RELATIVE AL RISCHIO DI COLLASSO DELLA NUOVA OPERA DI REGOLAZIONE DELLE PORTATE.....</b>	<b>61</b>
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
<b>9. CONCLUSIONI .....</b>	<b>74</b>
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**



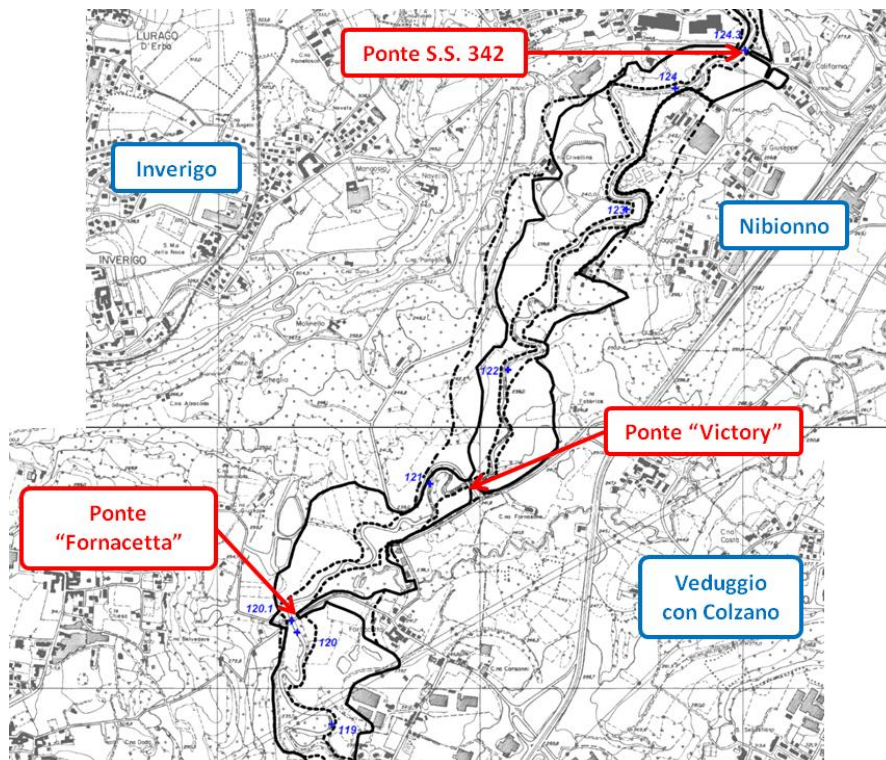
- Progetto preliminare degli "Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano – Area di laminazione di Inverigo" redatto dal Parco Regionale della Valle del Lambro nel novembre 2012;
- Contributi delle Associazioni locali rispetto ai contenuti 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 km<sup>2</sup>.

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 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.

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.

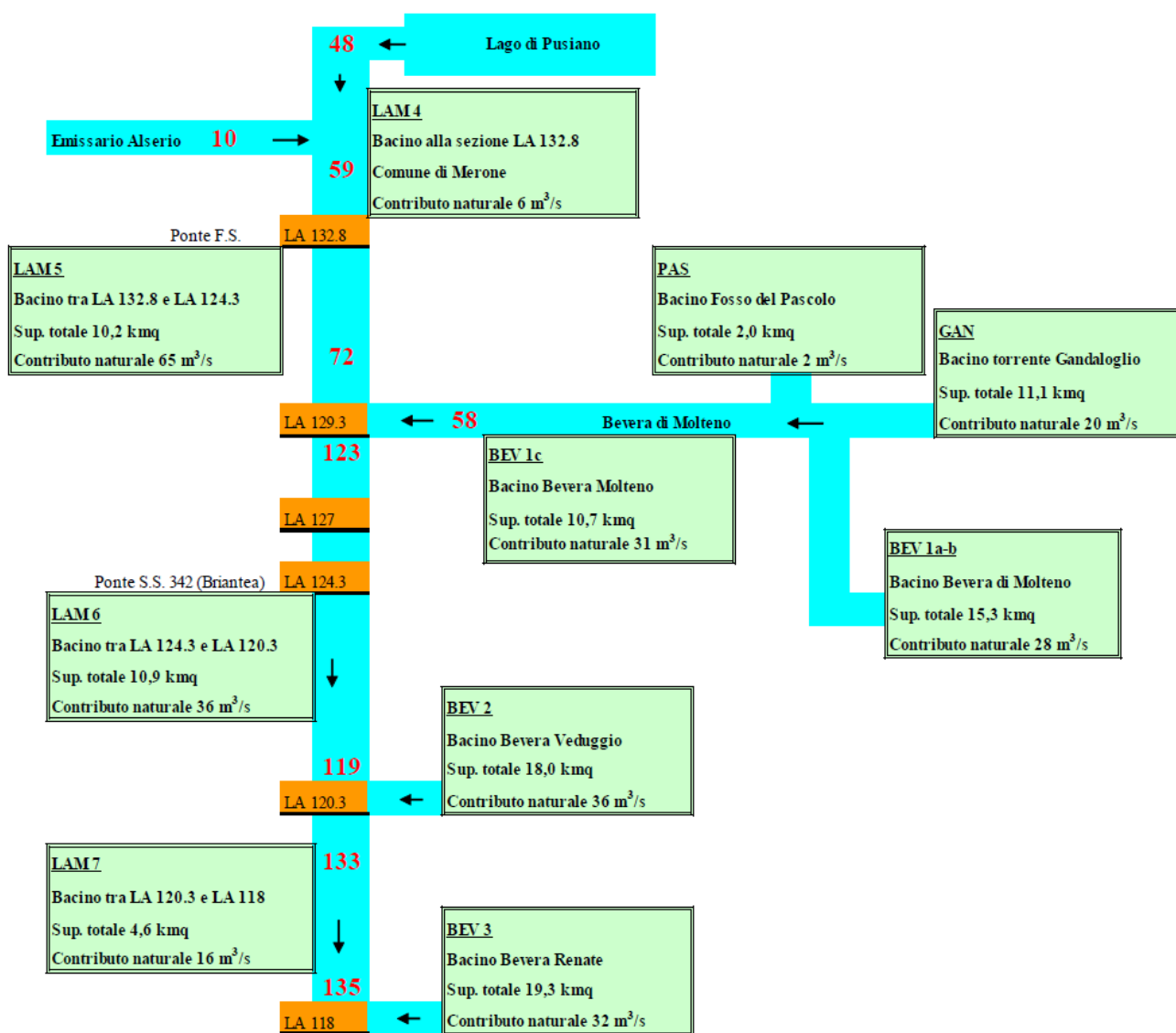


Figura 2 – Schema idrografico del fiume Lambro nel tratto d'interesse (fonte: SdF – 2003)



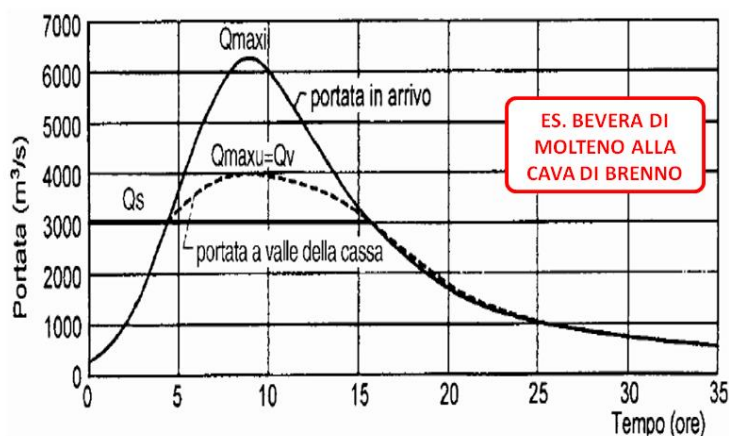
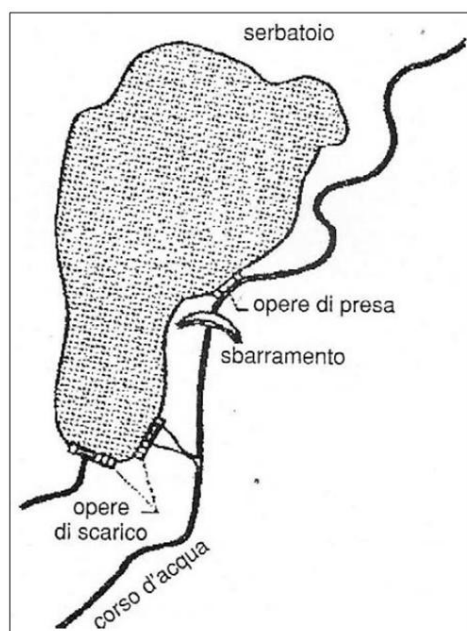
Gli approfonditi studi condotti a supporto del P.A.I. hanno consentito di appurare come la realizzazione di interventi di difesa passiva nei territori vallivi del Lambro (comuni di Monza, Milano, etc.) debbano necessariamente essere accompagnati da interventi attivi di riduzione delle portate al colmo 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**

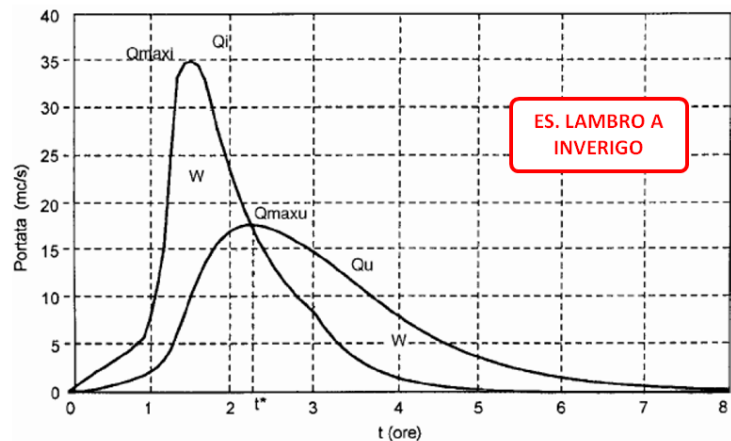
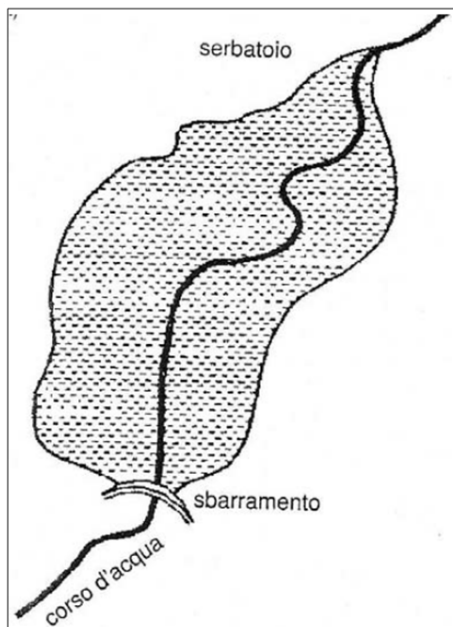
Come è possibile osservare nei precedenti schemi grafici la laminazione in derivazione si attua sottraendo una quota parte della portata defluente nel corso d'acqua: di solito ciò avviene realizzando uno sbarramento in alveo che consente un locale innalzamento dei livelli idrici a monte dello stesso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

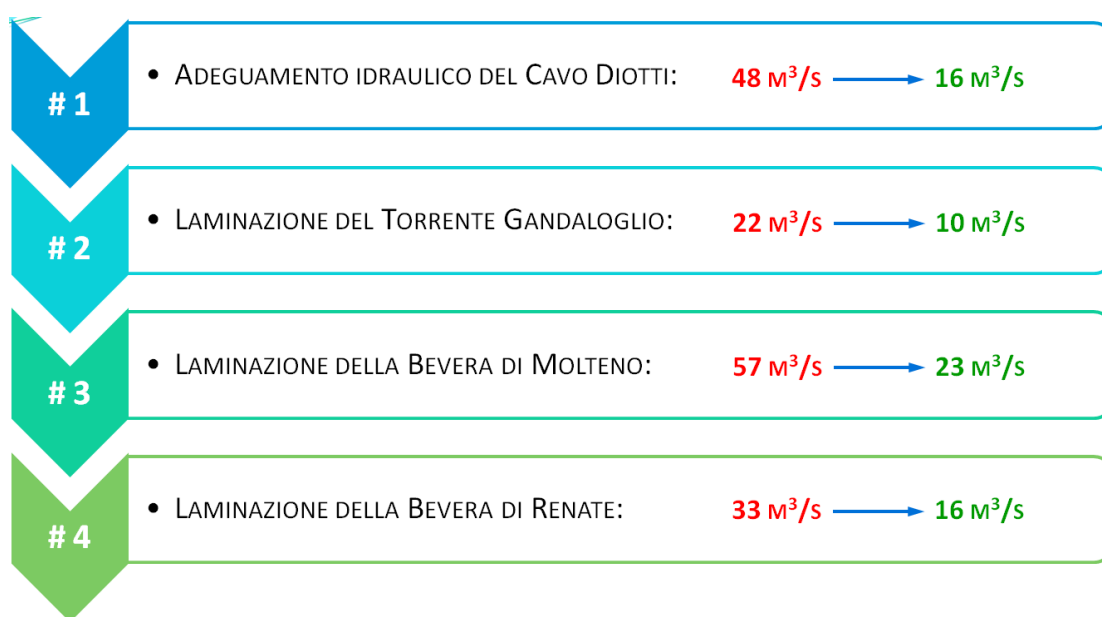


Figura 5 – Schema dei benefici attesi in termini di riduzione del colmo di portata grazie alla realizzazione degli interventi di regolazione e laminazione previsti nel P.A.I.

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 <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /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.**

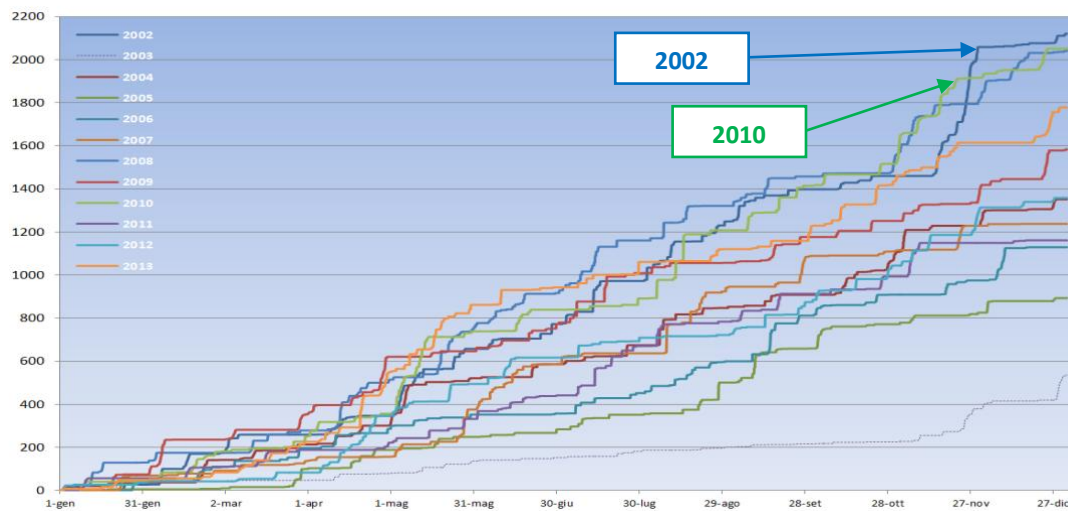


Figura 7 – Stazione di Caslino d'Erba: precipitazioni cumulate annue relative al periodo 2002 – 2013

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

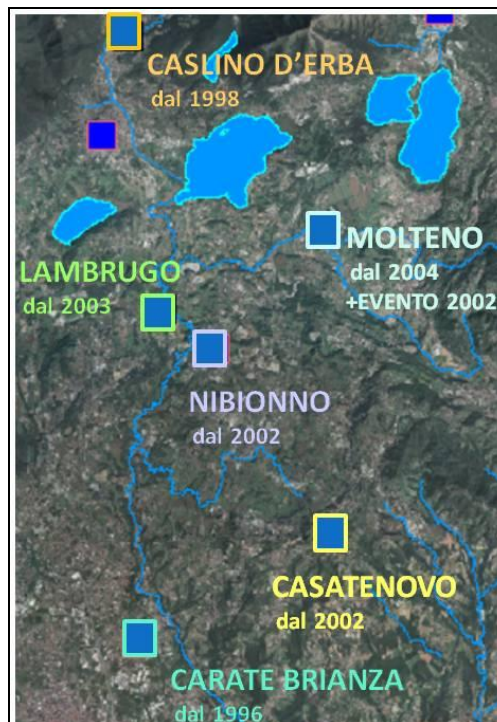


Figura 8 – Stazioni pluviometriche d'interesse



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).



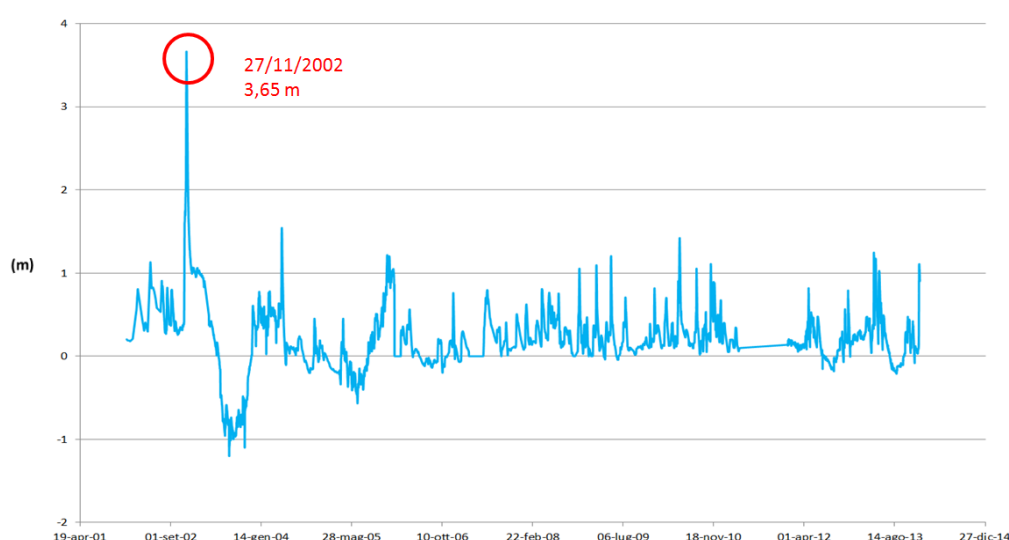
**Figura 9 – Confronto dell'andamento delle precipitazioni cumulate tra il 2002 e il 2010**

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.

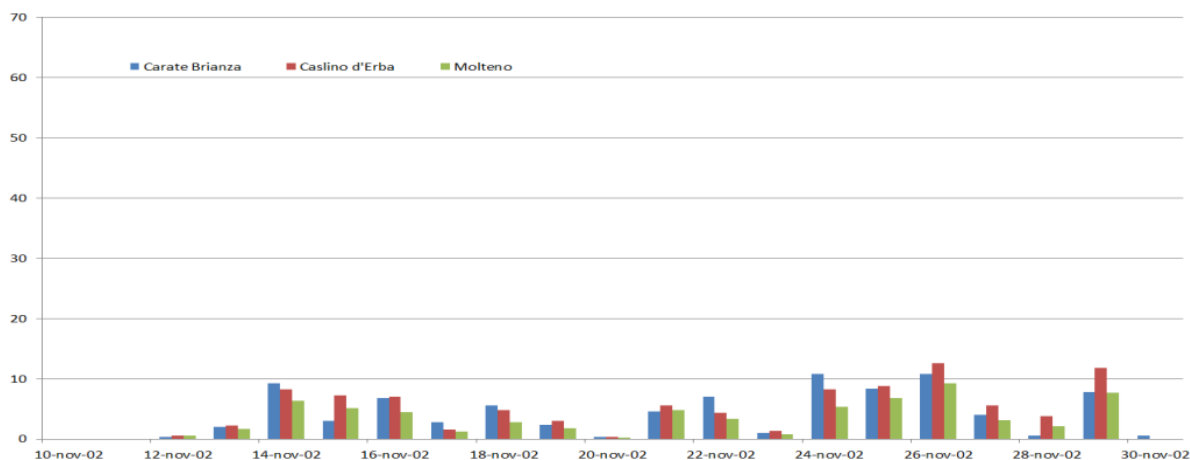


Figura 11 – Precipitazioni cumulate giornaliere per tre stazioni pluviometriche relative al novembre 2012

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.

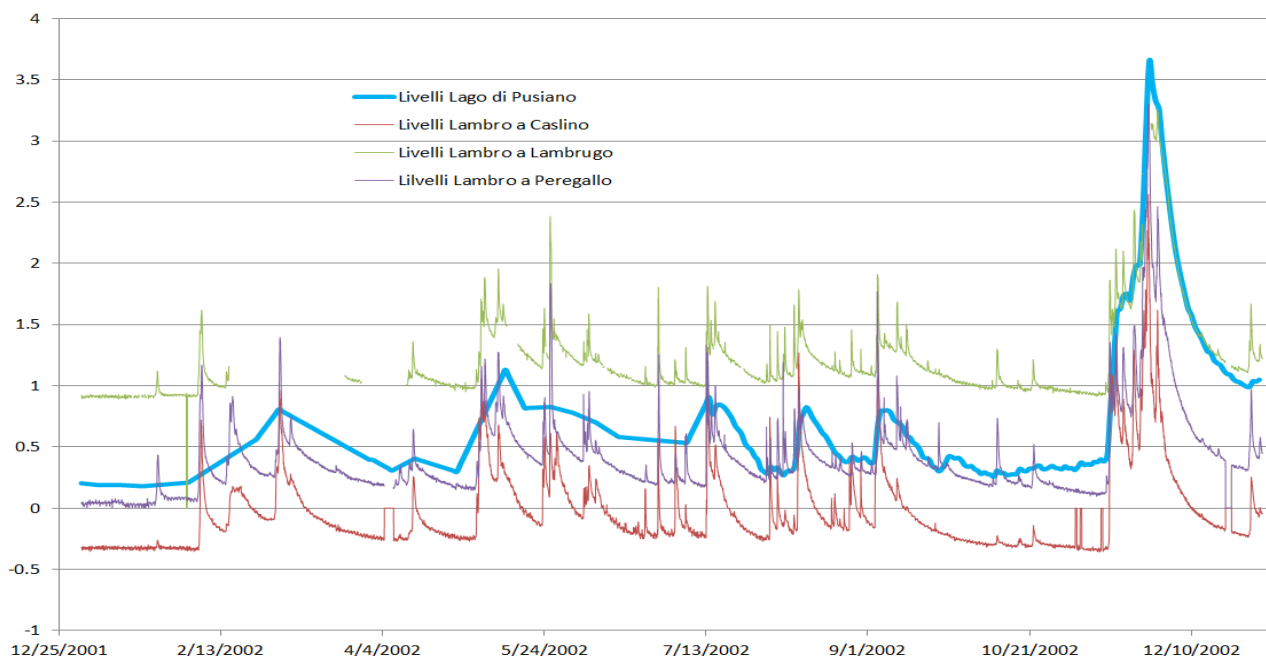
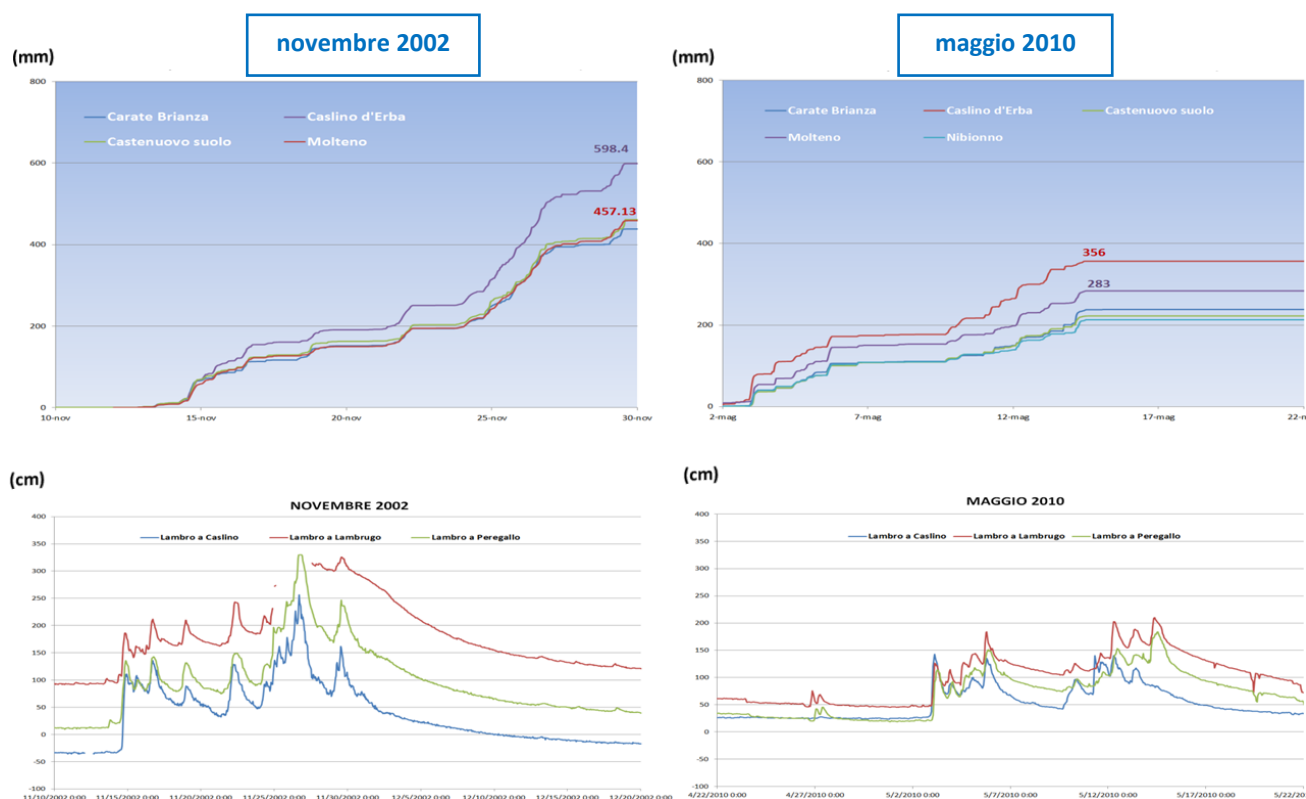


Figura 12 – Andamento dei livelli del fiume Lambro a monte (Caslino) e a valle (Lambrugo e Peregallo)



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 <sup>3</sup> /s	65 m <sup>3</sup> /s
LA 120.1	Ponte via Camisasca - Inverigo	135 m <sup>3</sup> /s	65 m <sup>3</sup> /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 professionisti<sup>1</sup> 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".

<sup>1</sup> 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 m<sup>3</sup>/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 antiersive 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'ufficiosità 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 ( $m^3/s \text{ m}$ );
- $\beta$  = 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.

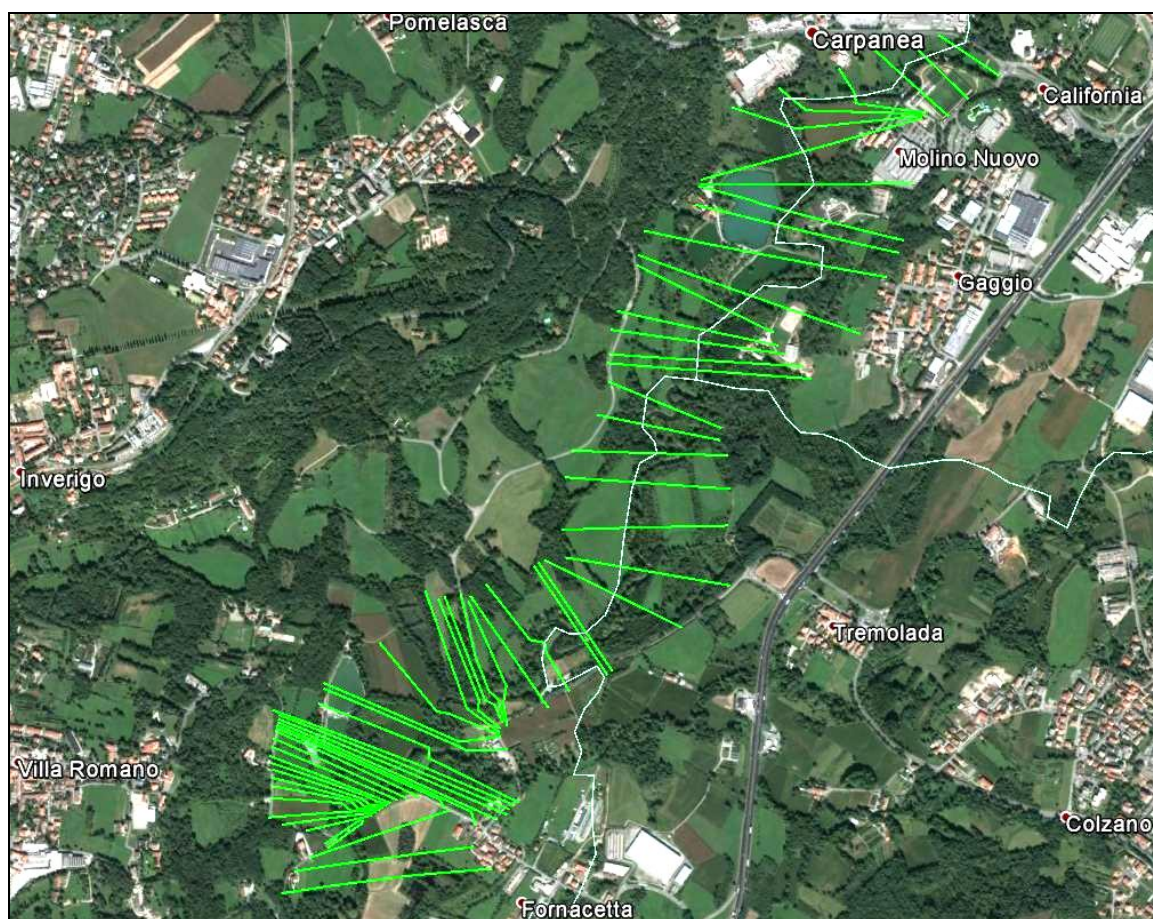




Il calcolo dei profili idraulici è avvenuto in "moto vario" e si basa sulle leggi fisiche che governano il flusso in un corso d'acqua, ossia il "principio di conservazione della massa" e quello di "conservazione del momento"; tali leggi sono matematicamente espresse secondo equazioni differenziali come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

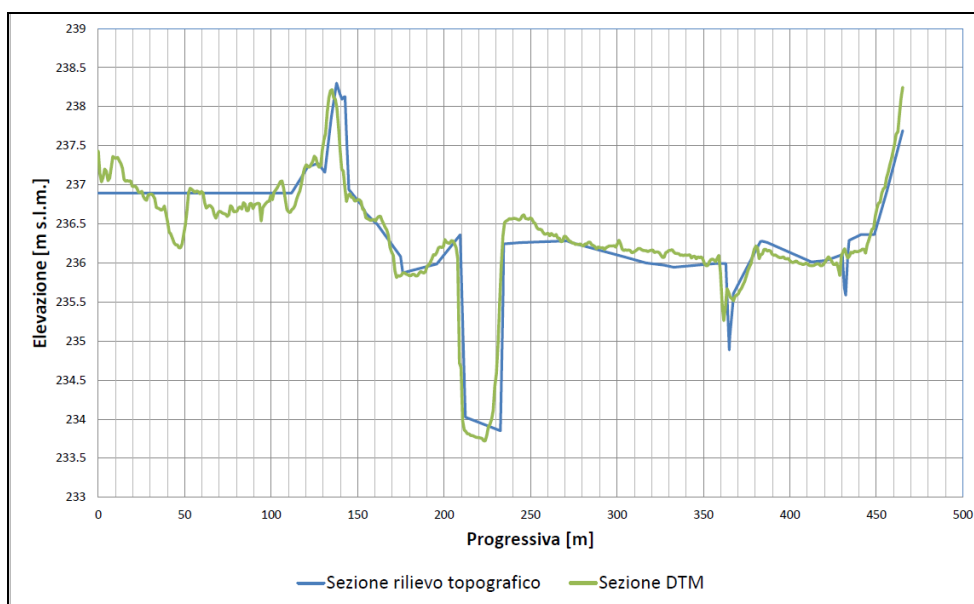
### 5.3.1 Verifica di congruenza delle informazioni topografiche disponibili

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.

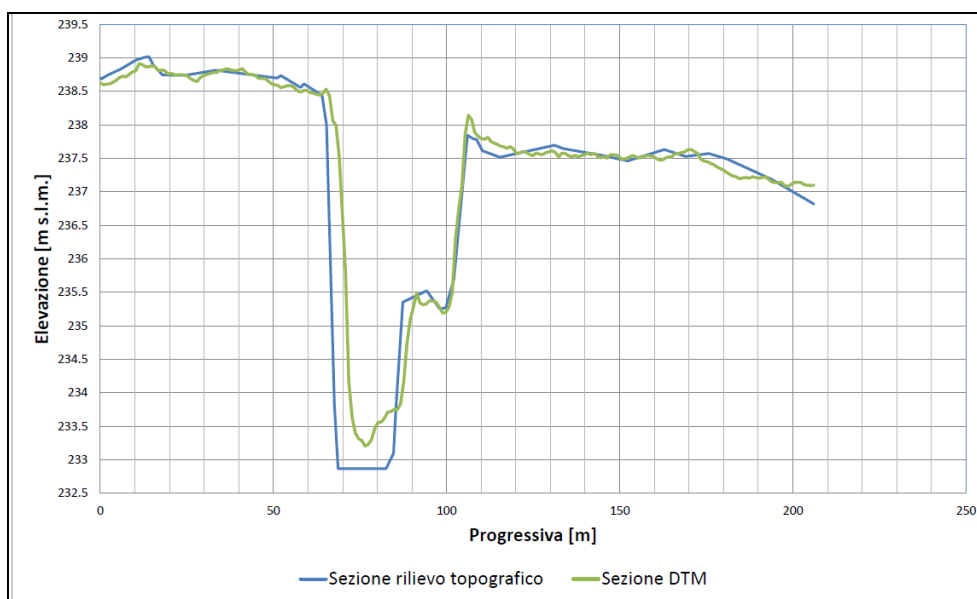
In particolare, sono stati assunti i seguenti riferimenti topografici:

- 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).

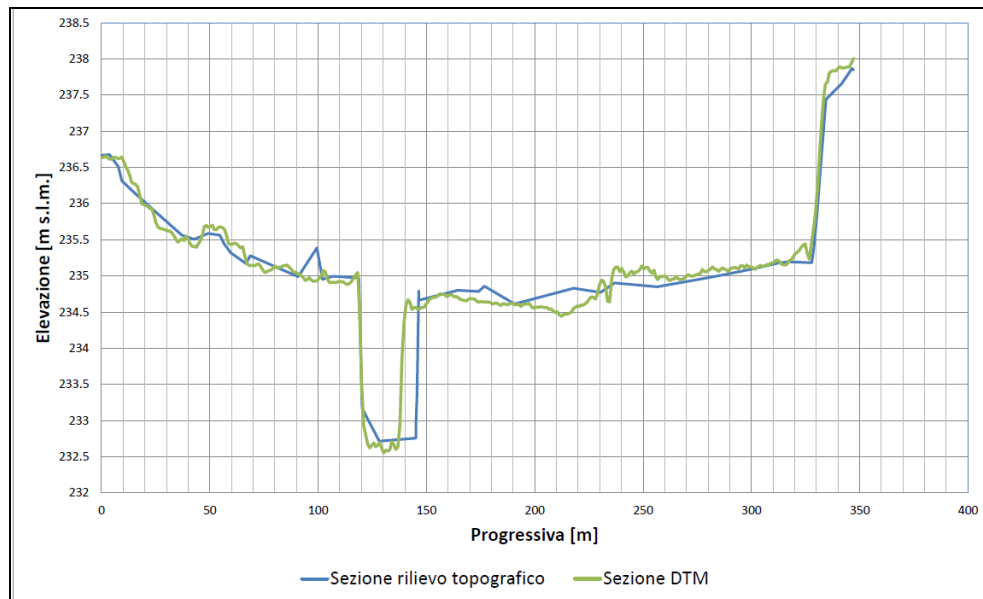
Le sezioni d'alveo estratte dal DTM, dagli altri dati disponibili e battute ex-novo nel corso del recente rilievo topografico eseguito specificatamente per lo svolgimento della presente commessa, sono state sottoposte ad un'approfondita verifica di congruenza tra loro.



*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/m<sup>2</sup>) 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.

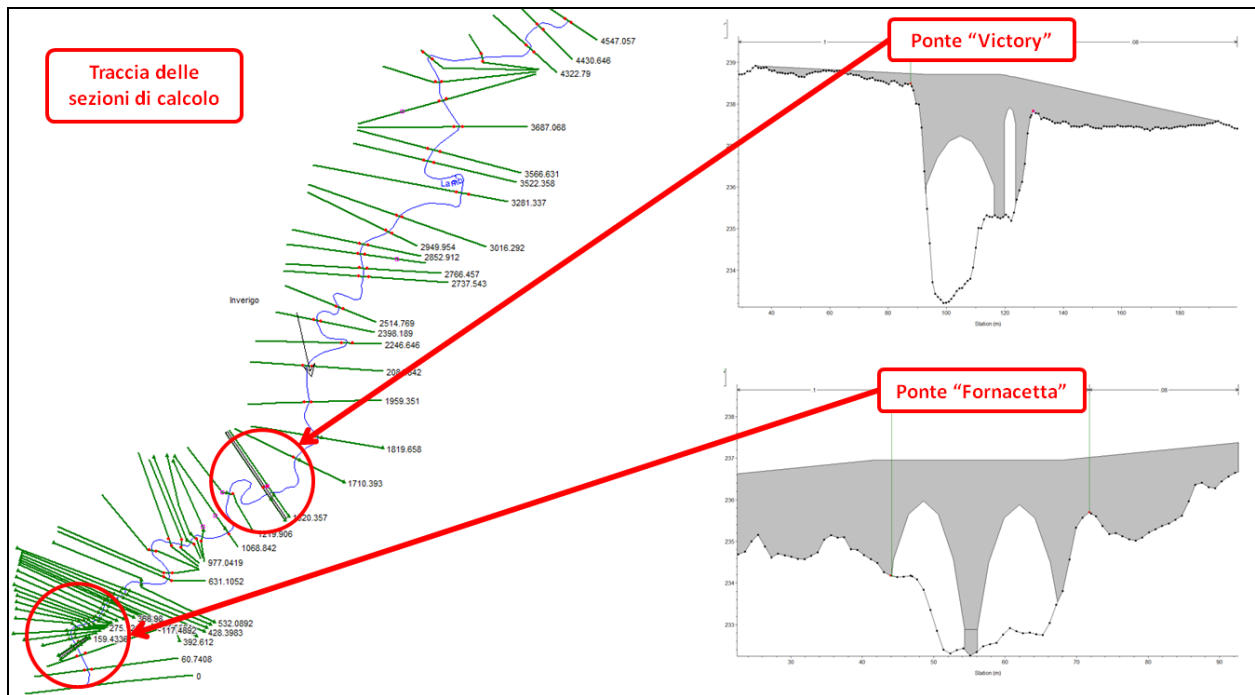


Figura 18 – Geometria di calcolo per la situazione attuale (Scenario "A")

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

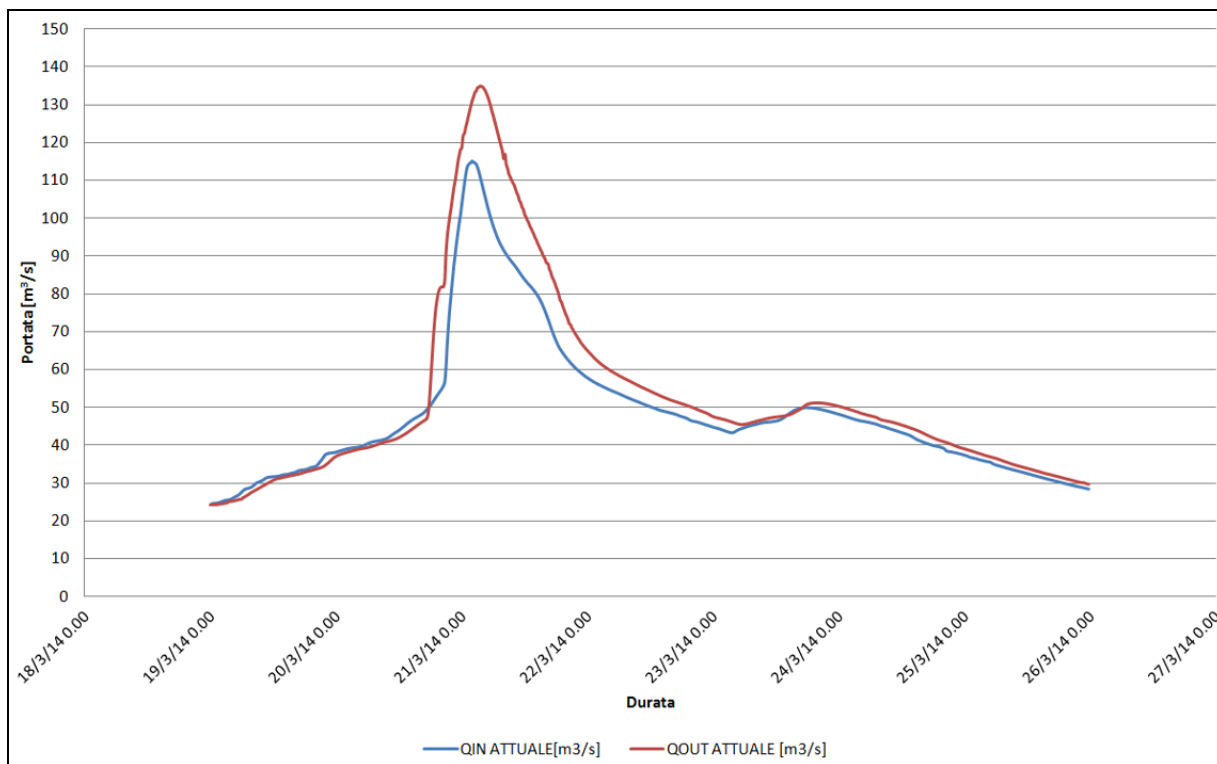
- Idrogramma in ingresso alla sezione di monte caratterizzato da un picco di portata pari a  $115 \text{ m}^3/\text{s}$ , così come previsto nel P.A.I.;
- Contributi di portata uniformemente distribuiti lungo il tratto d'interesse (bacini sottesi LAM 6 e 7);
- Contributo di portata localizzato alla confluenza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

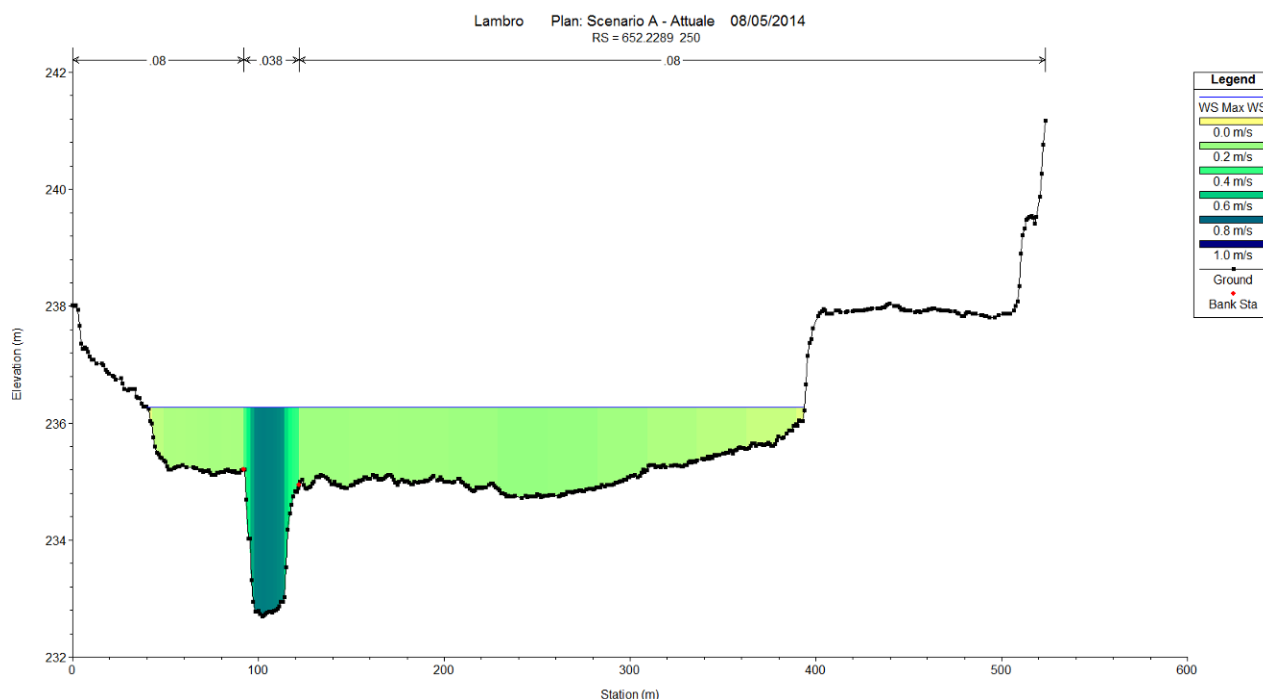


Figura 20 – Scenario "A": sezione di calcolo n.250

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.

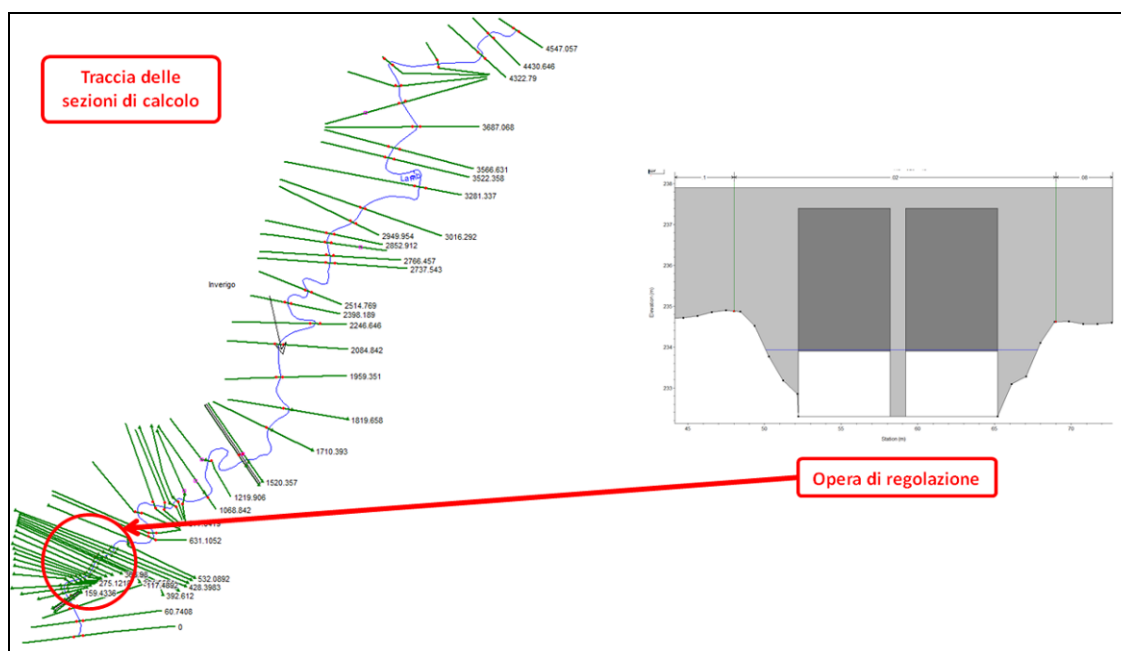


Figura 21 – Geometria di calcolo per la situazione attuale (Scenario "B"): oltre agli attraversamenti di via Fornacetta e "ex-Victory" è stata inserita anche l'opera di regolazione schematizzata in figura

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).

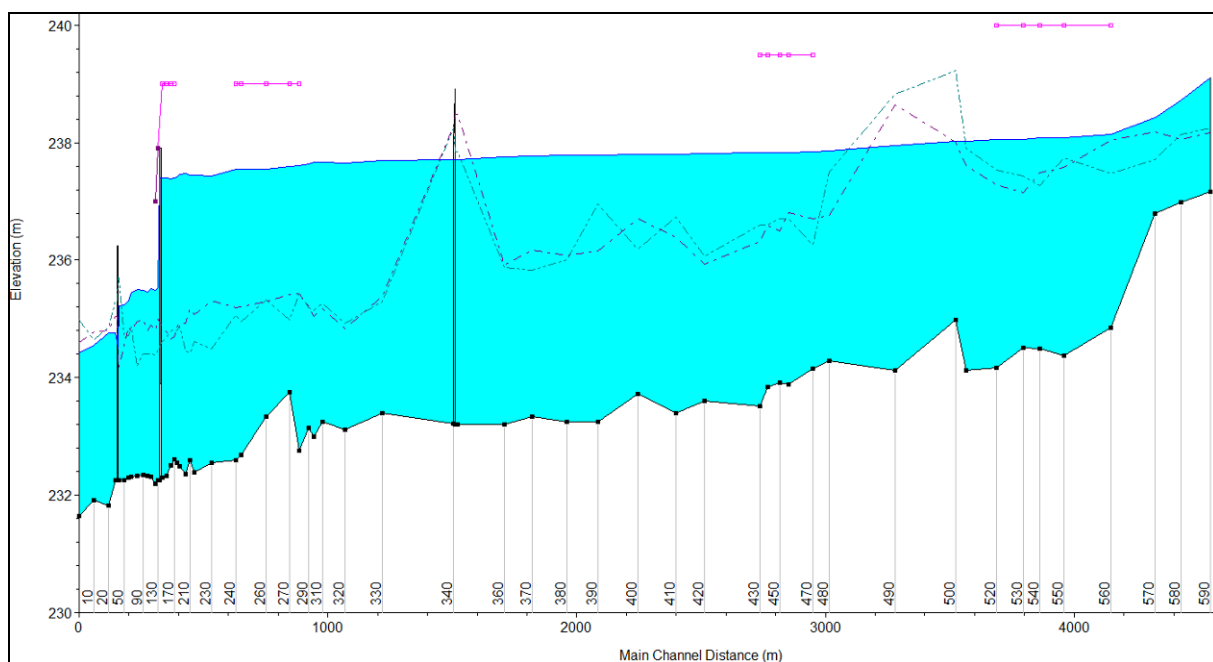


Figura 22 – Profilo di piena relativo allo scenario "B": è evidente il fenomeno di rigurgito dei livelli indotto dalla realizzazione dell'opera di regolazione delle portate

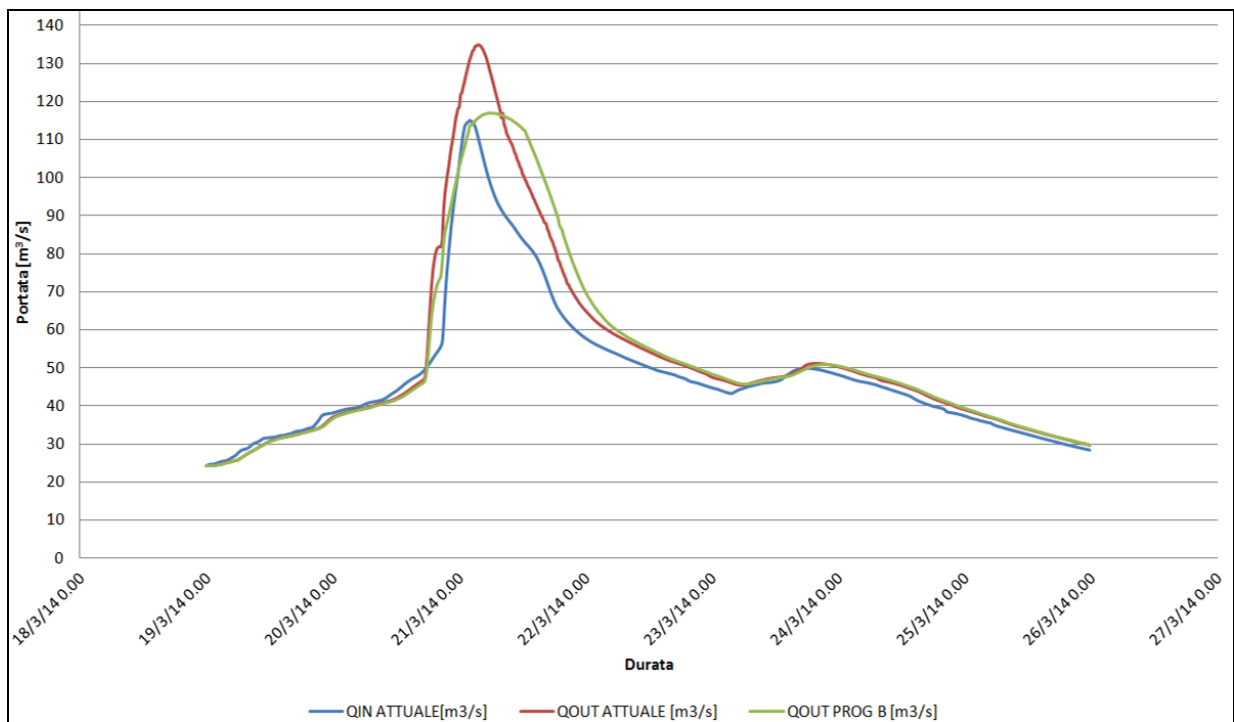


Figura 23 – Sezione di calcolo n.290: confronto tra il livello idrico in condizioni attuali (scenario "A", linea rossa) e in condizioni di progetto (scenario "B", linea rossa). E' evidente l'incremento di circa 1 m dovuto al fenomeno di rigurgito delle portate indotto dalla presenza dell'opera di regolazione.





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 m<sup>3</sup>/s (scenario "A", condizioni attuali) a 116 m<sup>3</sup>/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".

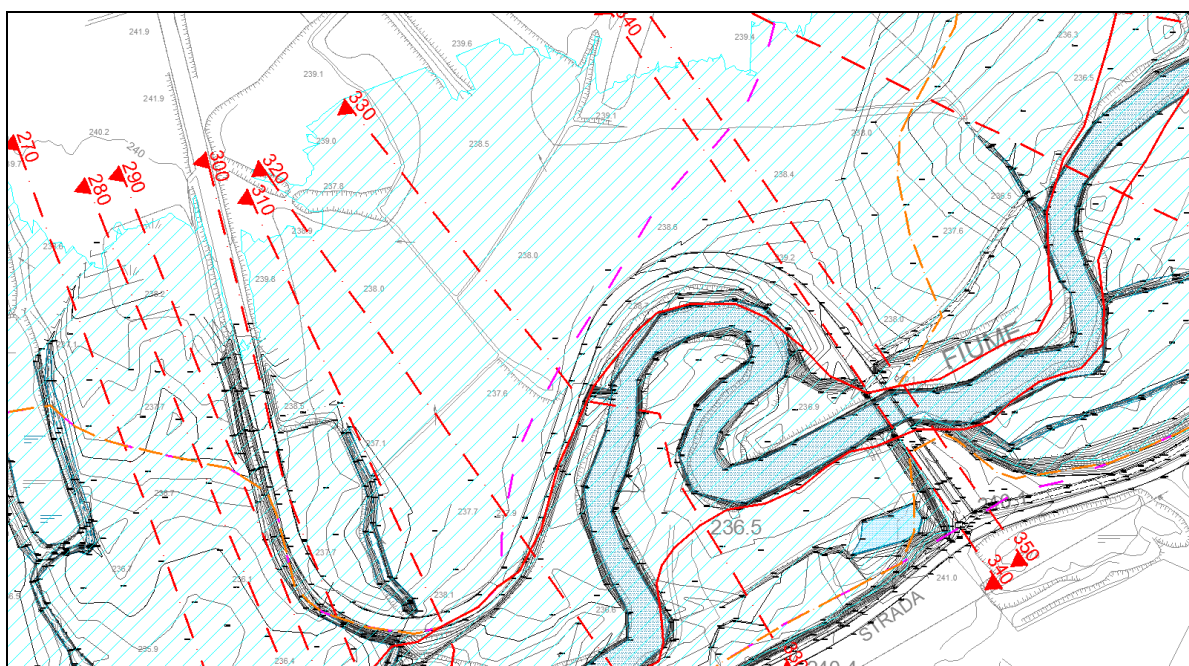
Si sottolinea che l'opera di regolazione consente di laminare il complesso dei contributi diretti (bacini LAM 6 e 7) e concentrati (Bevera di Veduggio) che il fiume Lambro riceve nel tratto d'interesse compreso tra il ponte della "Briantea" e quello di via Fornacetta in comune d'Inverigo.

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

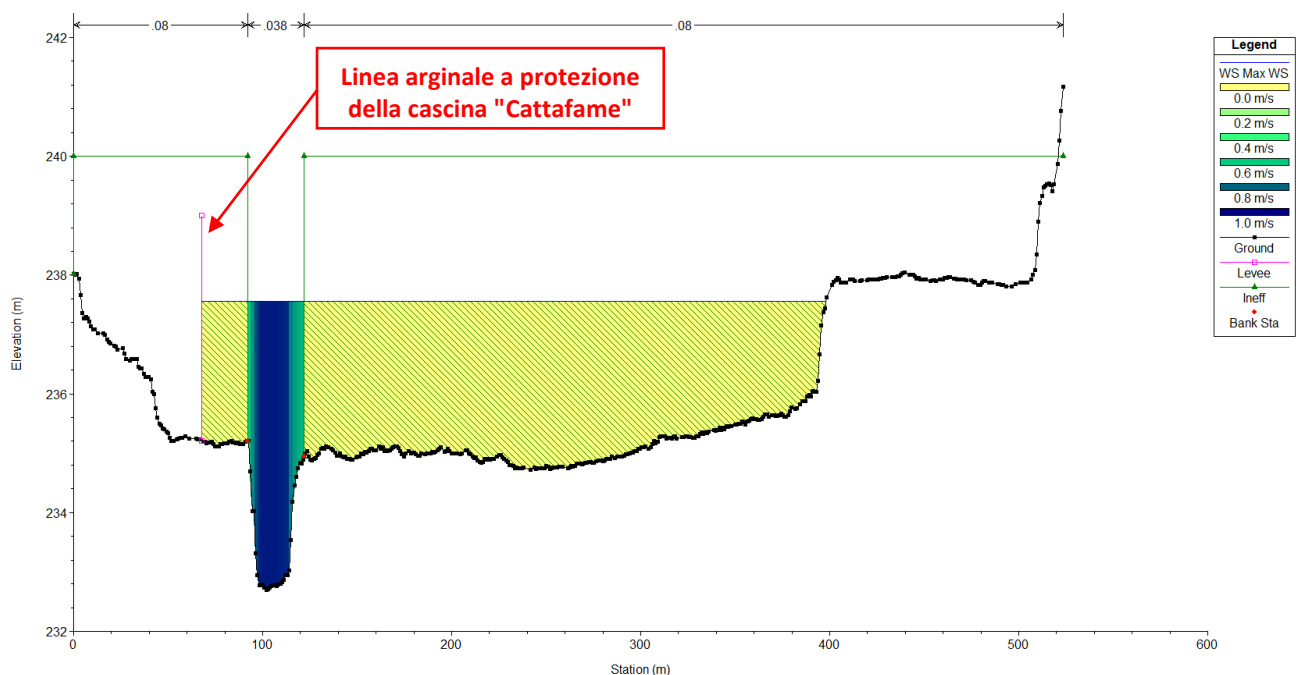


Committente ha comunicato agli scriventi che è già prevista la realizzazione di specifici interventi di protezione idraulica dell'impianto e, pertanto, la nuova linea arginale dovrà essere raccordata con questi ultimi.

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.

Rinviando 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"**

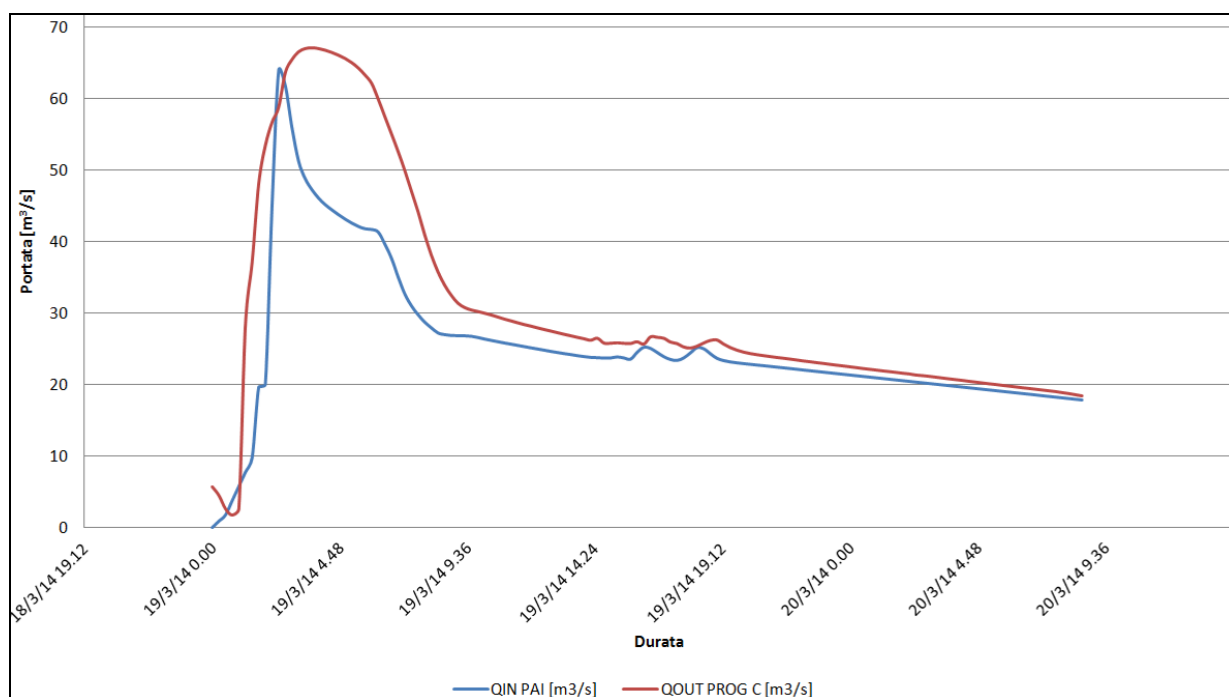


### 5.4.3 Scenario "C" – Portate di progetto P.A.I. con intervento di laminazione di Inverigo

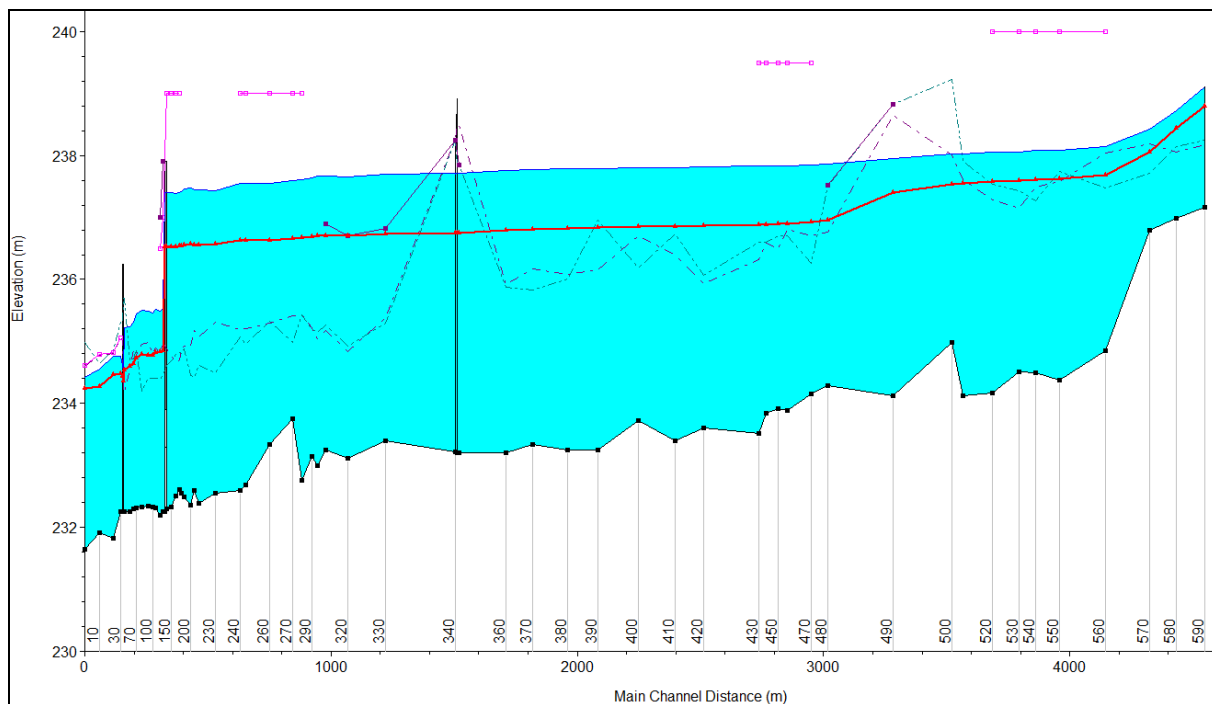
Il terzo ed ultimo scenario considerato è quello simulato al fine di verificare la funzionalità dell'opera di regolazione delle portate con riferimento alle portate di progetto indicate nel P.A.I. al momento in cui tutte le opere di laminazione pianificate a monte dell'area d'interesse saranno realizzate.

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 m<sup>3</sup>/s attuali ai futuri 65 m<sup>3</sup>/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.

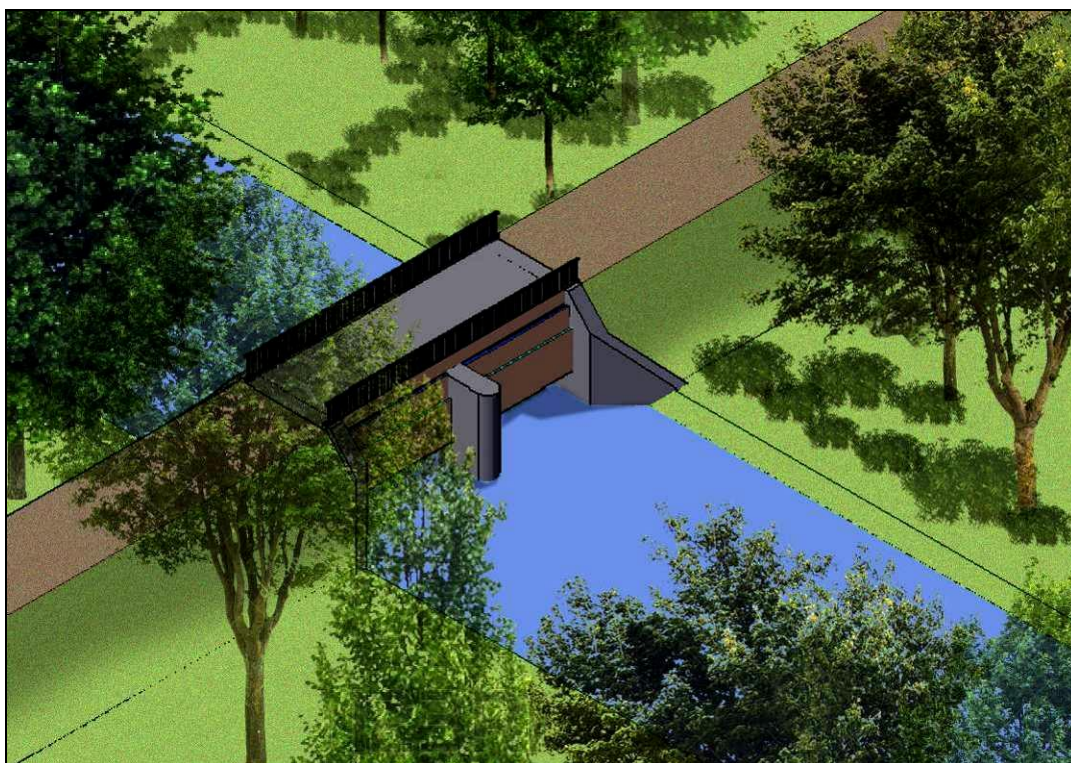
Ciascun battente di ogni paratoia sarà in grado di scorrere verticalmente al fine di potersi perfettamente sovrapporre all'altro in condizioni di riposo in modo da minimizzare l'ingombro e l'impatto visivo. Quest'ultimo accorgimento sarà ottenuto grazie al mascheramento offerto dall'impalcato dell'attraversamento 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'ufficiosità 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.**

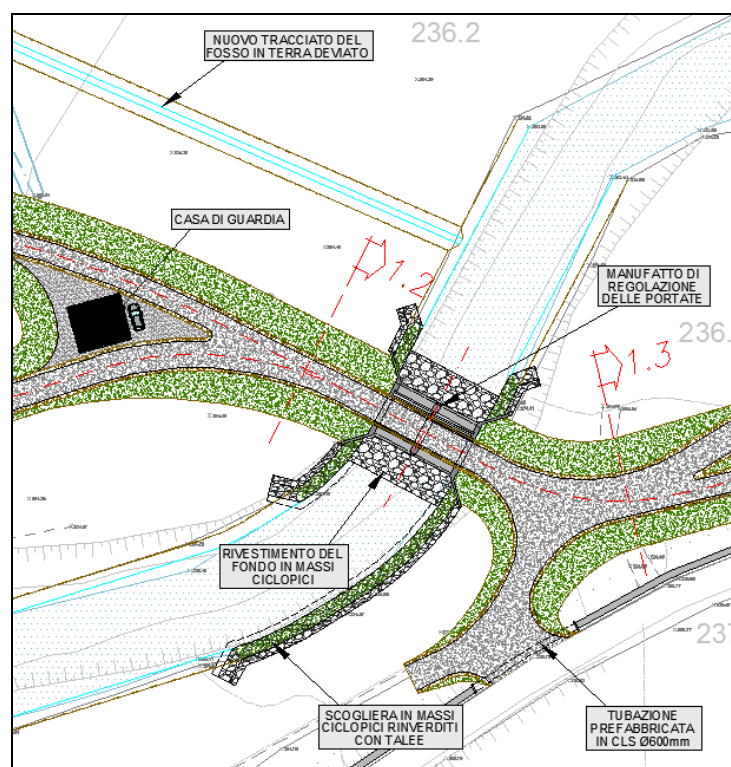
Inoltre, il fondo scorrevole sarà rivestito in massi ciclopici per evitare fenomeni di scalzamento delle fondazioni. Si fa presente che entrambi gli accorgimenti sopra descritti sono stati progettati per offrire ulteriori margini di sicurezza e durabilità dell'opera, a fronte di velocità di deflusso 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'officiosità 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"

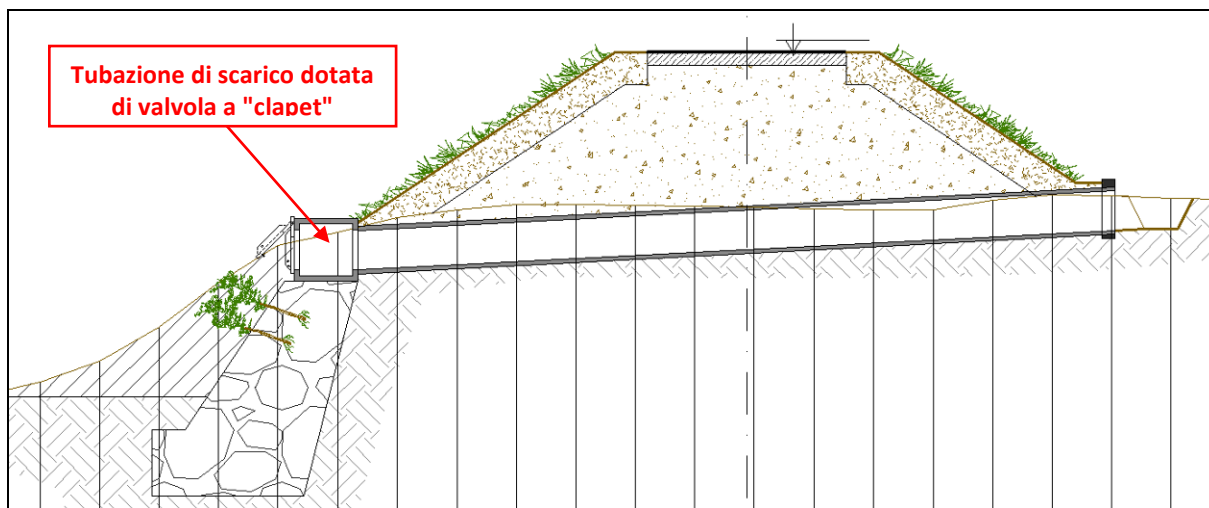


Figura 33 – Sezione tipo dell'argine di Cascina Cattafame: è evidente la protezione contro l'azione erosiva delle acque della Bevera di Veduggio e la tubazione di scarico dotata di "clapet" per il drenaggio delle acque meteoriche che si riverseranno nell'area interclusa generata dall'argine e dal rilevato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



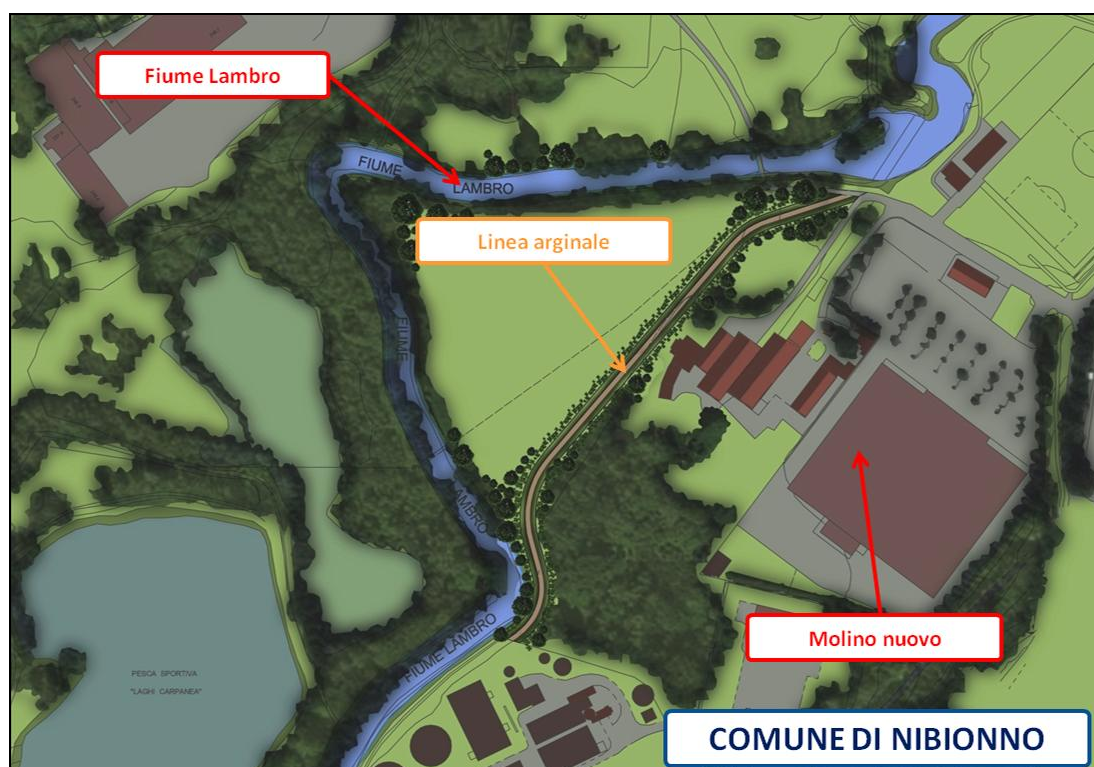
#### 6.4 LINEA ARGINALE IN LOCALITÀ "MOLINO NUOVO" IN COMUNE DI NIBIONNO

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.

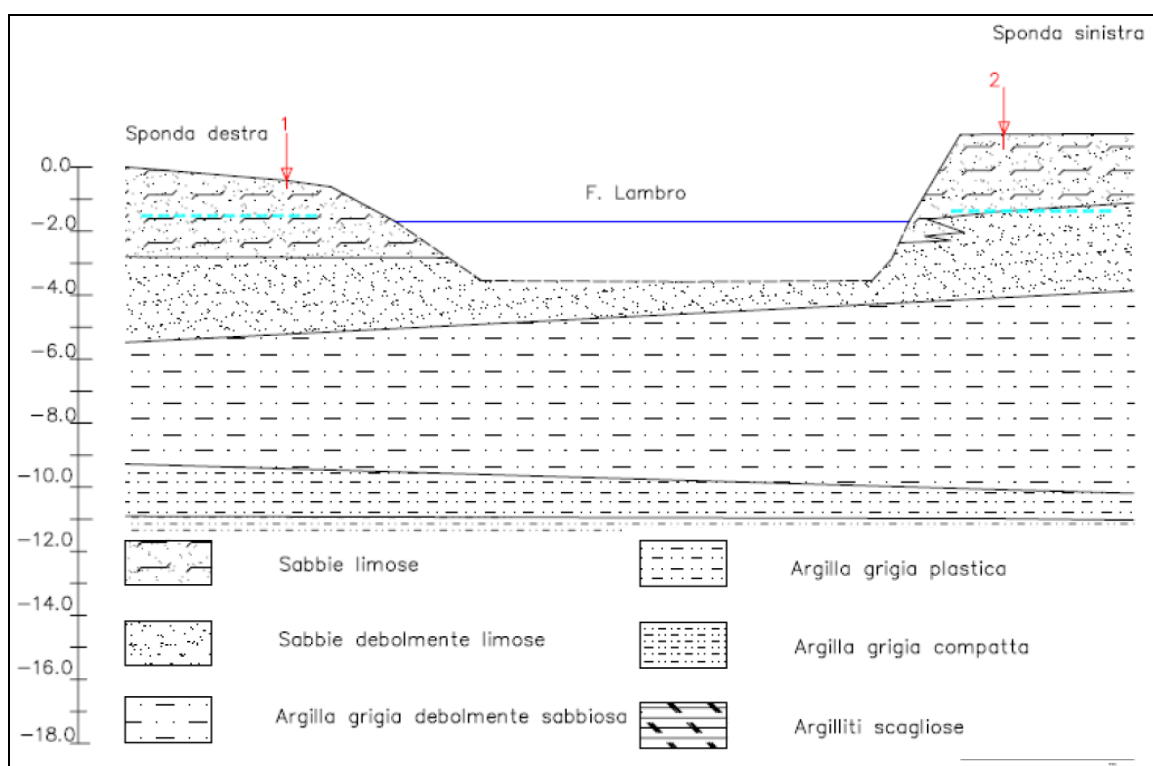


Figura 36 – Stratigrafia del terreno tratta dalla Relazione Geologica del geol. Alborghetti (marzo 2014)



### 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'innescio 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'innescio 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'innescio 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

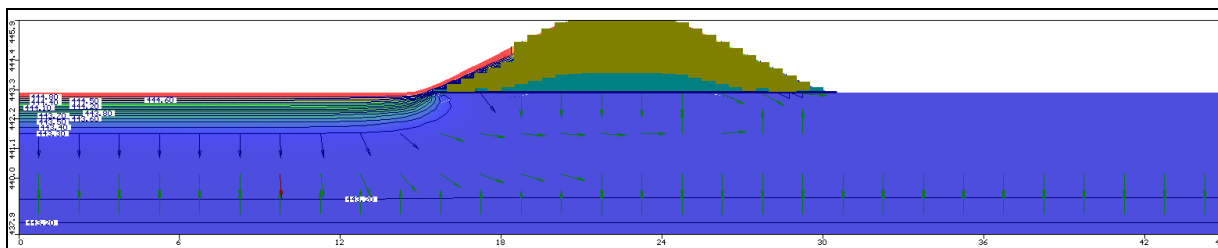


paratoie, in condizioni di completa saturazione del terreno di fondazione. In questa configurazione non si ha la presenza di un battente idrico a valle dell'opera.

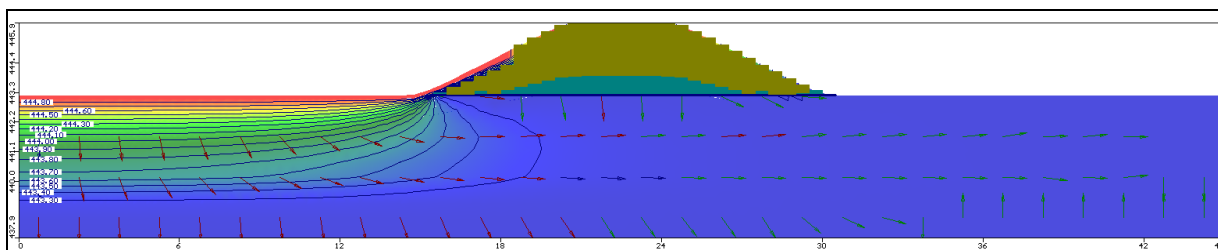
Per quanto concerne il primo scenario di verifica è stato allestito un modello in cui si considera un rilevato arginale avente base pari a 15 m e altezza dal coronamento pari a 3,5 m. La conducibilità idraulica fa riferimento alla stratigrafia rilevata dal sondaggio precedentemente eseguito che ha permesso 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**



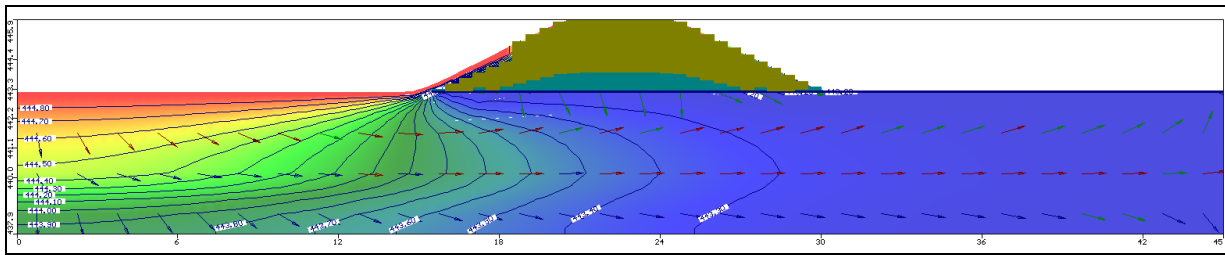


Figura 39 – Istante  $I_3$  del fenomeno filtrazione. Il fenomeno filtrazione ha già raggiunto lo strato più profondo. Le sottopressioni in corrispondenza del paramento di valle sono limitate perché gran parte del gradiente idraulico è dissipato nel primo tratto di monte

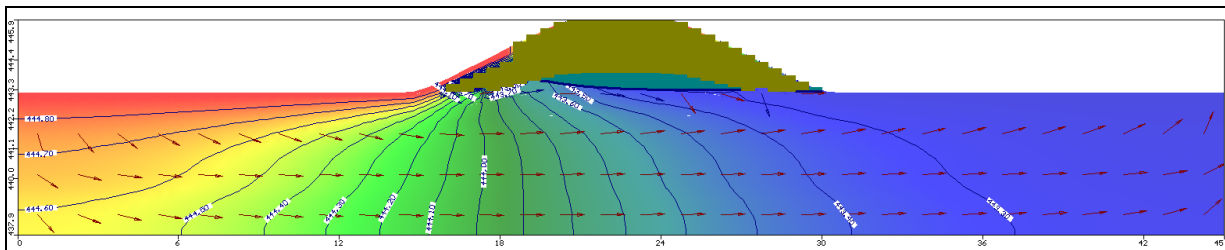


Figura 40 – 48 h dall'inizio del fenomeno. La filtrazione diretta verso l'alto è caratterizzata da uniformità lungo tutto il percorso

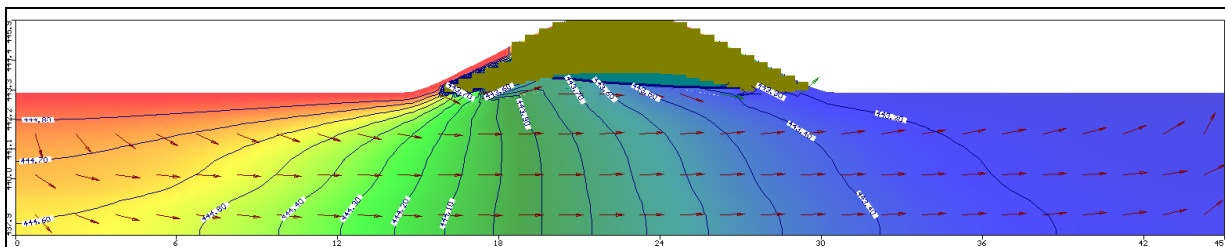


Figura 41 – 96 h dall'inizio del fenomeno. La filtrazione diretta verso l'alto è caratterizzata da uniformità lungo tutto il percorso.

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.

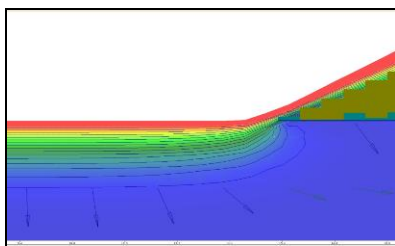


Figura 42 – Istante iniziale  $I_1$

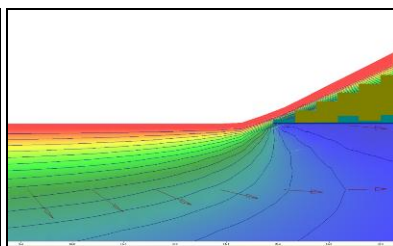


Figura 43 – Istante iniziale  $I_2$

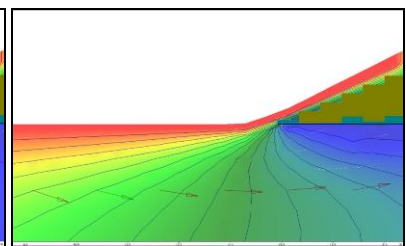


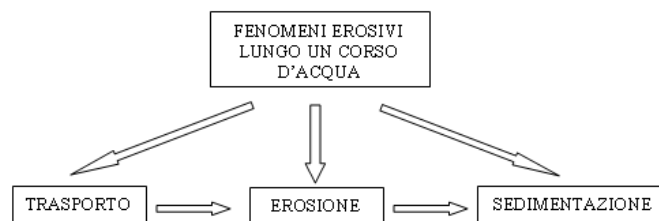
Figura 44 – Istante iniziale  $I_3$



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.

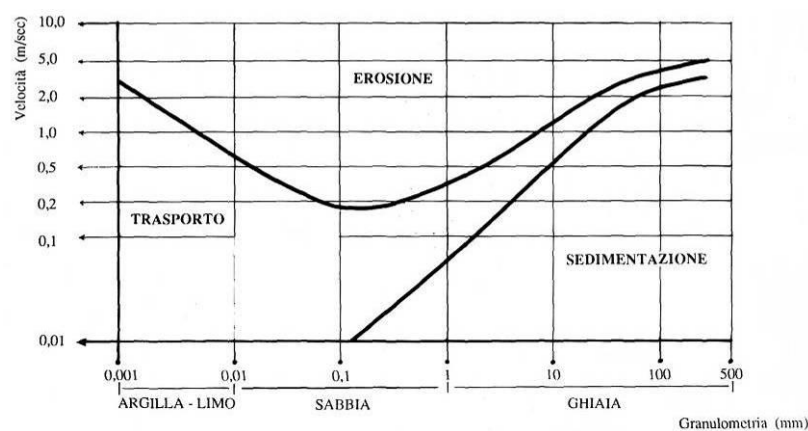


Figura 45 – Diagramma di Hjulström.



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:

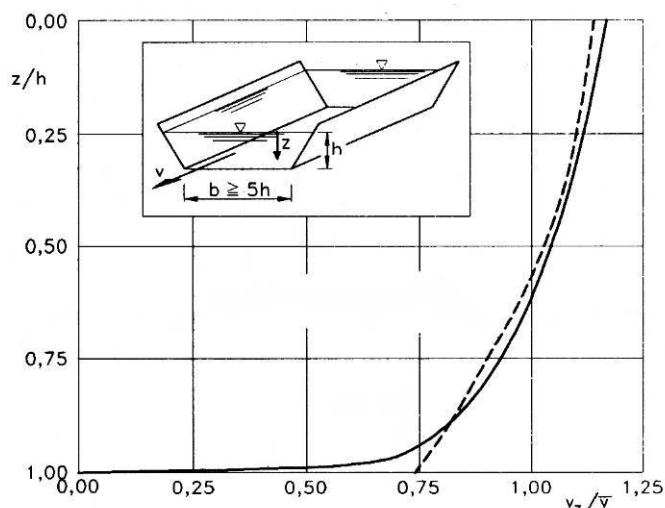
- $\gamma_s$  = peso specifico delle particelle costituenti il fondo alveo;
- $\gamma$  = peso specifico dell'acqua;
- $h$  = altezza idrica della corrente in moto uniforme;
- $d$  = diametro medio delle particelle costituenti il fondo alveo.

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  $\tau$ , il cui valore minimo  $\tau_c$  perché abbia inizio il suo moto, individua appunto la *condizione critica*. Lo sforzo tangenziale  $\tau_0$  esercitato dalla corrente sul materiale costituente il fondo dell'alveo può essere espresso come:

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

dove:

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



Il valore di  $\tau_0$  deve essere confrontato con lo sforzo tangenziale critico  $\tau_c$  (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  $\tau_c$  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  $\tau_c$ :

- *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:

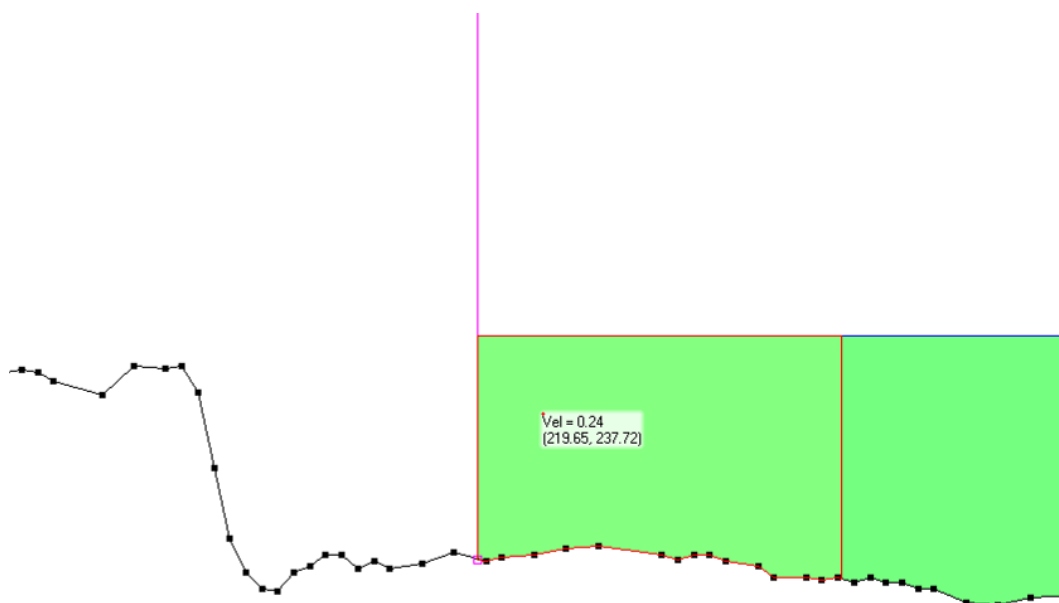
$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) \cdot d} = \frac{0,1}{\left[ \text{Log} \left( 19 \frac{d}{d_{50}} \right) \right]^2}$$

### 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
			<b>0.007</b>	<b>0.7</b>	<b>0.5</b>	<b>STABILE</b>	<b>0.9</b>	<b>STABILE</b>
			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  $\alpha$  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 m<sup>3</sup>/s e 120 m<sup>3</sup>/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;
- A<sub>0</sub> : sezione non attiva di deflusso;
- q : portata specifica in ingresso o uscita;
- β: coefficiente di ragguaglio della quantità di moto;
- S<sub>f</sub> : pendenza della linea dei carichi totali (valutata con l'equazione di Manning di moto uniforme stazionario).
- S<sub>e</sub> : pendenza della linea dei carichi per variazioni di forma della sezione (resistenze localizzate);
- S<sub>i</sub> : 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





- $\gamma$ : peso specifico del fluido
- $\tau_0$ : 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  $\theta$  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  $h = k(t)$

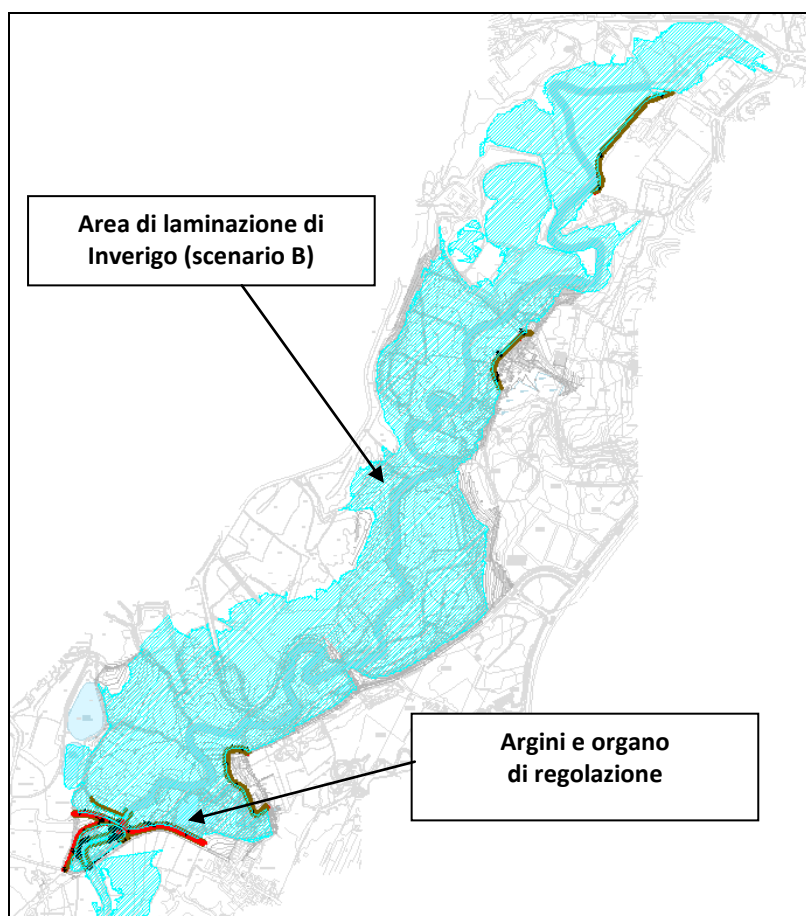
Il modello matematico offre la possibilità di condurre in modo automatico la ricerca delle transizioni di regime della corrente, e nel caso in questione il metodo utilizzato è quello proposto da Molisana e Yang, che consiste nel calcolare in tutti i punti del dominio di calcolo, sia l'altezza critica 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).

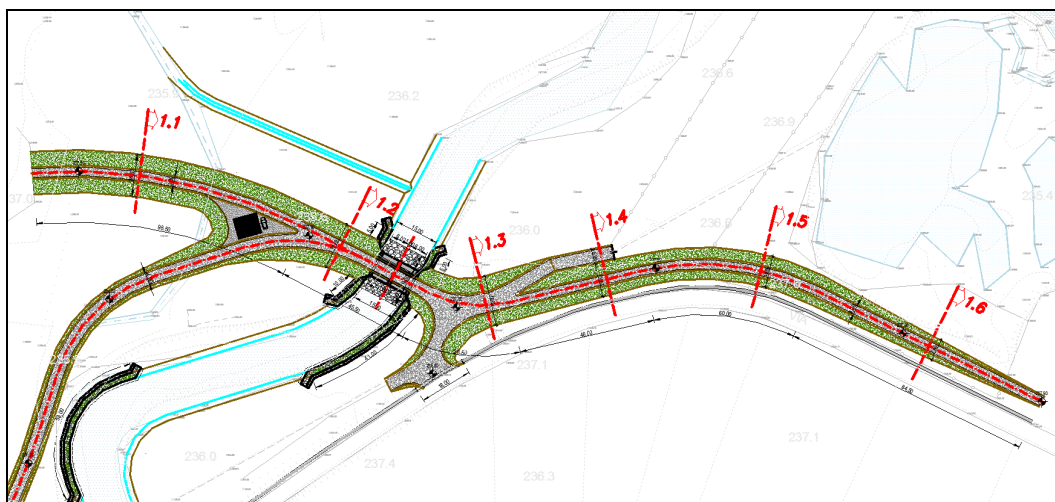


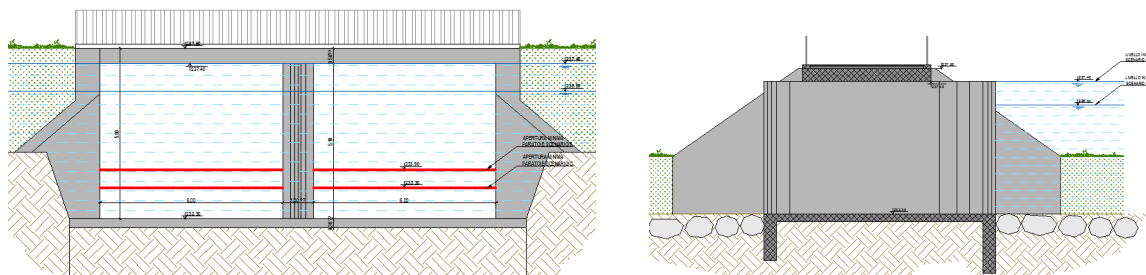
**Figura 48 – Planimetria dell'invaso (aree allagabili – scenario B).**



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.

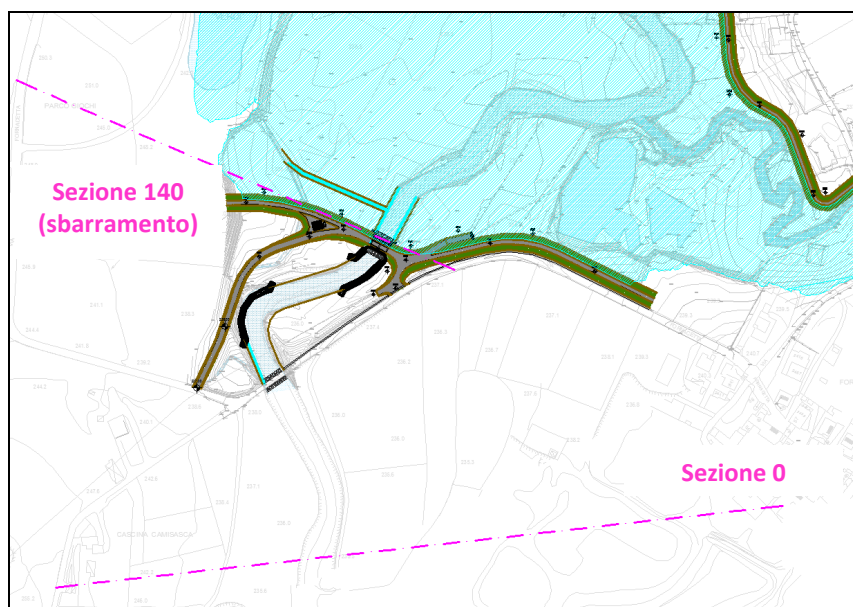
Rimandando agli elaborati grafici per approfondimenti di dettaglio, si riportano di seguito le principali grandezze geometriche di interesse ai fini dell'analisi in corso. Il rilevato arginale presenta sezione trapezia con base maggiore (sviluppo longitudinale) variabile, che nella parte centrale raggiunge 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



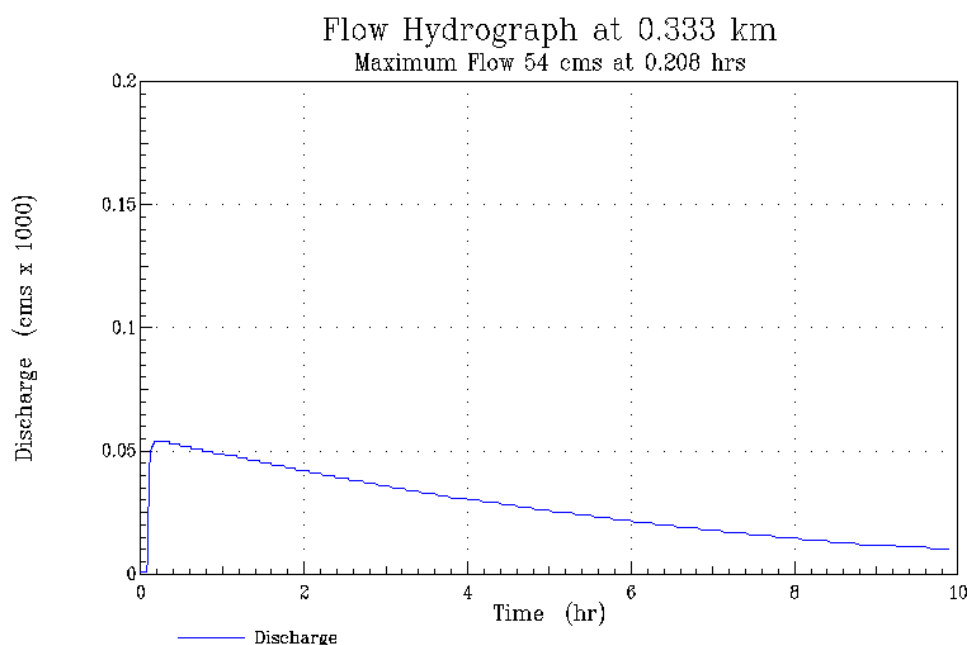


evento pluviometrico parossistico, le portate del Fiume Lambro sono tali da necessitare che venga attivata l'operazione di laminazione della portata. In ALLEGATO 5 si riportano tutti i risultati grafici e numerici.

#### 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  $t_p = 4 \text{ h}$ .

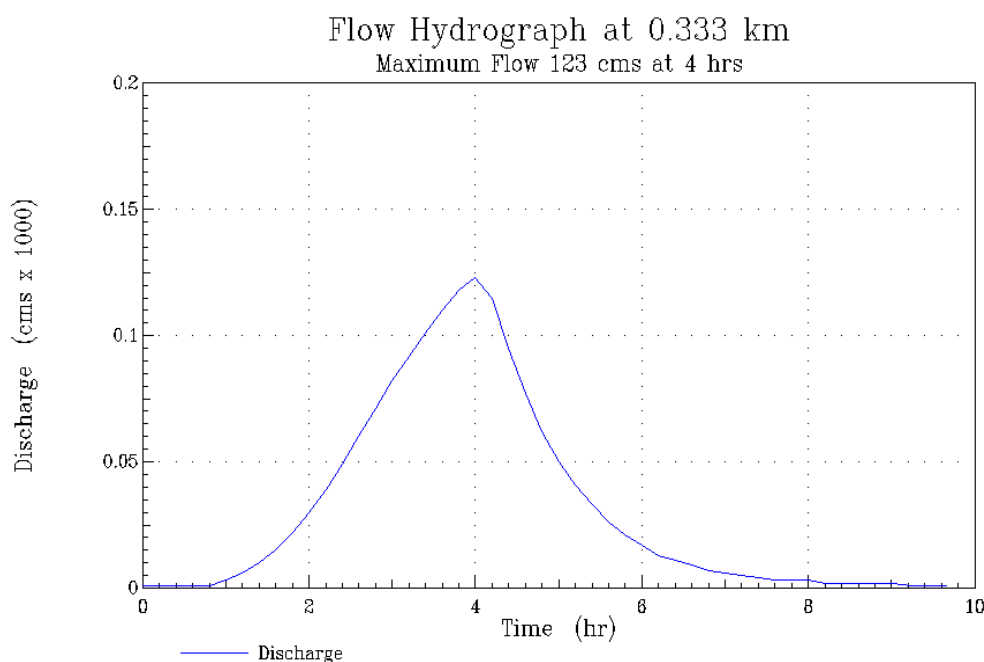


Figura 54 – Formazione onda di piena: erosione laterale progressiva e formazione breccia (scenario 2).

## 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 <sup>3</sup> /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/m<sup>2</sup>), 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

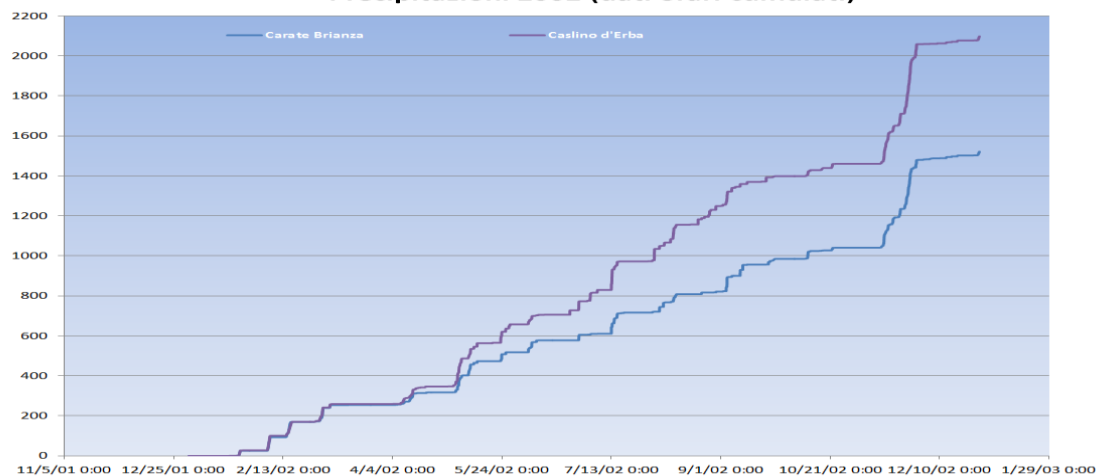


## PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

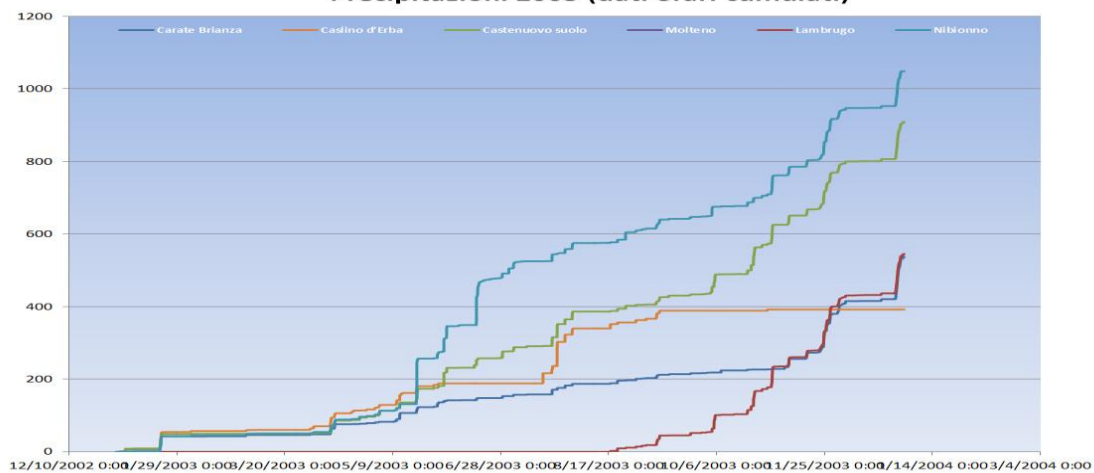
Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

**Progetto Definitivo**

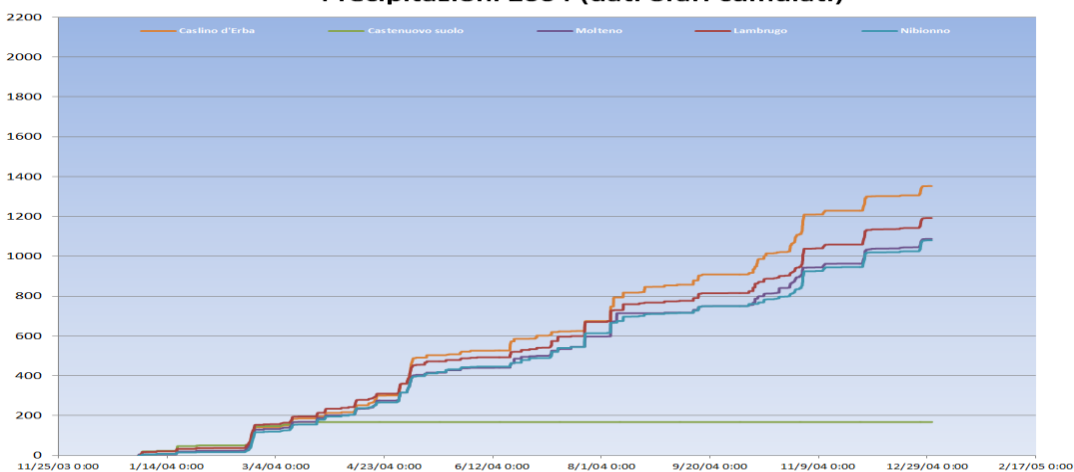
**Precipitazioni 2002 (dati orari cumulati)**



**Precipitazioni 2003 (dati orari cumulati)**



**Precipitazioni 2004 (dati orari cumulati)**



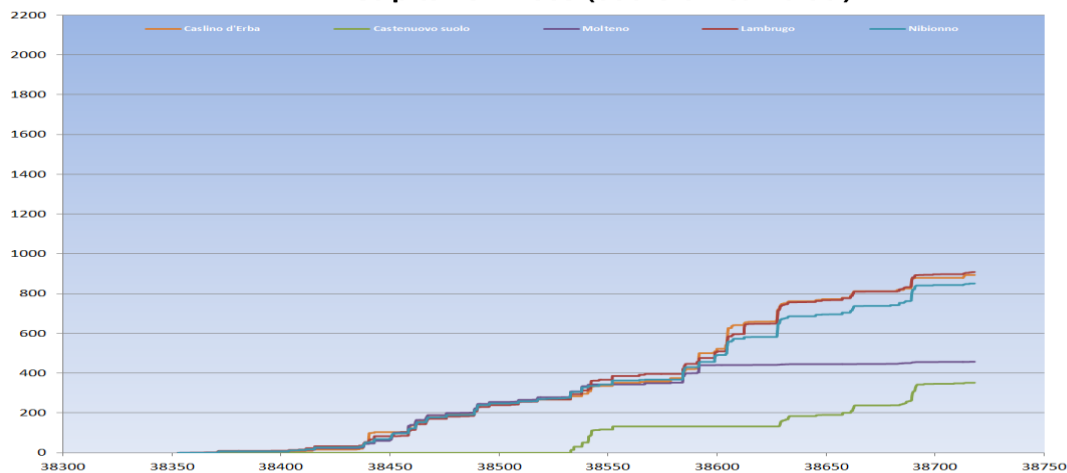


## PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

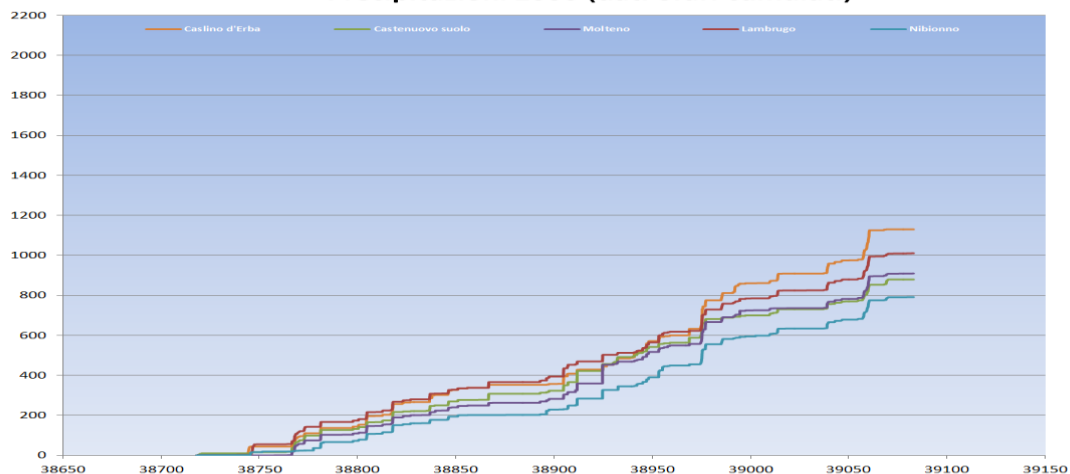
Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

**Progetto Definitivo**

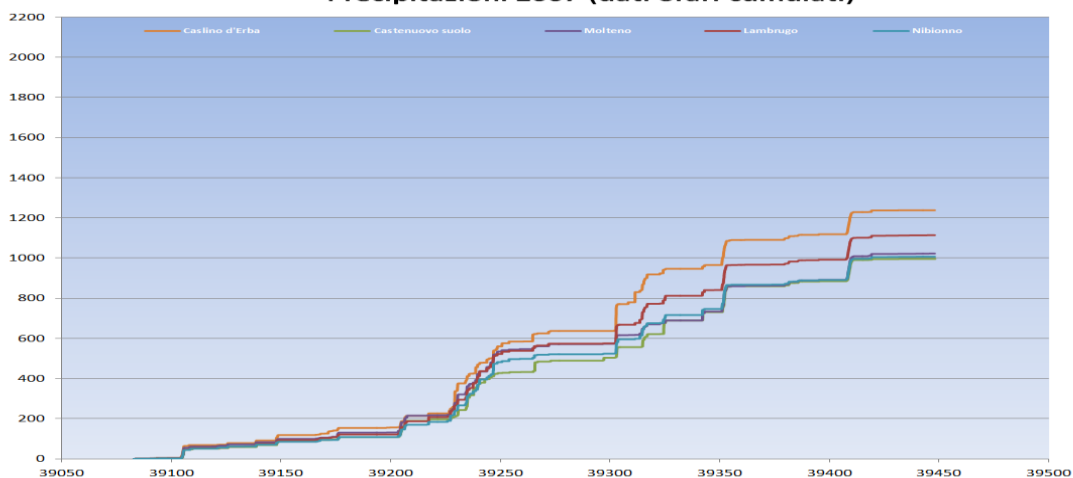
**Precipitazioni 2005 (dati orari cumulati)**



**Precipitazioni 2006 (dati orari cumulati)**



**Precipitazioni 2007 (dati orari cumulati)**



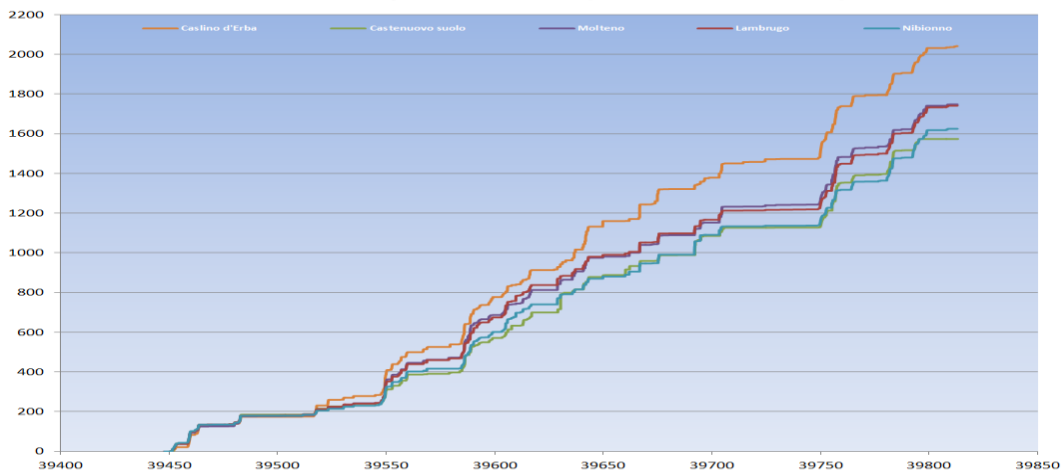


## PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

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**

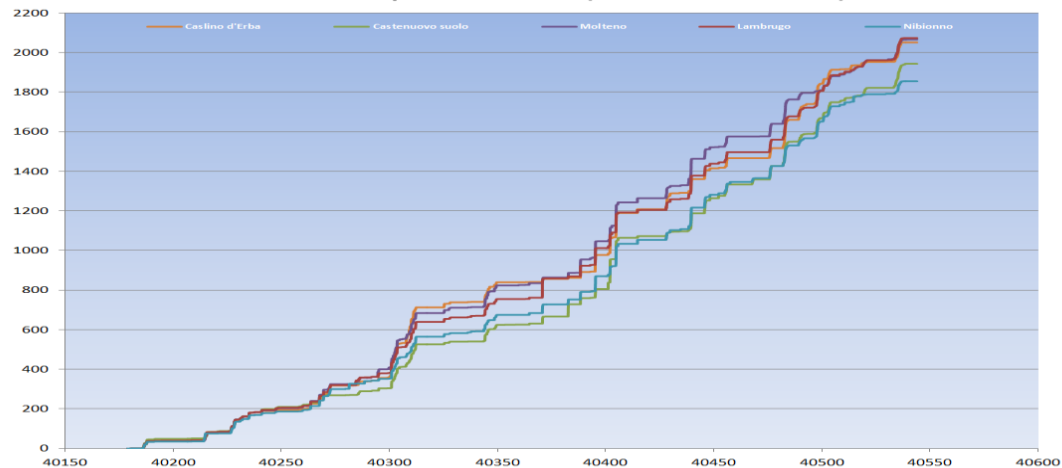
**Precipitazioni 2008 (dati orari cumulati)**



**Precipitazioni 2009 (dati orari cumulati)**



**Precipitazioni 2010 (dati orari cumulati)**



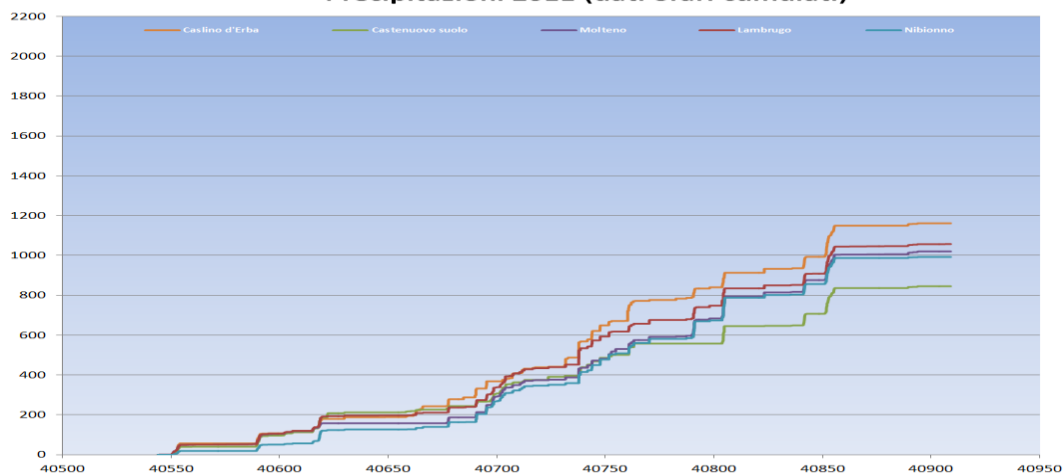


## PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

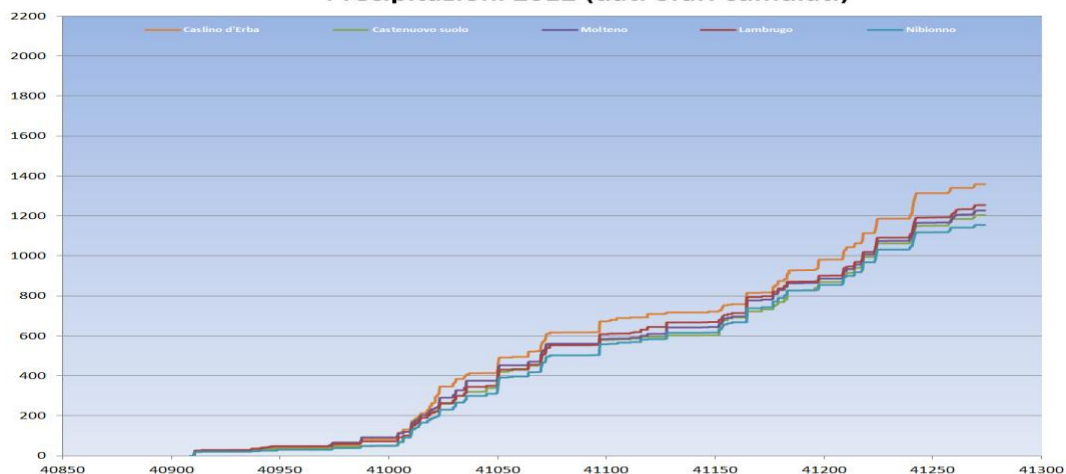
Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

**Progetto Definitivo**

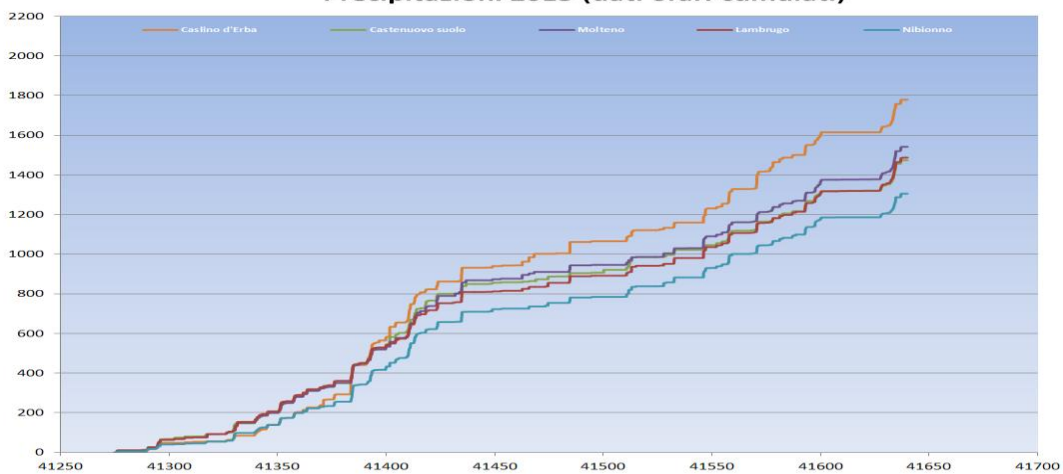
**Precipitazioni 2011 (dati orari cumulati)**



**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

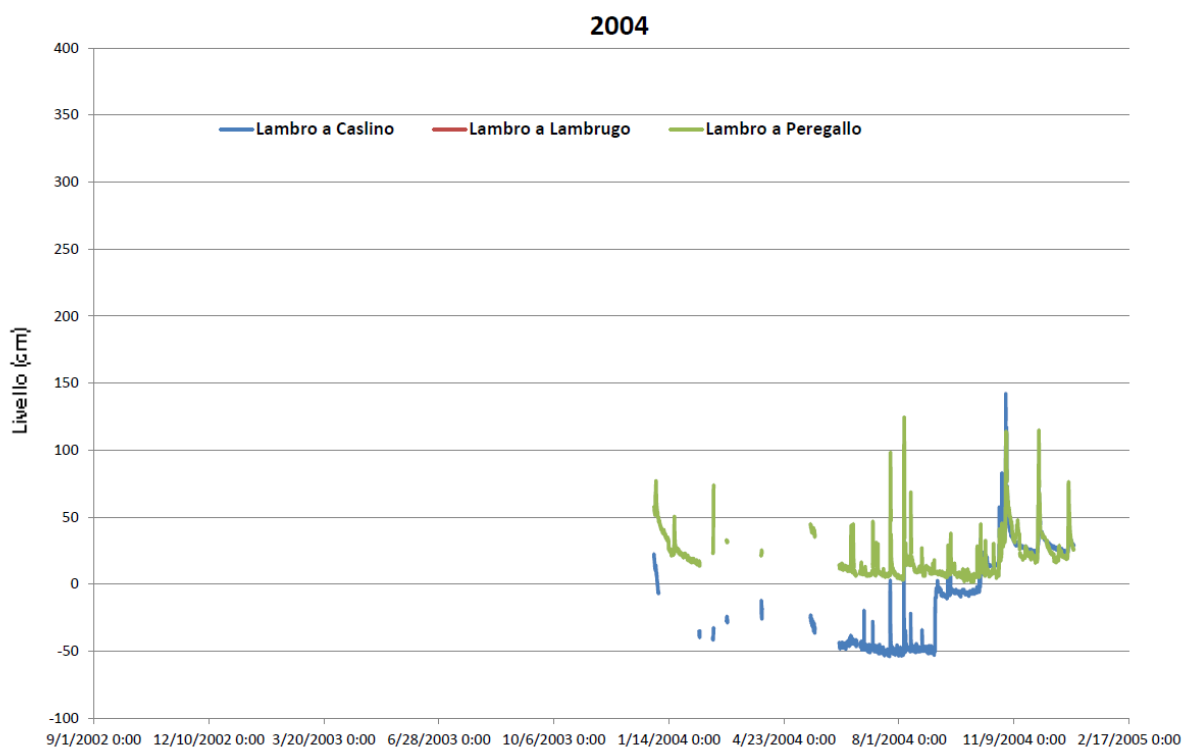
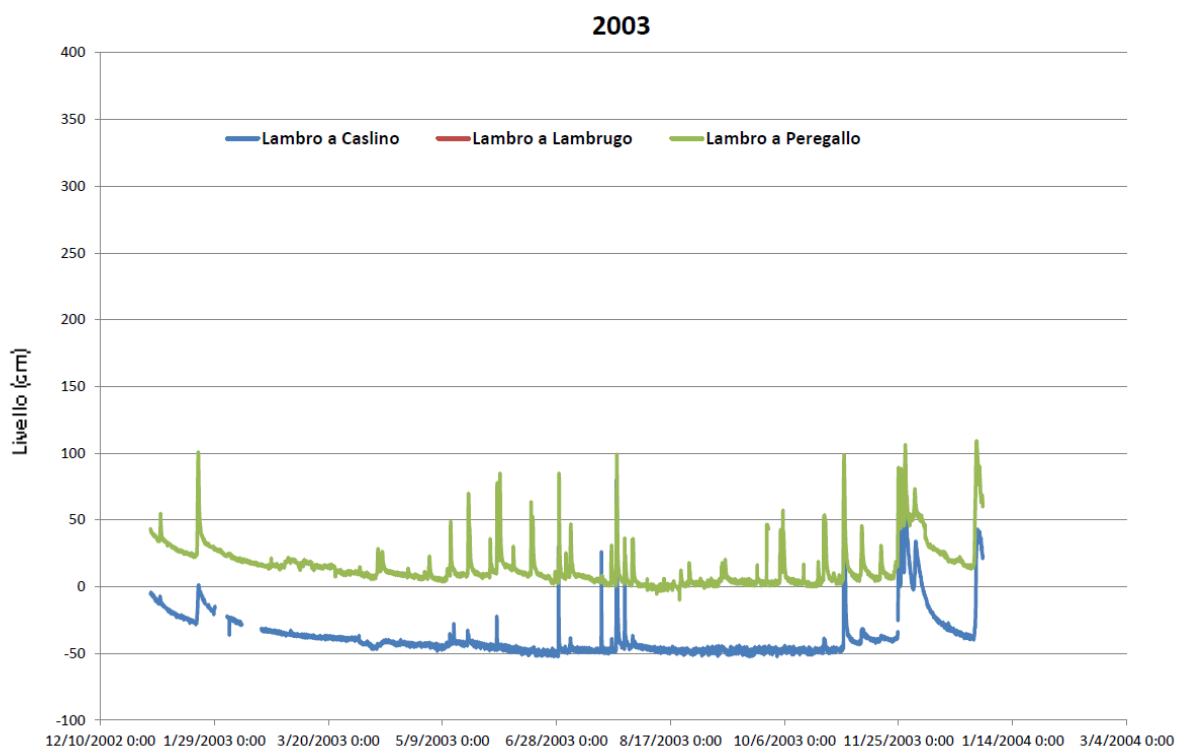
Andamento orario dei livelli F. Lambro nelle stazioni d'interesse suddiviso per anni di misura



## 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

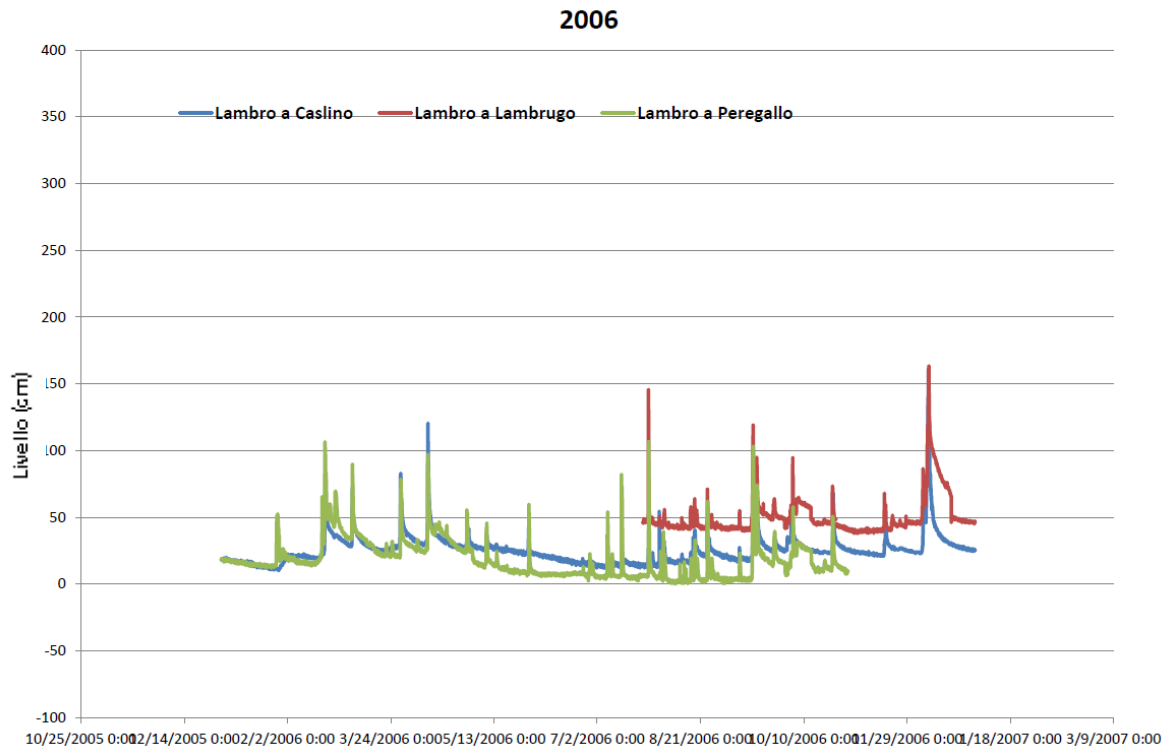
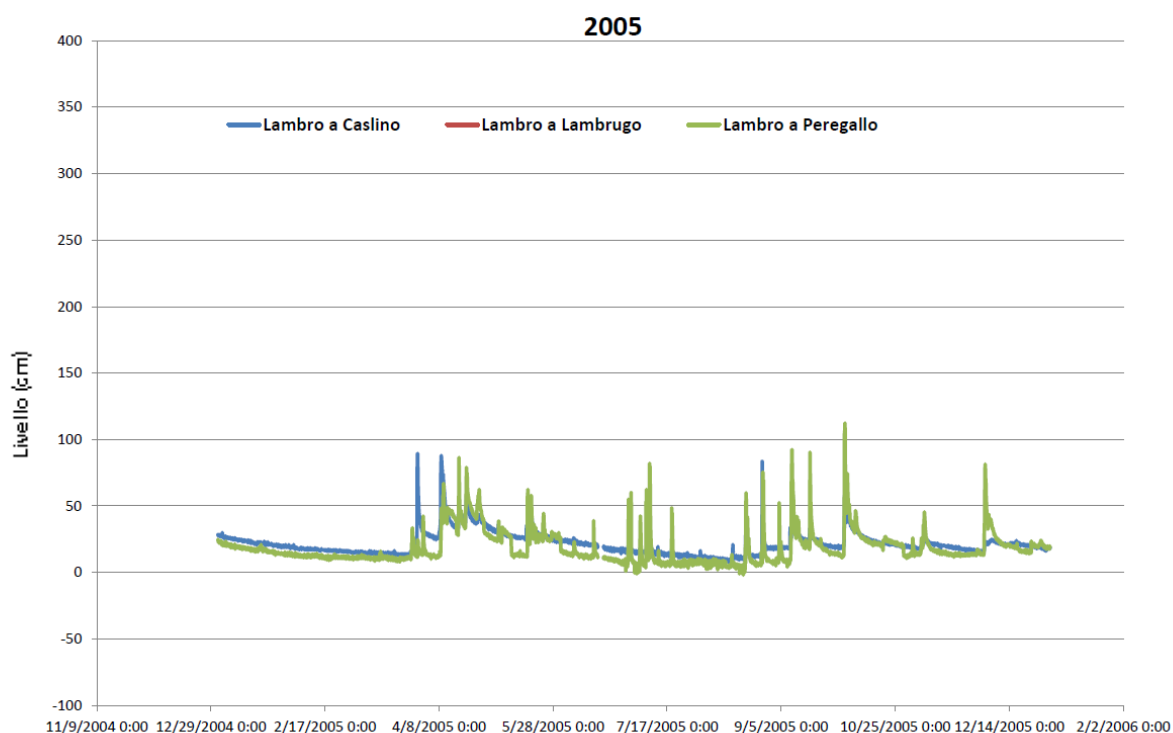




## PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

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



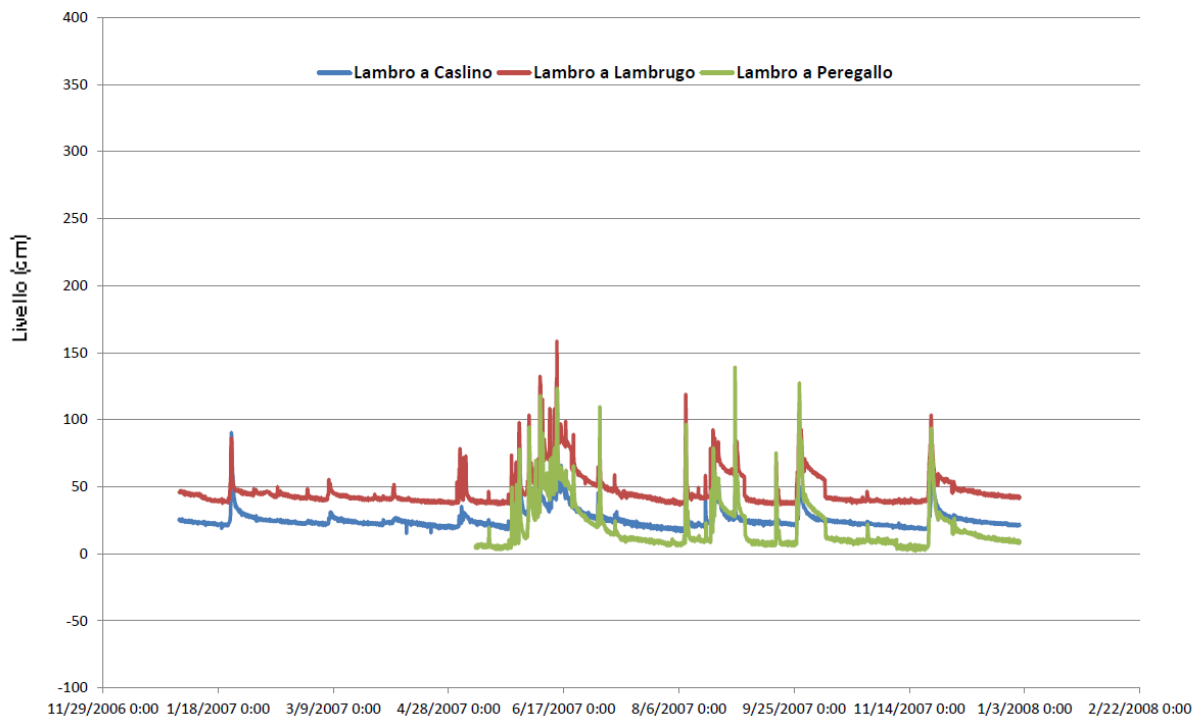


## PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

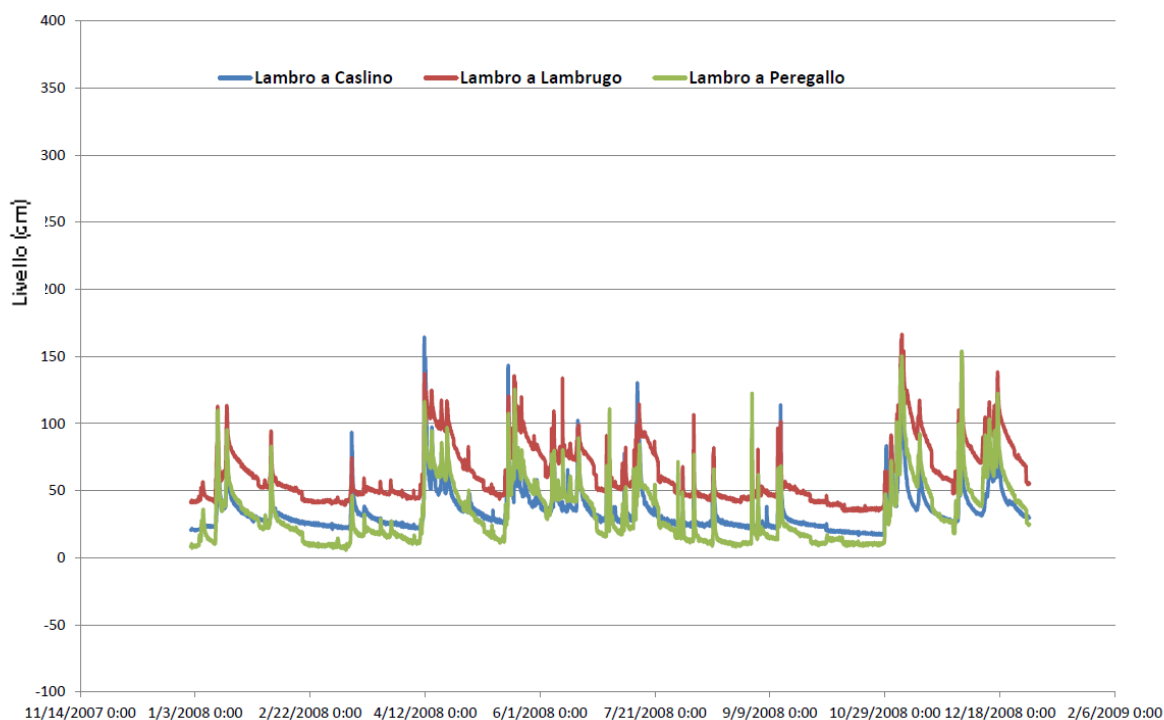
Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

### Progetto Definitivo

## 2007



## 2008



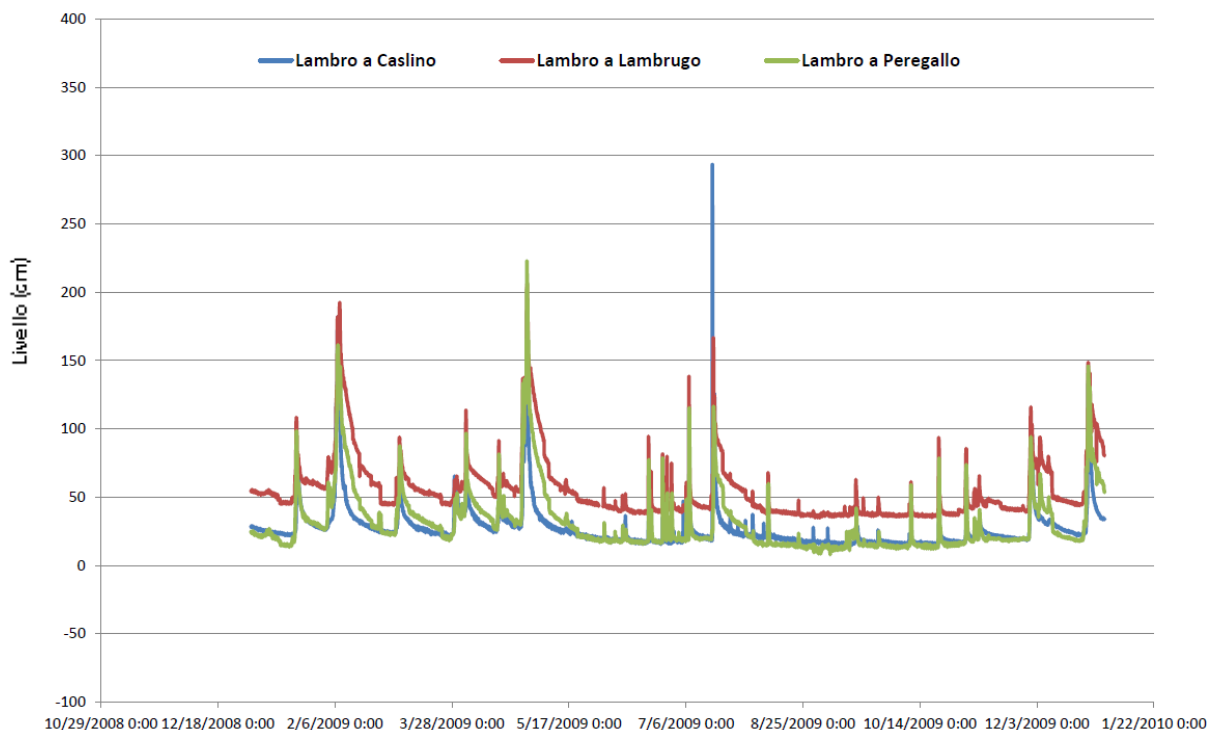


## PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

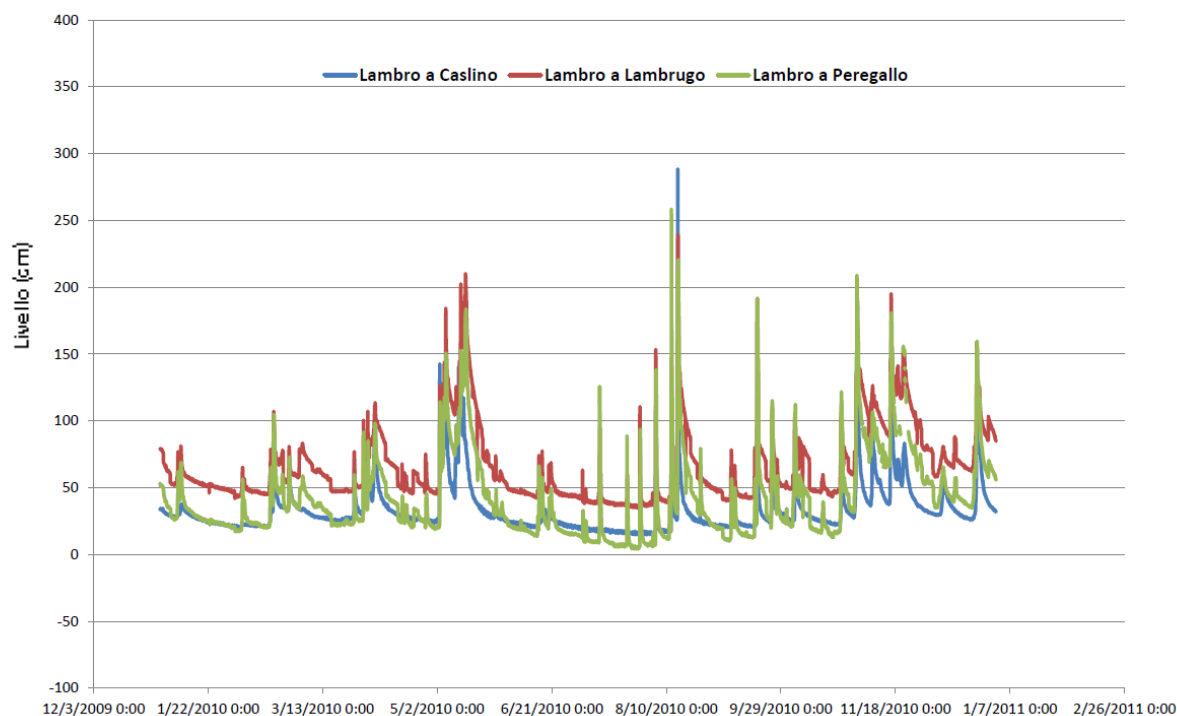
Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

### Progetto Definitivo

## 2009



## 2010



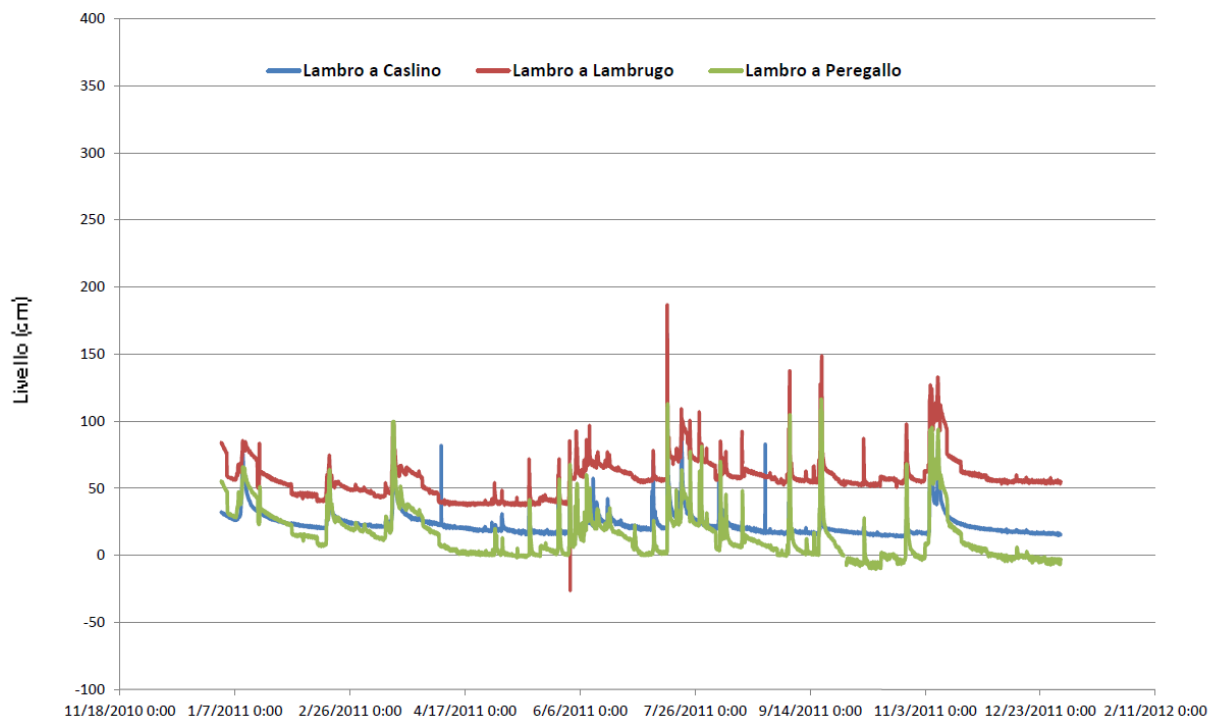


## PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

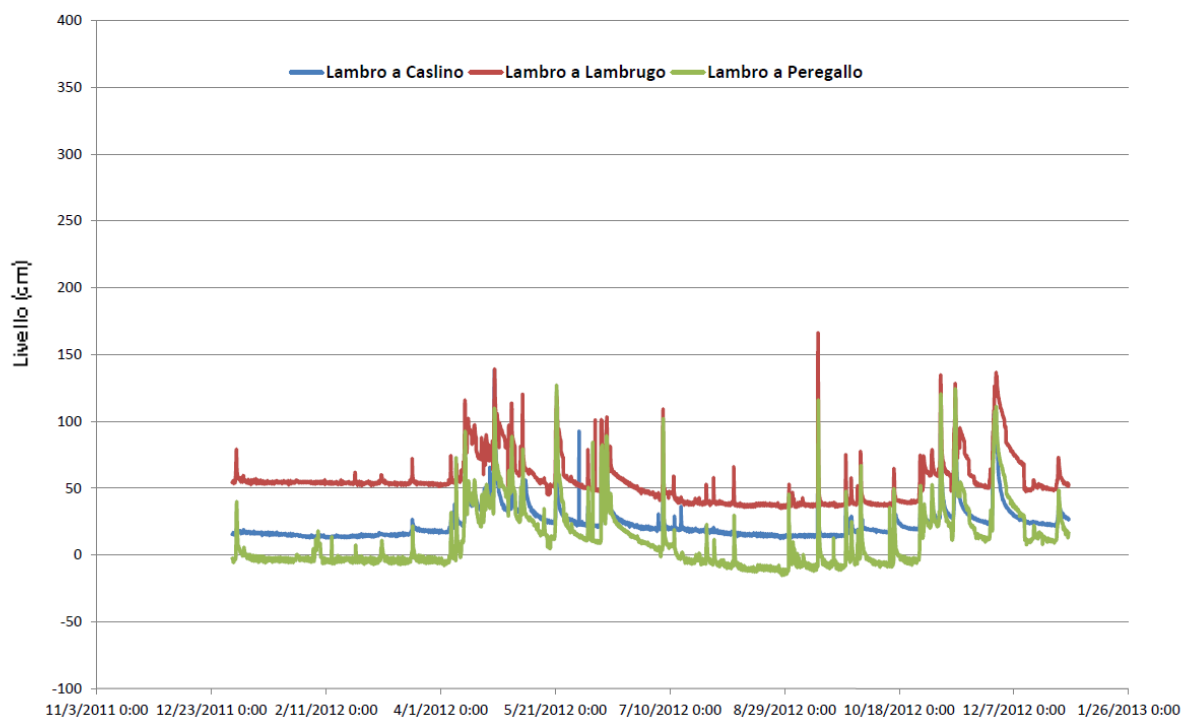
Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

### Progetto Definitivo

## 2011



## 2012





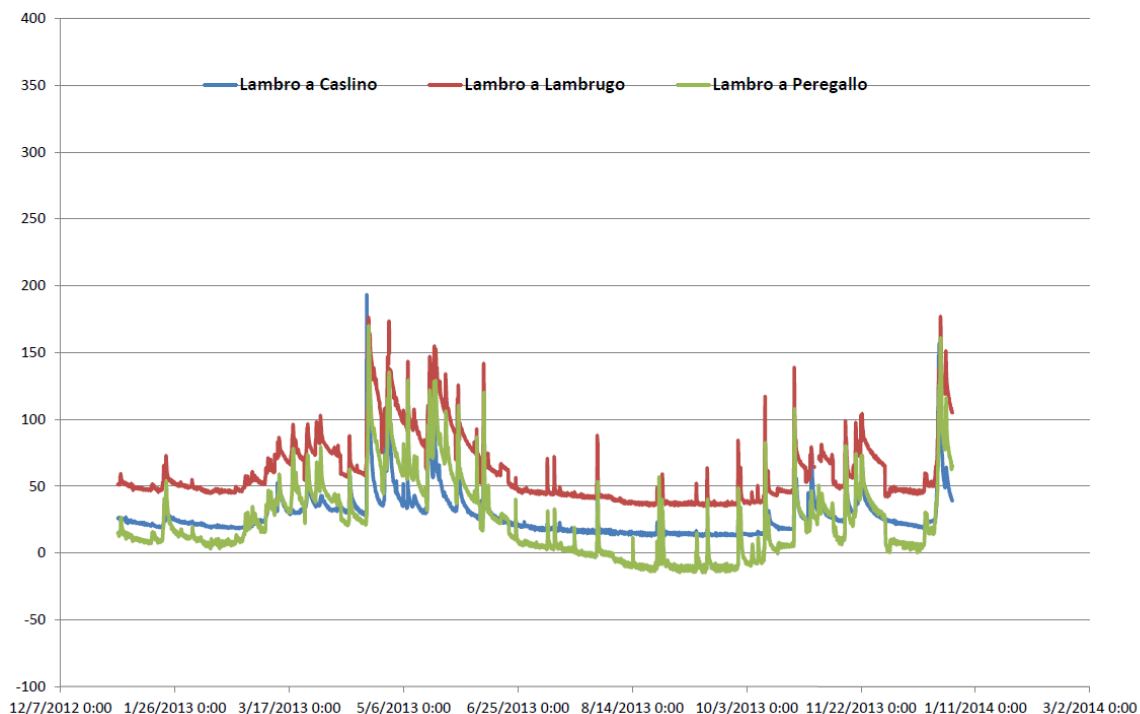


## PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

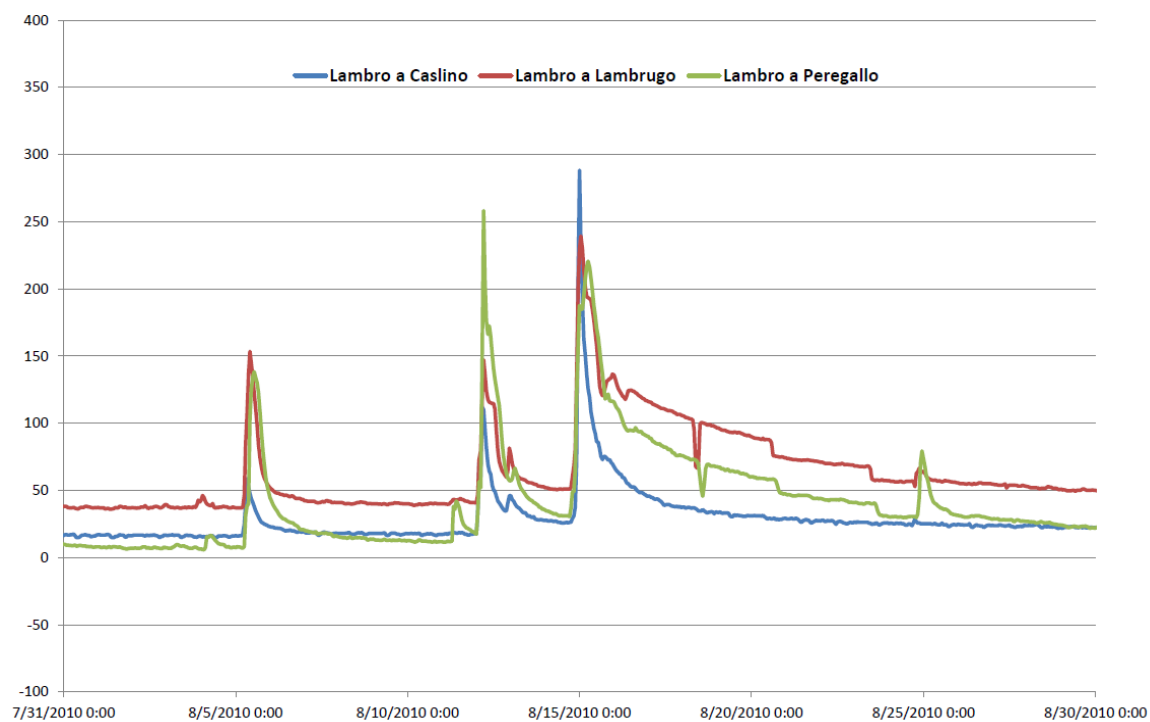
Opere di regolazione delle portate previste nell'intervento "Area di laminazione di Inverigo – Interventi idraulici e di riqualificazione fluviale nei territori di Inverigo, Nibionno e Veduggio con Colzano"

**Progetto Definitivo**

### 2013



### AGOSTO 2010



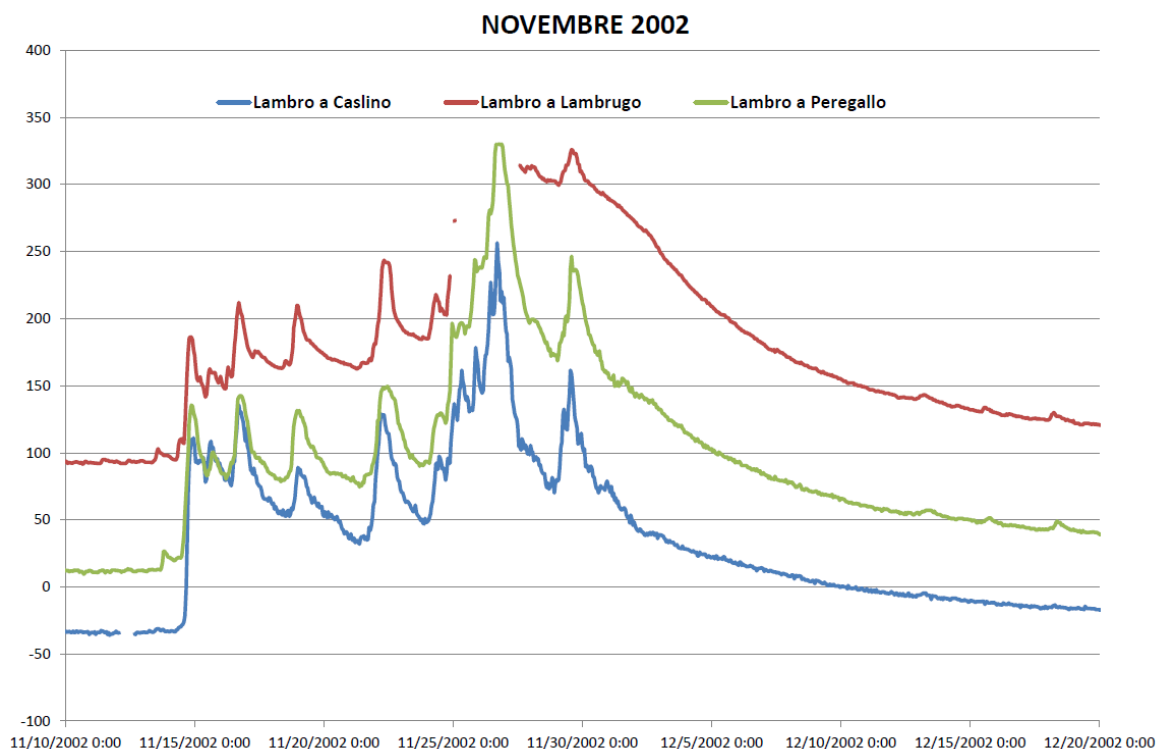


## PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

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**

**SR  
RA**  
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**

**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**

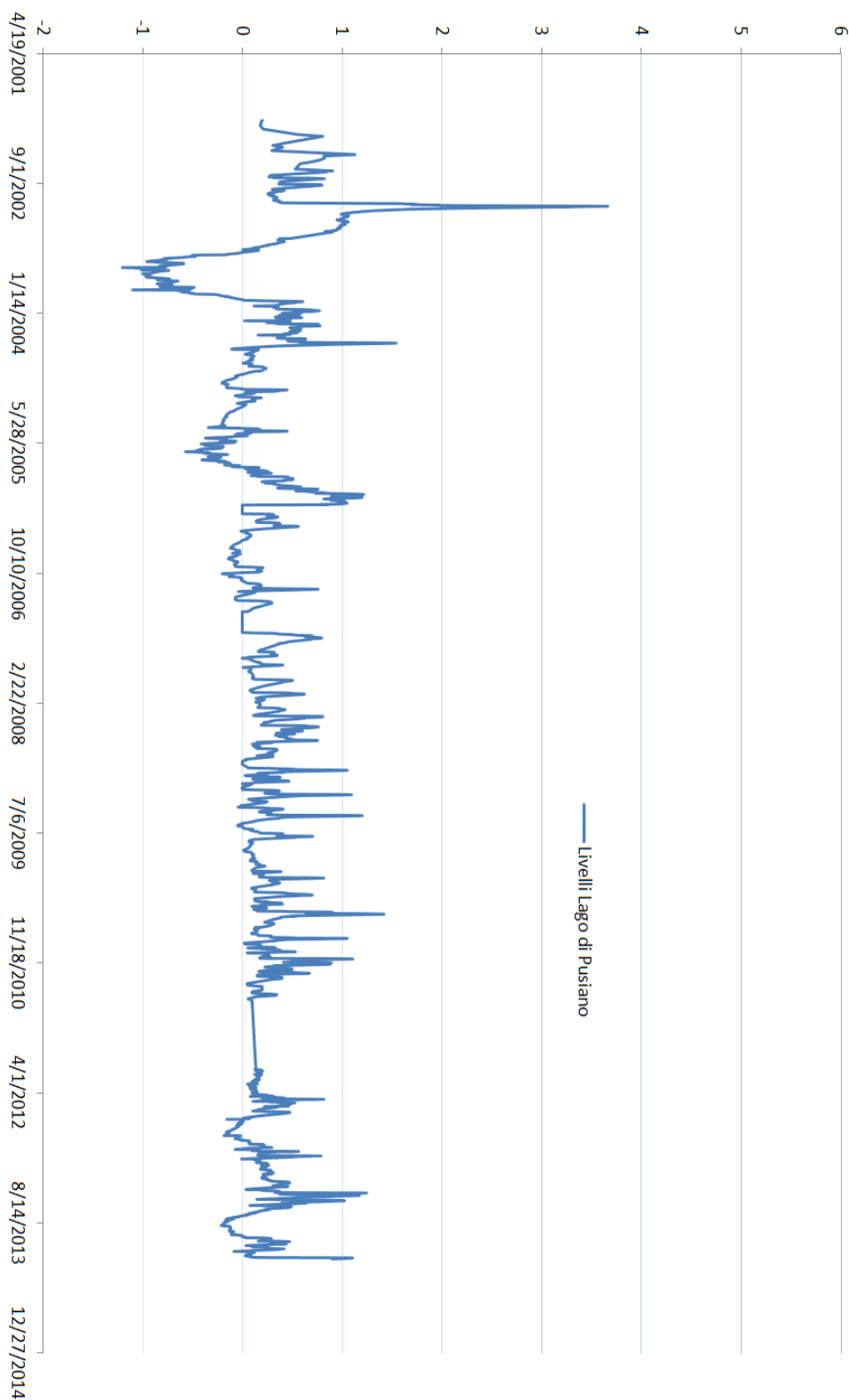


## PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

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

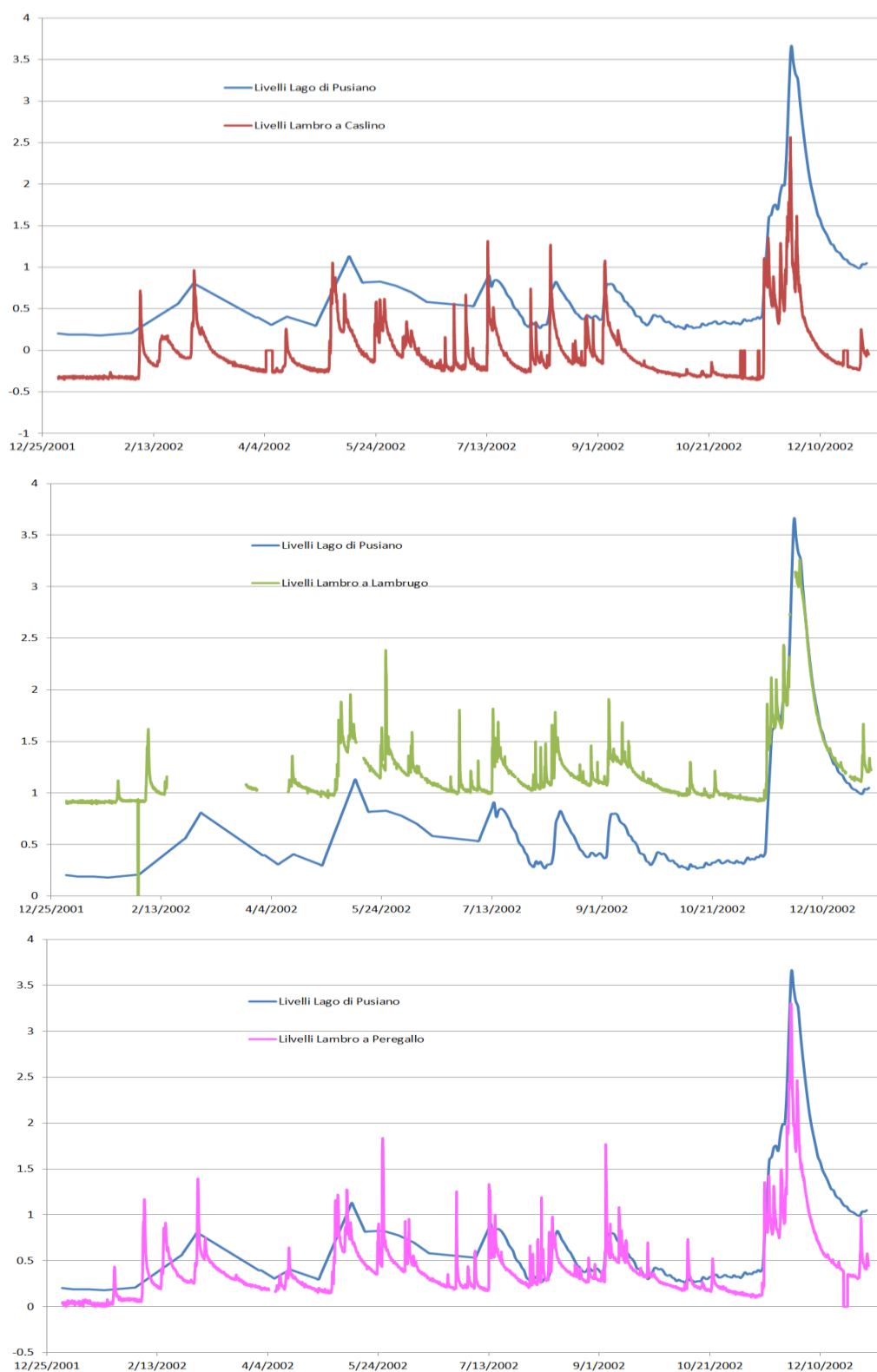
**Evento 2002: confronto andamento livelli F. Lambro e Lago di Pusiano**



## 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**

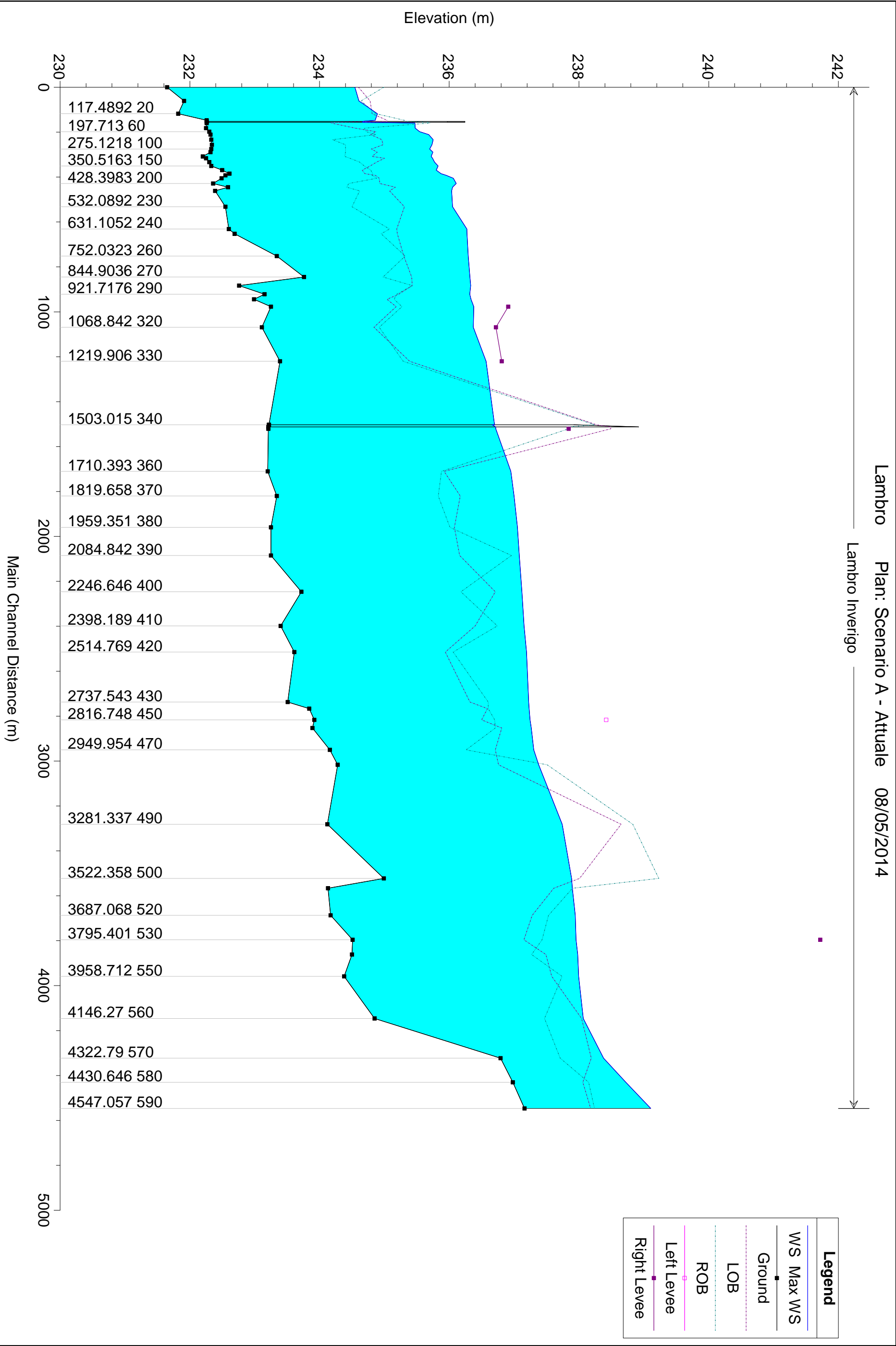
**SRA**  
s.r.l.  
**STUDIO ROSSO**  
INGEGNERI ASSOCIATI s.r.l.

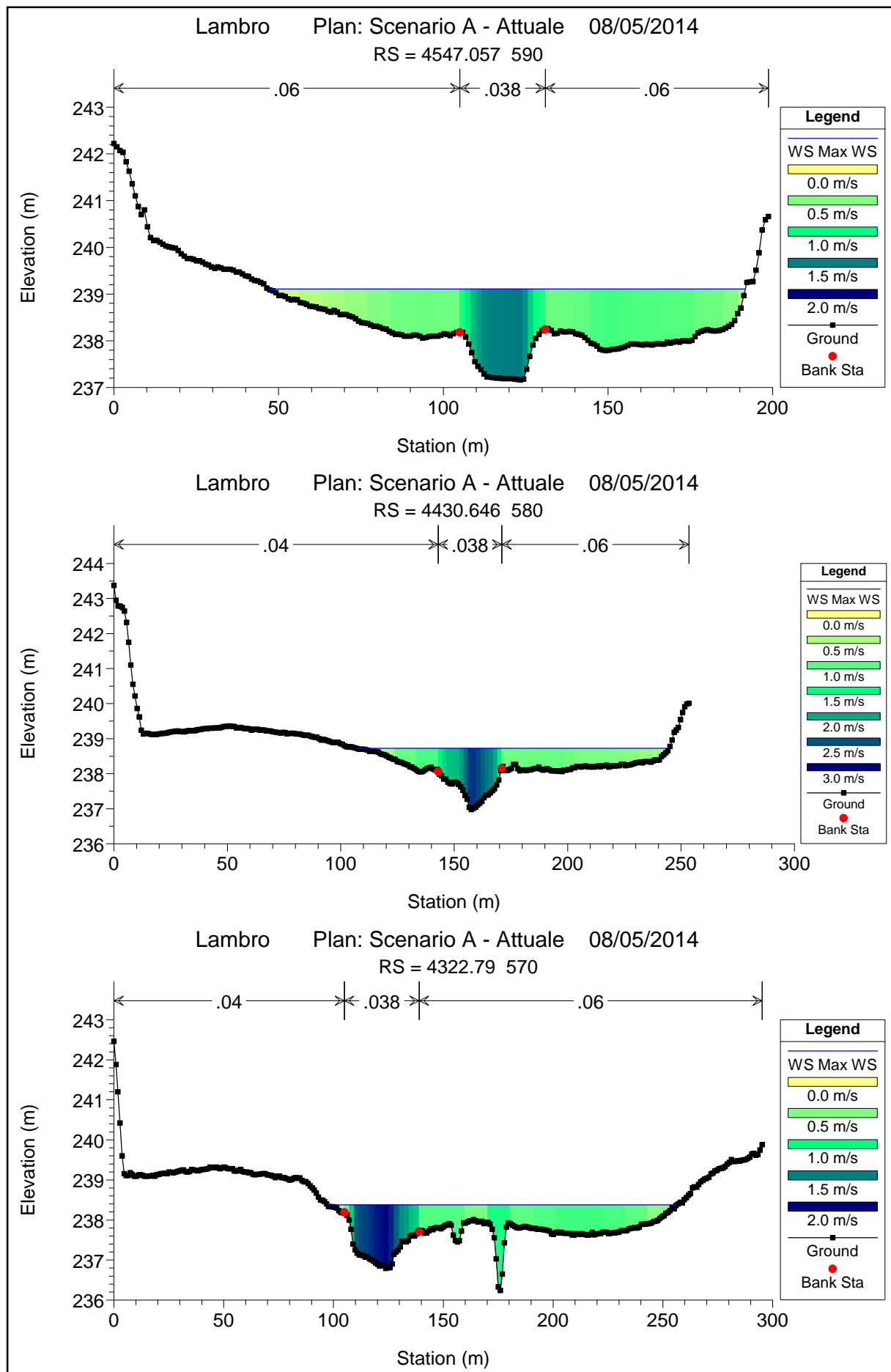
## ALLEGATO 2

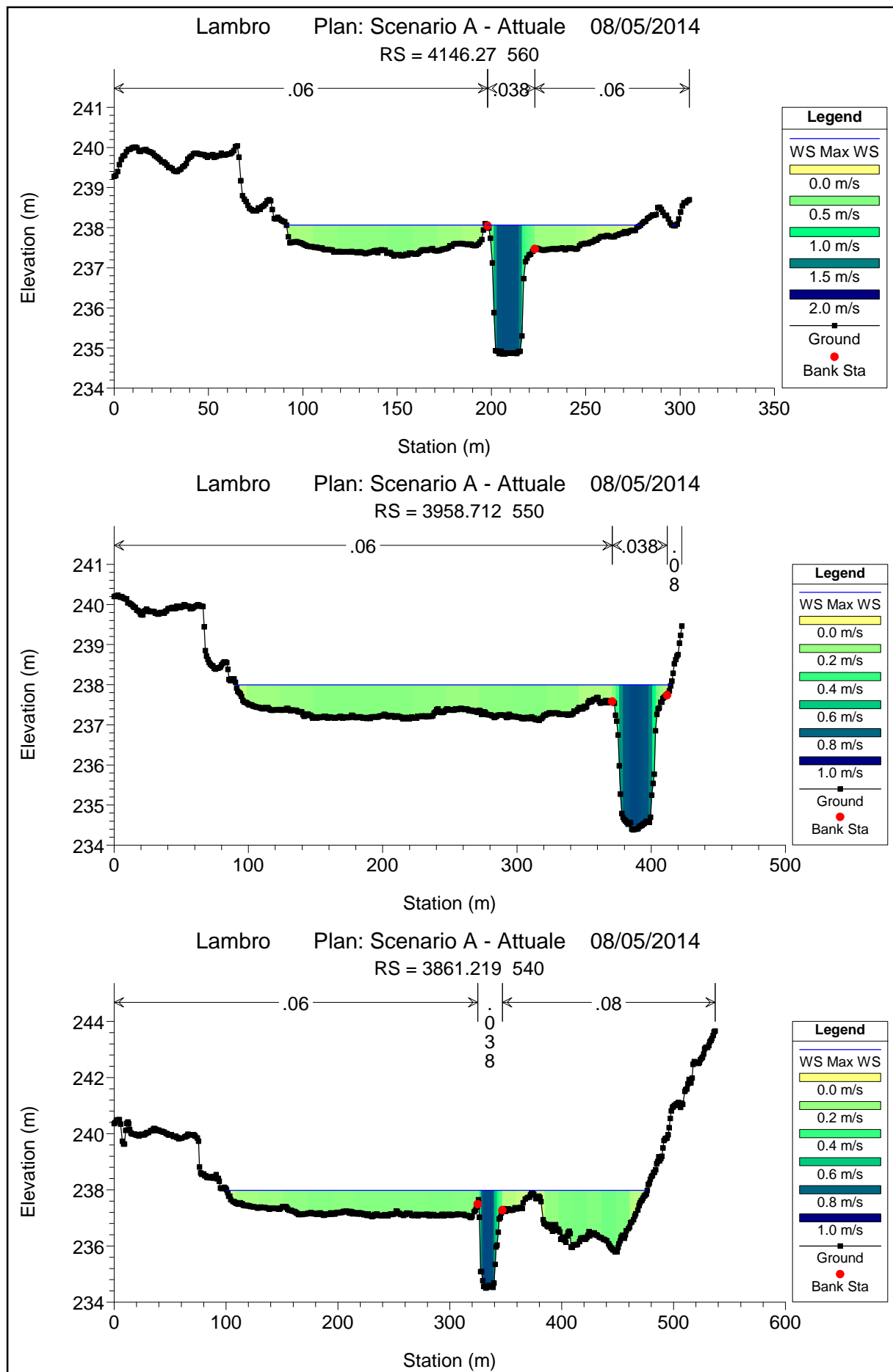
– Risultati simulazione idraulica: scenario A – Stato attuale

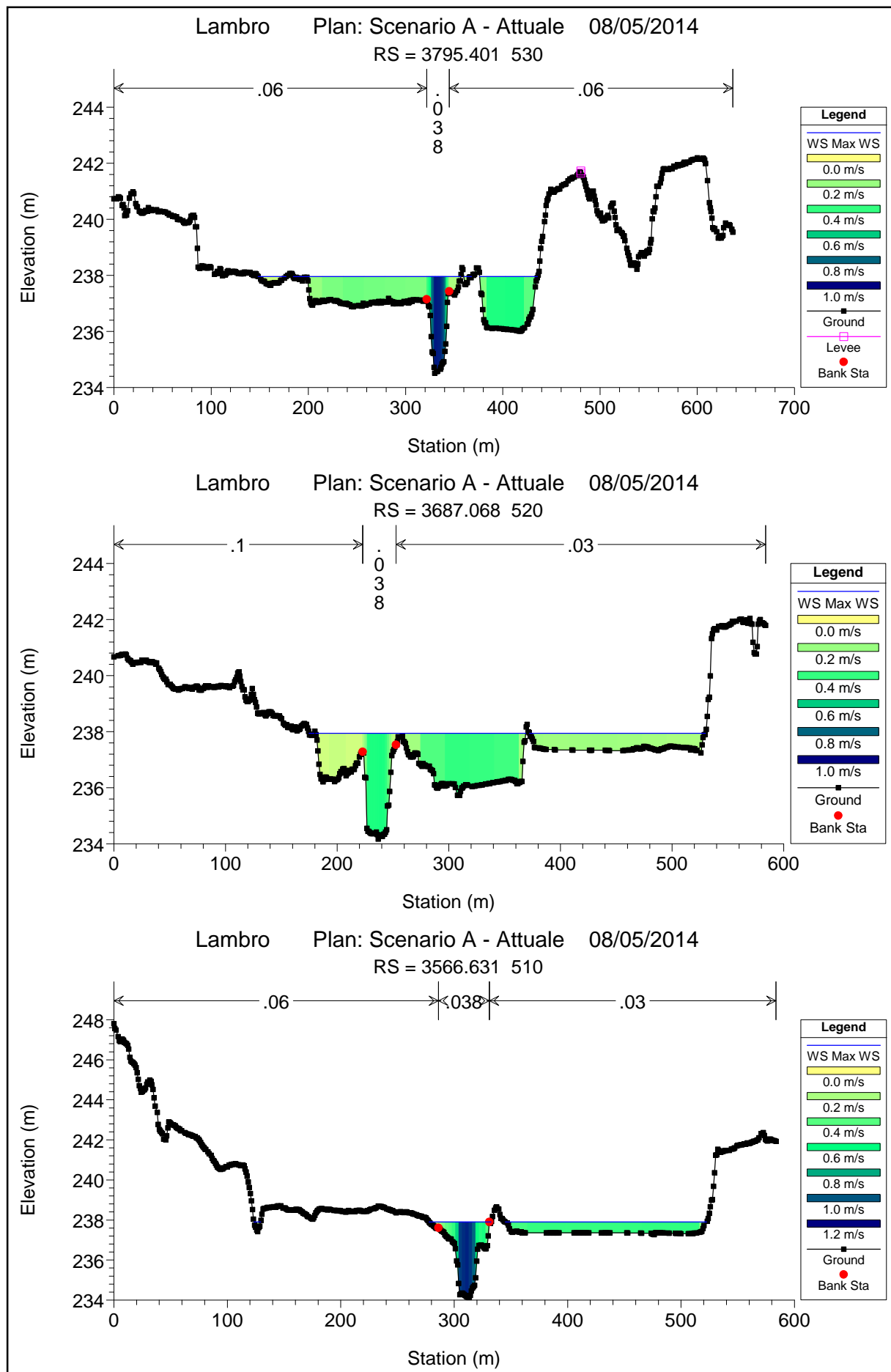
HEC-RAS Plan: A - Attuale River: Lambro Reach: Inverigo Profile: Max WS

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

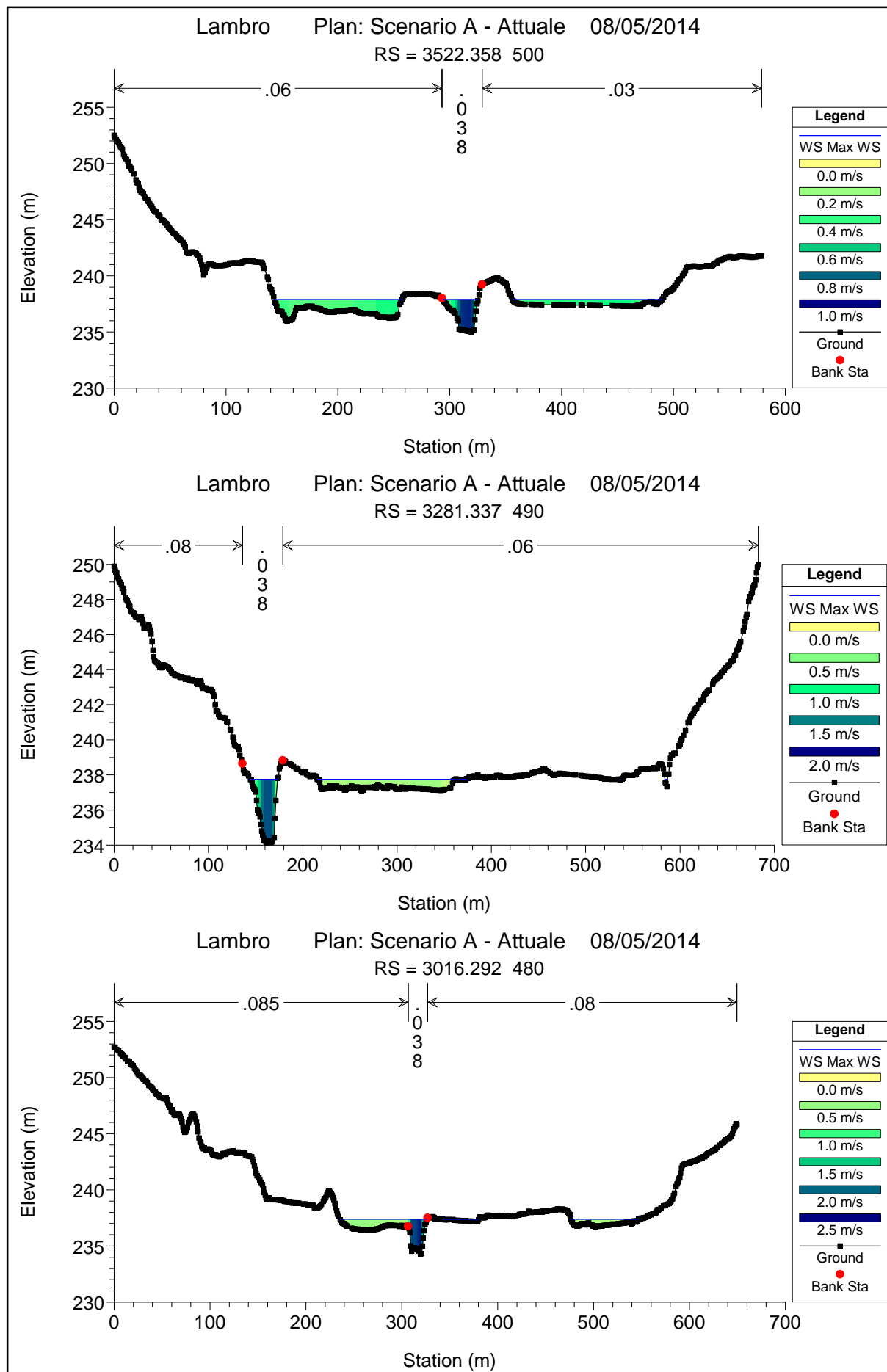


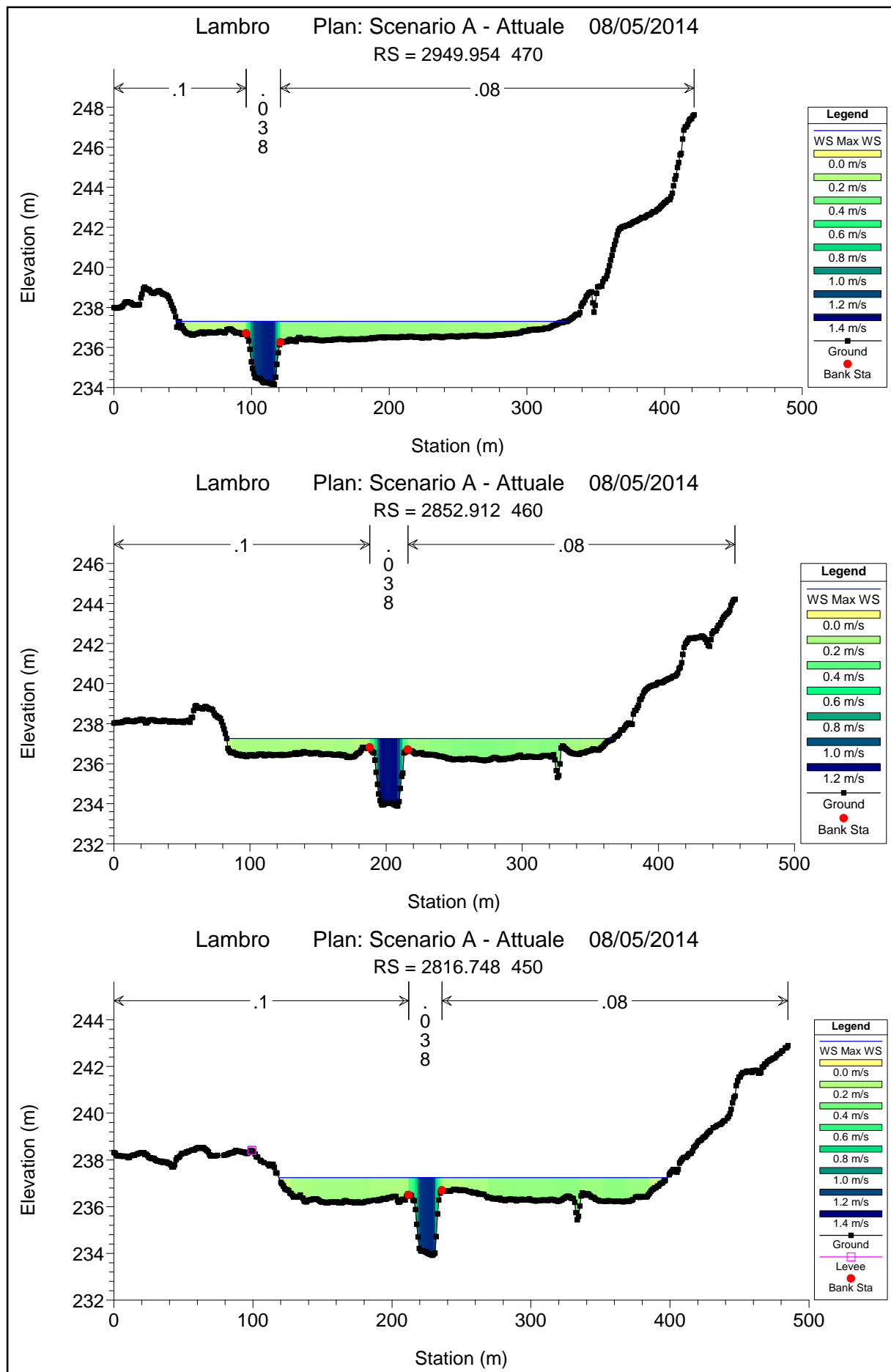


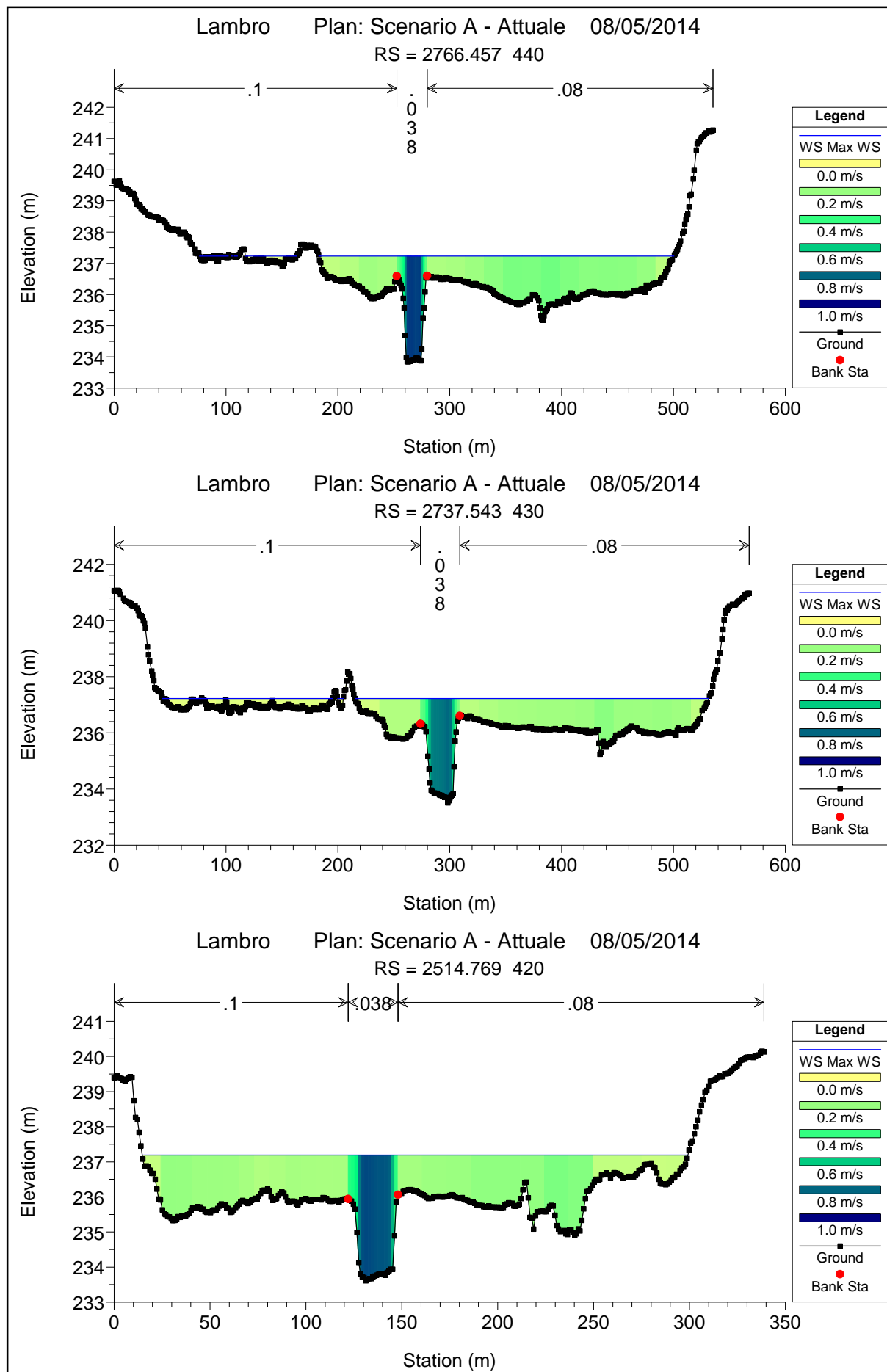


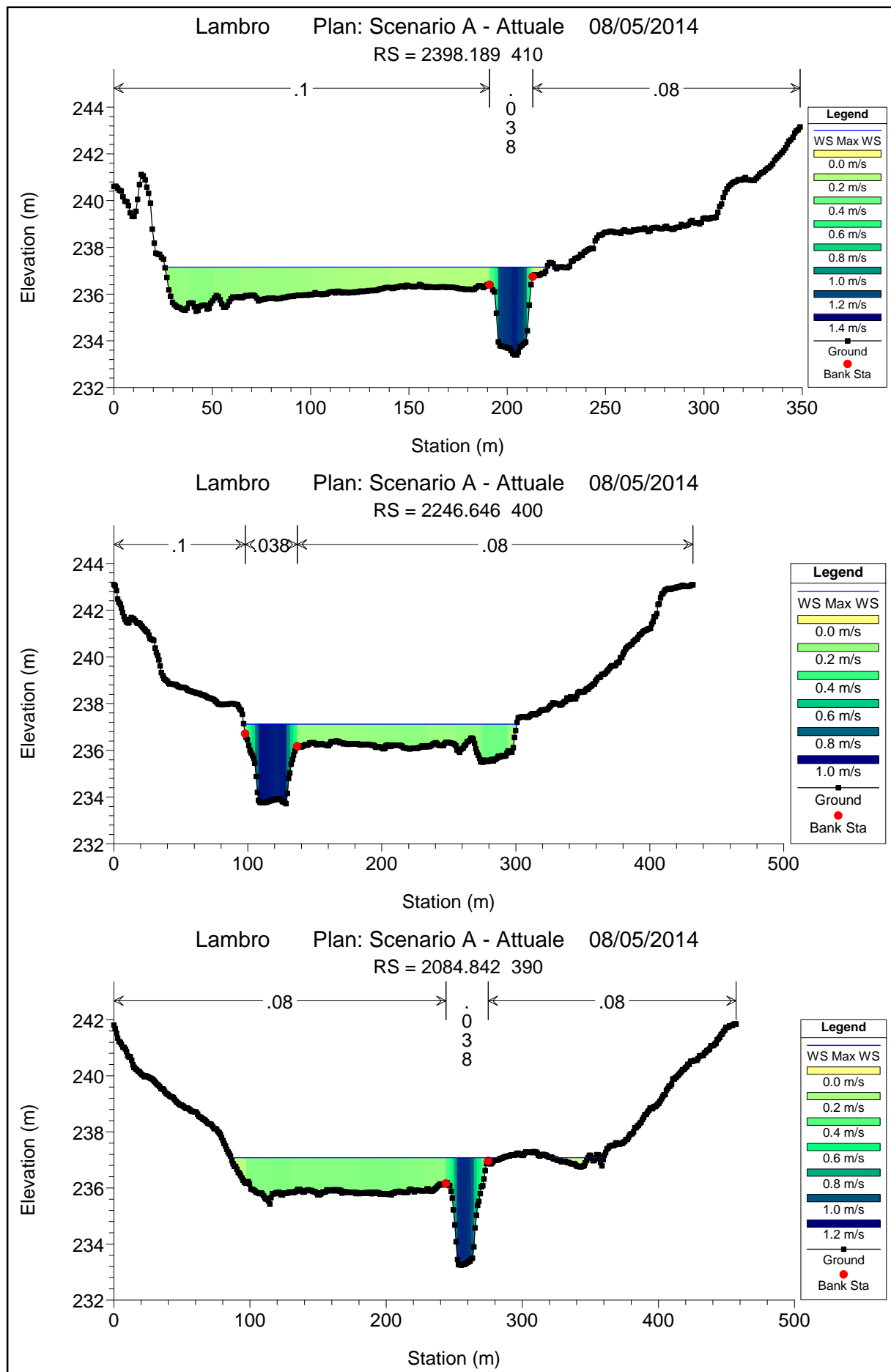


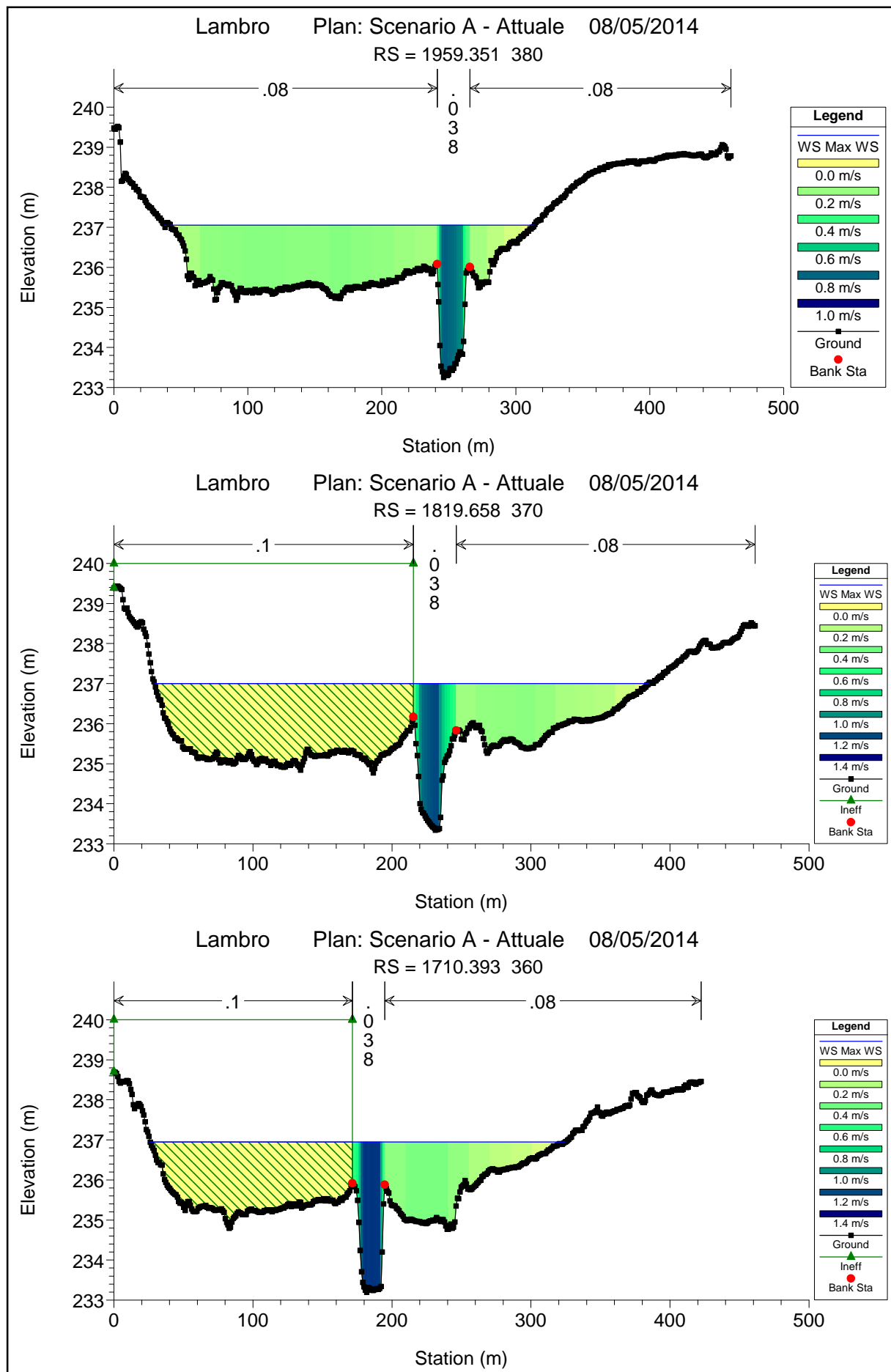


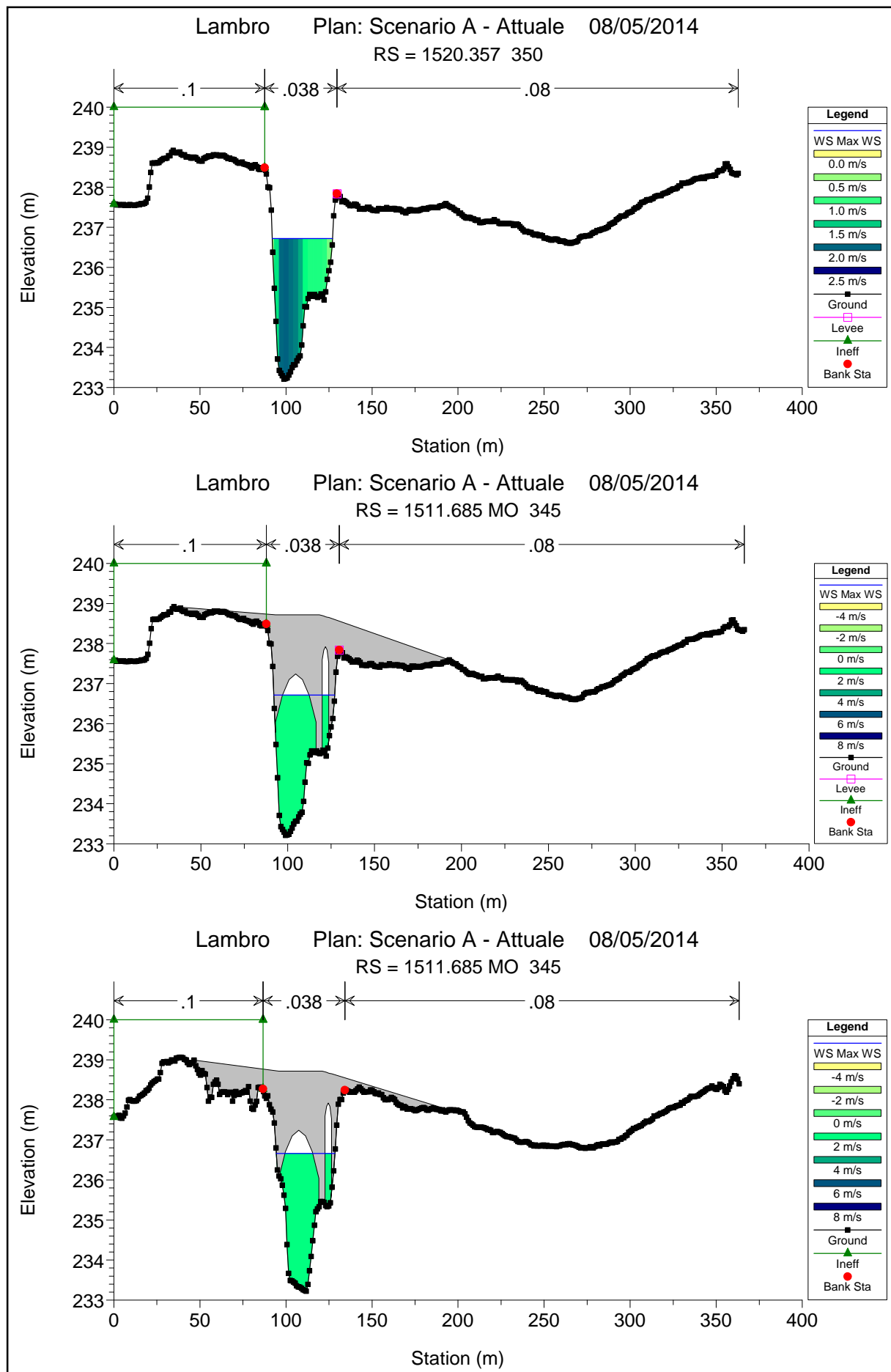


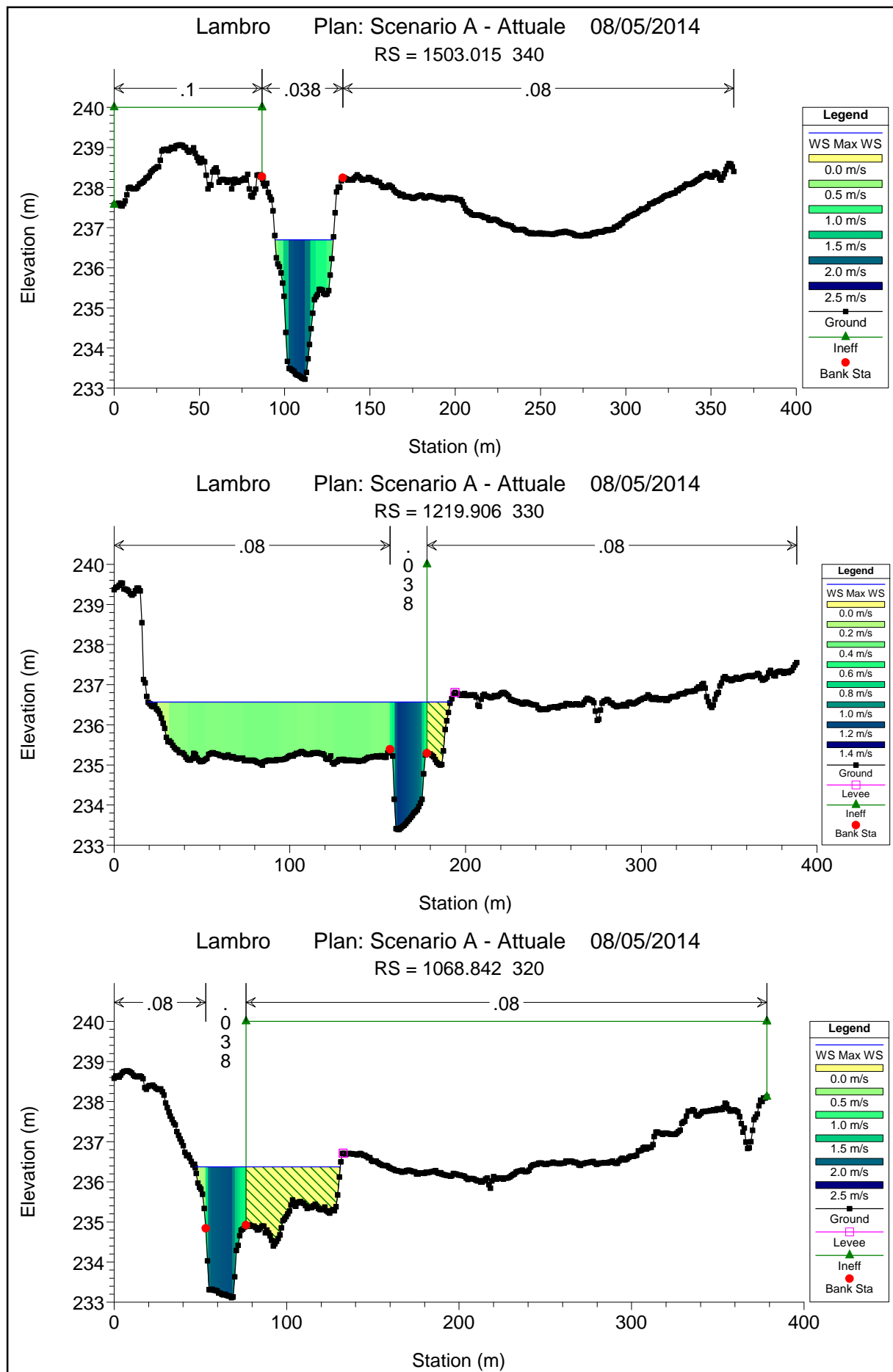




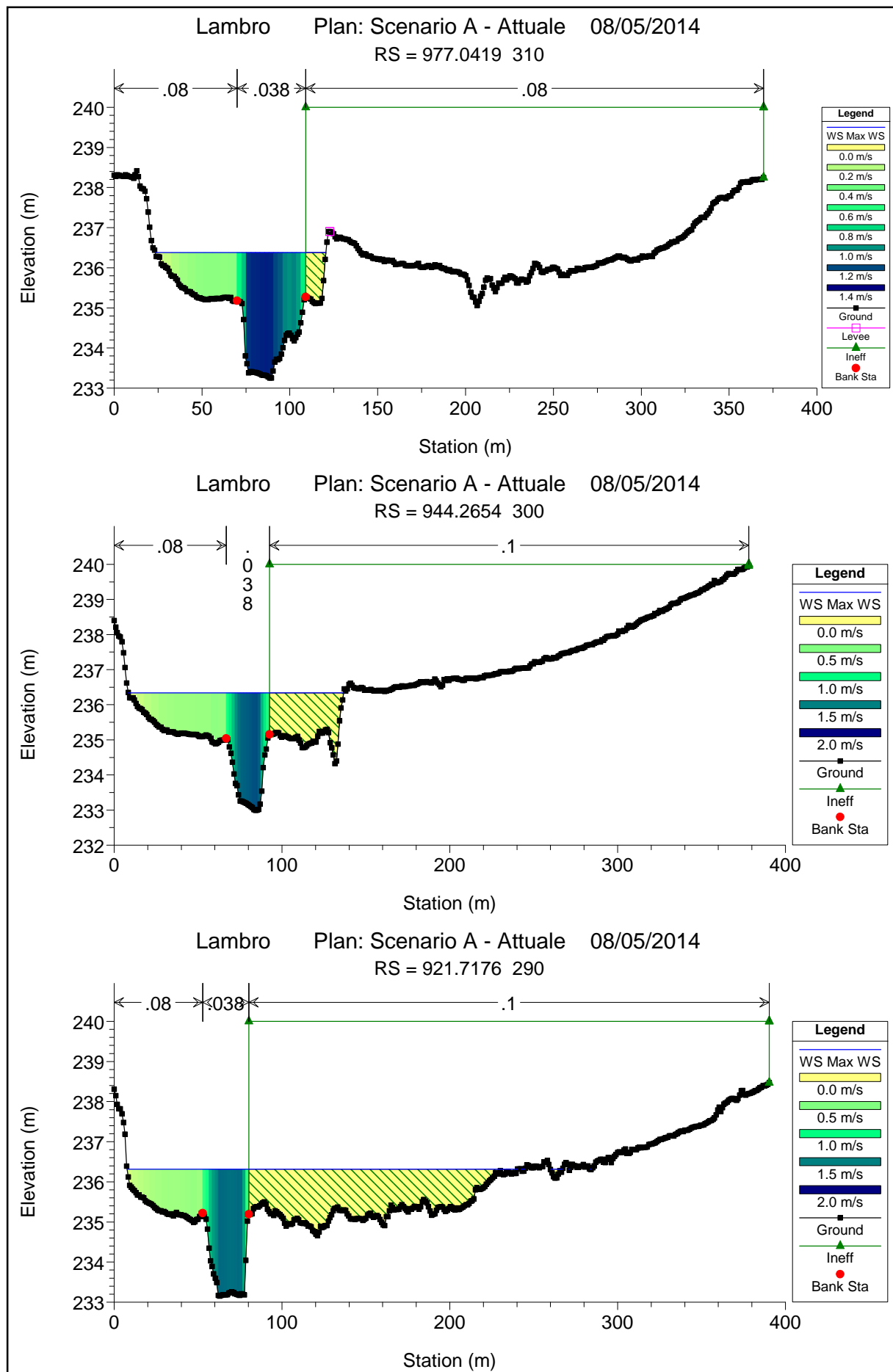


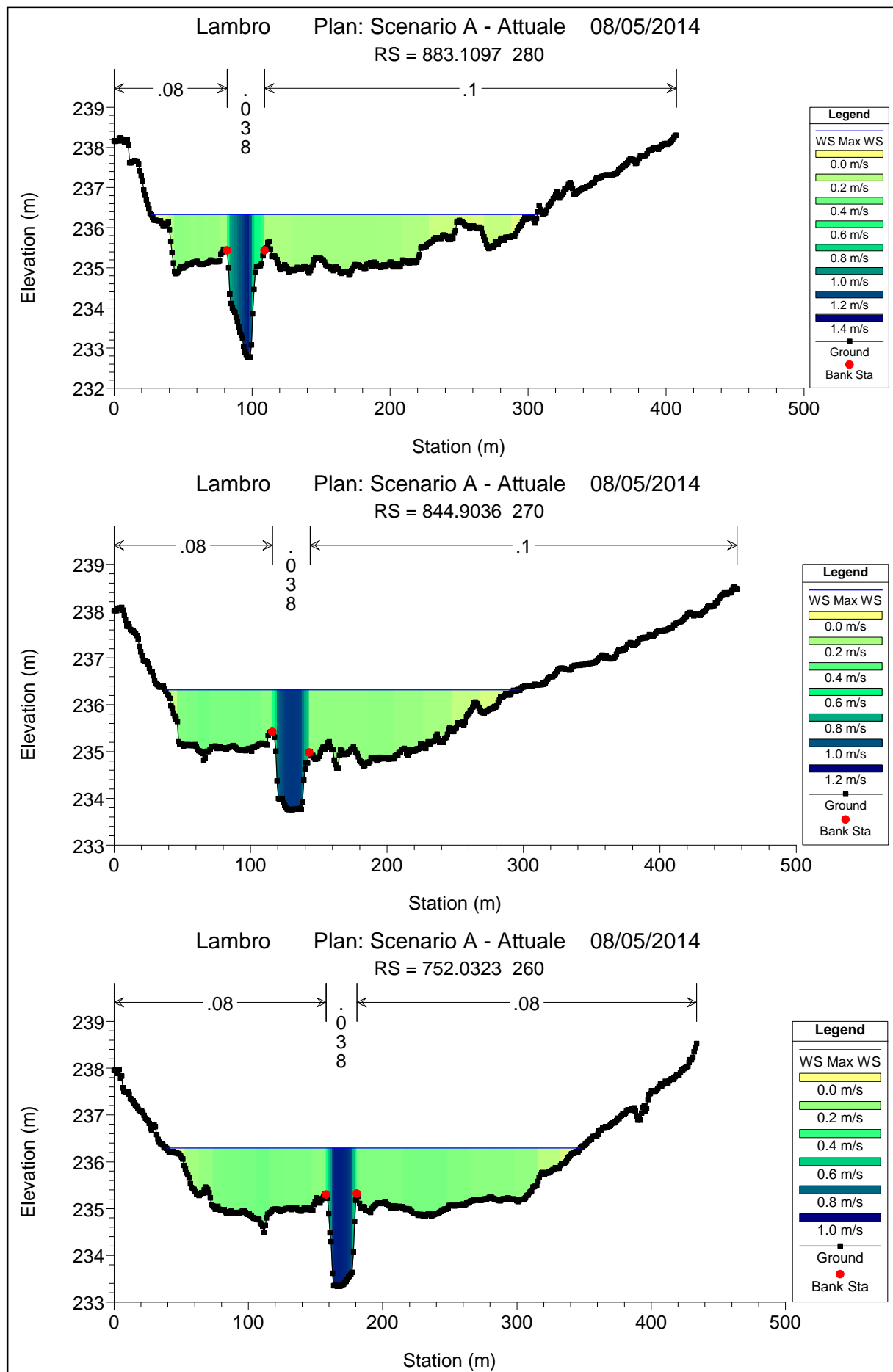


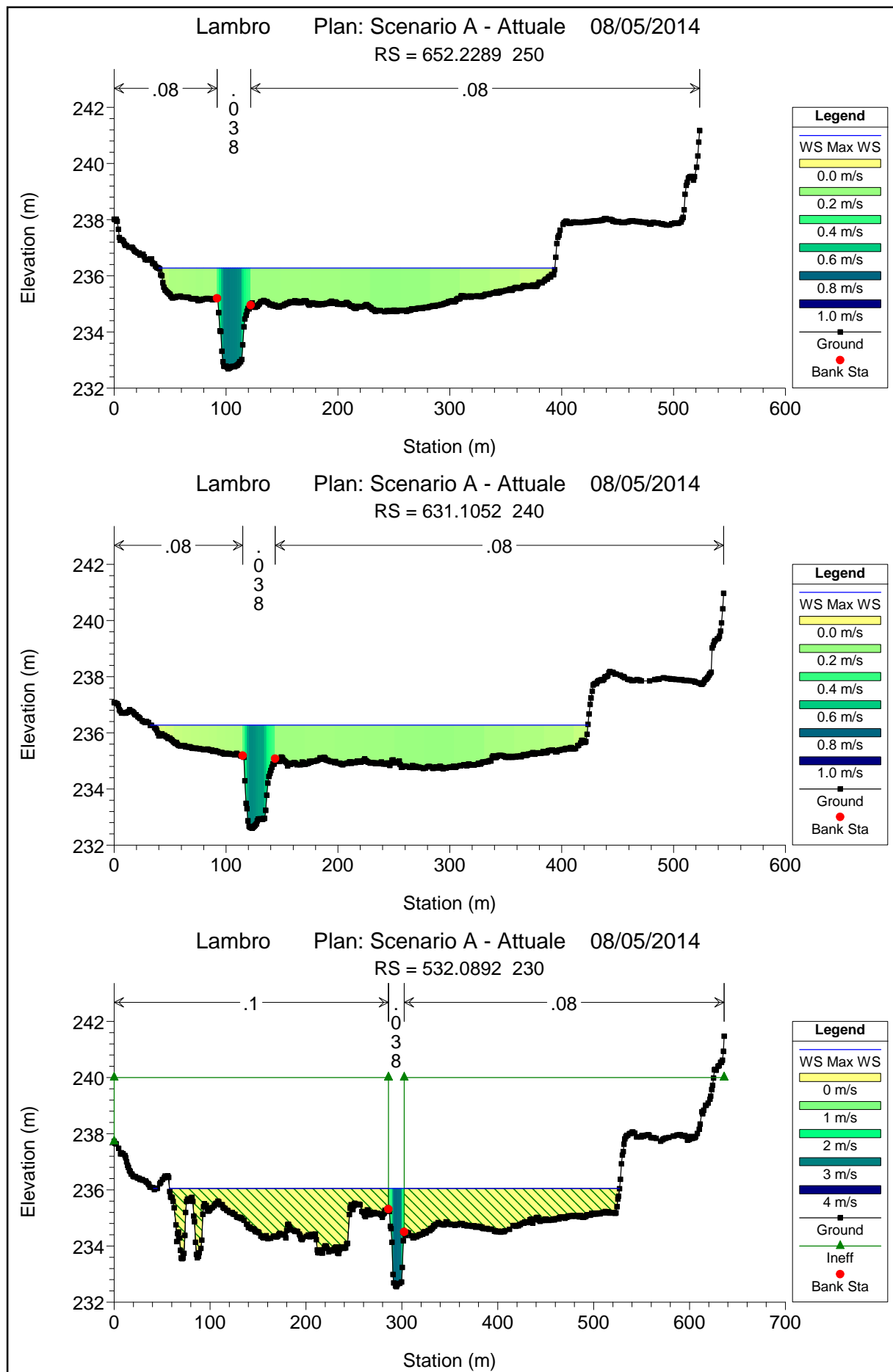


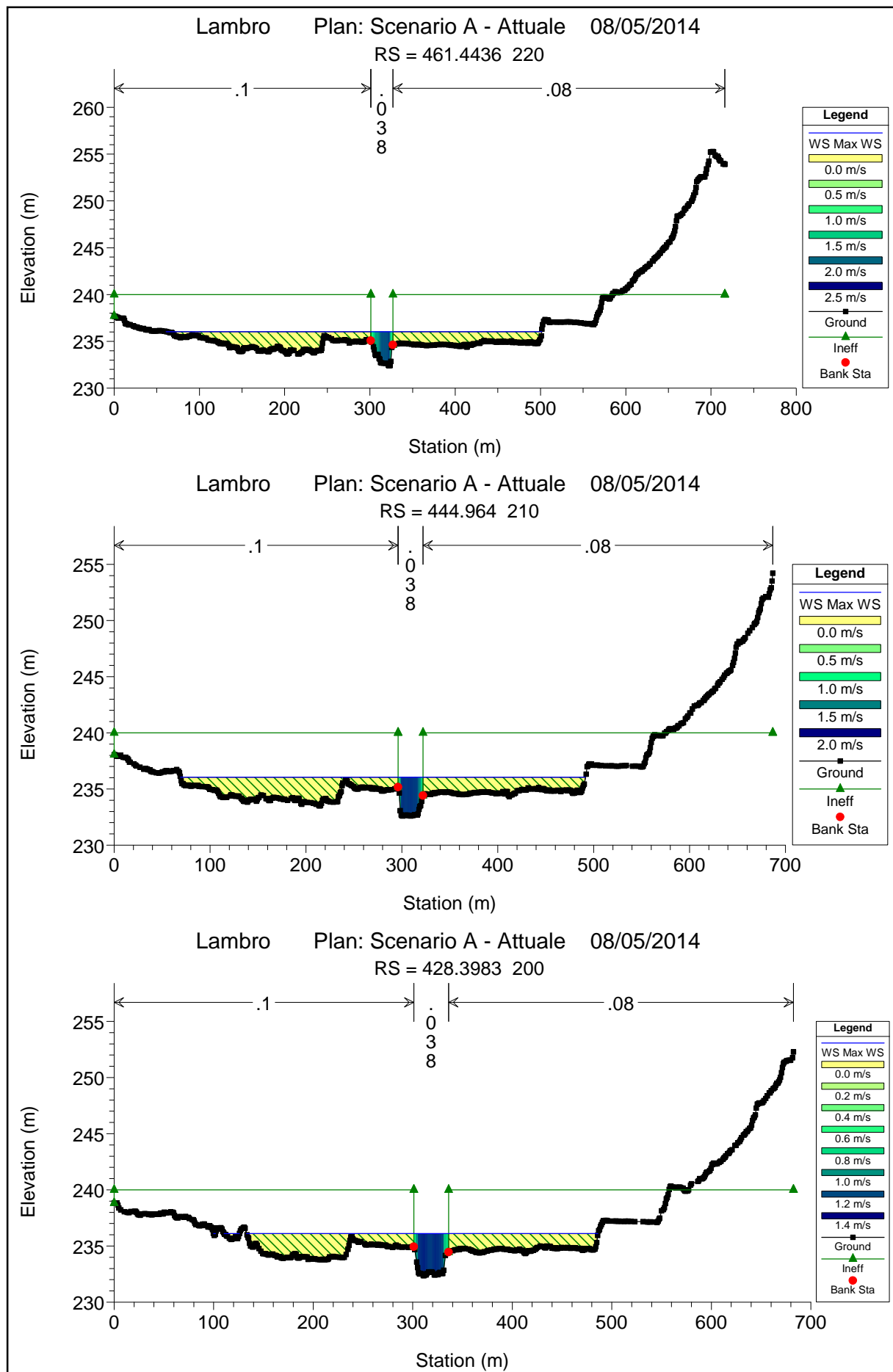


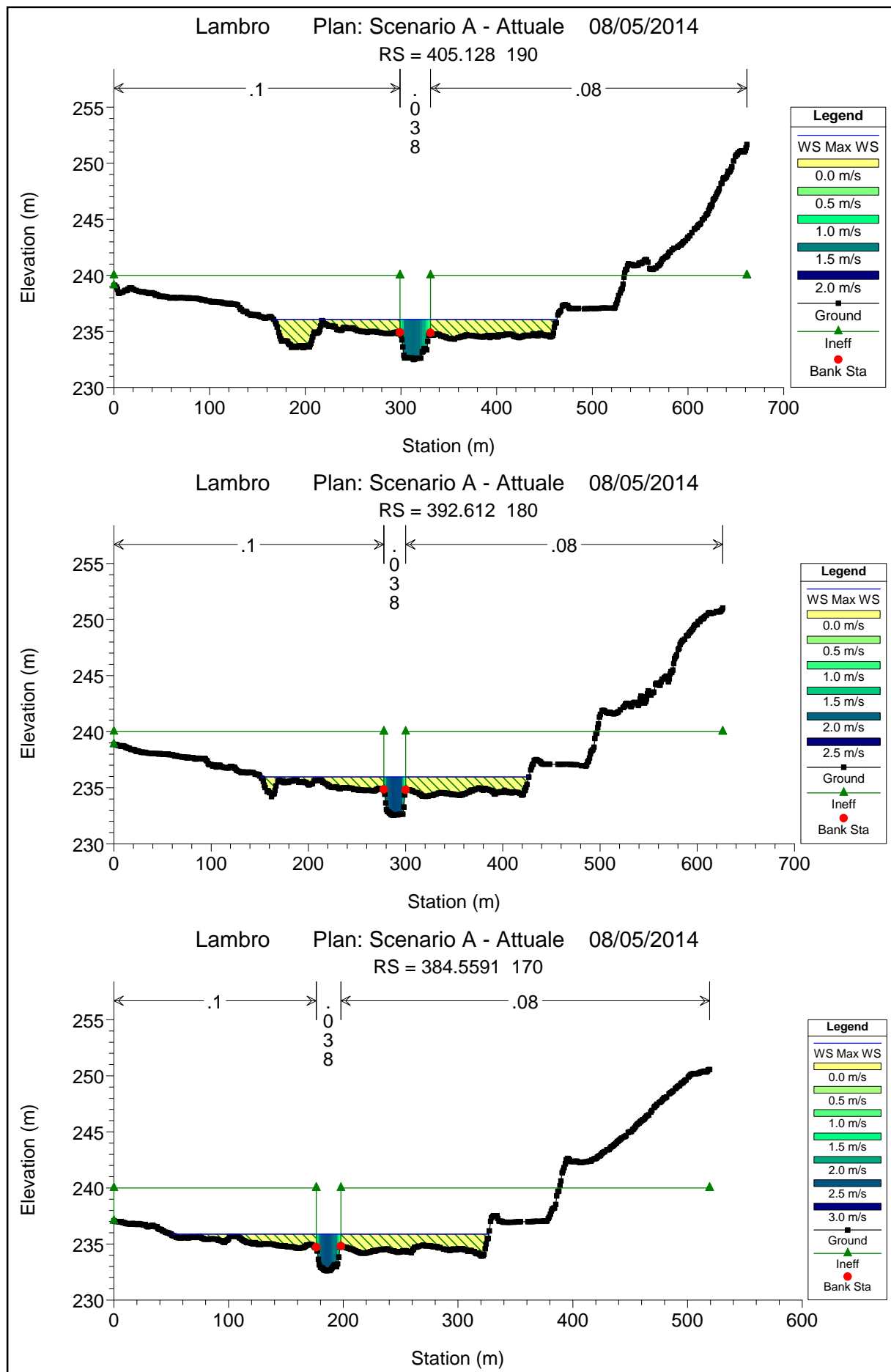


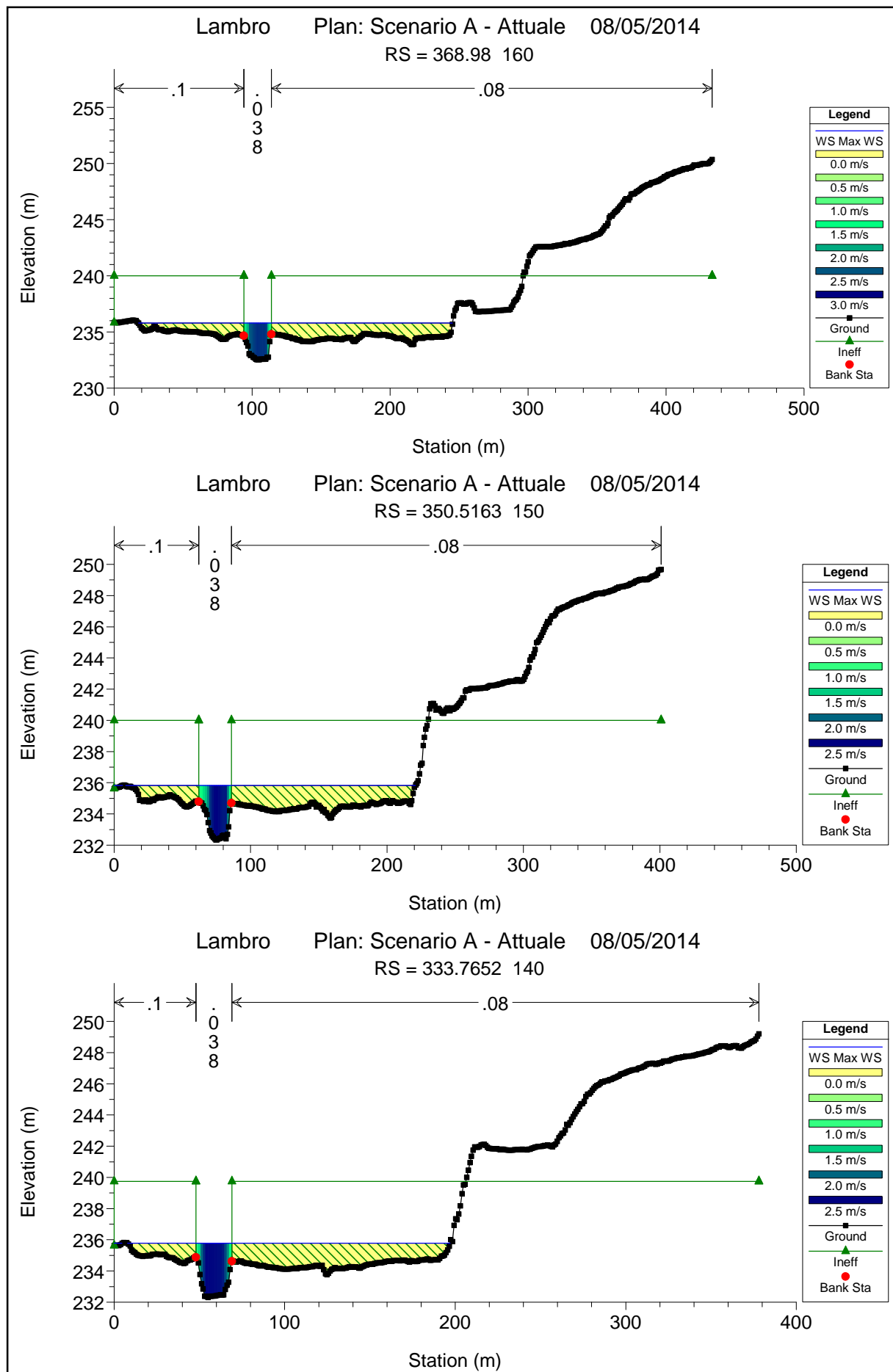


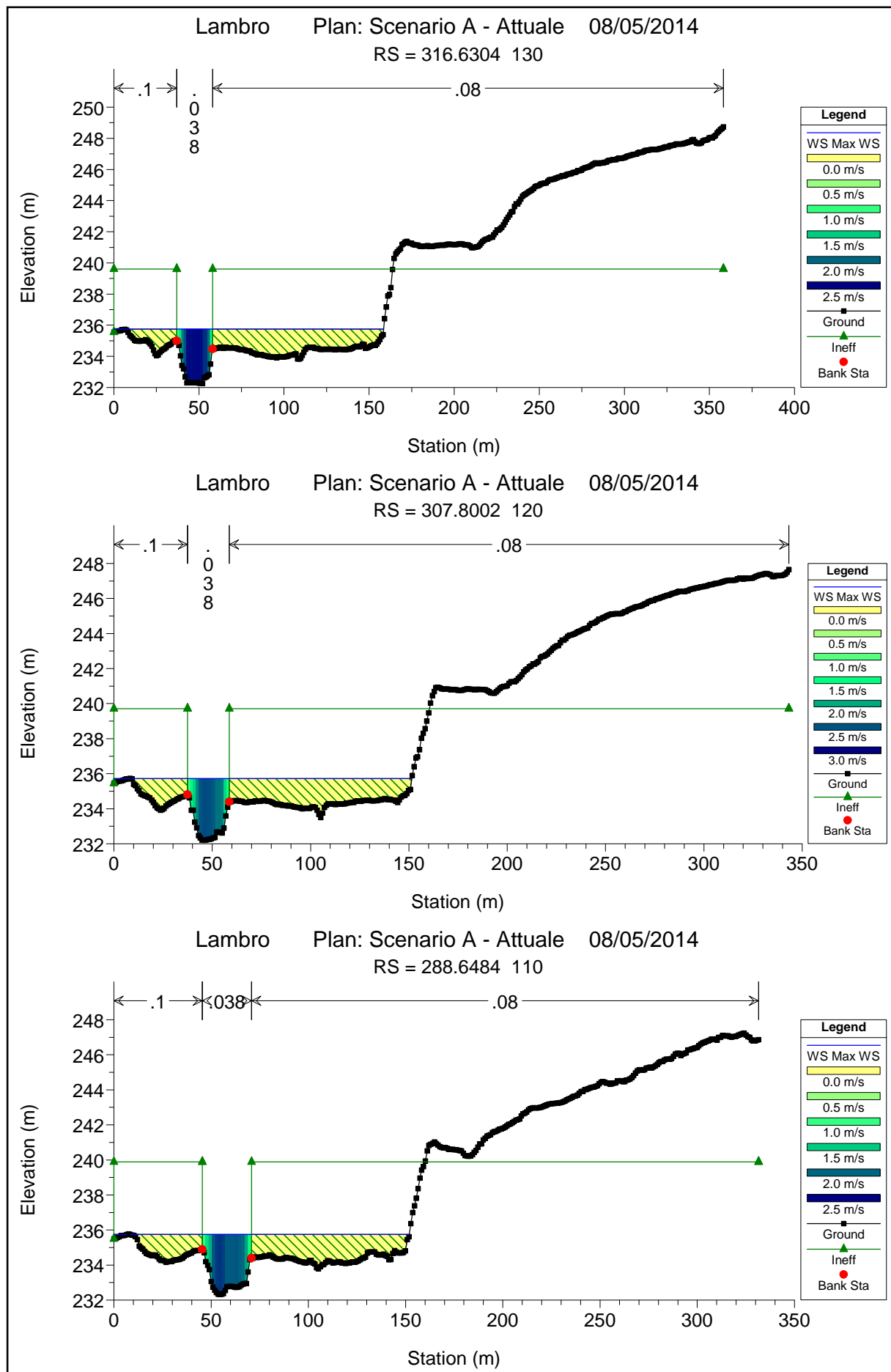




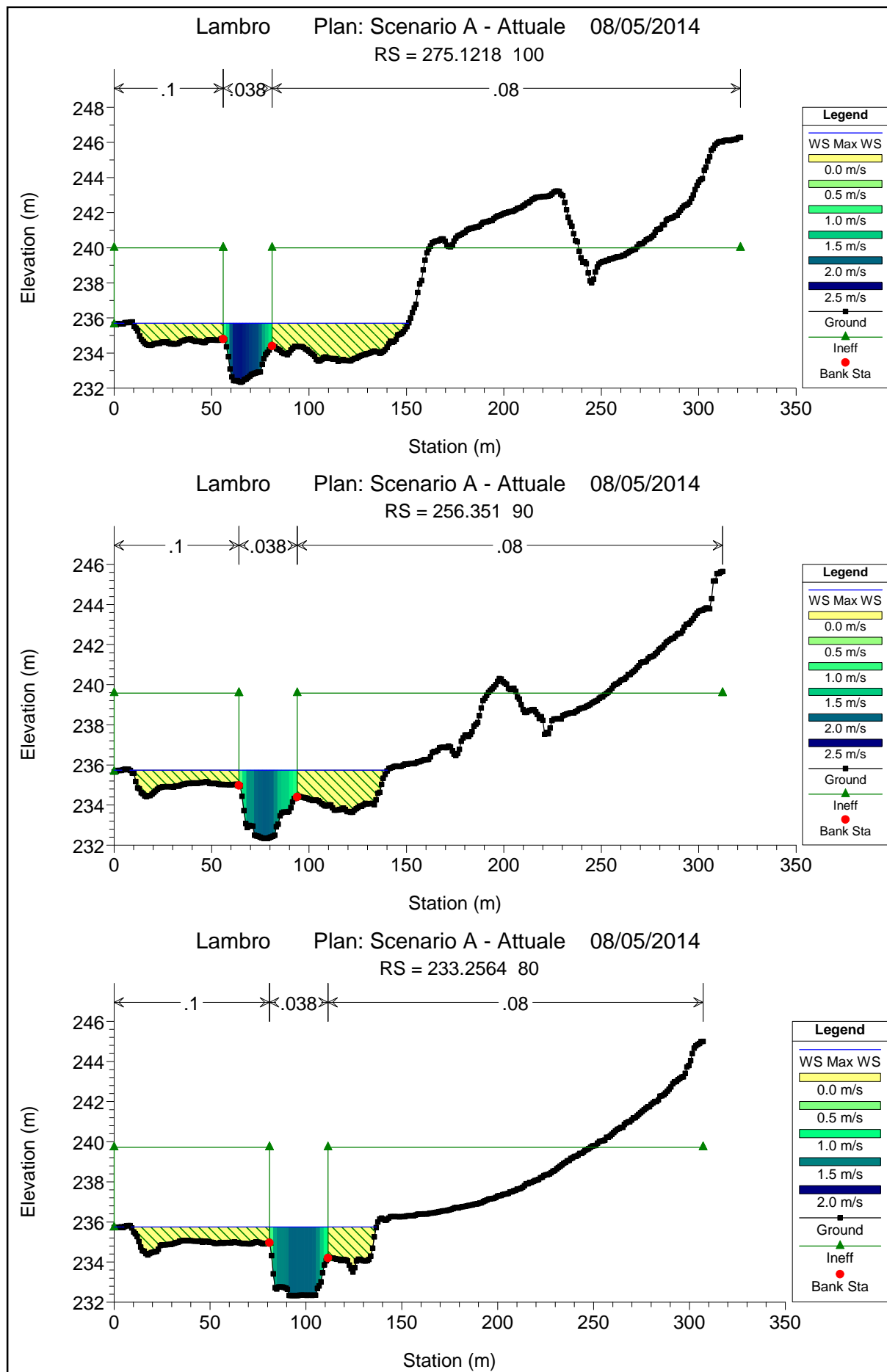


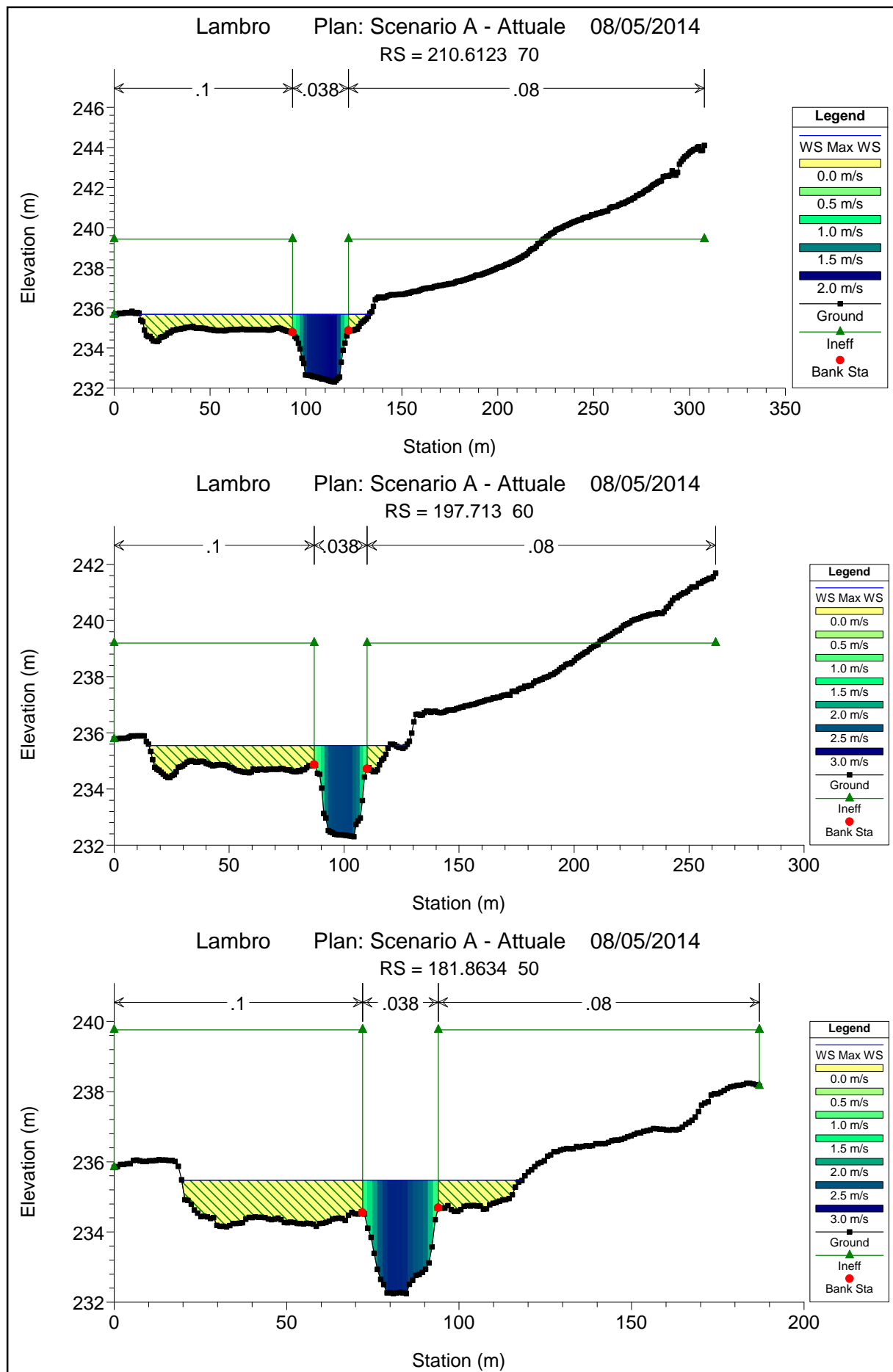


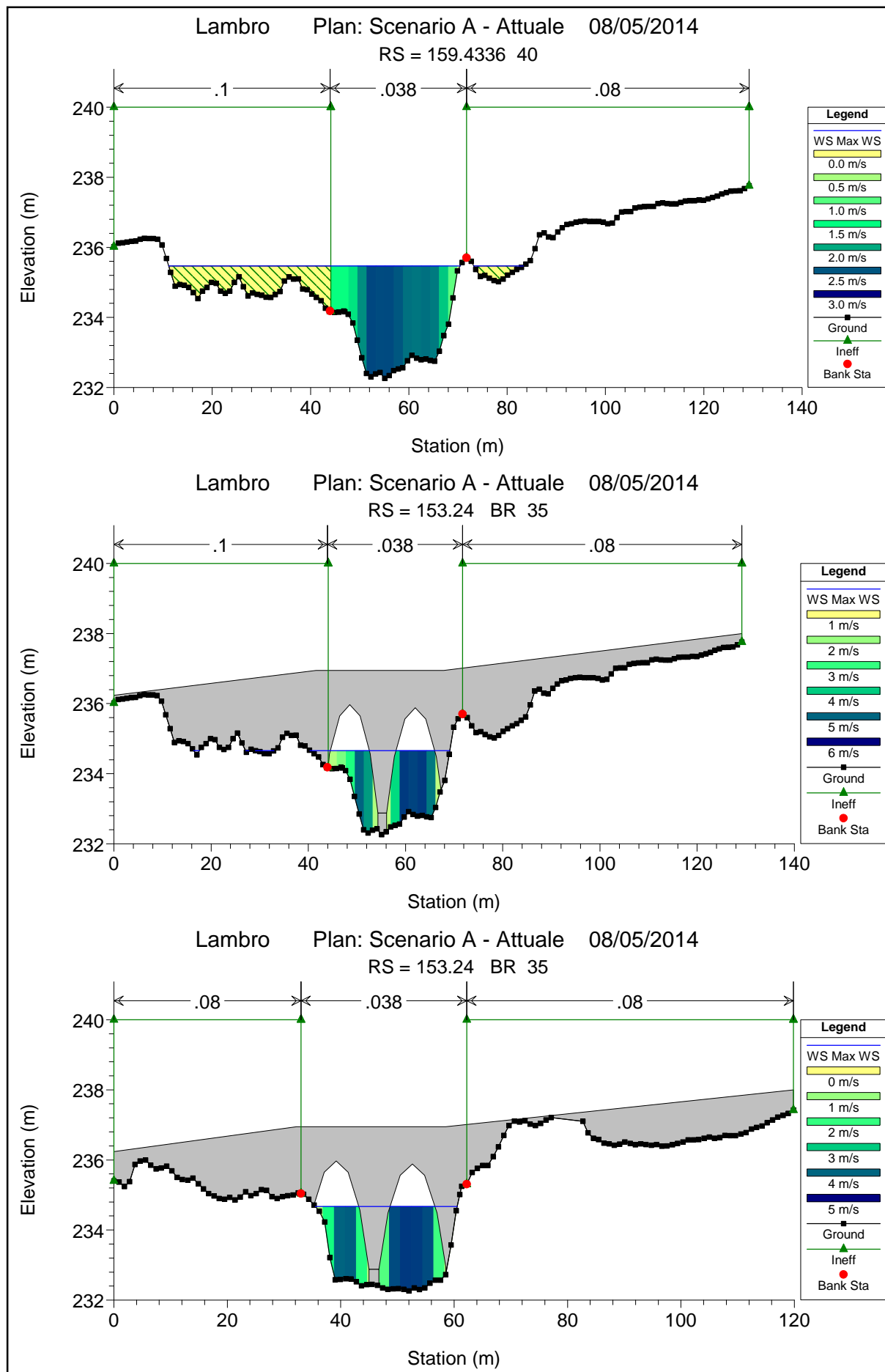


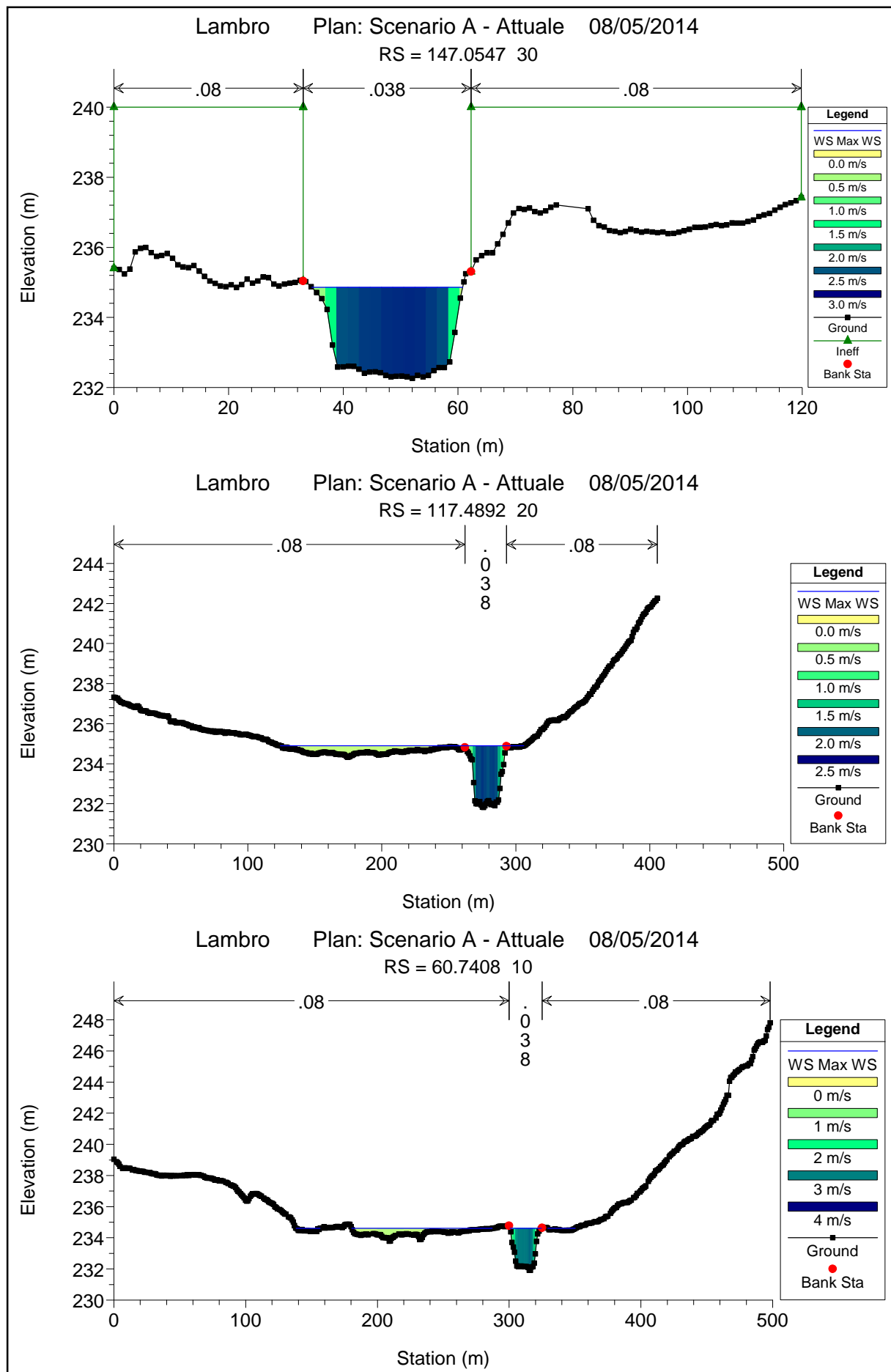


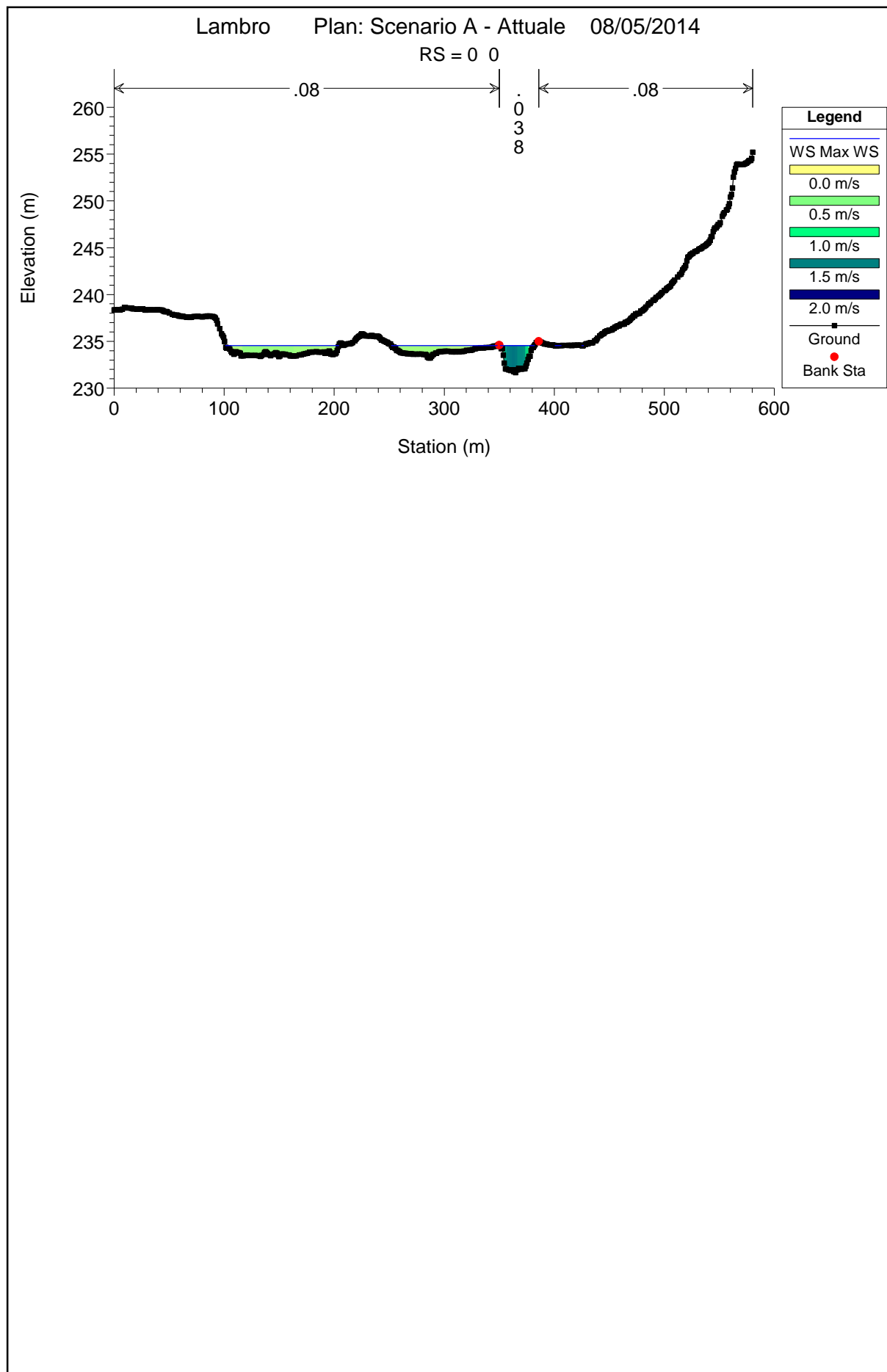














## PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

*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.

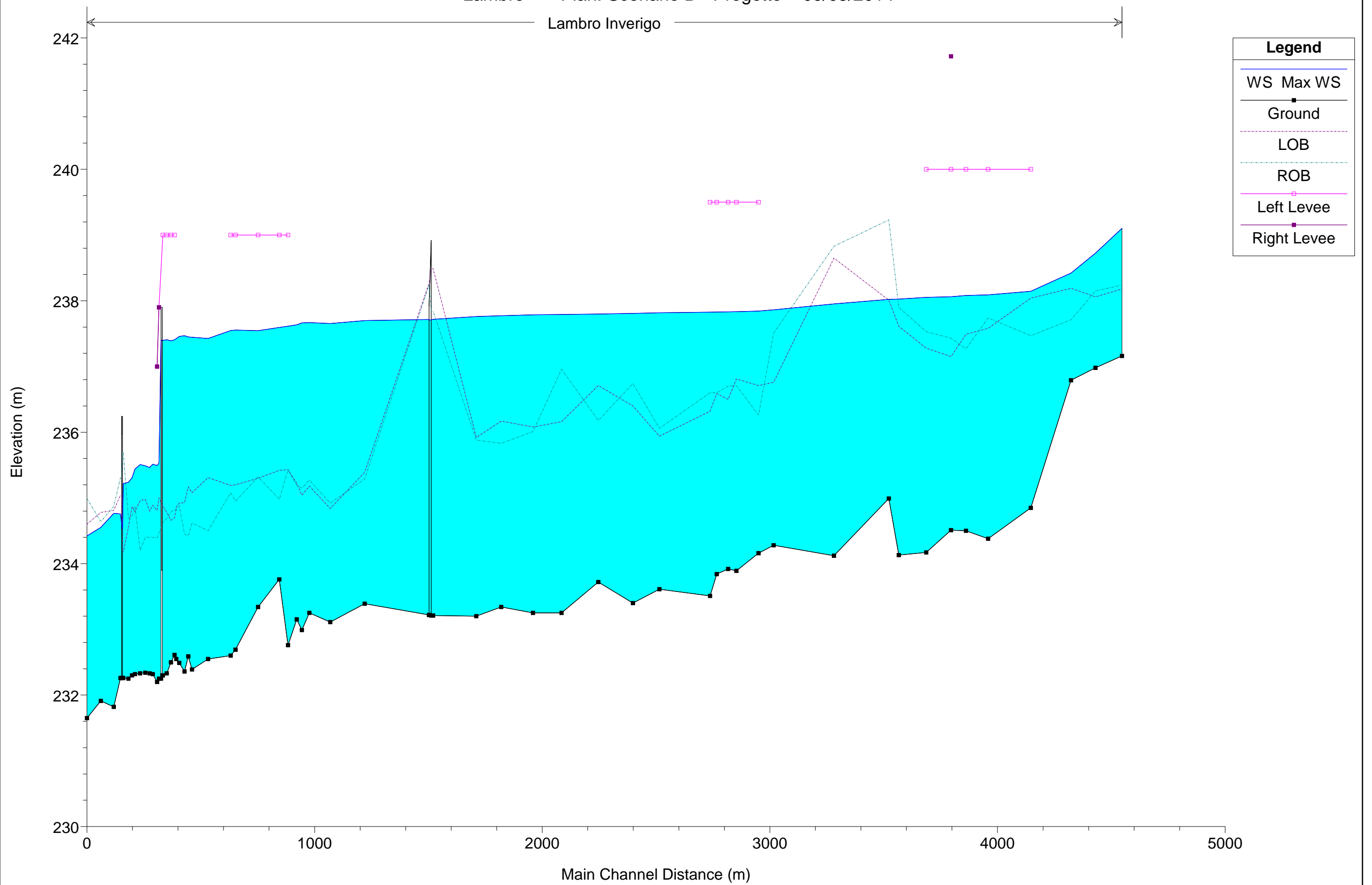
### ALLEGATO 3

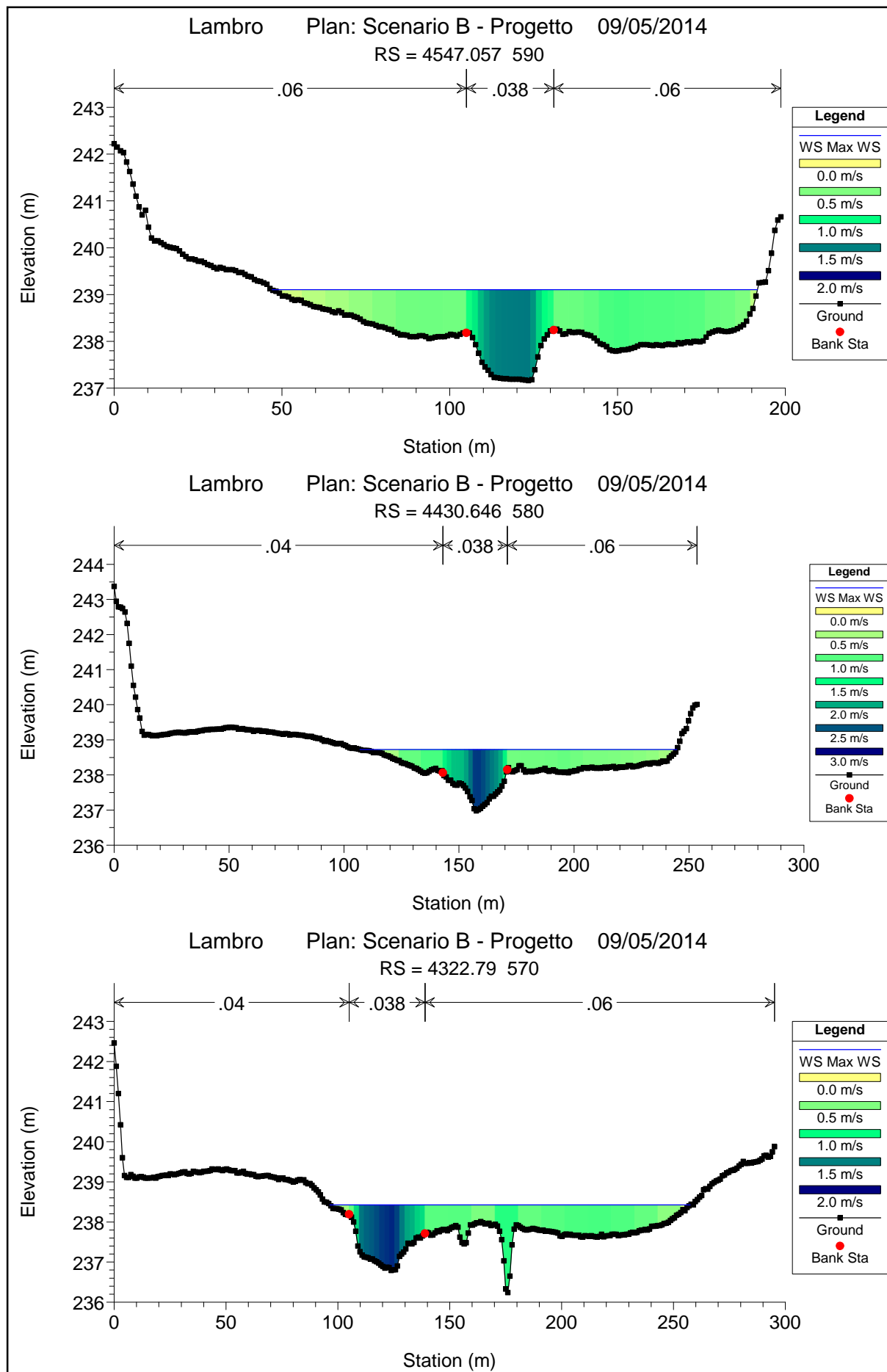
– Risultati simulazione idraulica: scenario B – Portate attuali con laminazione Inverigo

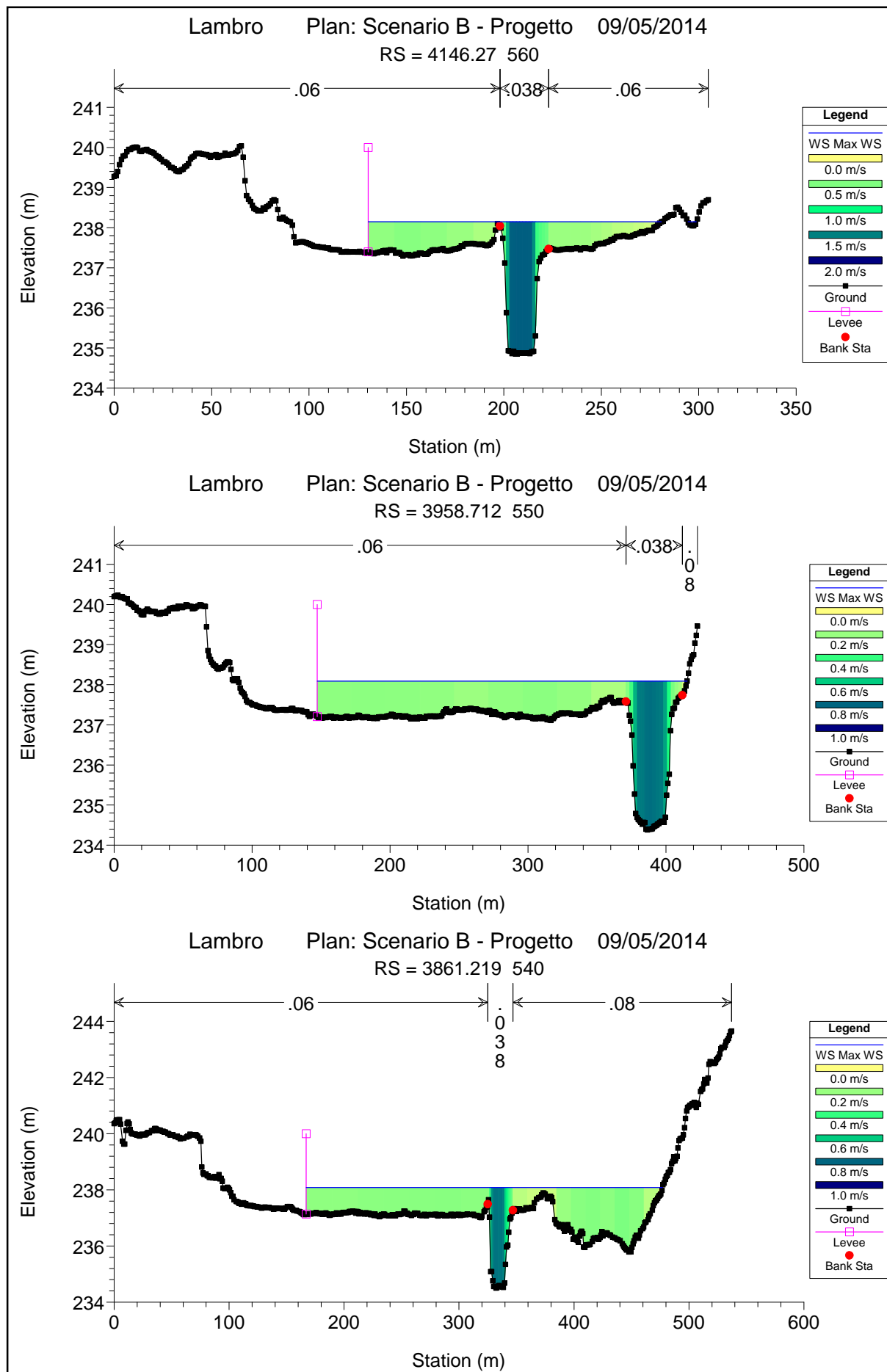
HEC-RAS Plan: B - Progetto River: Lambro Reach: Inverigo Profile: Max WS

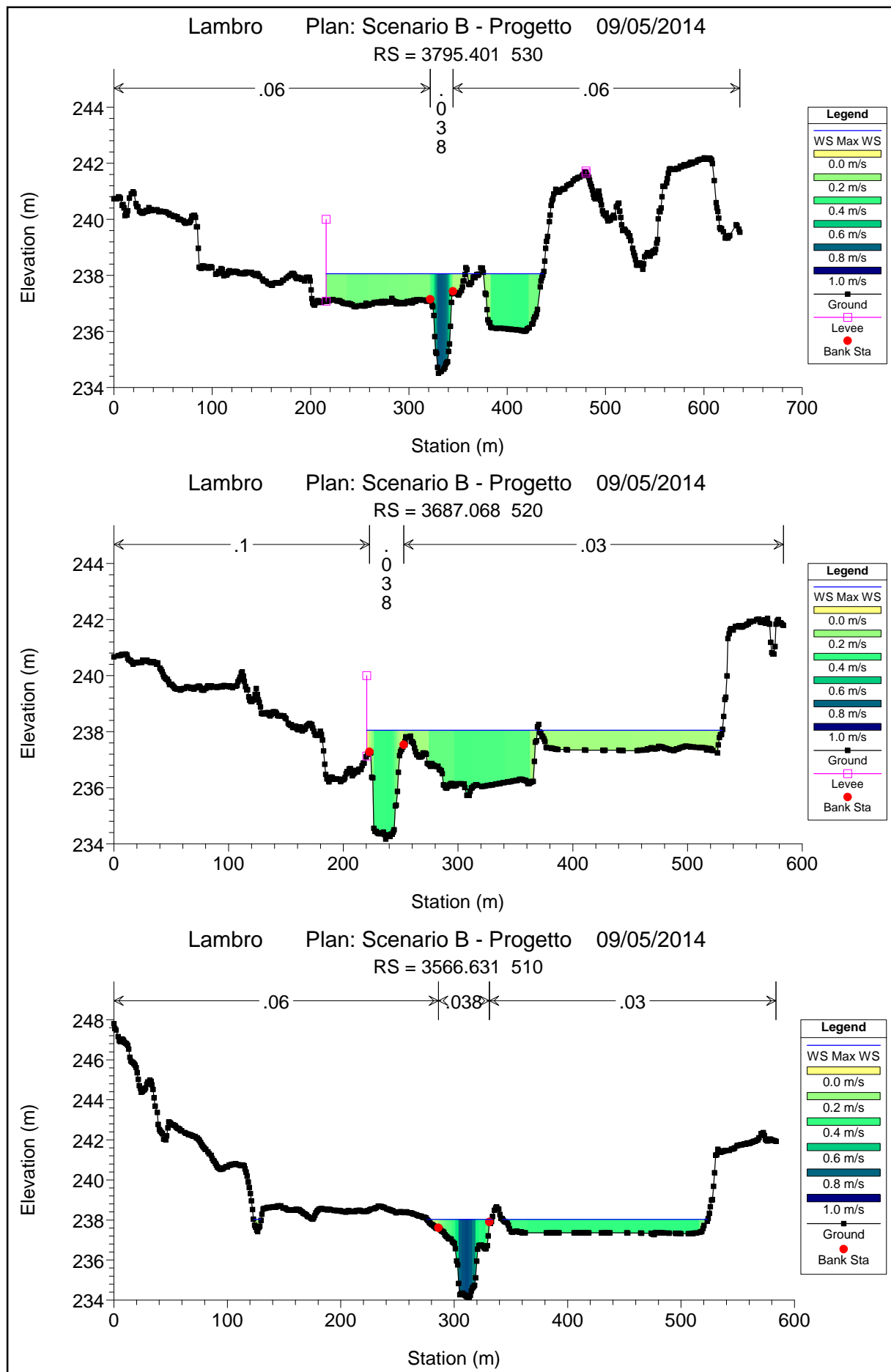
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Inverigo	4547.057 590	Max WS	115.10	237.16	239.10	238.54	239.16	0.001488	1.37	141.12	144.63	0.35
Inverigo	4430.646 580	Max WS	115.02	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

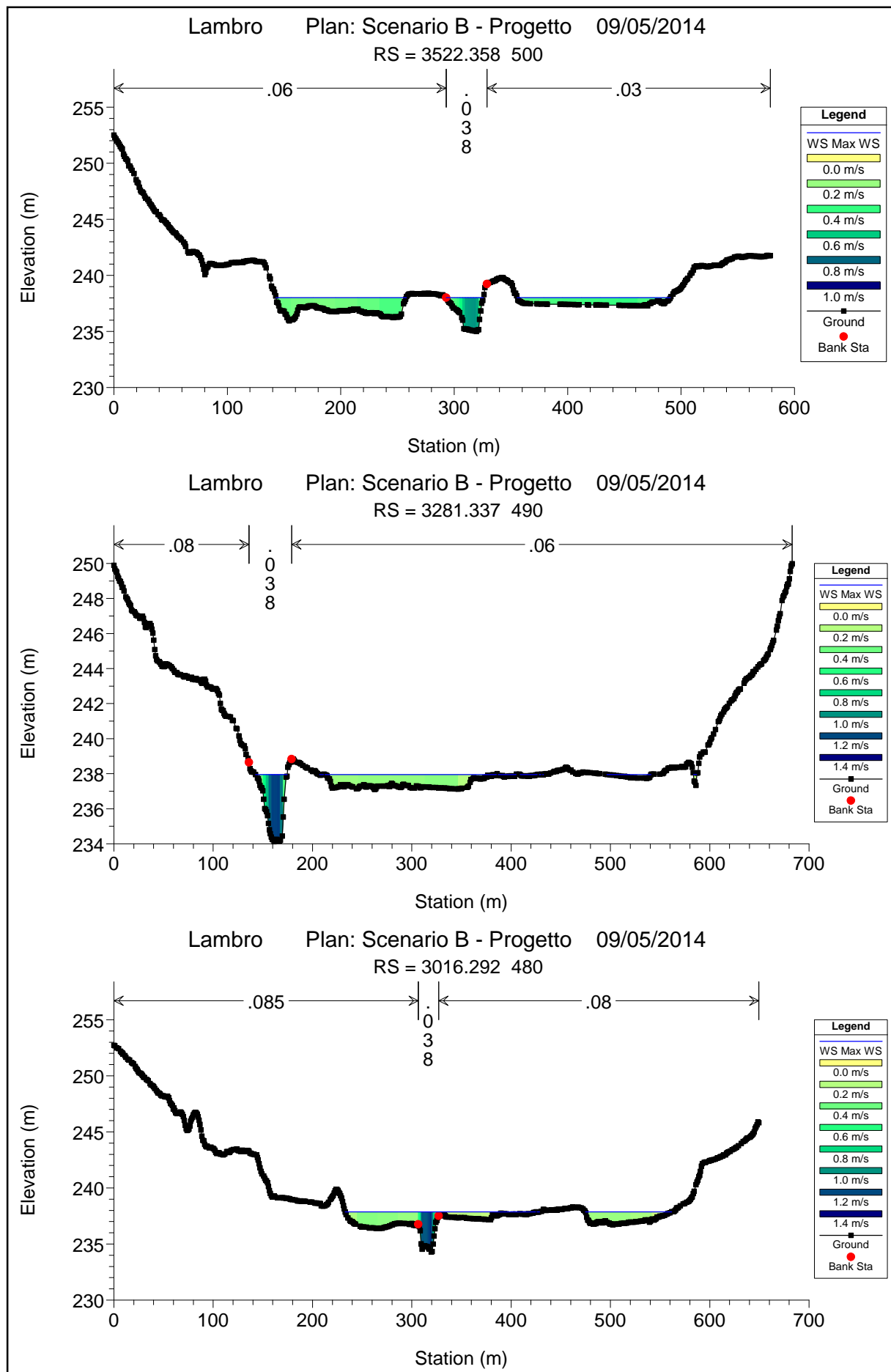


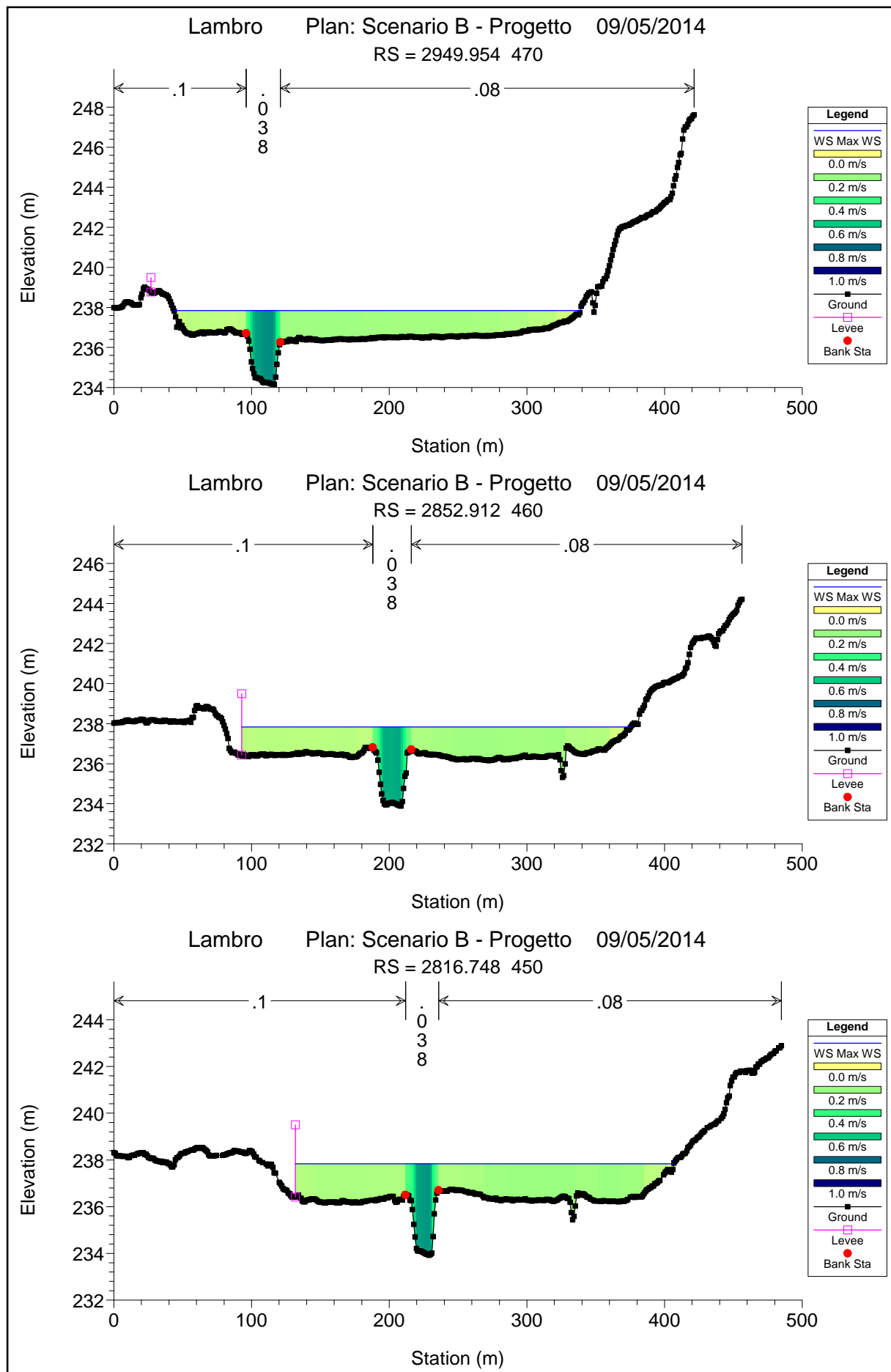


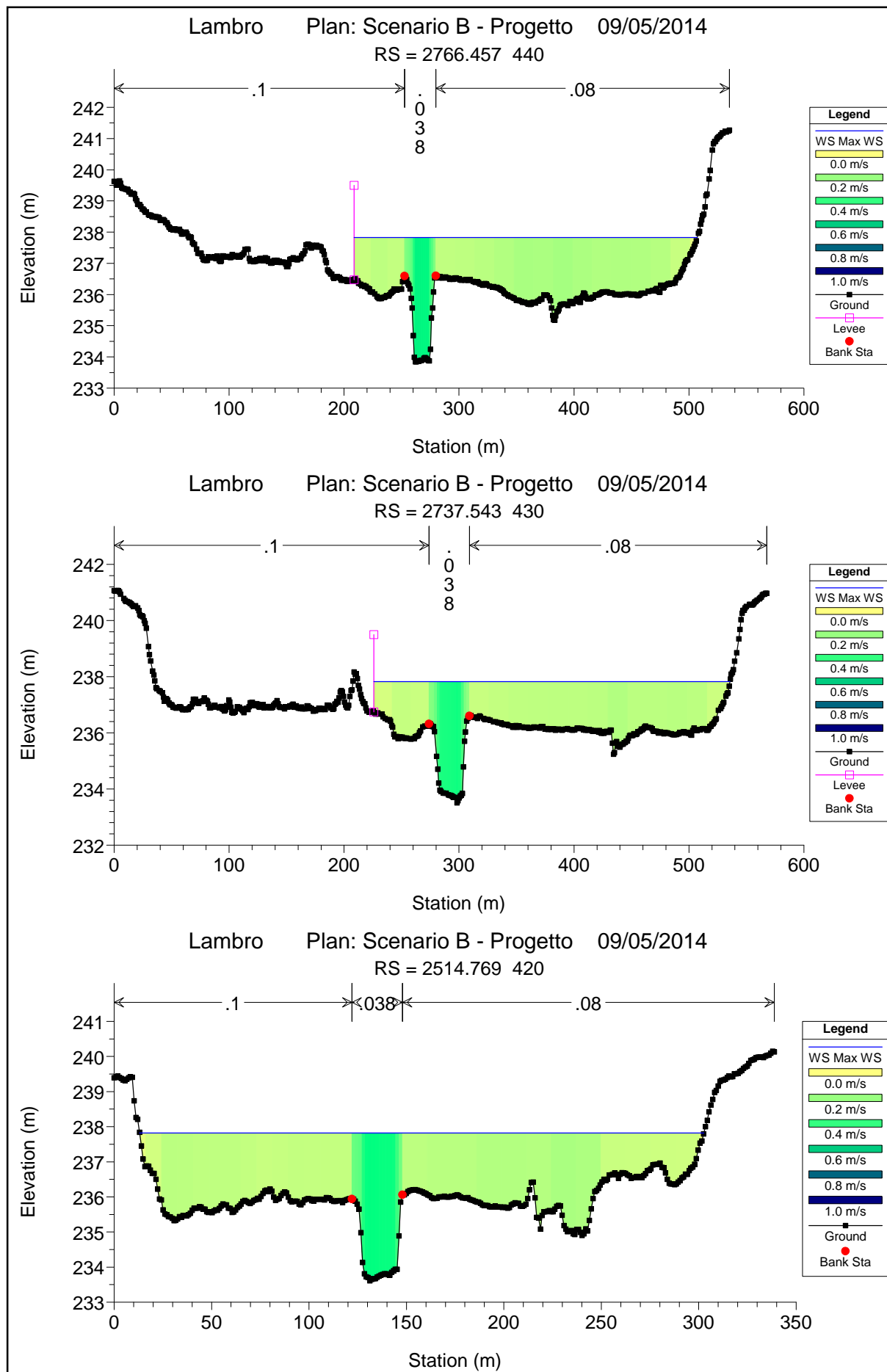


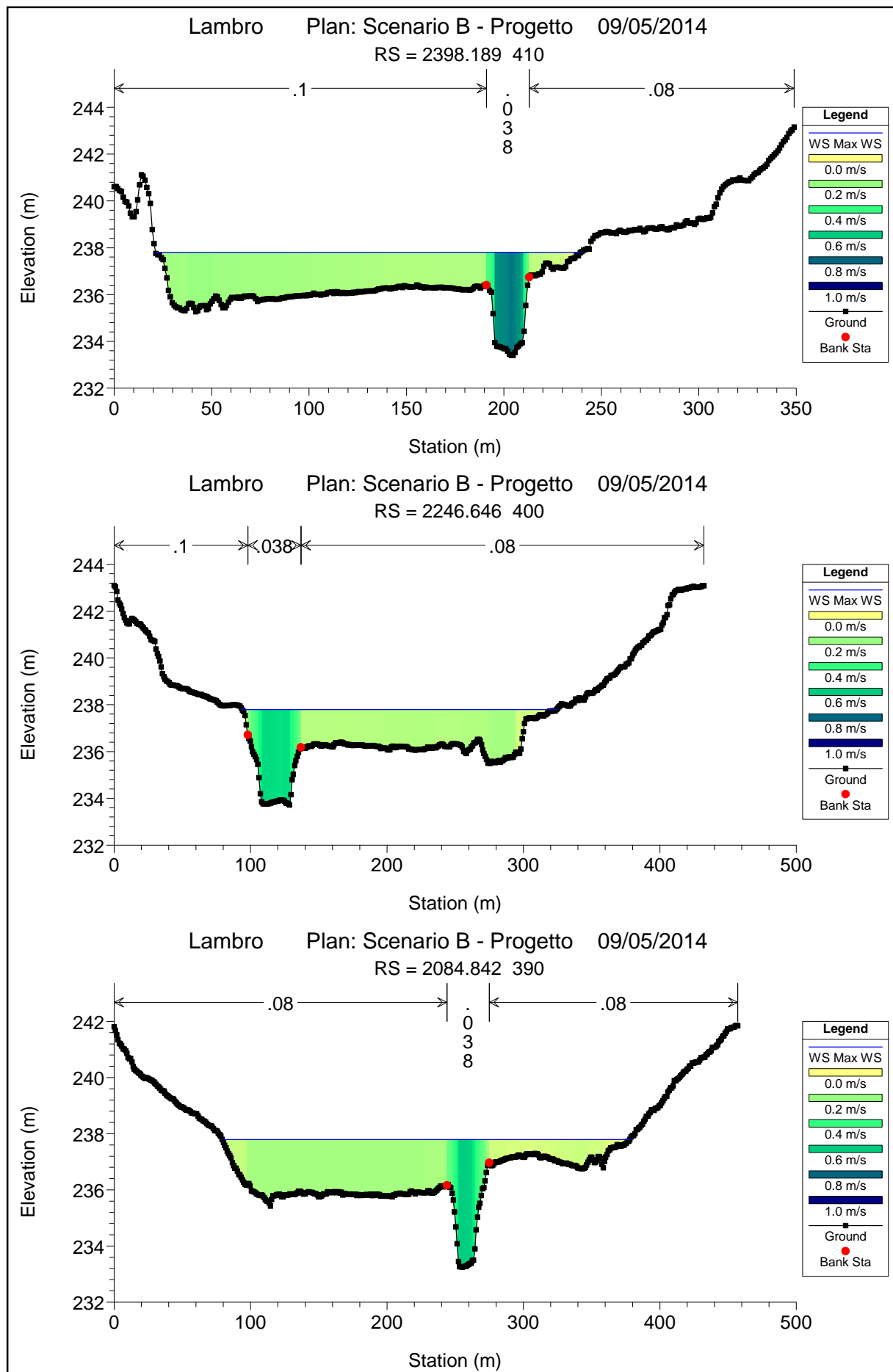




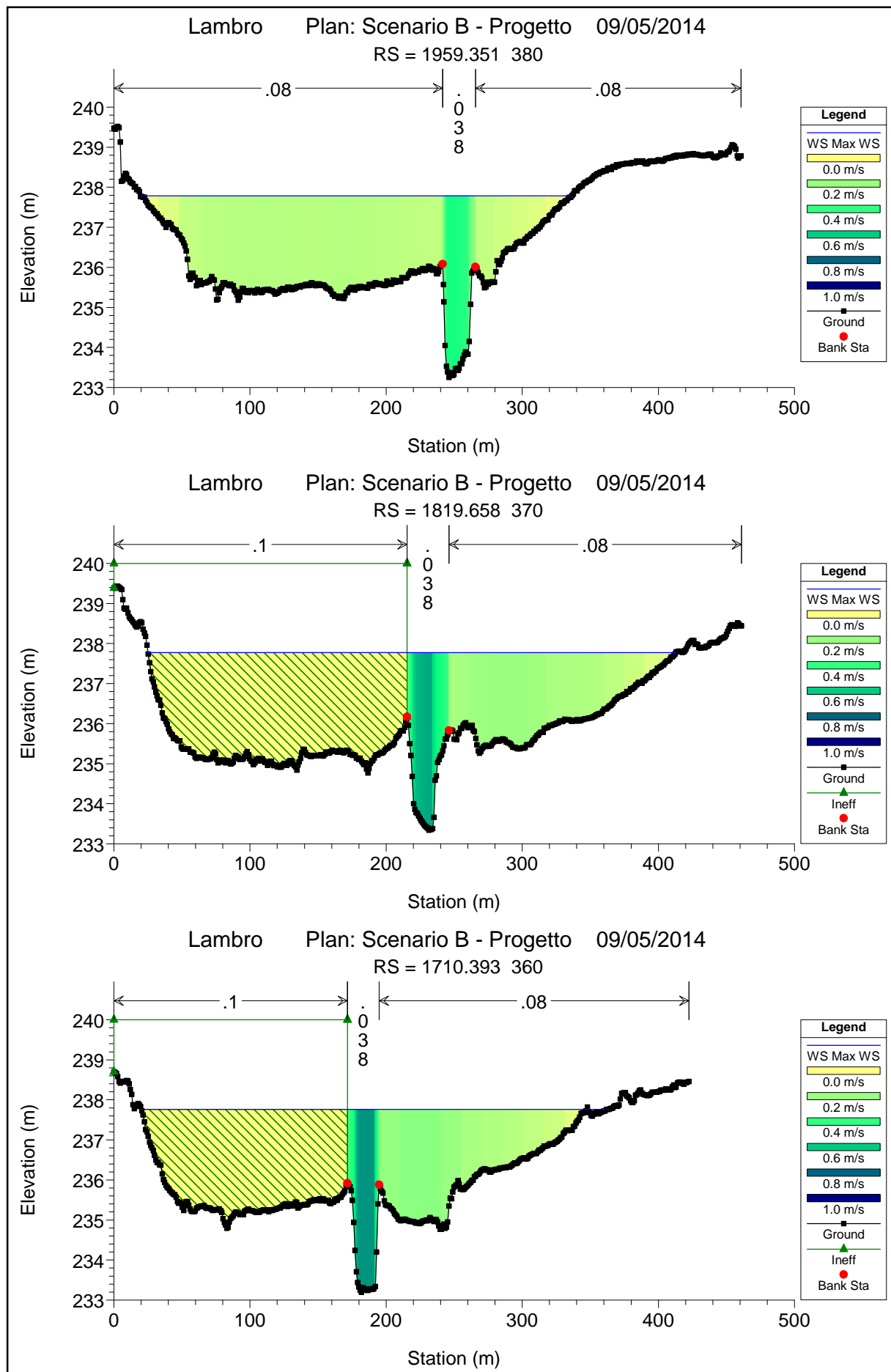


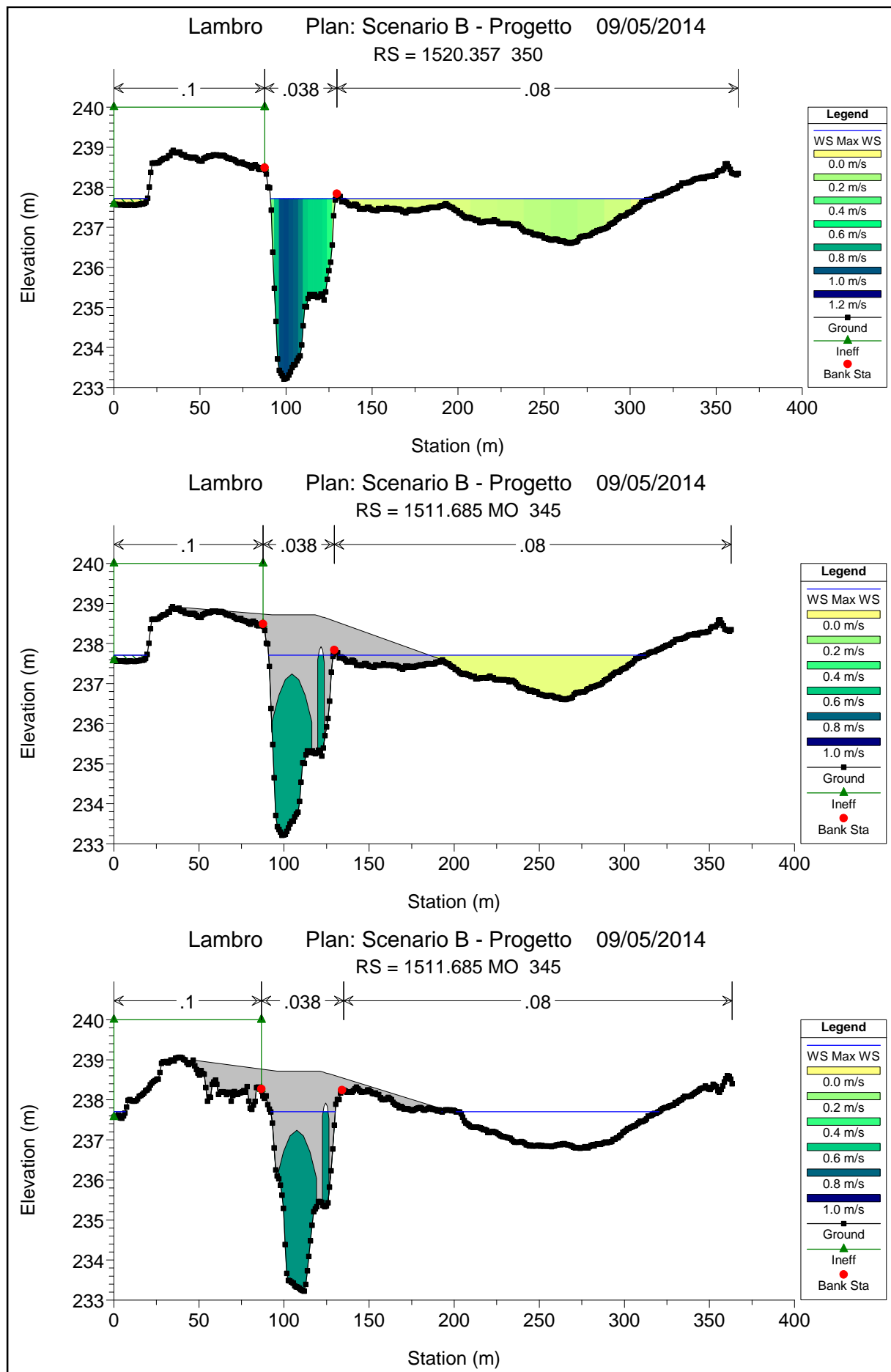


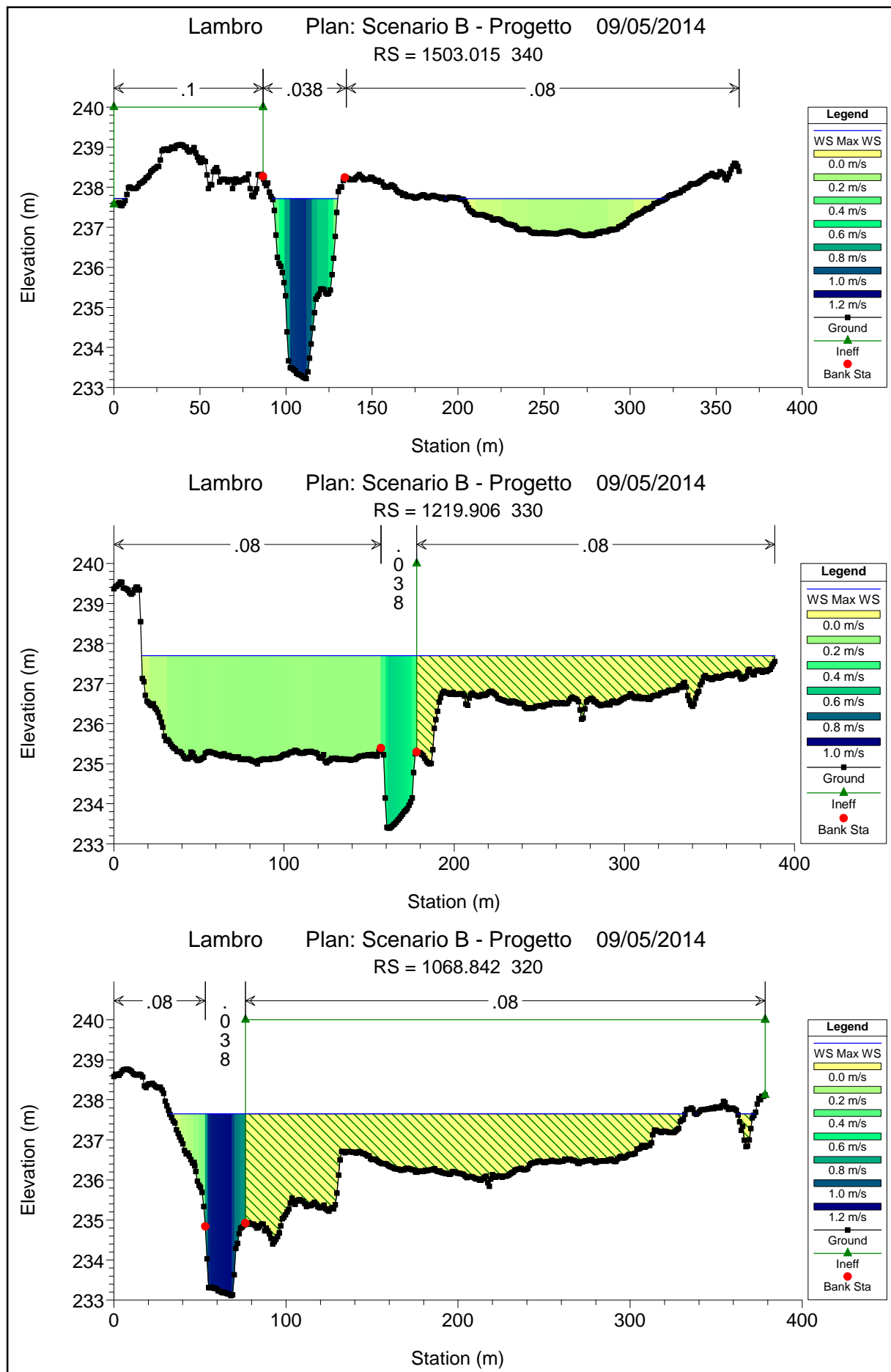


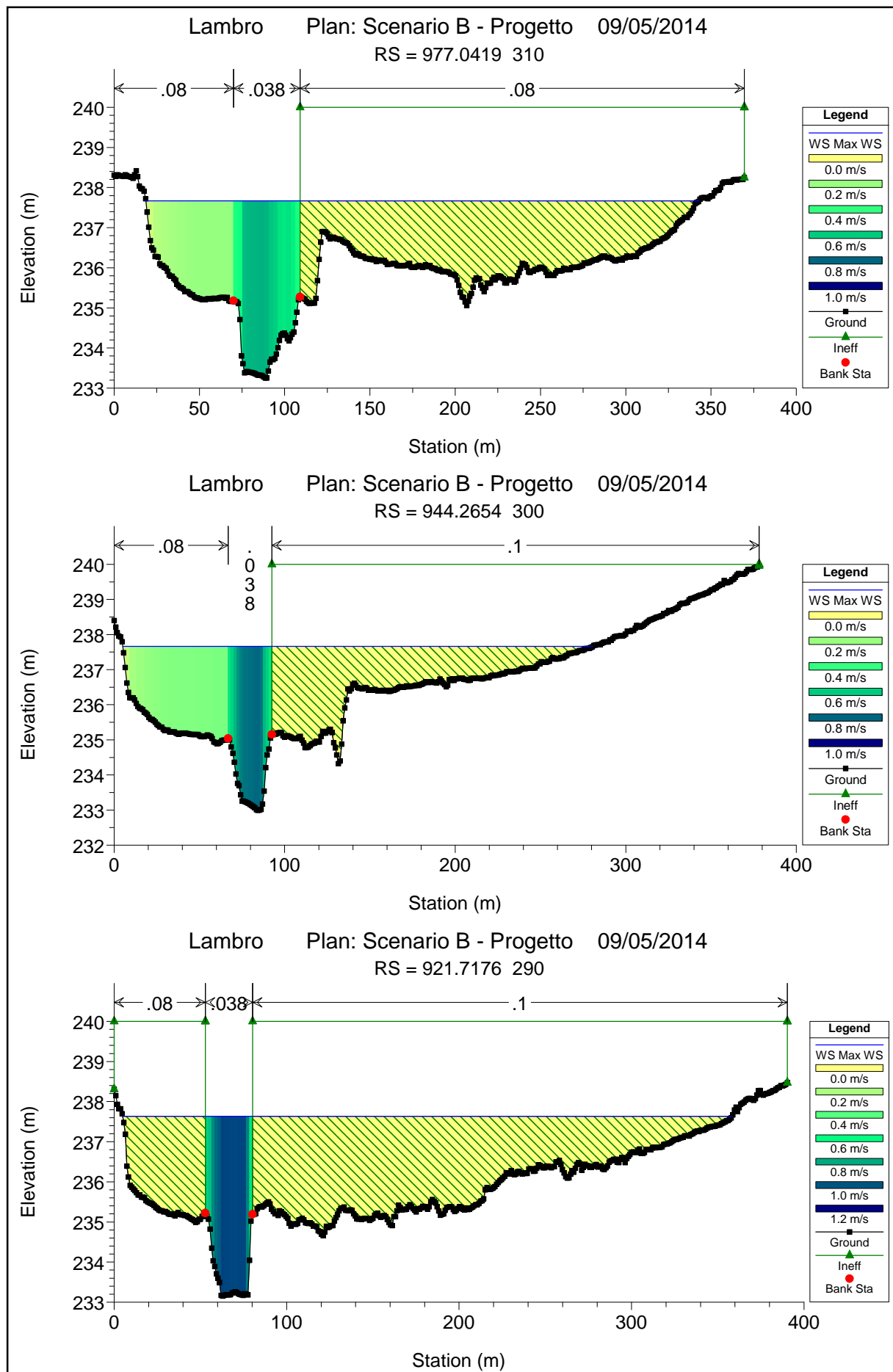


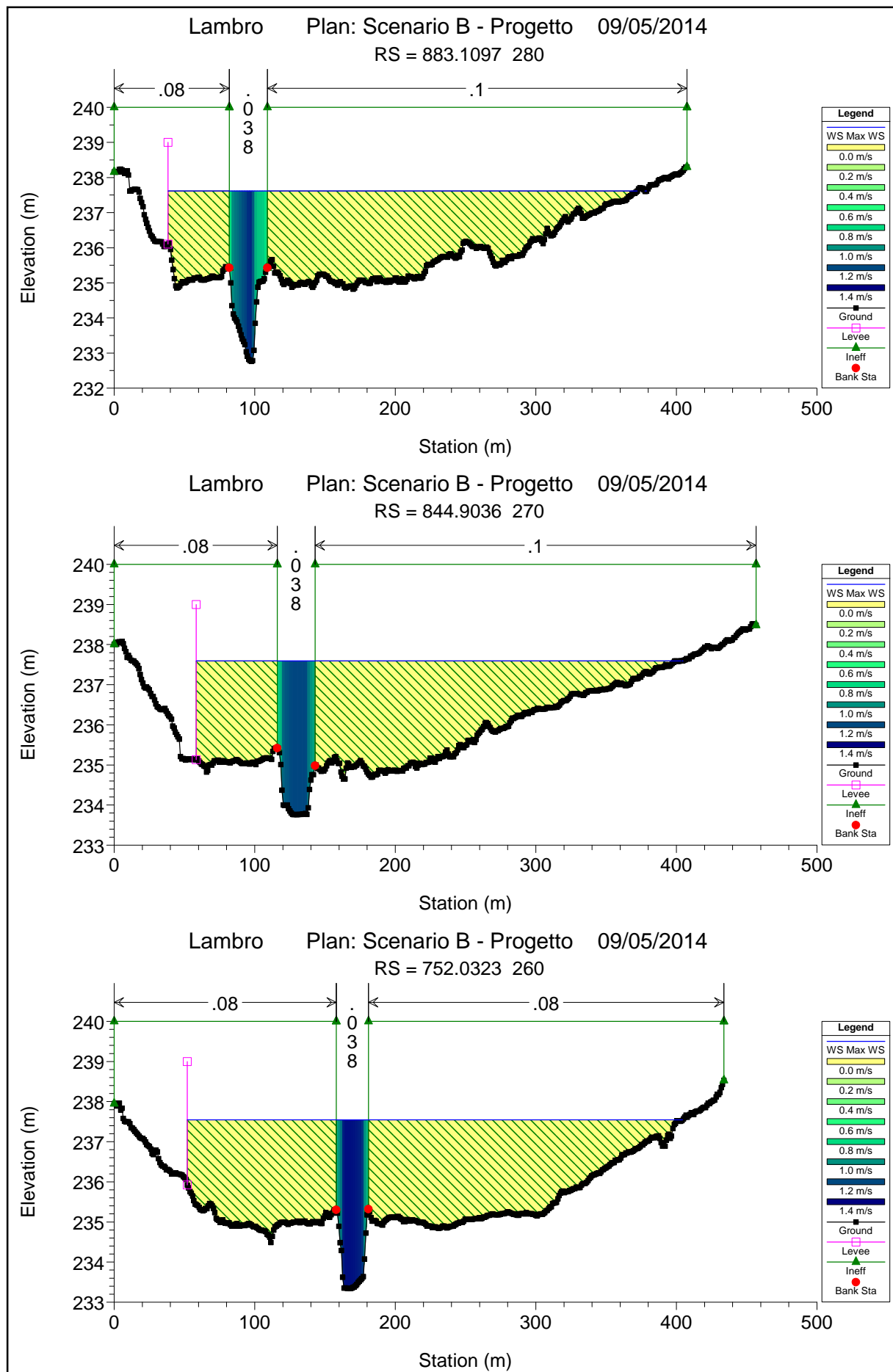


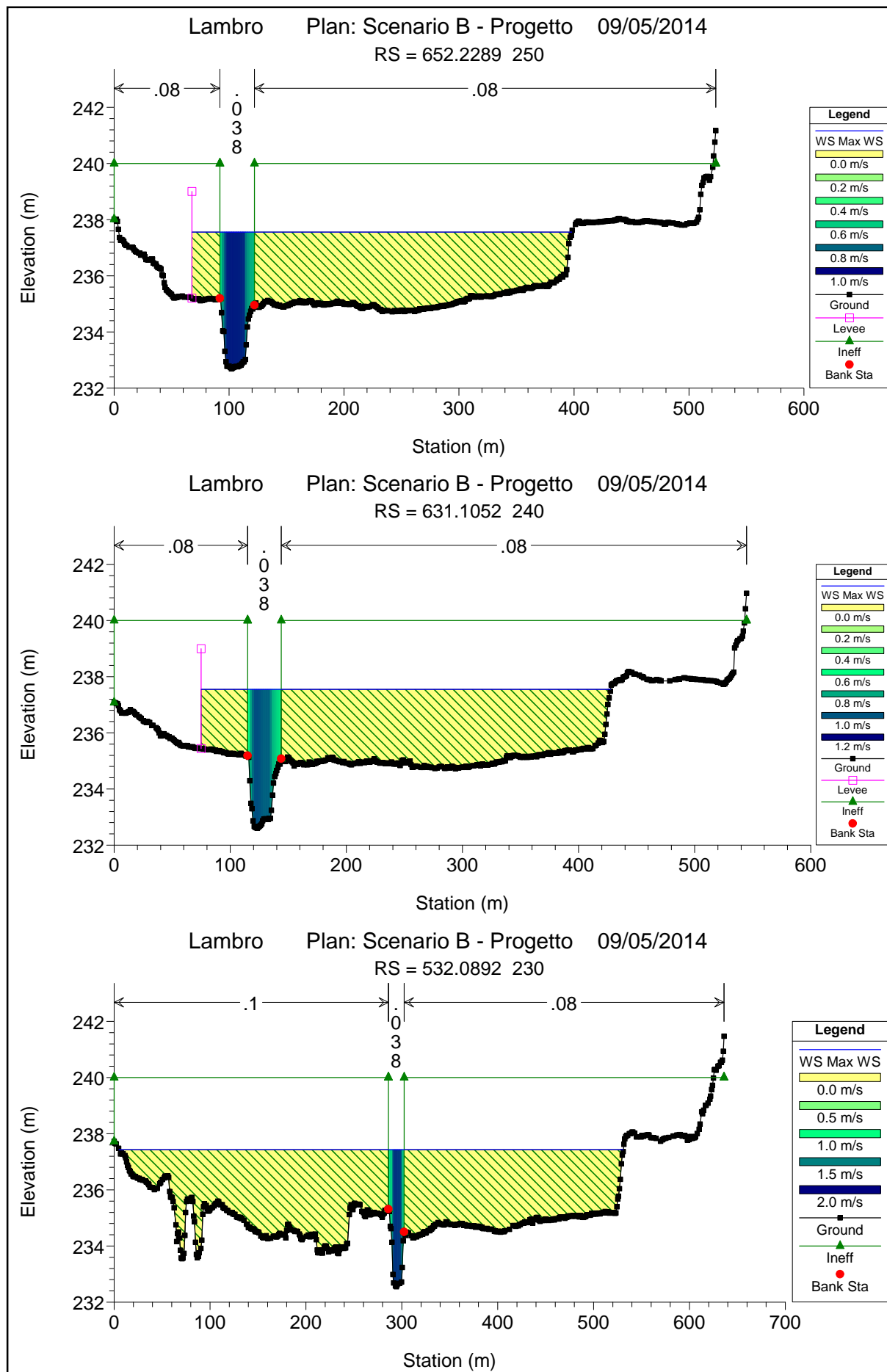


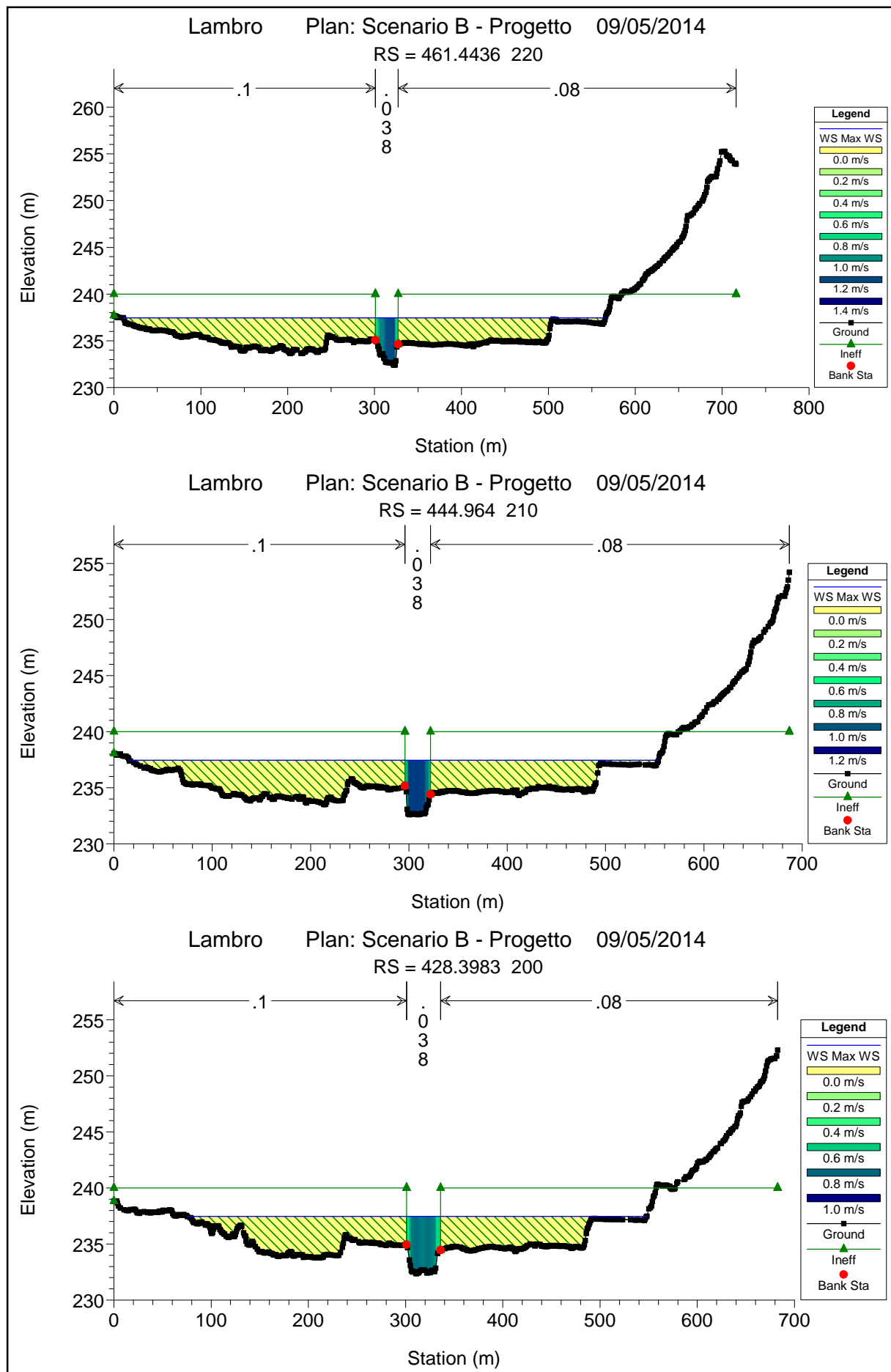


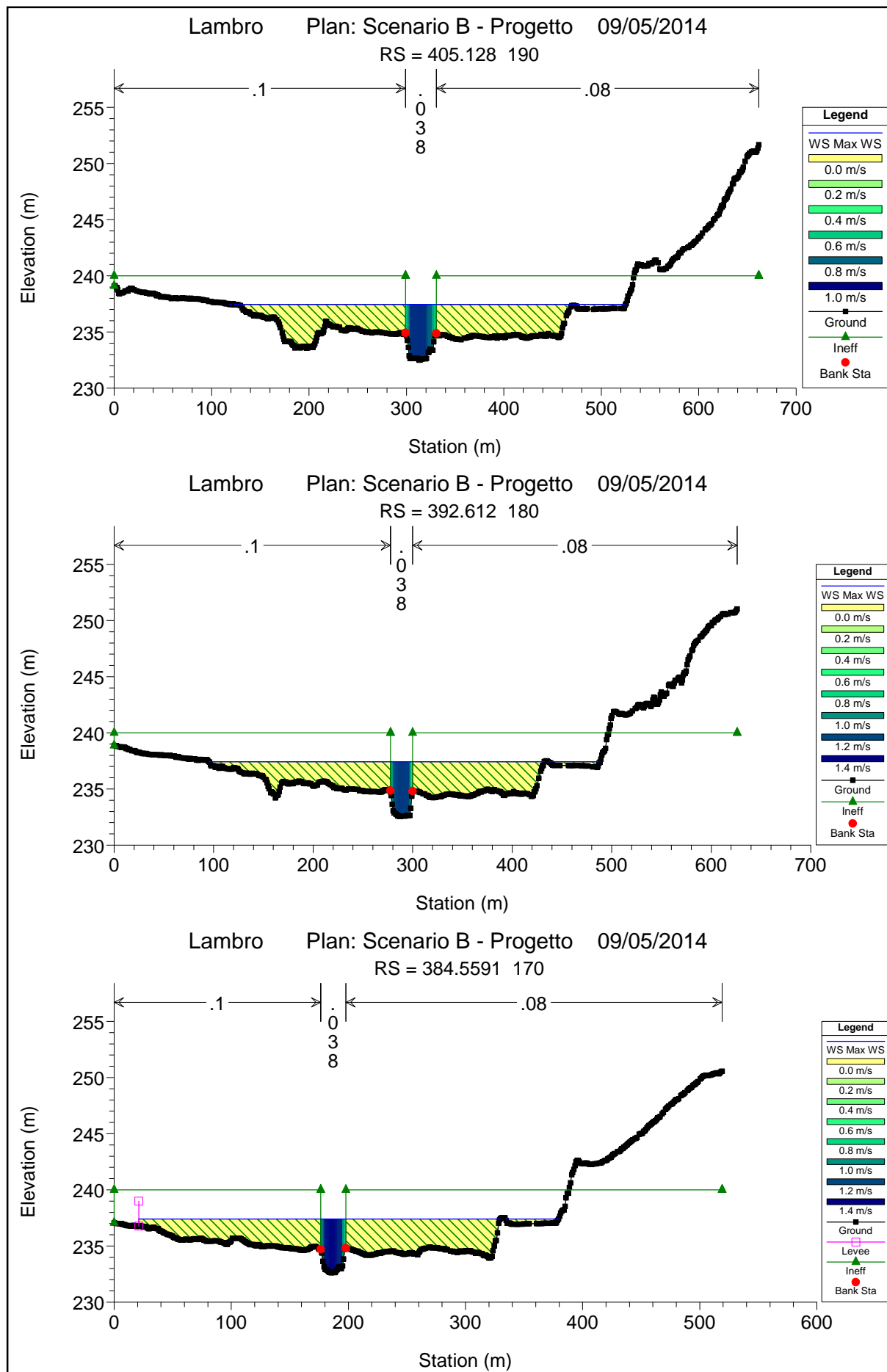




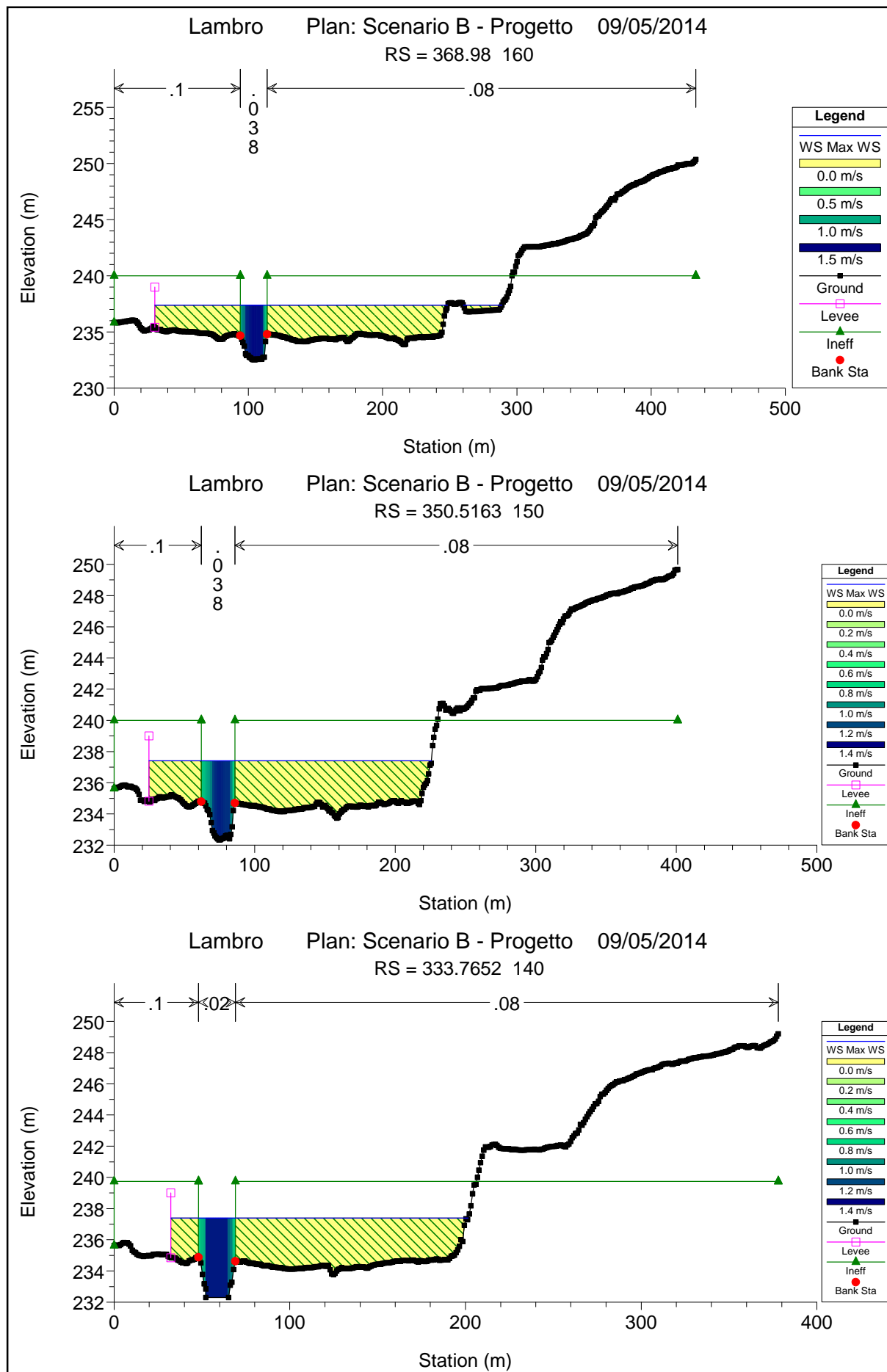


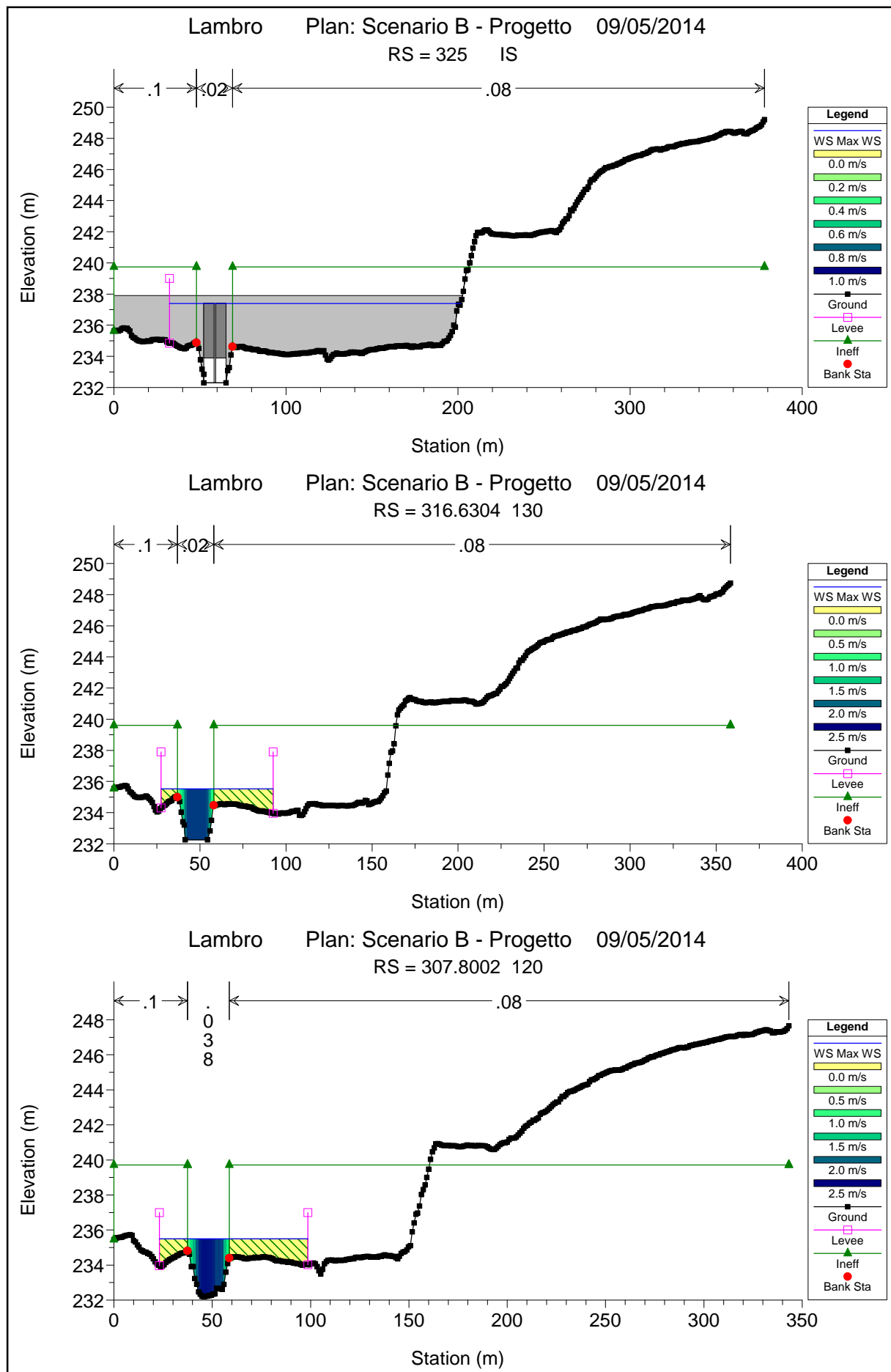


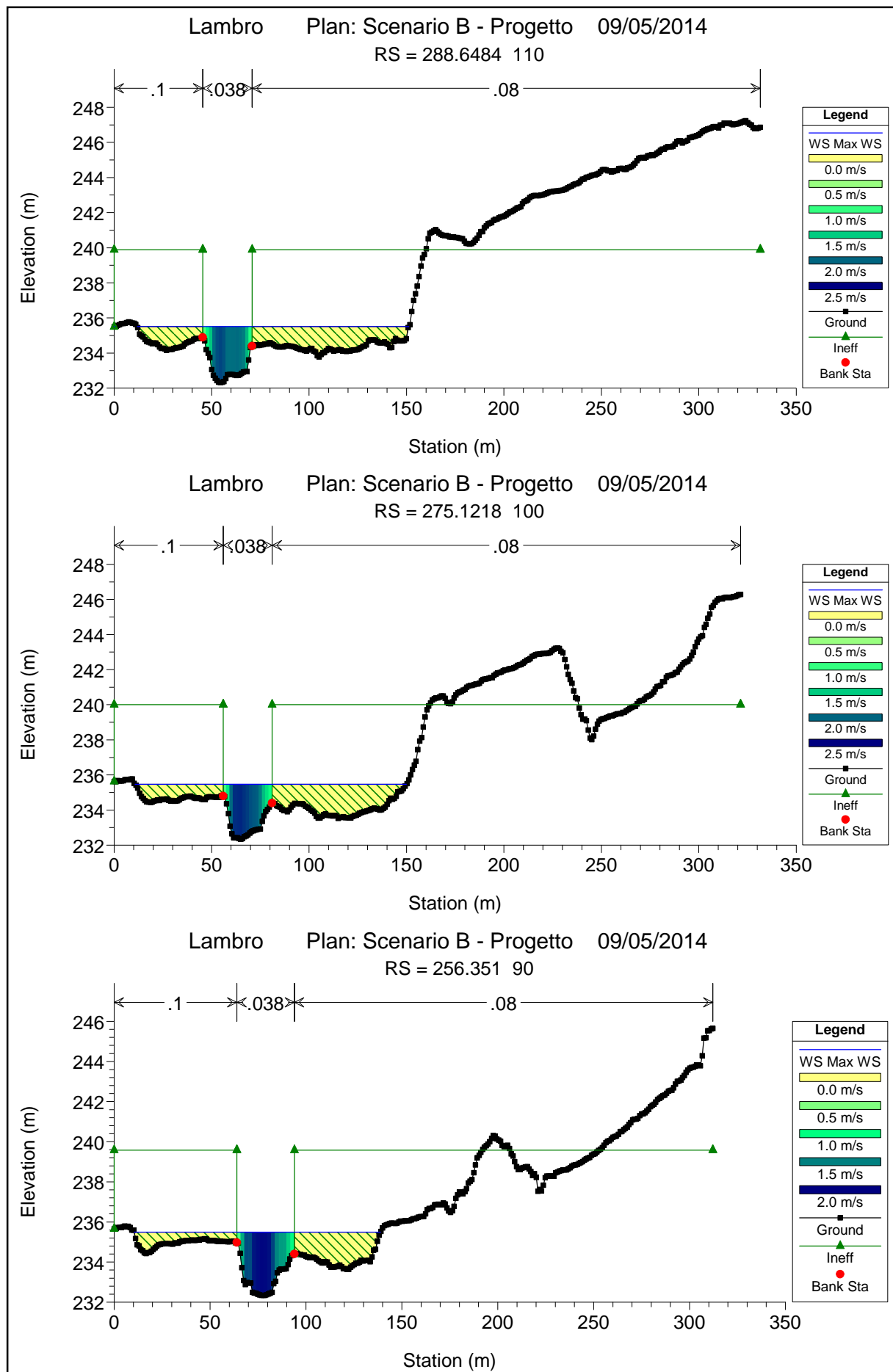


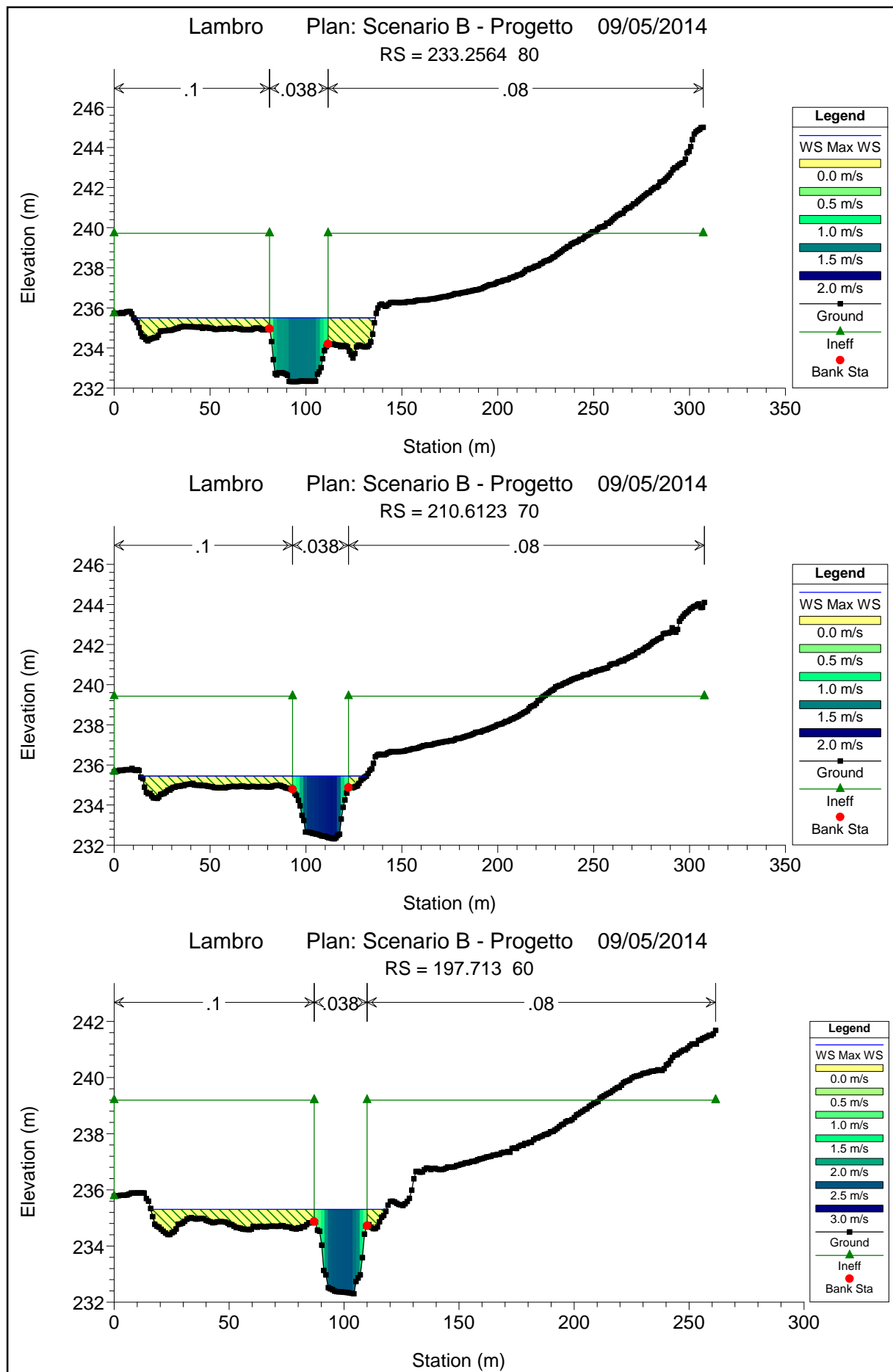


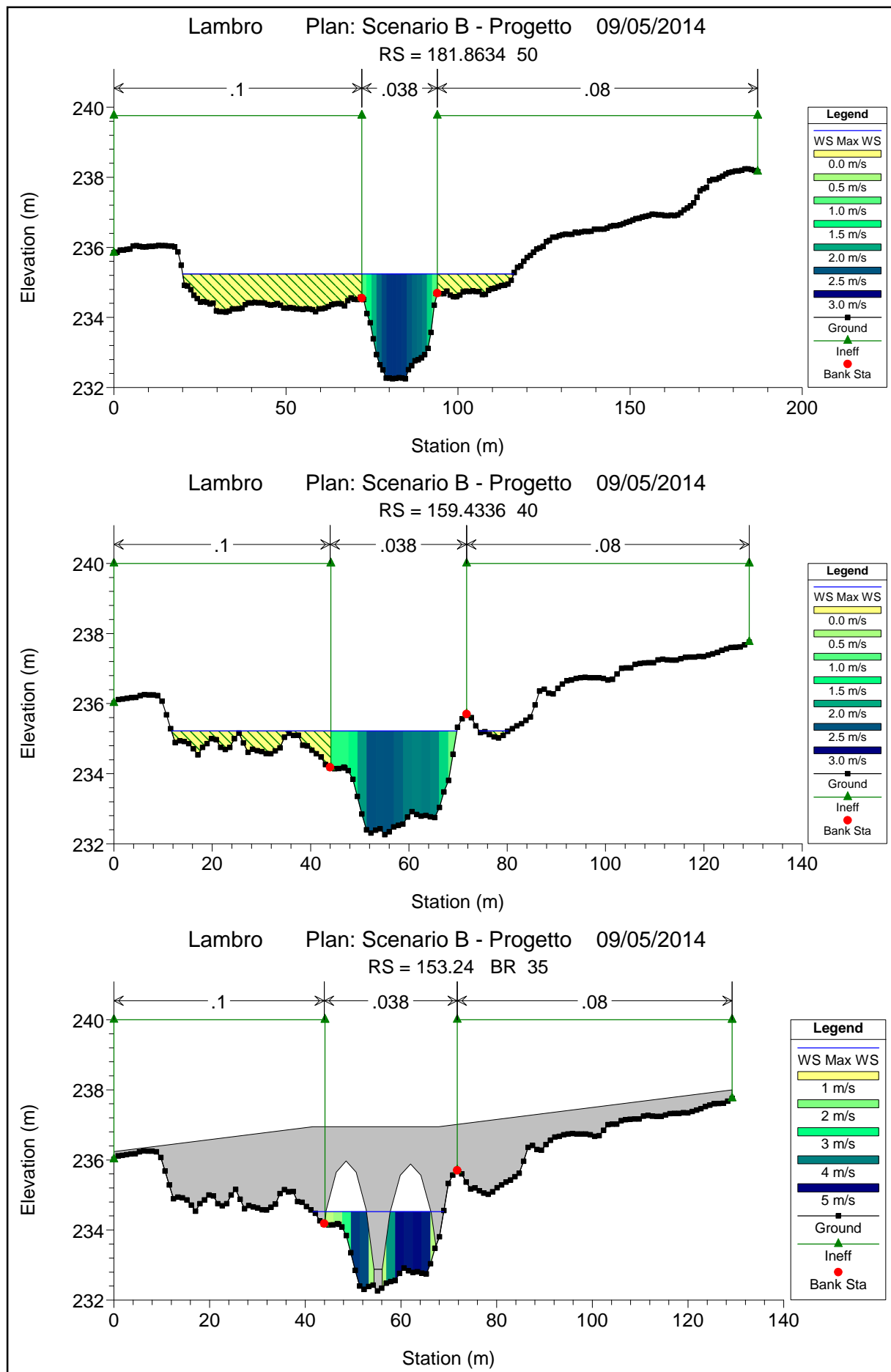


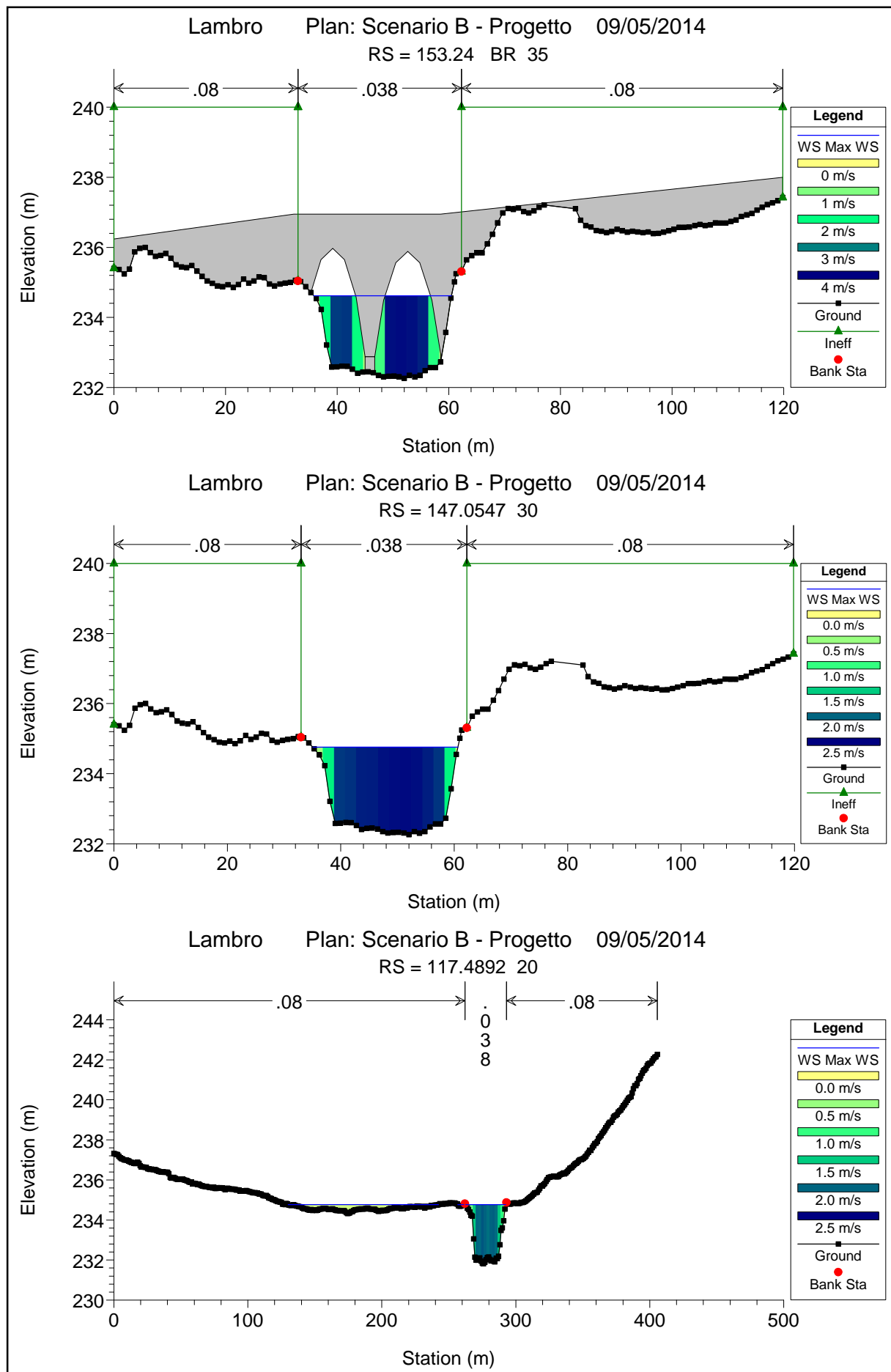


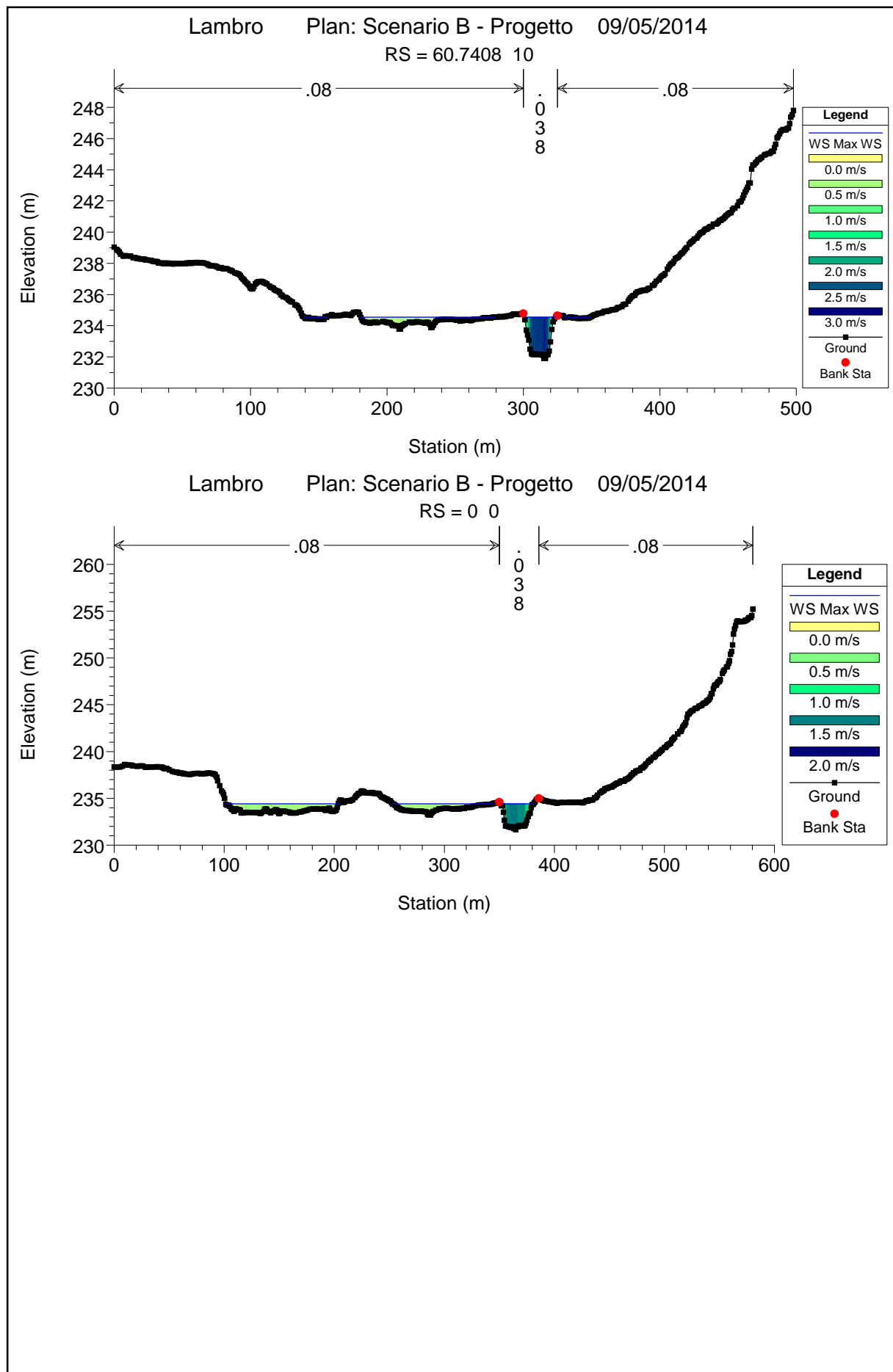














PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

*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

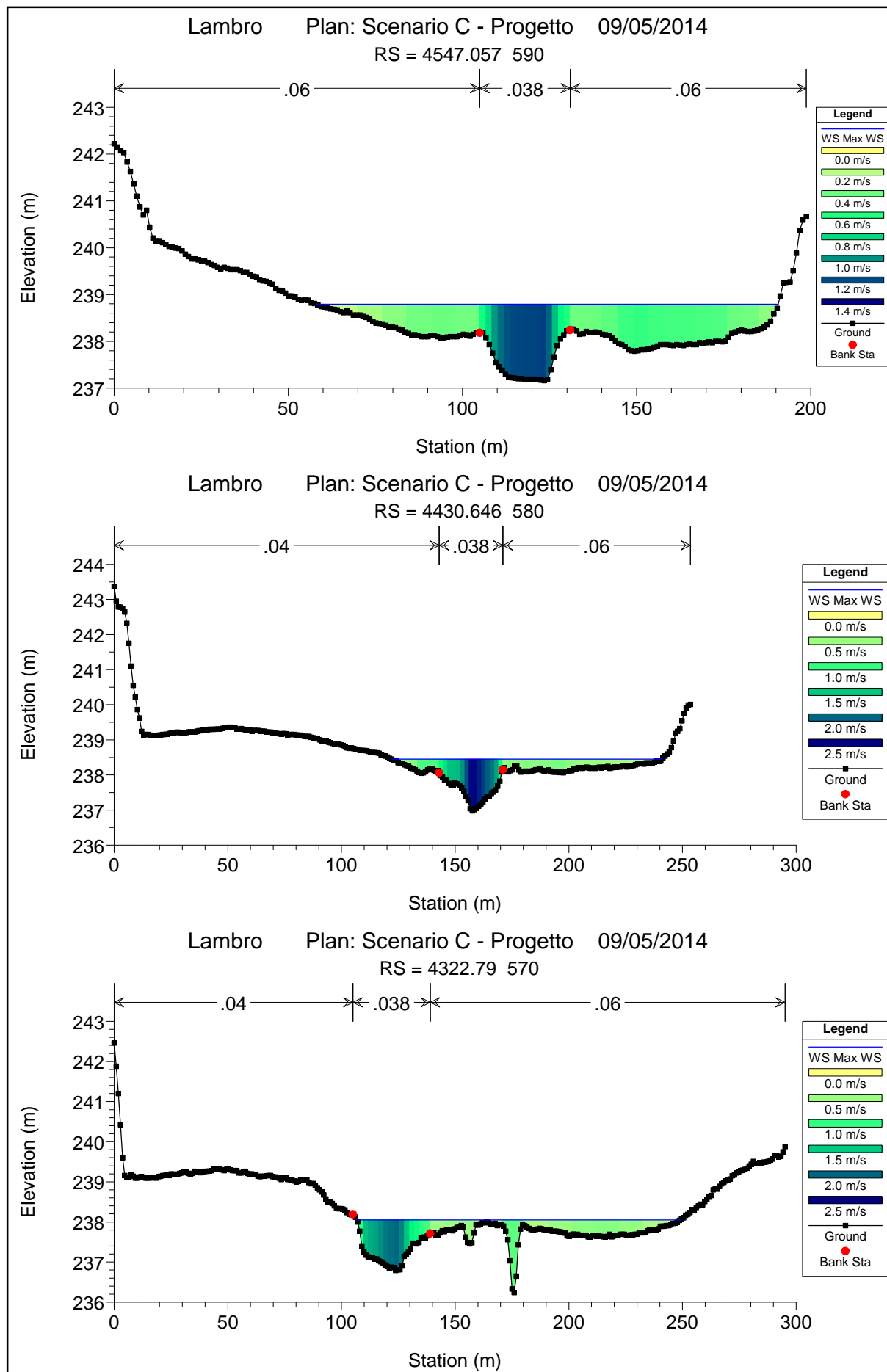
– Risultati simulazione idraulica: scenario C – Portate progetto con laminazione Inverigo

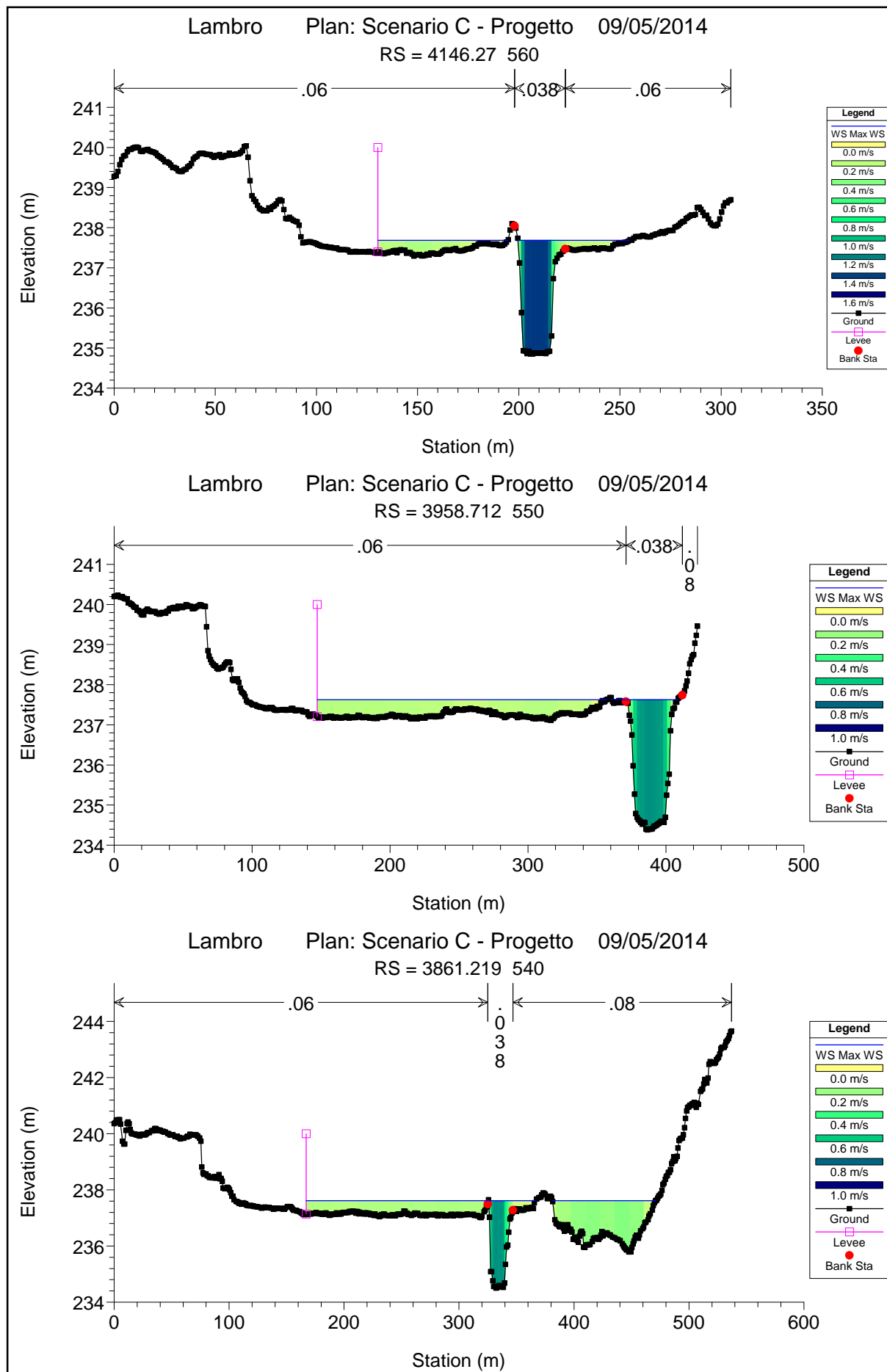


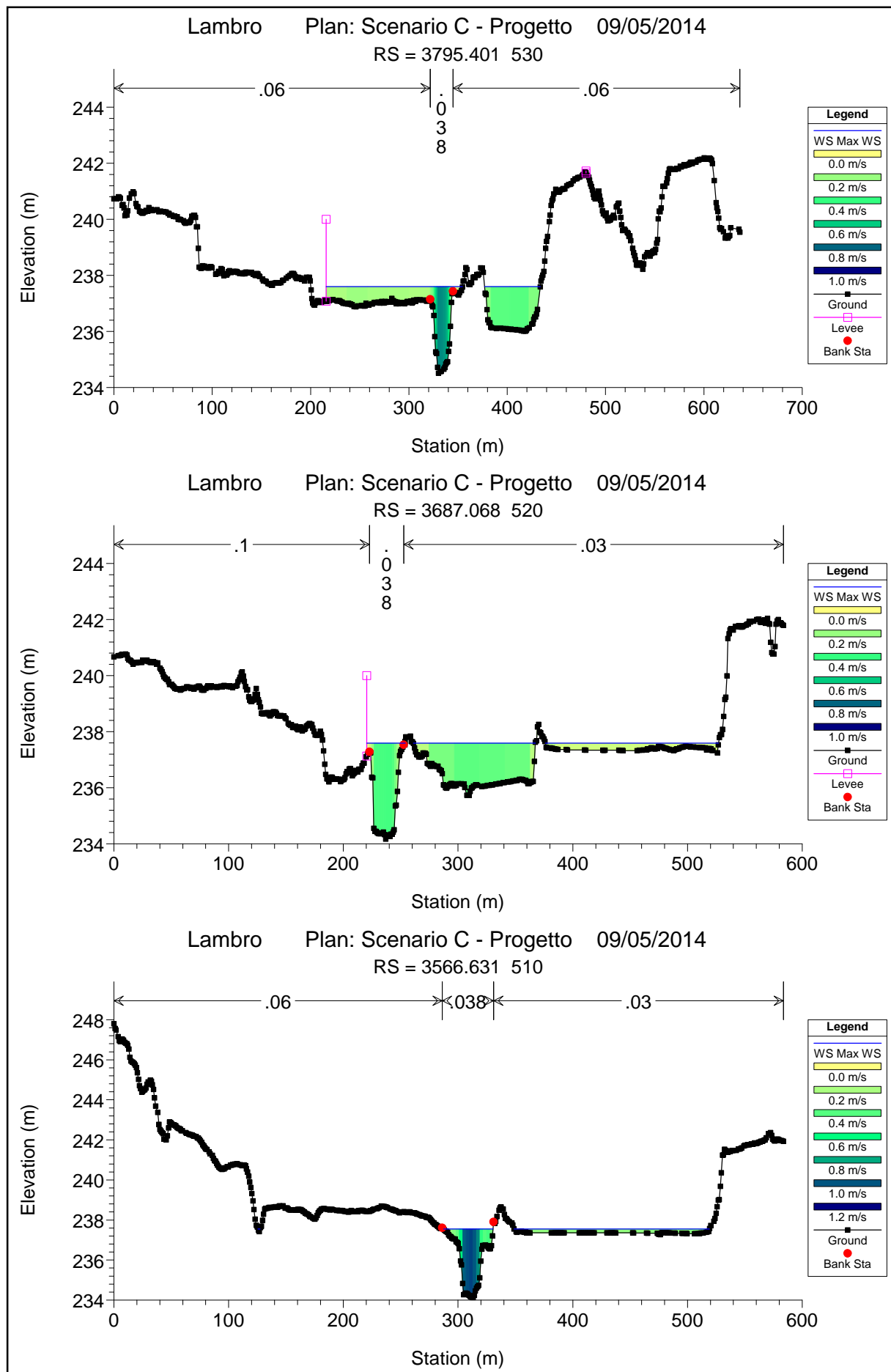
HEC-RAS Plan: C - Progetto River: Lambro Reach: Inverigo Profile: Max WS

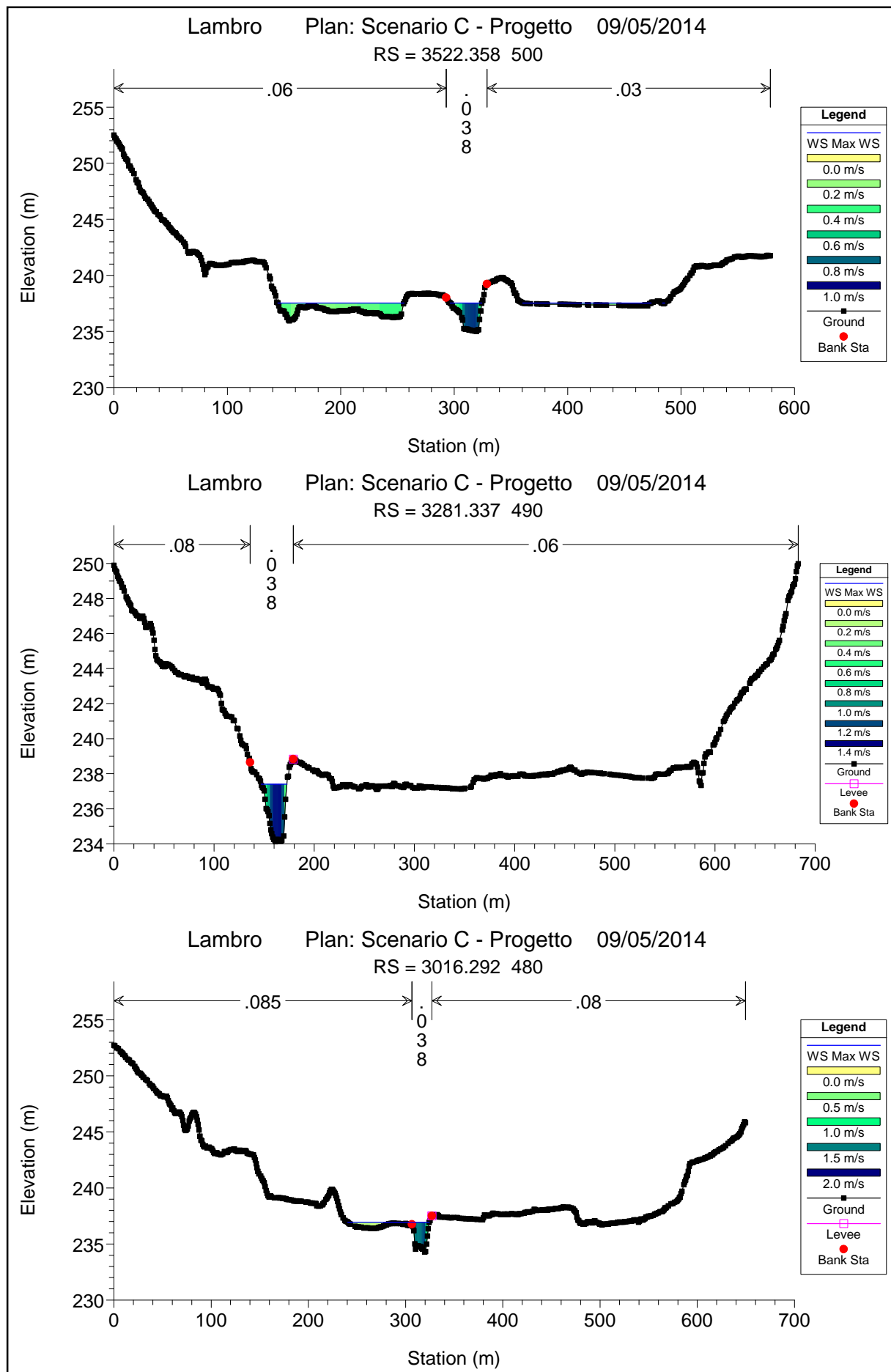
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Inverigo	4547.057 590	Max WS	64.26	237.16	238.79	238.33	238.83	0.001254	1.09	98.14	132.57	0.31
Inverigo	4430.646 580	Max WS	64.09	236.98	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

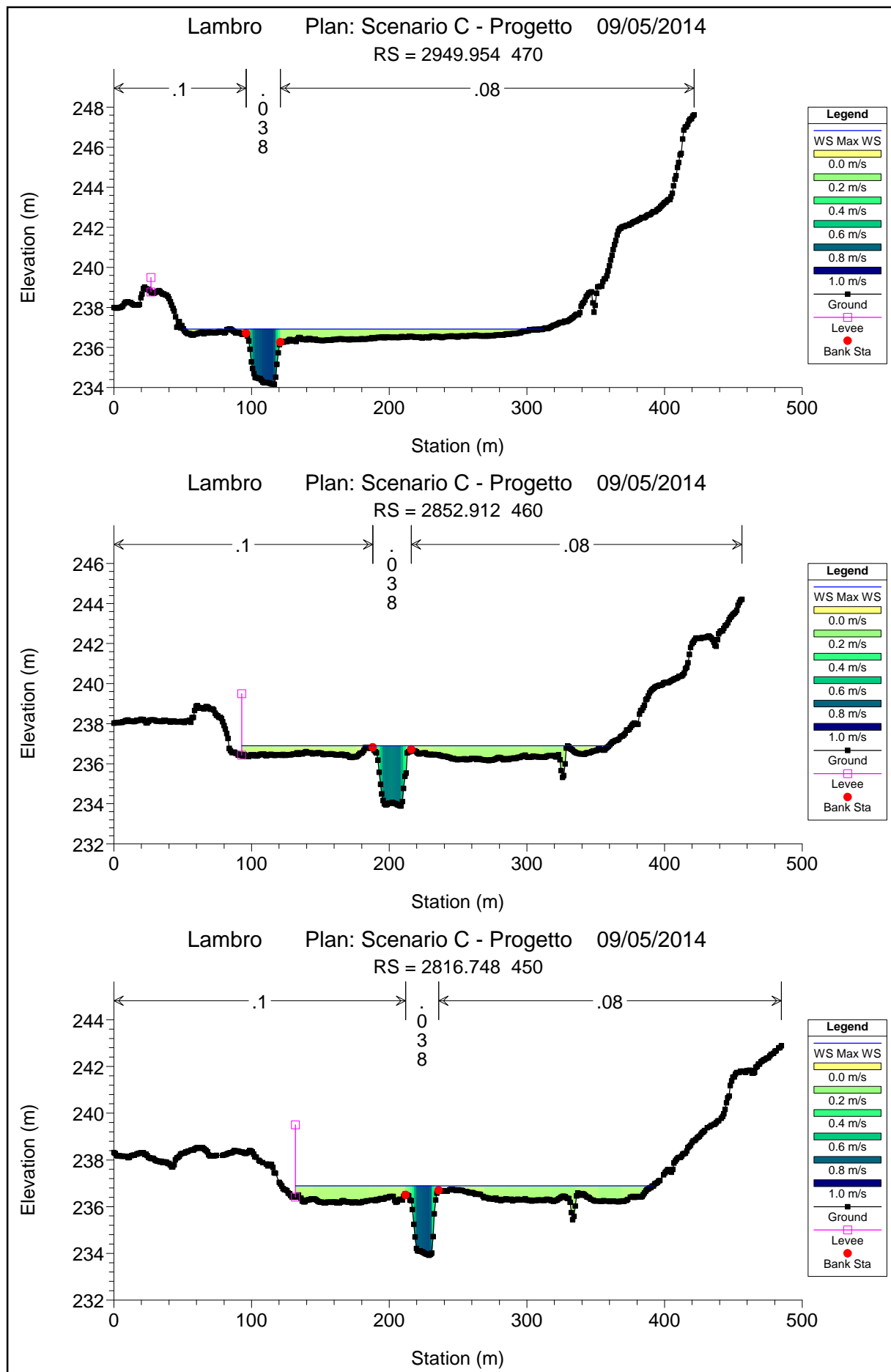


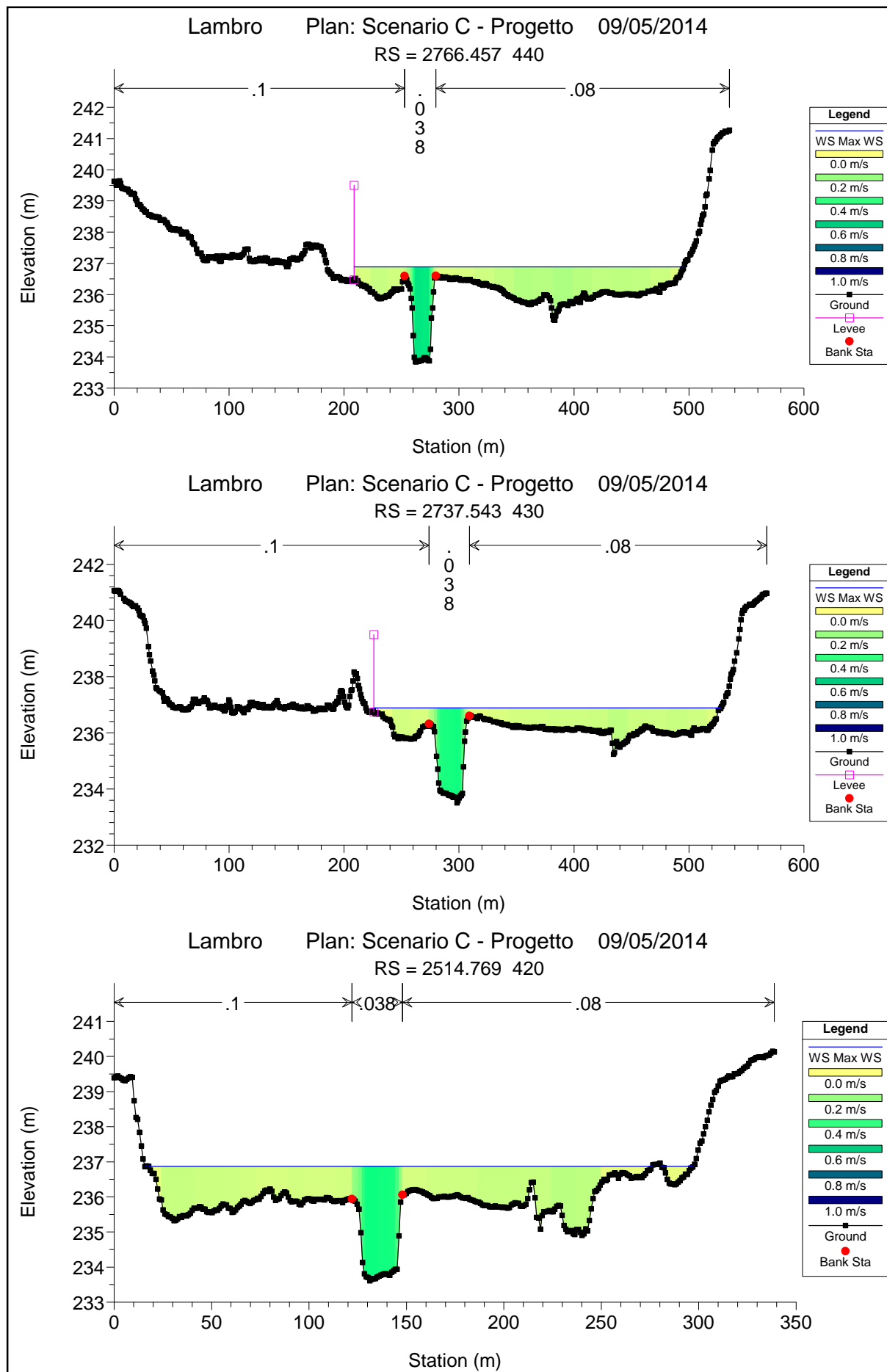




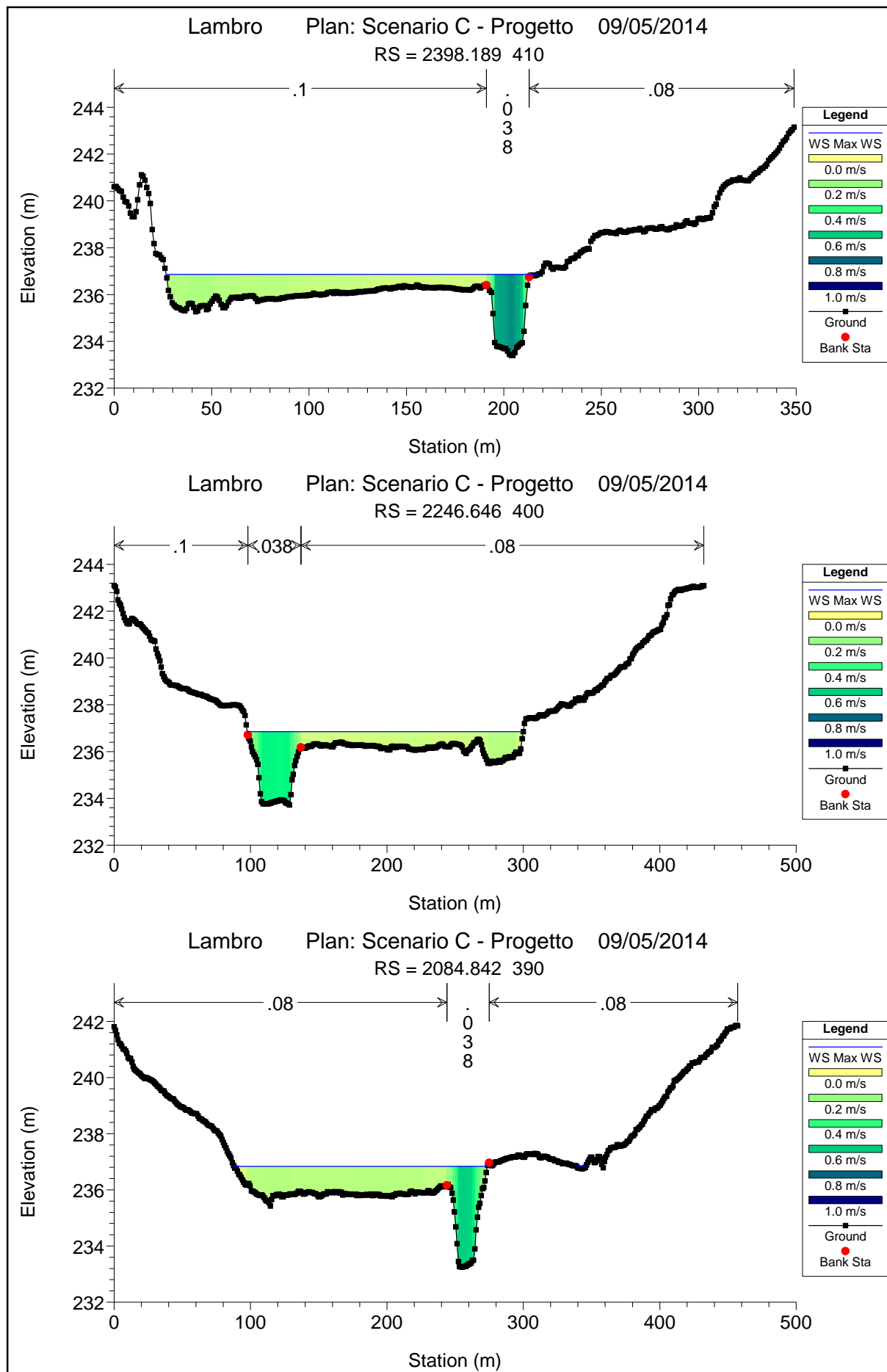


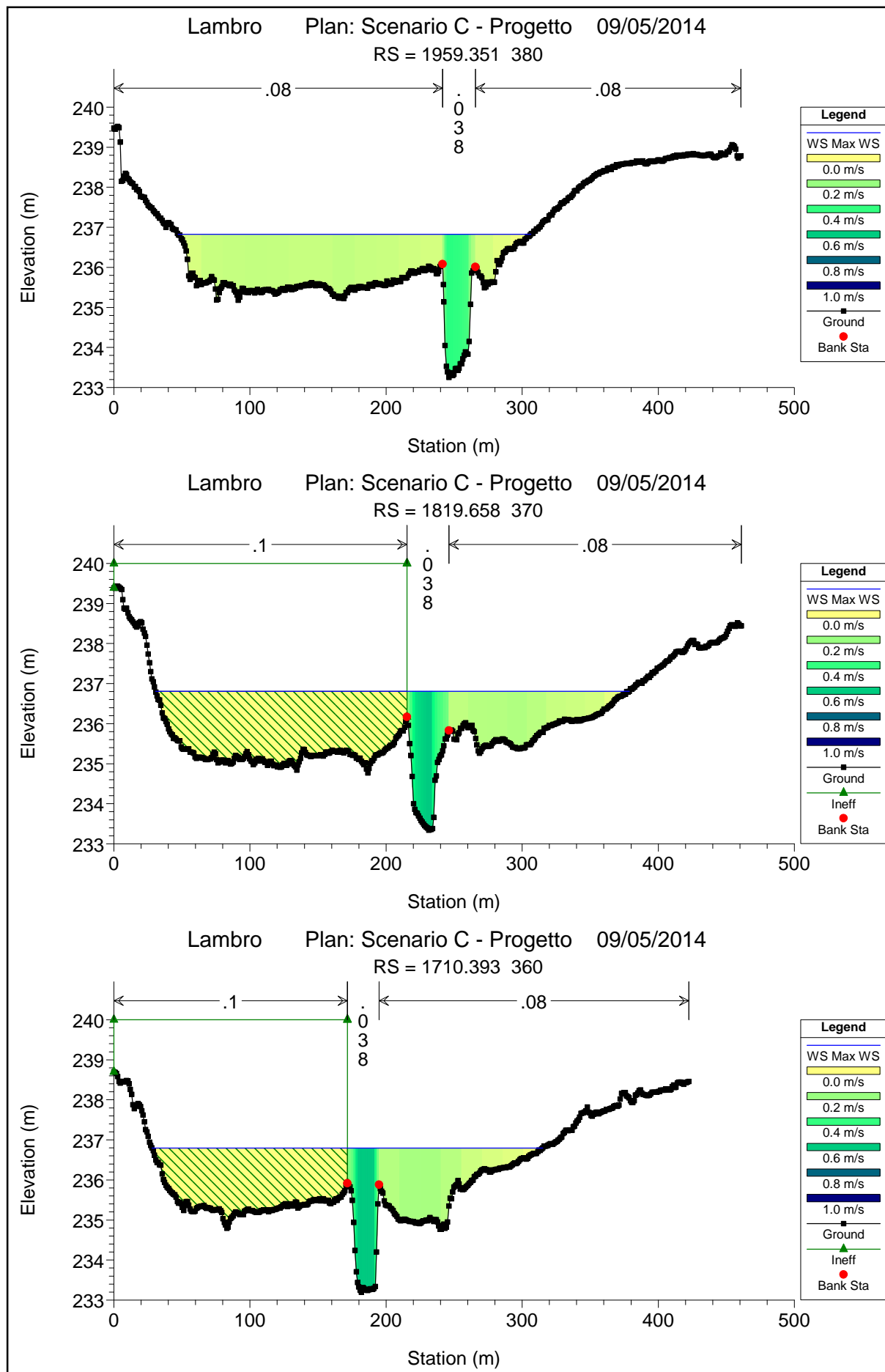


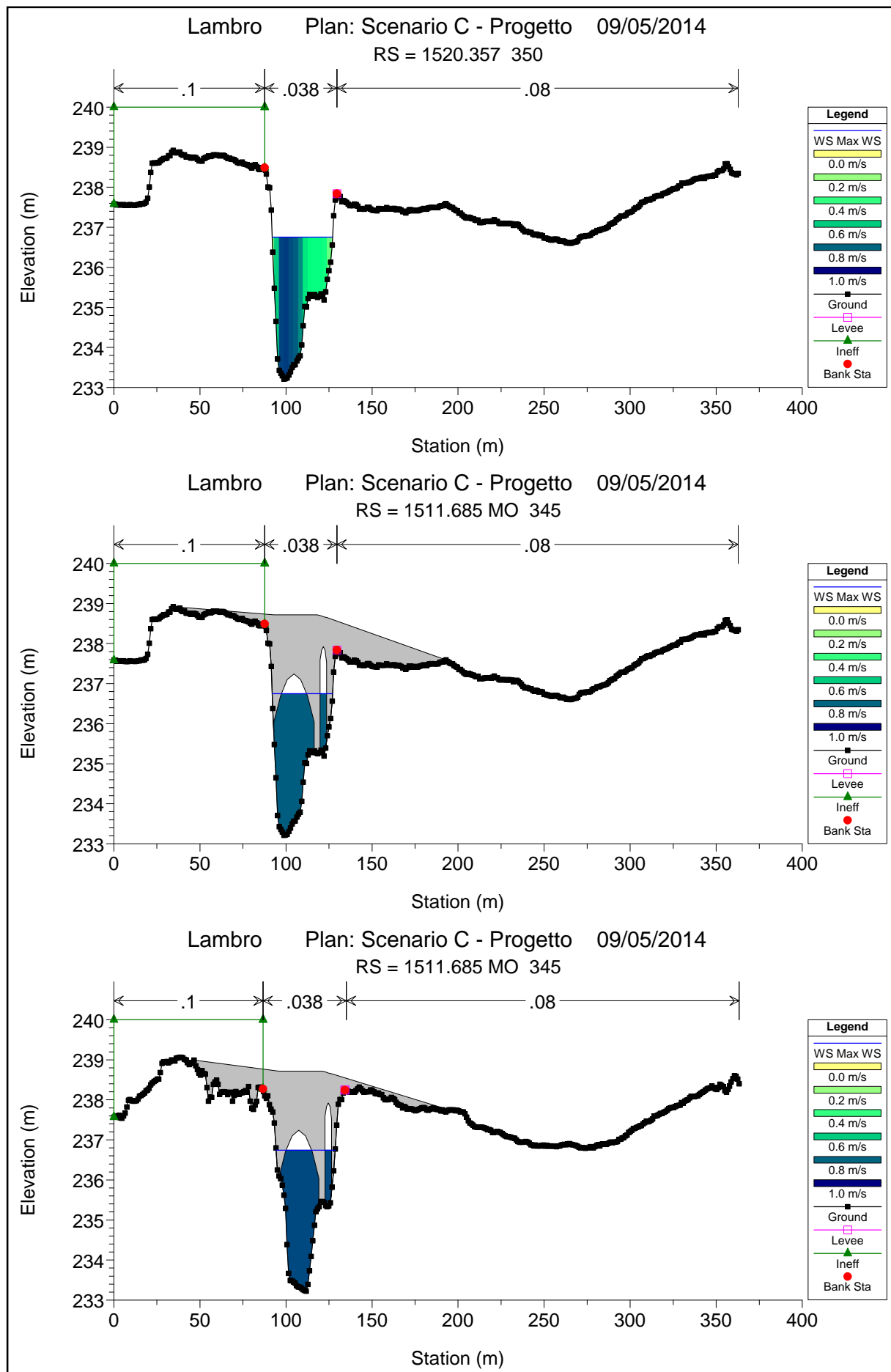


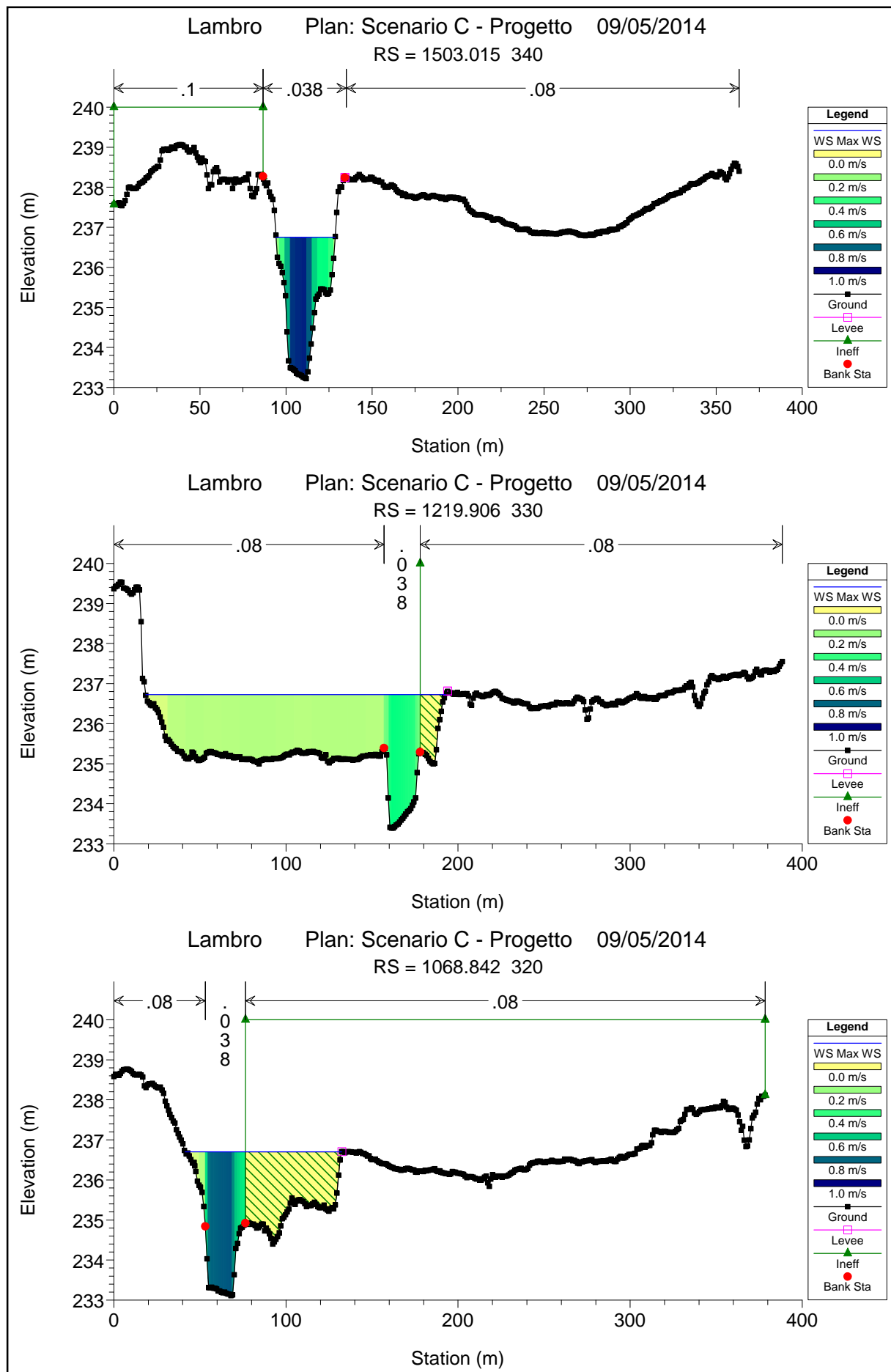


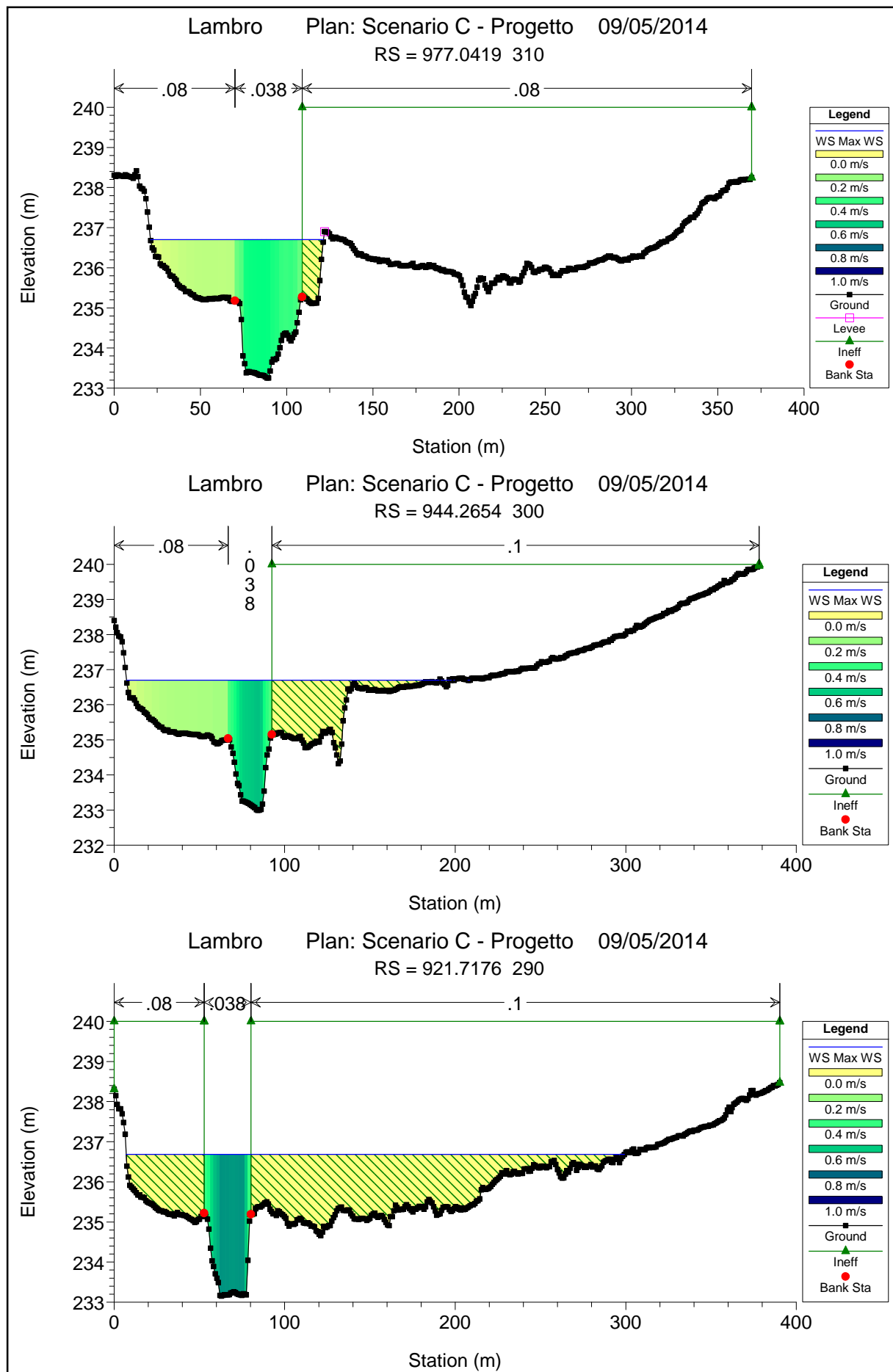


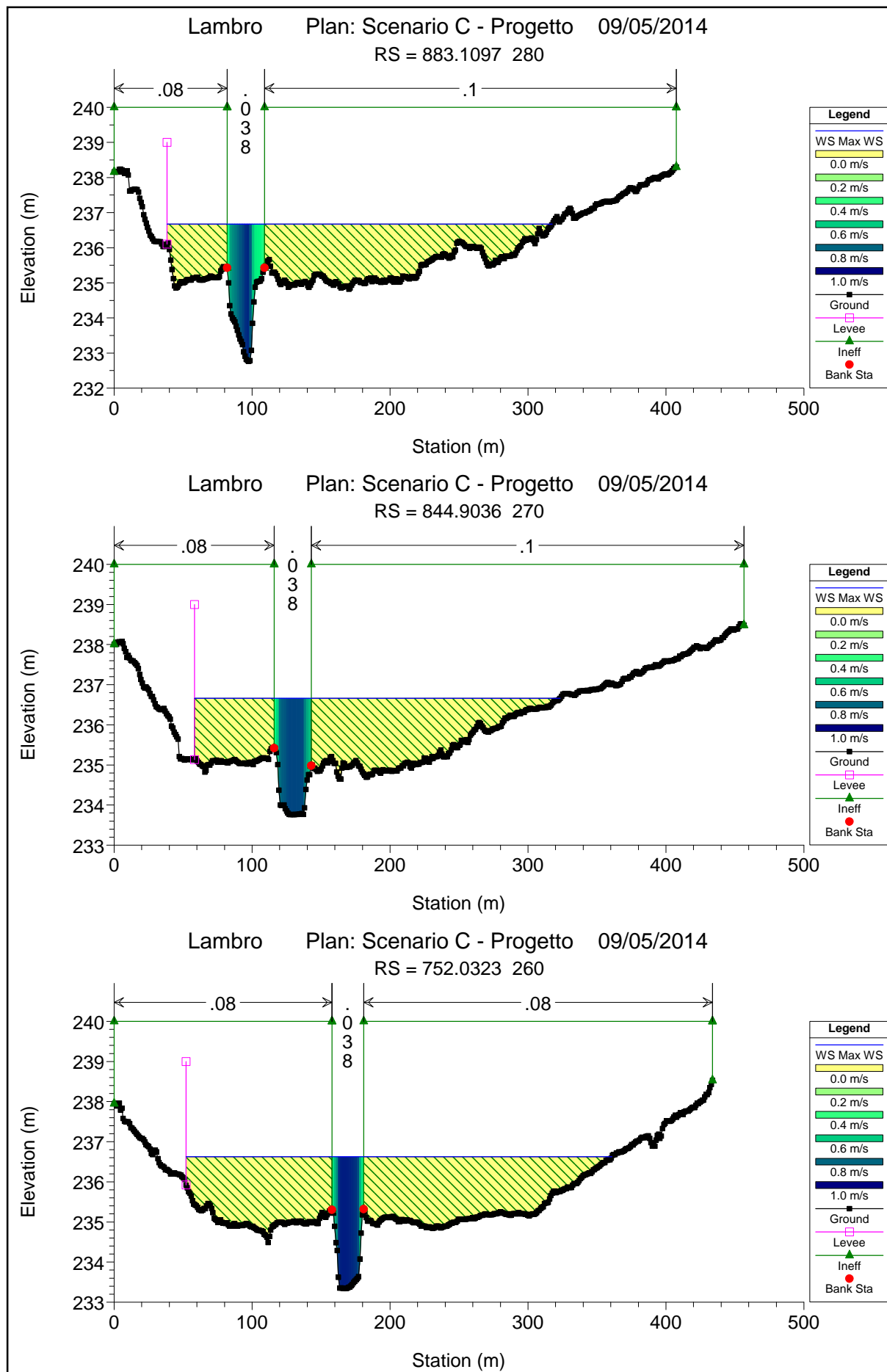


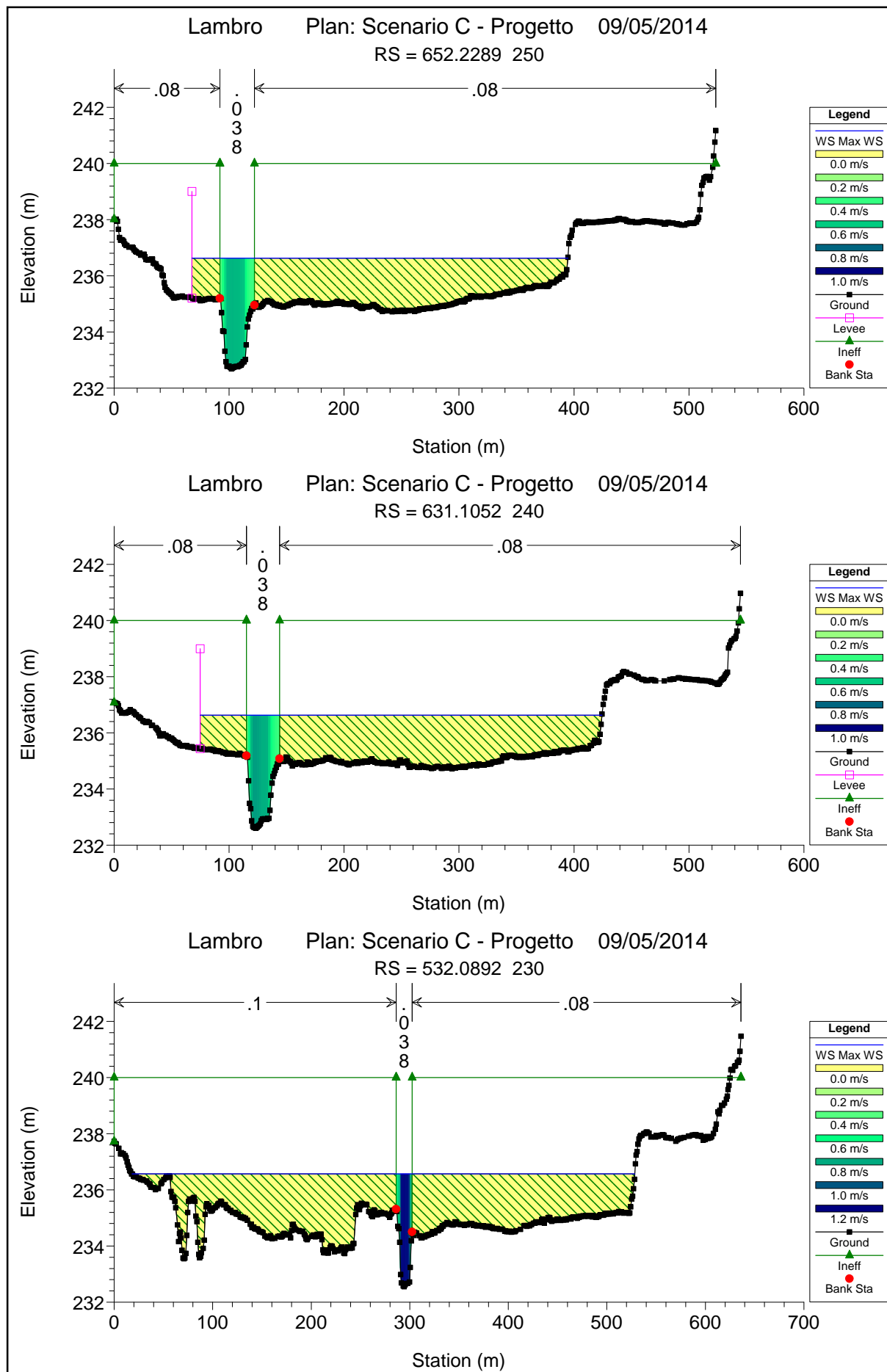


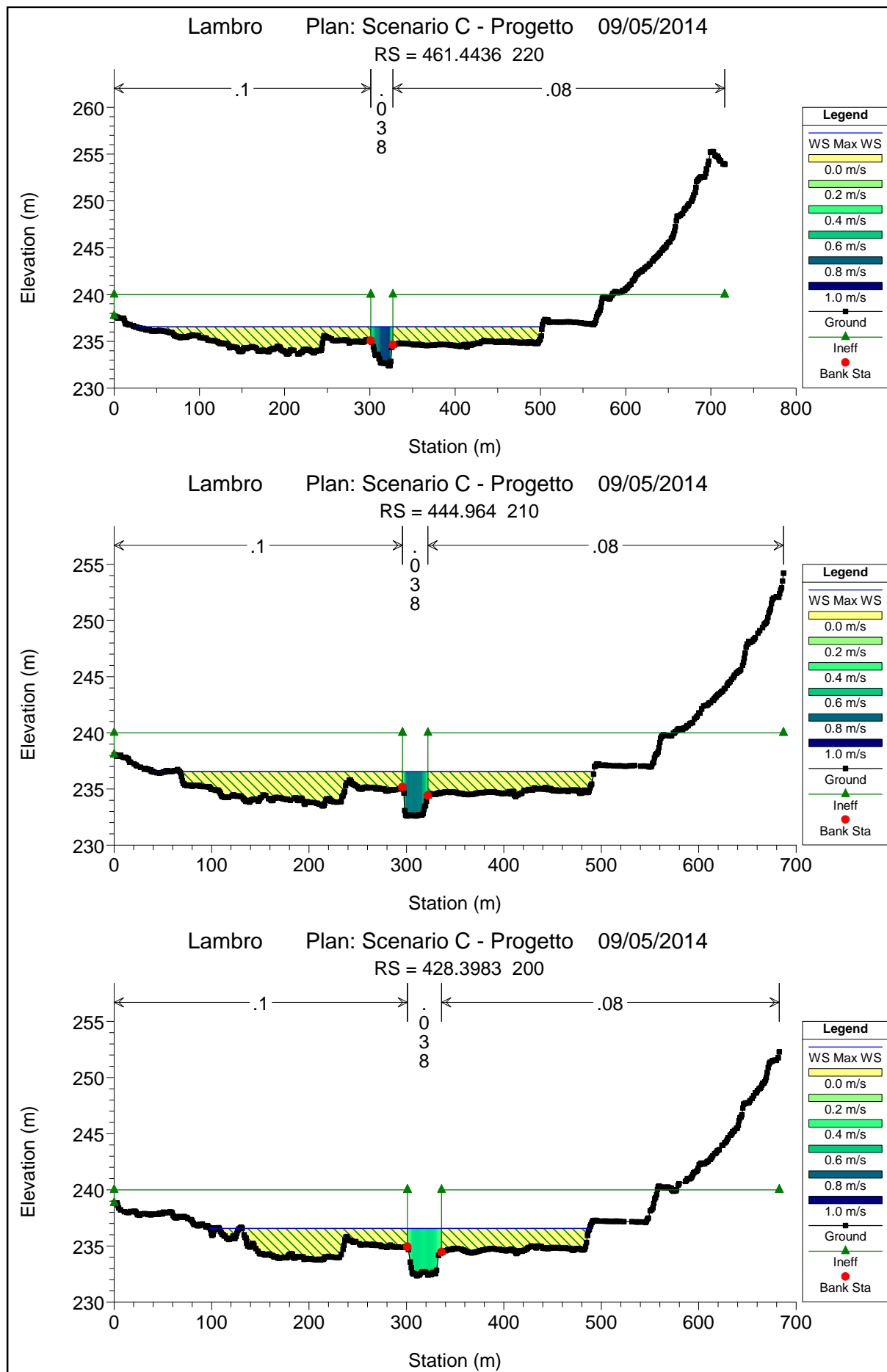




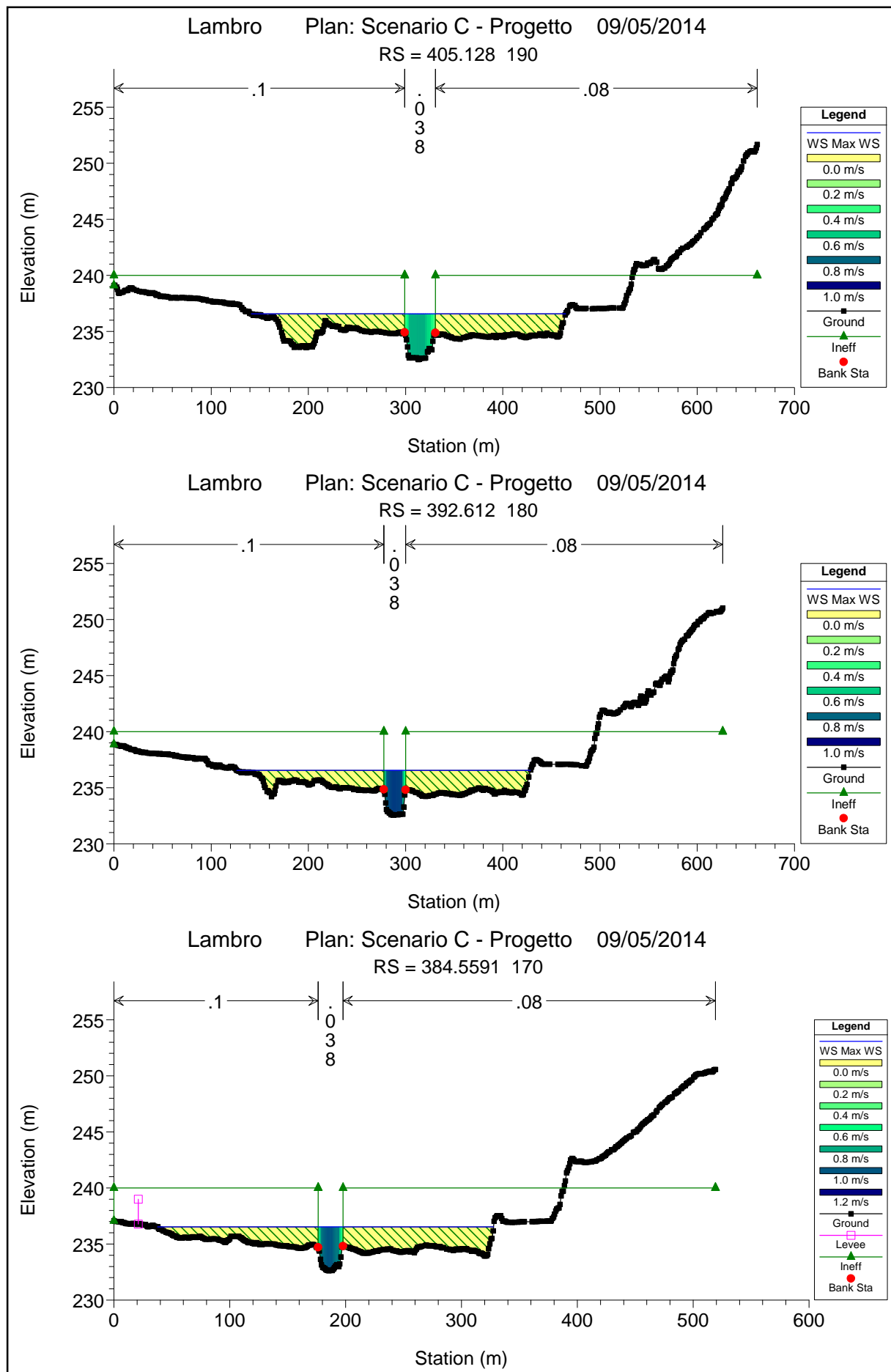


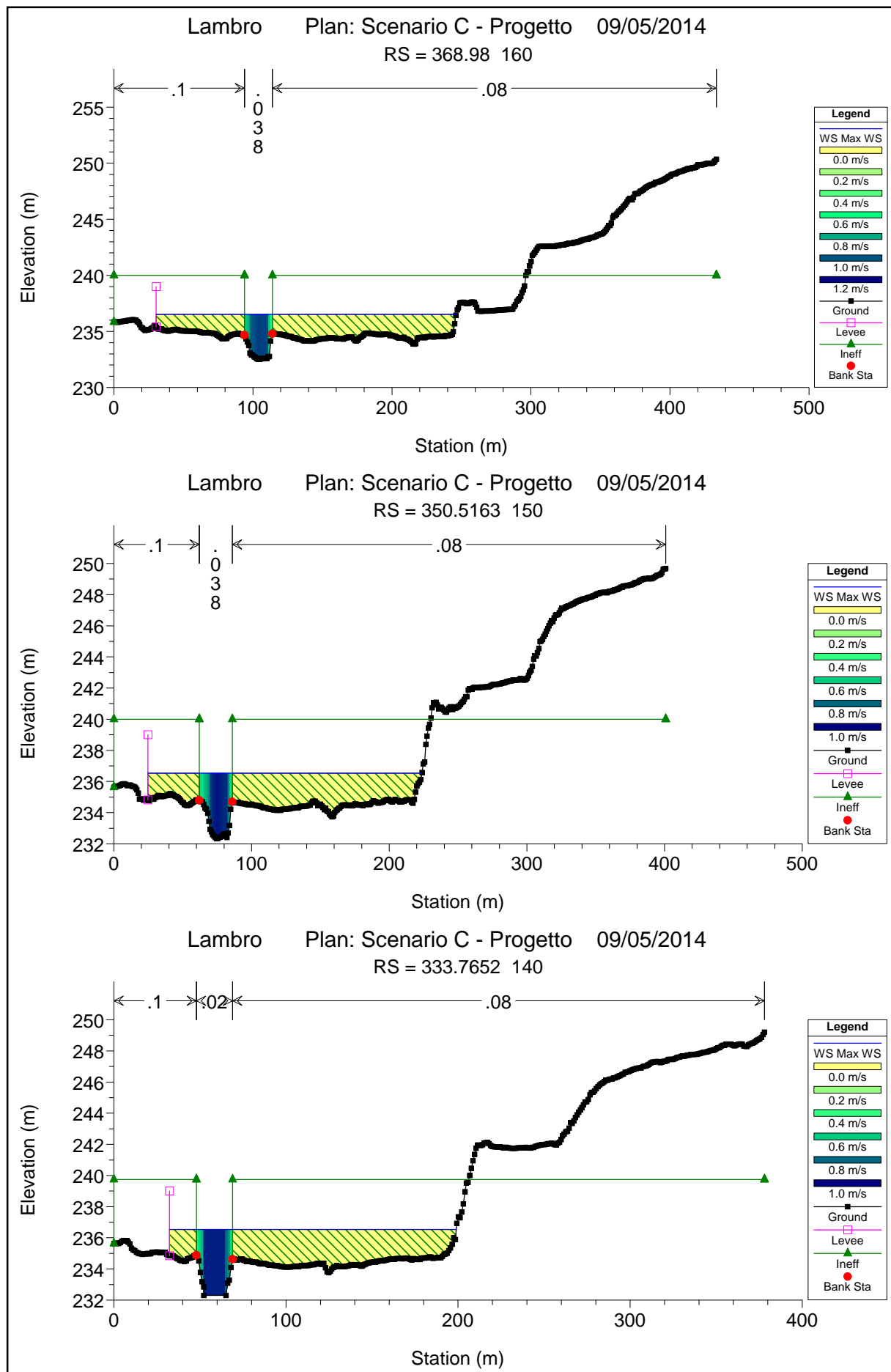


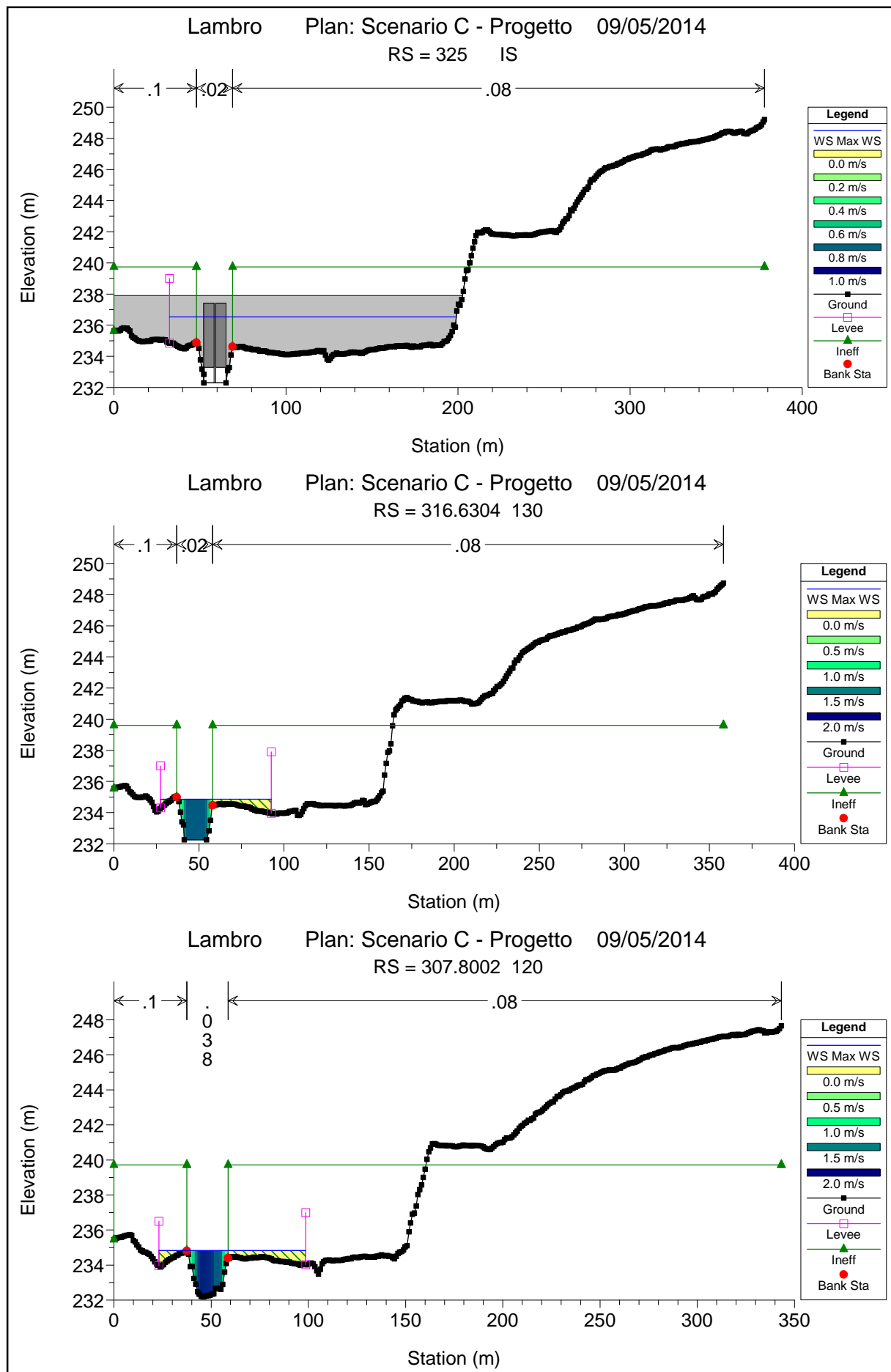


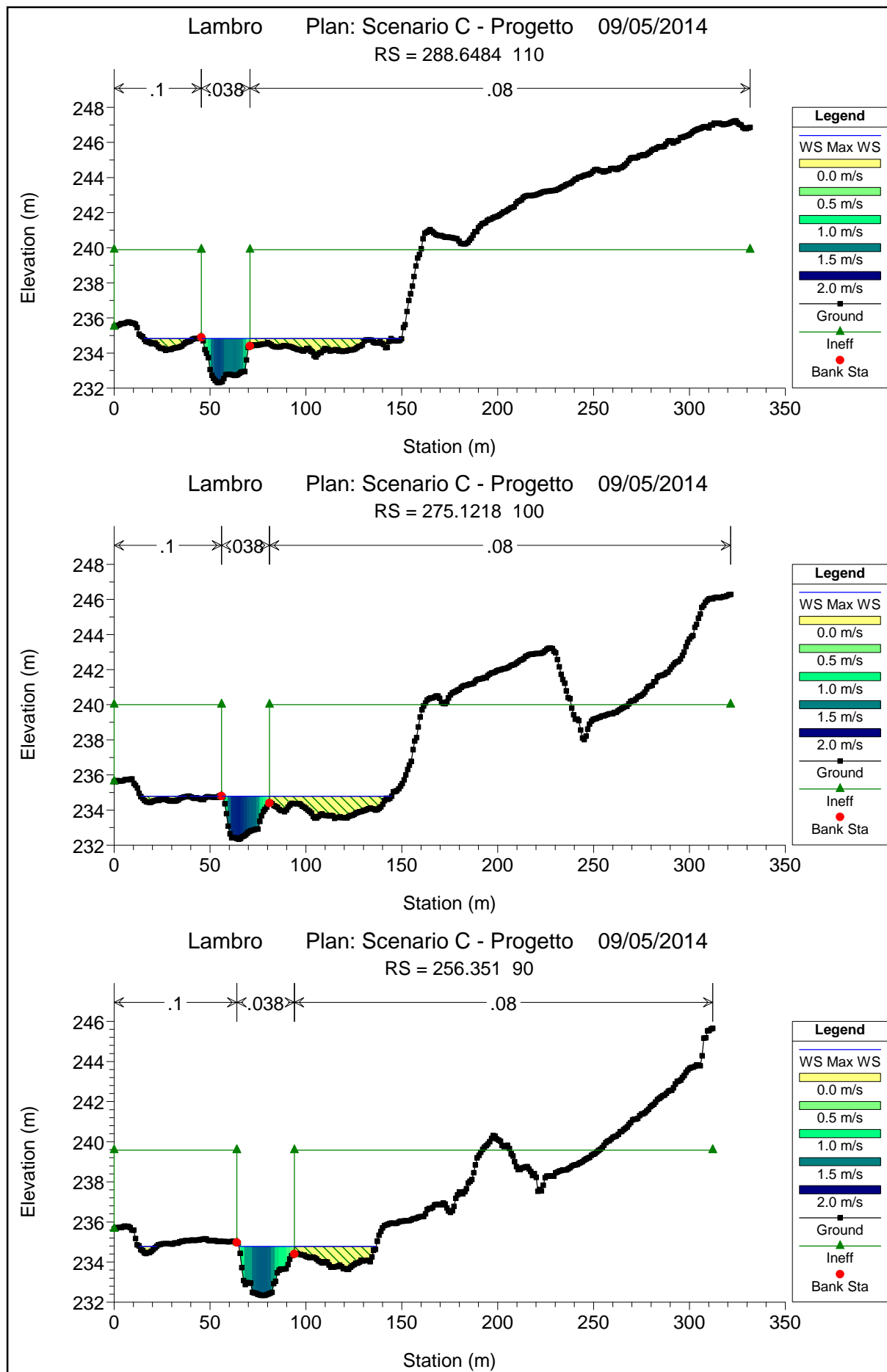




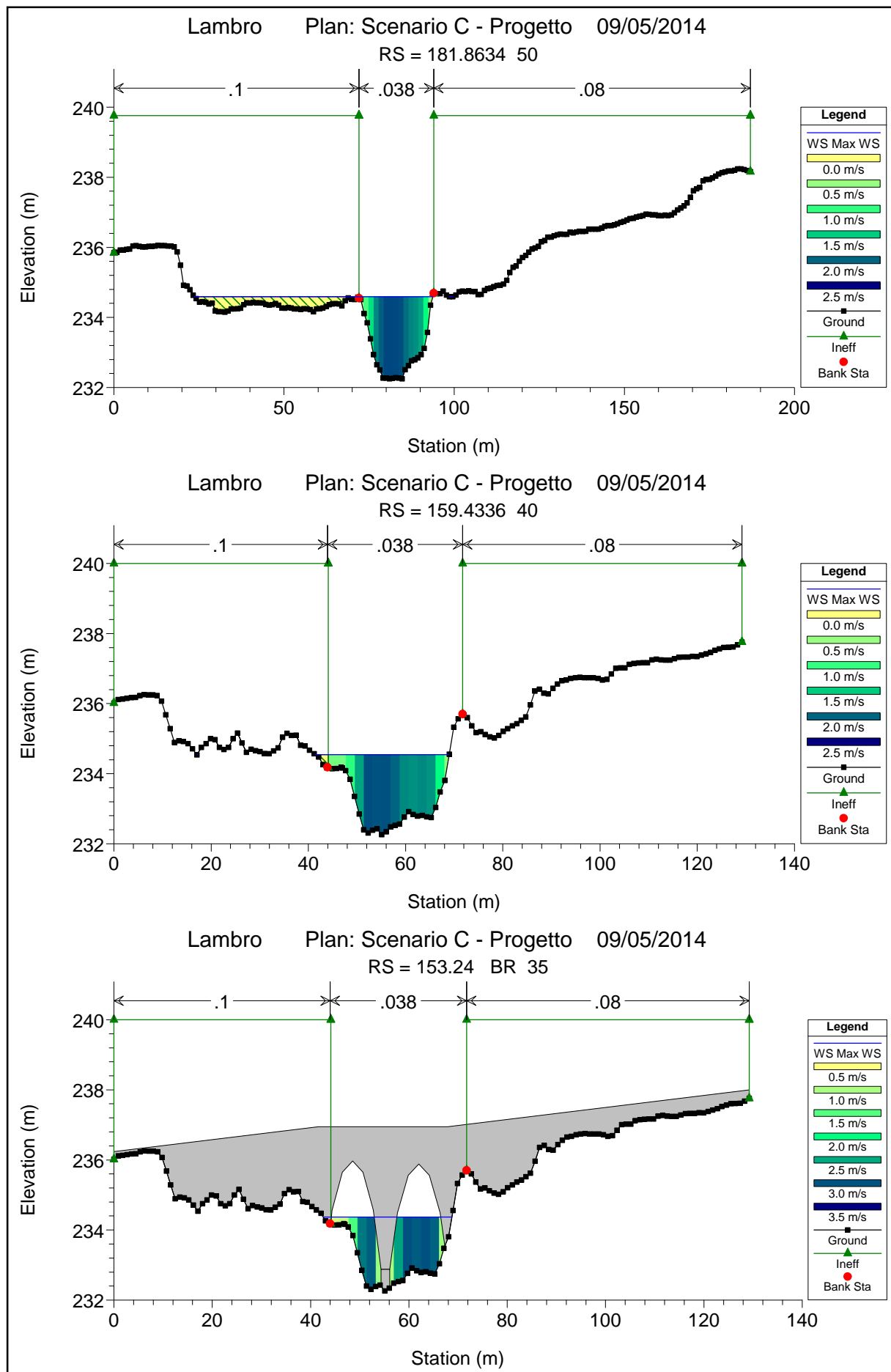


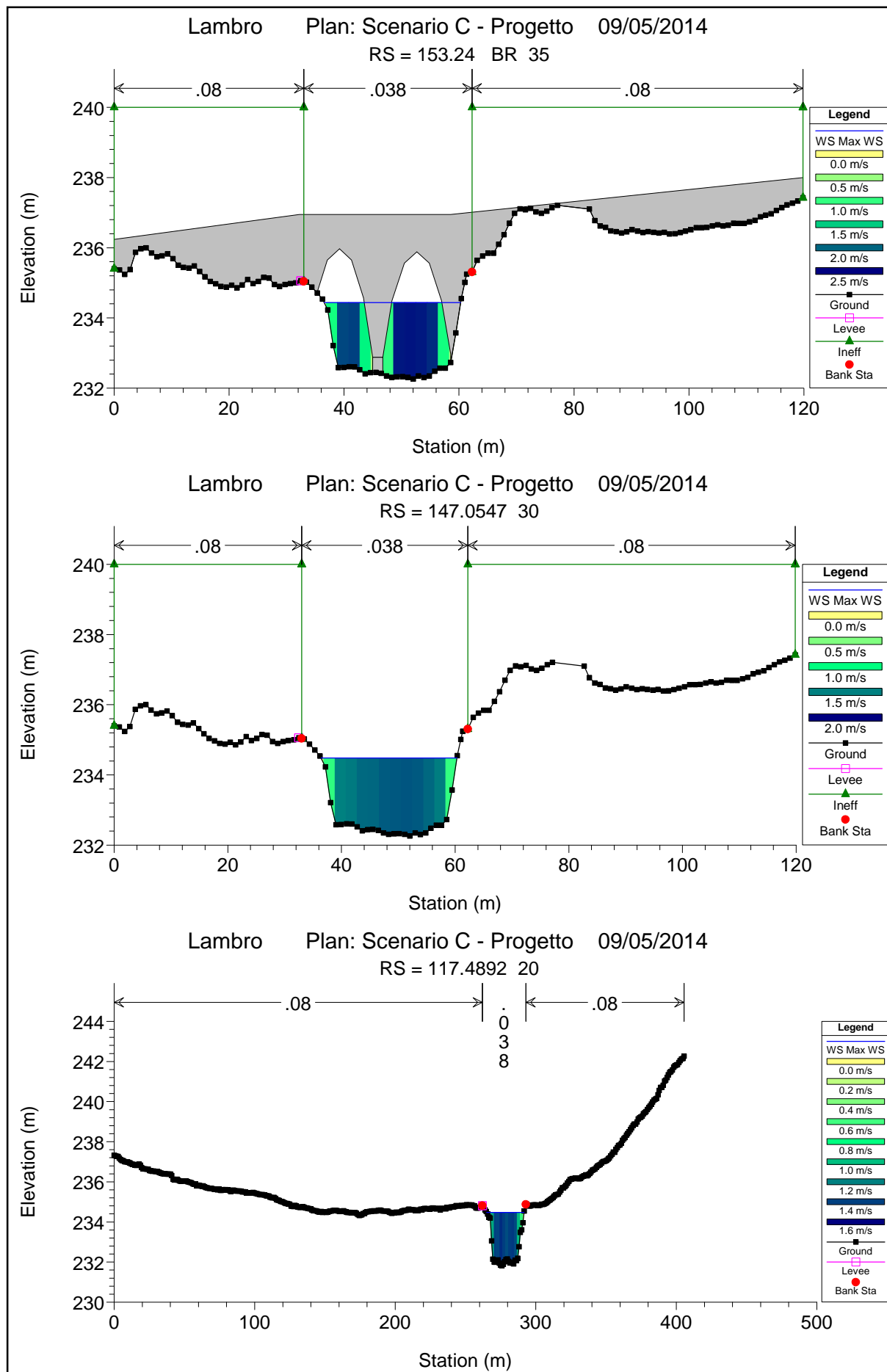


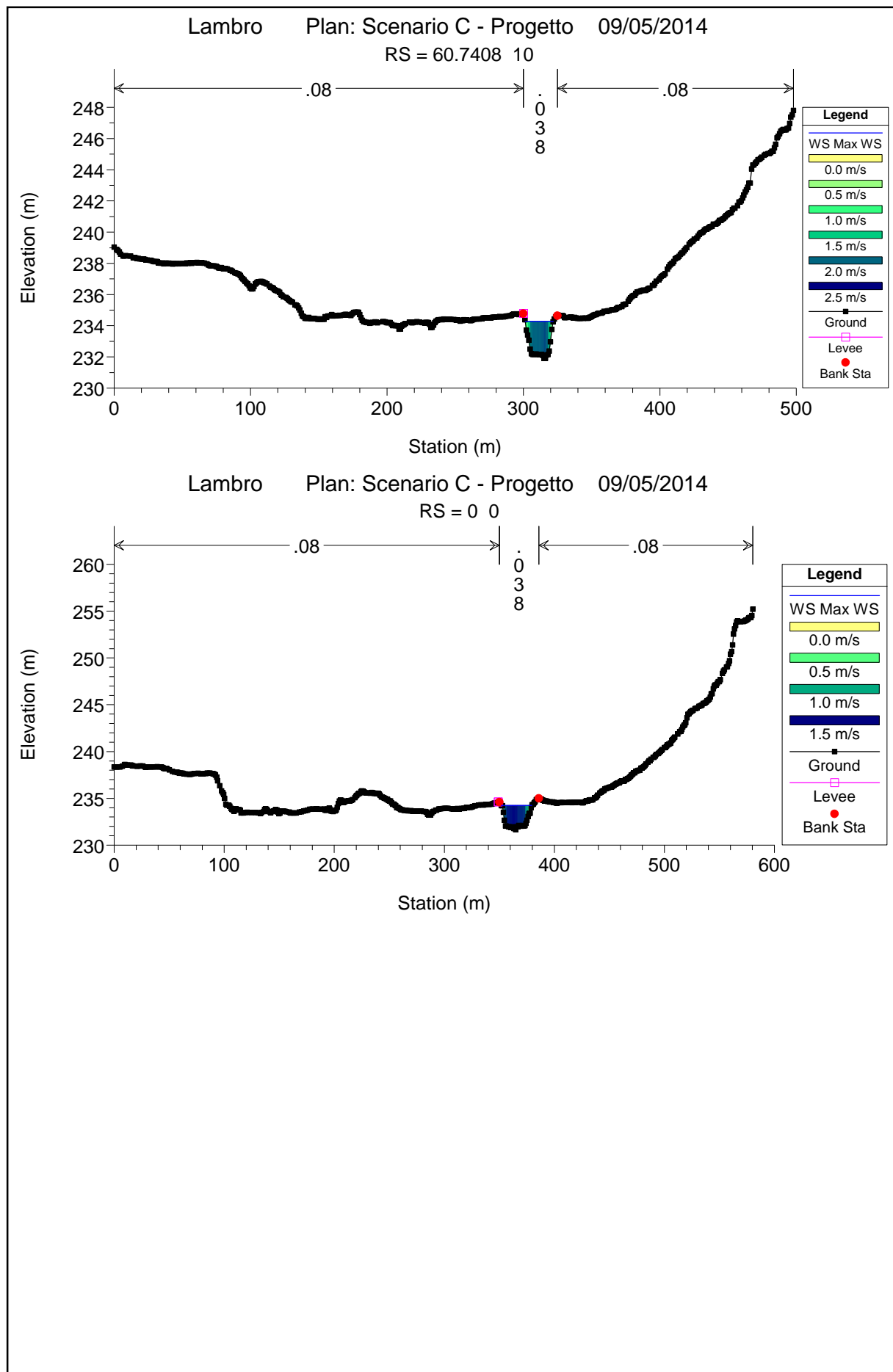
















## PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

*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**

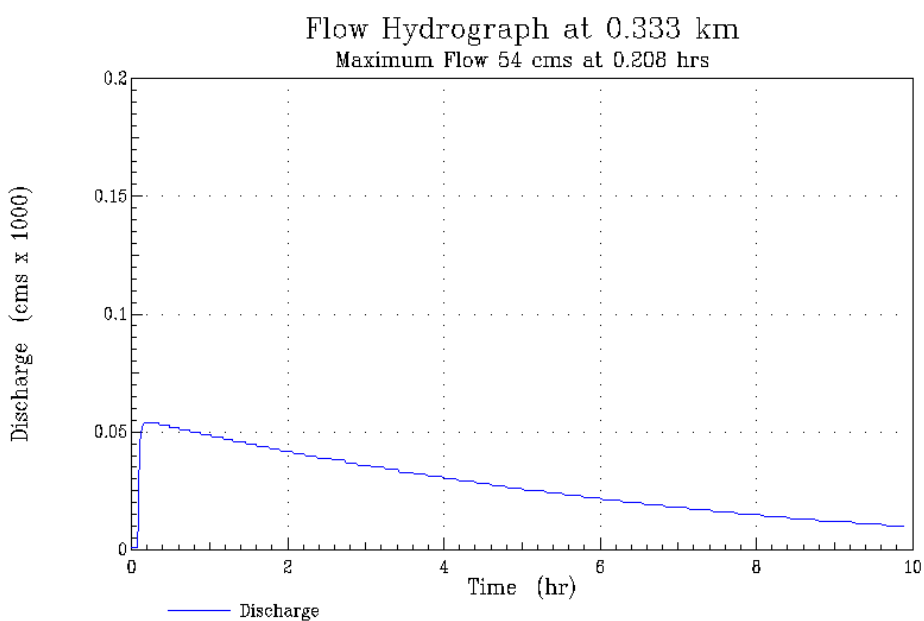
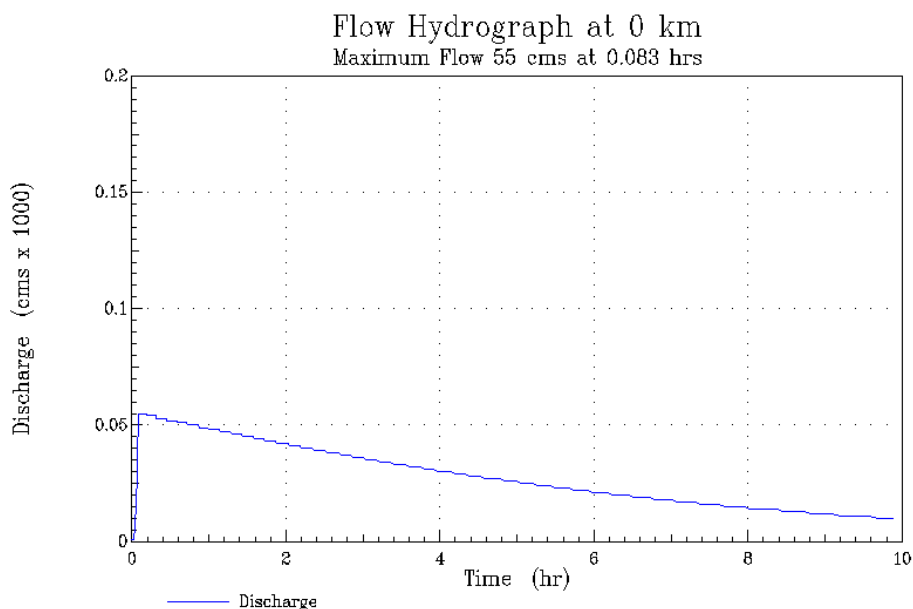
**SRA**  
s.r.l.  
**STUDIO ROSSO**  
INGEGNERI ASSOCIATI s.r.l.

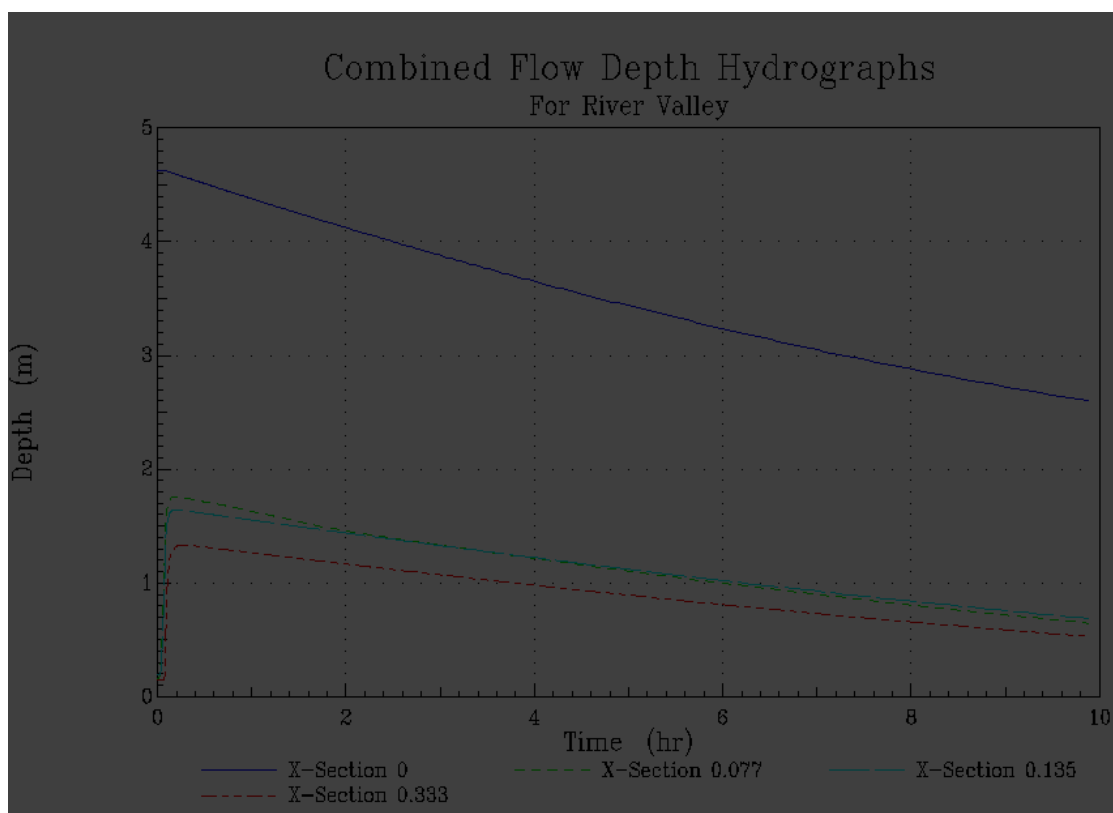
### ALLEGATO 5

– Rischio di collasso dell'opera



## SCENARIO A



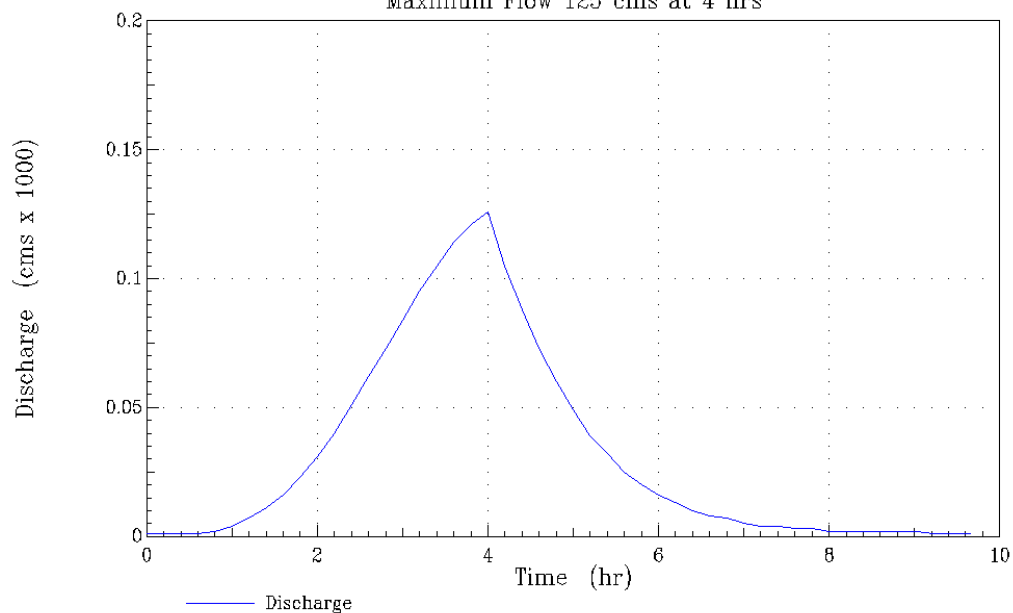




**SCENARIO B**

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

