

UFFICIO OPERATIVO DI MILANO

Via Taramelli 12, 20124 Milano

**MB-E-3 PROGETTAZIONE DEFINITIVA
 E REDAZIONE DEL PIANO OPERATIVO DI BONIFICA
 PER LA REALIZZAZIONE DI UN'AREA DI LAMINAZIONE
 PER LE PIENE DEL TORRENTE SEVESO
 NEI COMUNI DI PADERNO DUGNANO (MI) E VAREDO (MB)
 C.I.G.: 6574175CD2 C.U.P.: B57B15000390003**

PROGETTO DEFINITIVO

RELAZIONE IDROLOGICA ED IDRAULICA

RESPONSABILE PROGETTAZIONE GENERALE:
 DOTT. ING. FULVIO BERNABEI

PROGETTAZIONE IDRAULICA E STRUTTURALE:
 DOTT. ING. FULVIO BERNABEI
 DOTT. ING. STEFANO ADAMI
COORD. DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE:
 DOTT. ING. LAURA GRILLI

GEOLOGIA E PROGETTAZIONE GEOTECNICA:
 PROF. GEOL. LAMBERTO LUCIANO GRIFFINI
 DOTT. ING. STEFANO GRIFFINI

PROGETTAZIONE PAESAGGISTICA E AMBIENTALE:
 DOTT. ING. MASSIMO SARTORELLI
 DOTT. MARIO PUZZI
 DOTT. STEFANIA TRASFORINI
 DOTT. CHIARA LUVIÈ
 DOTT. ANDREA SIBILIA

CONSULENZE SPECIALISTICHE
 ASPETTI PAESAGGISTICI E AMBIENTALI:
 PROF. ANGELO DAL SASSO
 PROF. GIUSEPPE CROSA

PIANO DI BONIFICA:
 PROF. GEOL. GIOVANNI PIETRO BERETTA
 DOTT. GEOL. MAURIZIO NESPOLI
 DOTT. ING. ADELIO PAGOTTO
 DOTT. GEOL. MONICA AVANZINI

DOTT. ING. PAOLO SANAVIA

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO:
 DOTT. ING. LUIGI MILLE

CAPOGRUPPO MANDATARIA:



MANDANTE:



MANDANTE:



MANDANTE:



MANDANTE: Ing. Paolo Sanavia

ELAB. N°

3

 DATA **GIUGNO 2017**

COMMESSA N° 017/2016	REDATTO PS
CODICE COMMESSA DEFAIPOVAREDO	CONTROLLATO AD
NOME FILE	APPROVATO BERNABEI

Mod.7.3 F - Rev.01

REV.	DATA	DESCRIZIONE MODIFICA	REDATTO	CONTR.	APPR.
01	FEBB. 2019	REVISIONE A SEGUITO RAPPORTO DI VERIFICA			

INDICE

1	Premessa	3
2	Finalità dell'opera	4
2.1	Criticità idrauliche e pianificazione di bacino del torrente Seveso	4
2.1.1	Analisi dello stato di fatto	4
2.1.2	Criteri di pianificazione	6
2.1.3	Interventi previsti nello Studio AIPO 2011	11
2.2	Finalità specifiche	18
3	Descrizione dell'opera	32
3.1	Generalità	34
3.2	Invaso di laminazione	34
3.3	Opera di presa	36
3.4	Sfioratore d'emergenza	42
3.5	Canali di alimentazione dell'invaso	42
3.6	Stazione di sollevamento	43
4	Sviluppo della progettazione idraulica	47
4.1	Verifica del funzionamento idraulico dell'opera nello scenario di progetto	48
4.1.1	Obiettivi	48
4.1.2	Strumenti	48
4.1.2.1	<i>Il codice di calcolo</i>	48
4.1.2.2	<i>Idraulica</i>	48
4.1.2.3	<i>Modellazione dei manufatti idraulici</i>	51
4.1.2.4	<i>Costruzione del modello bidimensionale</i>	52
4.1.2.5	<i>Condizioni al contorno</i>	54
4.1.3	Risultati	55
4.2	Valutazione del rischio idraulico locale indotto dall'opera	56
4.2.1	Condizioni di funzionamento ordinario	56
4.2.1.1	<i>Obiettivi</i>	56
4.2.1.2	<i>Strumenti</i>	56
4.2.1.3	<i>Risultati</i>	57
4.2.2	Condizioni eccezionali	58
4.2.2.1	<i>Malfunzionamento dell'opera</i>	58
4.2.2.2	<i>Resilienza dell'opera</i>	62
5	Valutazione delle modalità e frequenza di attivazione dell'invaso	66
5.1	Analisi eventi reali	66

5.2	Analisi eventi sintetici	81
5.2.1	Analisi evento per T=2 anni	81
5.2.2	Analisi evento per T=5 anni	82
5.2.3	Analisi evento per T=10 anni	84
6	Processo di svuotamento dell'invaso	87
6.1	Svuotamento a gravità	87
6.2	Sollevamento meccanico	89

1 Premessa

La presente progettazione definitiva ha per oggetto i lavori per la realizzazione **dell'area di laminazione del torrente Seveso nei Comuni di Varedo (MB), Paderno Dugnano (MI) e Limbiate (MI)**. Si tratta di una vasca di laminazione in scavo da circa 2.100.000 m³, posta esternamente **all'alveo di piena del torrente Seveso**, con funzionamento in derivazione. **L'invaso è localizzato circa 1 km a monte dell'opera di presa del Canale Scolmate di Nord Ovest.**

La presente relazione espone le principali caratteristiche idrologico-idrauliche del sistema fluviale afferente alla vasca in progetto e riporta i risultati delle verifiche idrauliche svolte sull'**opera**.

Per quanto concerne **l'inquadramento** generale relativo **all'assetto idrologico-idraulico** (presente e futuro) del bacino, nella presente progettazione si è fatto riferimento allo **"Studio idraulico del torrente Seveso nel tratto che va dalle sorgenti alla presa del Canale Scolmatore Nord Ovest (CSNO) in località Palazzolo in Comune di Paderno Dugnano (MI) e studio di fattibilità della vasca di laminazione del CSNO a Senago (MI)" (d'ora in avanti denominato Studio AIPO 2011)**, redatto nel 2011 dalla società ETATEC Studio Paoletti s.r.l. su incarico di AIPO ed **approvato nell'ambito dell'Accordo di Programma relativo** alla difesa idraulica del territorio milanese.

Utili informazioni sono state inoltre reperite nei seguenti progetti:

- **"Progetto preliminare di "Adeguamento delle Aree golenali del Torrente Seveso" nei comuni di Carimate, Vertemate con Minoprio e Cantù (CO) – aprile 2015**, redatto **dall'Associazione Temporanea di Imprese e Professionisti ETATEC Studio Paoletti S.r.l., Studio Paoletti Ingegneri Associati, Beta Studio S.r.l., Studio Associato di Geologia Spada, Dott. Ing. Alessandro Barbon**;
- **Progetto definitivo dell' "Area di laminazione del Torrente Seveso in Comune di Lentate sul Seveso (MB)" – gennaio 2016**, redatto **dall'Associazione Temporanea di Imprese e Professionisti ETATEC Studio Paoletti S.r.l., Studio Paoletti Ingegneri Associati, Studio Associato di Geologia Spada**;
- **Progetto preliminare dell' "Area di laminazione del Torrente Seveso nei Comuni di Varedo (MB), Paderno Dugnano (MI), Limbiate (MB)" – novembre 2015**, redatto **dall'Associazione Temporanea di Imprese e Professionisti ETATEC Studio Paoletti S.r.l., Studio Paoletti Ingegneri Associati, Beta Studio S.r.l., Studio Associato di Geologia Spada, Dott. Ing. Alessandro Barbon**;
- **Progetto definitivo dell'area di laminazione sul CSNO in Comune di Senago** redatto **dall'Associazione Temporanea di Imprese e Professionisti ETATEC Studio Paoletti S.r.l., Studio Paoletti Ingegneri Associati, Studio Associato di Geologia Spada, Dott. Ing. C. Tonetto**.

2 Finalità dell'opera

L'opera in progetto rientra tra gli invasi di laminazione previsti nel già citato *"Studio idraulico del torrente Seveso nel tratto che va dalle sorgenti alla presa del C.S.N.O. in località Palazzolo in Comune di Paderno Dugnano (MI) e studio di fattibilità della vasca di laminazione del C.S.N.O. a Senago (MI)"* (2011), redatto dalla società ETATEC s.r.l. per conto di AIPO – Agenzia Interregionale per il fiume Po. Tale studio costituisce di fatto un aggiornamento del precedente *"Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua naturali e artificiali all'interno dell'ambito idrografico di pianura Lambro – Olona"* (2002 ÷ 2004), redatto per conto dell'Autorità di Bacino allo scopo di analizzare nel dettaglio le problematiche idrauliche dei bacini idrografici di pianura a nord di Milano e pianificare gli interventi necessari per garantire un adeguato livello di protezione dalle piene.

Come successivamente spiegato, la configurazione dell'opera in progetto originariamente prevista nello Studio AIPO 2011 è stata modificata in fase di progettazione preliminare sia per effetto dell'implementazione delle misure di riduzione del rischio a monte di Varedo, sia per esigenze di mitigazione dell'impatto dell'opera sul territorio.

I paragrafi seguenti richiamano brevemente le criticità idrauliche evidenziate negli studi pregressi, e descrivono le soluzioni previste nello Studio AIPO 2011 e nelle sue successive integrazioni.

2.1 Criticità idrauliche e pianificazione di bacino del torrente Seveso

2.1.1 Analisi dello stato di fatto

Il torrente Seveso nasce alle falde del Monte Pallanza nel territorio del comune di San Fermo della Battaglia (CO), nelle vicinanze del confine svizzero con il Canton Ticino, sul versante Meridionale del Sasso Cavallasca, in provincia di Como, a quota 490 metri sul livello del mare; dopo aver toccato vari centri abitati della Brianza, il torrente entra nella città di Milano dove si unisce con il Naviglio della Martesana in prossimità di via Melchiorre Gioia. **La lunghezza dell'asta dall'ospedale S. Anna di Como fino a Milano è pari a circa 39 km.**

Il bacino idrografico del Seveso può essere schematicamente suddiviso in quattro parti:

- **la prima parte più settentrionale, denominata "Seveso naturale",** afferente all'asta del torrente Seveso dalla sorgente al comune di Lentate sul Seveso, presenta versanti acclivi o mediamente acclivi ed è caratterizzato da urbanizzazione ridotta, o comunque tale da non produrre modifiche rilevanti rispetto al processo naturale di formazione delle piene;
- **la seconda parte, denominata "Certesa naturale",** ad est della precedente e afferente al torrente Certesa (o Roggia Vecchia), principale affluente del Seveso, si estende dalle sorgenti del Certesa fino alla confluenza con il torrente Terrò ed è caratterizzato da versanti acclivi e da scarsa urbanizzazione;
- **la terza parte, denominata "Certesa urbano",** anch'essa afferente al Torrente Certesa, dalla confluenza con il Torrente Terrò fino alla confluenza nel torrente Seveso, presenta versanti poco acclivi e vaste aree urbanizzate (Mariano Comense, Cabiato e Meda);

- **la quarta parte, denominata "Seveso urbano", afferente direttamente al torrente Seveso, da Lentate sul Seveso all'ingresso nel tratto tombato** in Comune di Milano, presenta andamento pressoché pianeggiante **ed un'elevata urbanizzazione** (centri urbani di Barlassina, Seveso, Cesano Maderno, Bovisio Masciago, Varedo, Paderno Dugnano, Cusano Milanino, Cormano, Bresso e Cinisello Balsamo).

In relazione alla tipologia di funzionamento idrologico ed ai processi di formazione delle piene, si può assumere che i deflussi nel Seveso naturale e nel Certesa naturale dipendano esclusivamente dalle caratteristiche geomorfologiche dei sottobacini scolanti, mentre i deflussi nel Seveso urbano e nel Certesa urbano, nonostante gli apporti di alcuni piccoli affluenti (Comasinella), risultino influenzati principalmente dalla capacità di smaltimento delle reti di drenaggio urbano.

A causa della sua posizione centrale all'interno dell'area urbana milanese e di uno sviluppo urbanistico che negli ultimi 50 anni non ha avuto paragoni in Lombardia, l'assetto idraulico del Seveso presenta alcune caratteristiche peculiari, che lo distinguono dagli altri corsi d'acqua dell'area nord-milanese:

- il torrente ha un bacino di oltre 200 km², superiore al bacino **dei corsi d'acqua delle Groane** che si immettono al di sotto della città di Milano;
- poiché il torrente ha origine nella zona delle prealpi, le onde di piena che interessano il corso **d'acqua hanno una base di tipo "naturale", con volumetrie dell'onda superiori a** quelle **derivanti dagli ambiti collinari e urbani che caratterizzano gli altri corsi d'acqua** limitrofi (Groane, Bozzente ed anche Lura);
- **fin dall'ingresso nel territorio comunale di Milano**, il torrente è tombinato e presenta una capacità di deflusso (stimata in 30÷40 m³/s) assai inferiore **rispetto all'apporto di monte**; tale capacità idraulica è appena sufficiente al drenaggio delle acque meteoriche urbane **dell'hinterland per eventi che non superino i 2 anni di tempo di ritorno**;
- **il corso d'acqua, nel percorso in Milano, non presenta sezioni a cielo aperto**;
- tutto il tratto terminale del corso **d'acqua**, da Lentate sul Seveso a Milano, drena aree urbanizzate di vaste proporzioni: dei circa 226 km² di bacino sottesi **all'ingresso nel tratto tombato** in via Ornato a Milano, ben 100 km² (44%) sono infatti costituiti da aree urbane; se si considera poi come sezione di chiusura la presa del CSNO ubicata a Palazzolo (in Comune di Paderno Dugnano, **circa 7 km a monte dell'inizio del tratto tombato**), dove vengono scolmate le portate di piena del torrente Seveso, il bacino **idrografico ha un'estensione di** circa 190 km², 76 dei quali (40%) di aree urbane; per differenza si ha che il bacino idrografico del T. Seveso compreso tra la presa del CSNO e Milano è pari a 36 km², di cui 24 km² (67%) di aree urbanizzate;
- in buona parte del tratto tra Lentate sul Seveso e Milano (in particolare da Lentate sul Seveso a Cusano Milanino) il corso **d'acqua si presenta incassato di parecchi metri rispetto al piano campagna**;
- il sistema spondale del torrente è costituito per ampi tratti dai muri stessi delle case realizzate **ai margini dell'alveo**, che in alcuni casi ne riducono la capacità di deflusso;

- **lo sviluppo urbanistico dei Comuni dell'hinterland a monte** di Milano ha indotto nel corso del tempo una progressiva impermeabilizzazione di vaste aree, con conseguente aumento delle portate scaricate dai reticoli fognari; le potenzialità di scarico di tali reti sono in grado di saturare la **capacità di deflusso del corso d'acqua già per eventi associati a modesto tempo** di ritorno, pur in assenza di afflussi da monte.

L'insieme di tutti questi fattori fa sì che a Milano gli eventi alluvionali del torrente Seveso si presentino **più volte l'anno**. Secondo i dati disponibili, dal 1976 al 2014 si sono avute ben 104 esondazioni (in **media 2,7 esondazioni all'anno**). Negli ultimi anni particolarmente critico è stato **l'anno 2010**, durante il quale si sono verificate ben 8 esondazioni (03/05, 14/05, 23/07, 05/08, 12/08, 18/09, 01/11, 16/11), di cui una (quella del 18 settembre) particolarmente grave. Altre 8 esondazioni sono state registrate nel periodo 25 giugno 2014 ÷ 16 novembre 2014; tra queste, particolarmente gravose sono state **quelle dell'8 luglio e del 15-16 novembre**, nel corso delle quali si sono generate portate con tempi di ritorno prossimi ai 100 anni, che hanno causato gravi situazioni di allagamento non solo a Milano – **Niguarda ma anche in altri comuni lungo l'asta** del Seveso.

2.1.2 Criteri di pianificazione

I numerosi studi che si sono susseguiti nel tempo per la risoluzione delle criticità idrauliche **dell'ambito milanese**, in cui il Seveso si inserisce, hanno sempre ricercato soluzioni volte a ridurre pesantemente i deflussi alle porte della città (intesa ora come zona urbana milanese e non più solo come città di Milano). Coerentemente con questa impostazione è stato realizzato negli anni Cinquanta del secolo scorso il Canale Scolmatore di Nord Ovest (CSNO), che da Paderno Dugnano recapita nel fiume Ticino le acque di scolmo del torrente Seveso, del fiume Olona e dei torrenti delle Groane, e sempre sulla base di tale criterio sono state elaborate le ipotesi di sistemazione contenute nello studio del 2004 dell'**Autorità di Bacino del fiume Po**, successivamente aggiornate dallo Studio AIPO 2011 e sue integrazioni. Infatti, **il vincolo dell'attraversamento della zona urbana di Milano ha sempre imposto, ed impone tutt'oggi, lo sviluppo di pianificazioni che prevedano l'abbattimento ed in alcuni casi l'annullamento delle** portate in arrivo a Milano. La consapevolezza maturata nel corso degli anni **è che l'intero assetto del Seveso risulta vincolato** (sin dalle zone più remote del bacino) dalla conformazione ad imbuto del tratto terminale. Di conseguenza, occorre superare il tradizionale **approccio di tipo "puntuale", orientato alla formazione di arginature per** la difesa delle aree allagabili, in favore di laminazioni sovradimensionate per le esigenze locali, ma funzionali **all'obiettivo** di sicurezza a scala di bacino. Il grado di vincolo esistente sul sistema, la notevole insufficienza delle sezioni rispetto agli apporti, la pressione antropica sul territorio, inducono inoltre a prevedere che tali soluzioni strategiche siano dimensionate con ampi margini di sicurezza.

Per le ragioni sopra esposte, **l'assetto fluviale** di progetto del Seveso individuato nello Studio AIPO 2011 risulta spesso influenzato da esigenze poste assai a valle rispetto al punto di intervento. Tale situazione risulta avere tuttavia **riflessi positivi distribuiti lungo l'intera asta, in quanto la riduzione delle portate rende a volte superfluo l'adeguamento delle strutture interferenti** attualmente incompatibili.

Nella sua pianificazione, l'Autorità di Bacino aveva definito i livelli di rischio idraulico accettabili e gli interventi di adeguamento dell'asta sulla base di un evento meteorico di progetto caratterizzato da tempo di ritorno pari a 100 anni, uniformemente distribuito sull'intera superficie del bacino (ossia con ingresso contemporaneo degli afflussi meteorici nel reticolo naturale ed artificiale afferente all'asta del Seveso). Lo Studio AIPO 2011 e le successive progettazioni hanno fatto propria questa impostazione (che prevedeva inoltre l'adozione di uno ietogramma di pioggia di tipo Chicago della durata di 24 h, con picco posto ad un terzo della durata dell'evento), per sviluppare un modello numerico quasi-bidimensionale a supporto della pianificazione delle opere.

Per quanto riguarda lo stato di fatto del bacino a monte del CSNO, i risultati delle analisi idrauliche (aggiornate nella fase di progettazione preliminare della vasca di Varedo, Paderno Dugnano e Limbiate) sono riassunte in Tabella 1. La tabella riporta la capacità idraulica dell'alveo in alcune sezioni significative, a confronto con la portata centennale in arrivo nella sezione (anche attraverso lo scorrimento laterale o la tracimazione di manufatti). I valori in tabella sono arrotondati ai 5 m³/s, mentre tra parentesi è riportato il valore da modello. Nella medesima tabella sono riportati inoltre i valori della portata idrologica (da Studio dell'Autorità di Bacino 2004), intesa come la portata teoricamente presente in alveo in assenza di limitazioni al deflusso e di alterazioni derivanti dall'azione di particolari manufatti idraulici (es. derivazione nel CSNO). E' evidente come tale portata sia molto maggiore rispetto alla portata effettivamente convogliabile dall'alveo (portata idraulica), anche per effetto dei numerosi manufatti di attraversamento, che determinano per ampi tratti un profilo di rigurgito, talvolta con effetti di crisi a catena per cui il ponte di valle con il proprio rigurgito porta alla crisi il ponte a monte.

Il confronto rende evidente il notevole impatto che le opere interferenti e le aree di esondazione hanno nei processi di formazione delle piene del Seveso.

Sezione	Descrizione	Portata compatibile stato attuale	Portata idraulica stato attuale (T=100)	Portata idrologica stato attuale (T=100)
SV97	Ponte autostrada A9	30 ₍₂₉₎ (T=100)	30 ₍₂₉₎	30 ₍₃₀₎
SV93	Ponte S.S. 35	40 ₍₃₈₎ (T=100)	40 ₍₃₈₎	40 ₍₄₀₎
SV91	Ponte comunale di Casnate	15 ₍₁₅₎ (T=10)	40 ₍₄₂₎	45 ₍₄₆₎
SV87	Ponte S.P. 27 (Como)	50 ₍₄₉₎ (T=100)	50 ₍₄₉₎	55 ₍₅₄₎
SV84	Ponte Abbazia Vertemate – Valle confluenza Acquanegra	30 ₍₂₇₎ (T=10)	80 ₍₇₈₎	90 ₍₉₁₎
SV77	Ponte S.P.34 (Como) – Idrometro di Cantù Asnago	35 ₍₃₅₎ (T=10)	60 ₍₅₉₎	105 ₍₁₀₅₎
SV73	Ponte FFSS Milano-Chiasso a Carimate – Valle confluenza Valle Antonio	35 ₍₃₆₎ (T=10)	65 ₍₆₄₎	120 ₍₁₂₂₎

Sezione	Descrizione	Portata compatibile stato attuale	Portata idraulica stato attuale (T=100)	Portata idrologica stato attuale (T=100)
SV68	Ponte S.P.32 (Como) – confluenza Serenza	35 ₍₃₆₎ (T=10)	65 ₍₆₅₎	140 ₍₁₄₂₎
SV64	Ponte linea FF.SS. Milano-Chiasso a Lentate sul Seveso	80 ₍₇₇₎ (T=100)	80 ₍₇₇₎	170 ₍₁₆₈₎
SV57	Ponte di Camnago di Lentate sul Seveso	80 ₍₈₁₎ (T=100)	80 ₍₈₁₎	180 ₍₁₇₈₎
SV54	Ponte di via Marconi – Barlassina	55 ₍₅₅₎ (T<100)	85 ₍₈₄₎	185 ₍₁₈₅₎
SV53	Ponte superstrada Milano-Meda a Barlassina	85 ₍₈₃₎ (T=100)	85 ₍₈₃₎	185 ₍₁₈₃₎
SV42	Ponte FNM Seregno-Saronno	85 ₍₈₇₎ (T=100)	85 ₍₈₇₎	185 ₍₁₈₃₎
SV40	Ponte comunale Cesano Maderno – valle confluenza T. Certesa	160 ₍₁₆₁₎ (T=100)	160 ₍₁₆₁₎	250 ₍₂₅₂₎
SV34	Ponte comunale Bovisio Masciago	175 ₍₁₇₆₎ (T=100)	175 ₍₁₇₆₎	265 ₍₂₆₆₎
SV32	Ponte comunale Bovisio Masciago	85 ₍₈₃₎ (T=10)	165 ₍₁₆₃₎	270 ₍₂₇₁₎
SV27	Ponte attraversamento Canale Villoresi – a monte presa CSNO	165 ₍₁₆₅₎ (T=100)	165 ₍₁₆₅₎	275 ₍₂₇₆₎
SV24	Paratoia CSNO – a valle opera di presa	135 ₍₁₃₄₎ (T=100)	135 ₍₁₃₄₎	275 ₍₂₇₅₎

Tabella 1. Confronto tra la portata idraulica e la portata compatibile in alveo (da Progetto preliminare).

Per quanto riguarda invece il rischio idraulico a valle del CSNO (città di Milano) nelle condizioni di bacino attuali, l'analisi idrologico-idraulica condotta **nell'ambito della progettazione definitiva dell'Area di laminazione del Torrente Seveso in Comune di Lentate sul Seveso (MB)**, sviluppando le analisi dello Studio AIPo 2011, ha **portato a definire in corrispondenza dell'opera di presa del CSNO a Palazzolo (sezione SV 24 dell'Autorità di Bacino)** gli idrogrammi di piena rappresentati nelle figure seguenti.

La Figura 1 presenta **l'idrogramma di piena per T=100 anni**, che risulta caratterizzato da un valore della portata al colmo pari a circa 153 m³/s e da un volume dell'onda pari a circa 6,7 Mm³.

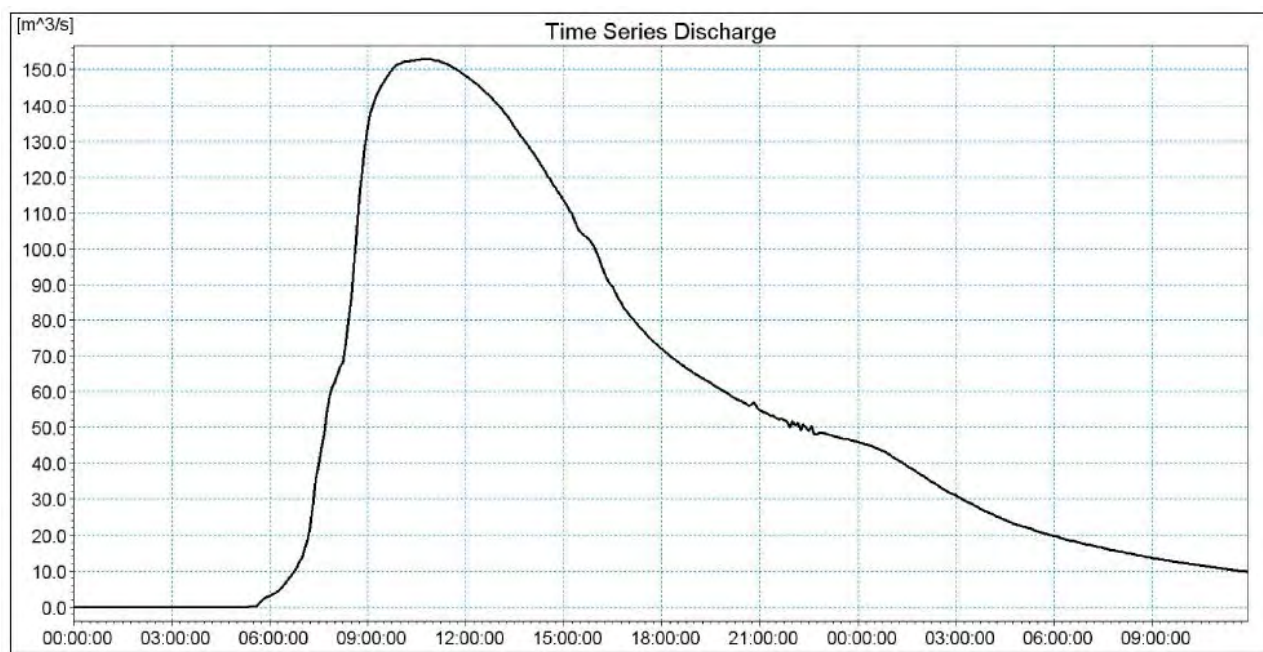


Figura 1. Idrogramma TR=100 anni in corrispondenza della sezione SV 24 a monte del CSNO.

La Figura 2 presenta l'idrogramma di piena per $T = 10$ anni, che risulta caratterizzato da una portata al colmo pari a circa $120 \text{ m}^3/\text{s}$ e da un volume dell'onda pari a circa $5,0 \text{ Mm}^3$.

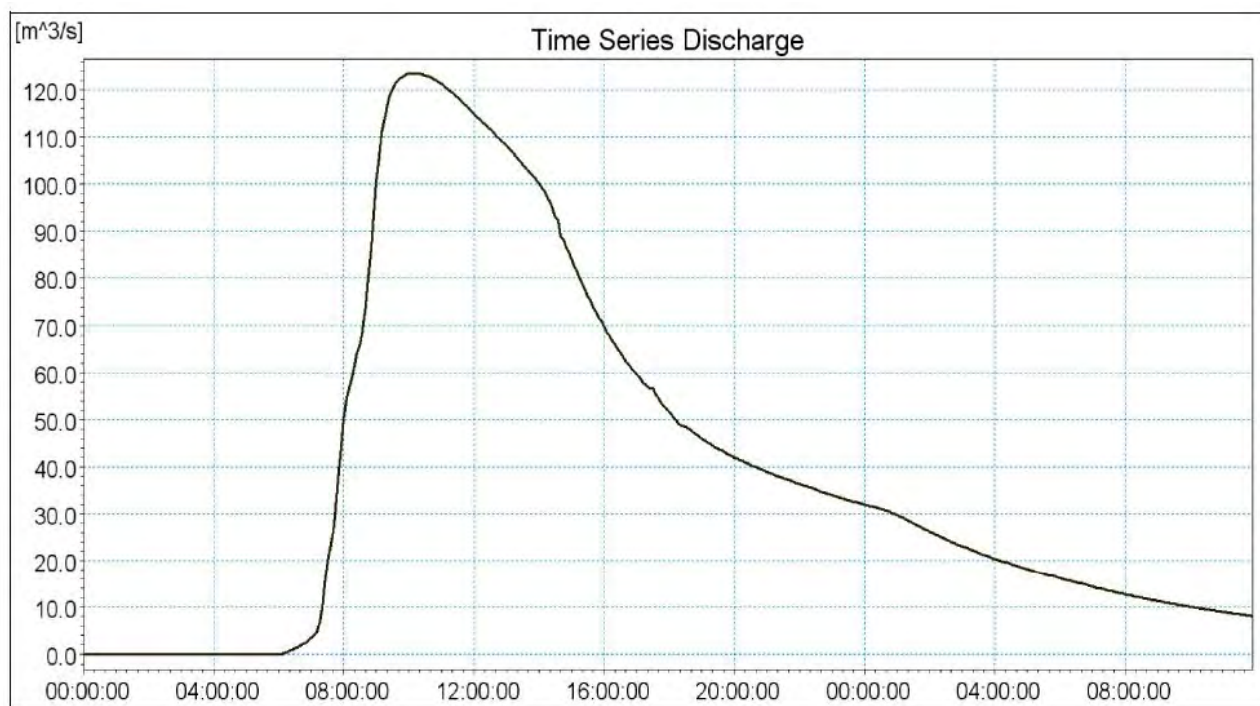


Figura 2. Idrogramma $T=10$ anni in corrispondenza della sezione SV 24 a monte del CSNO.

La Figura 3 **presenta l'idrogramma di piena per $T = 5$ anni**, che risulta caratterizzato da una portata al colmo pari a circa $100 \text{ m}^3/\text{s}$ e da un volume dell'onda pari a circa $4,3 \text{ Mm}^3$.

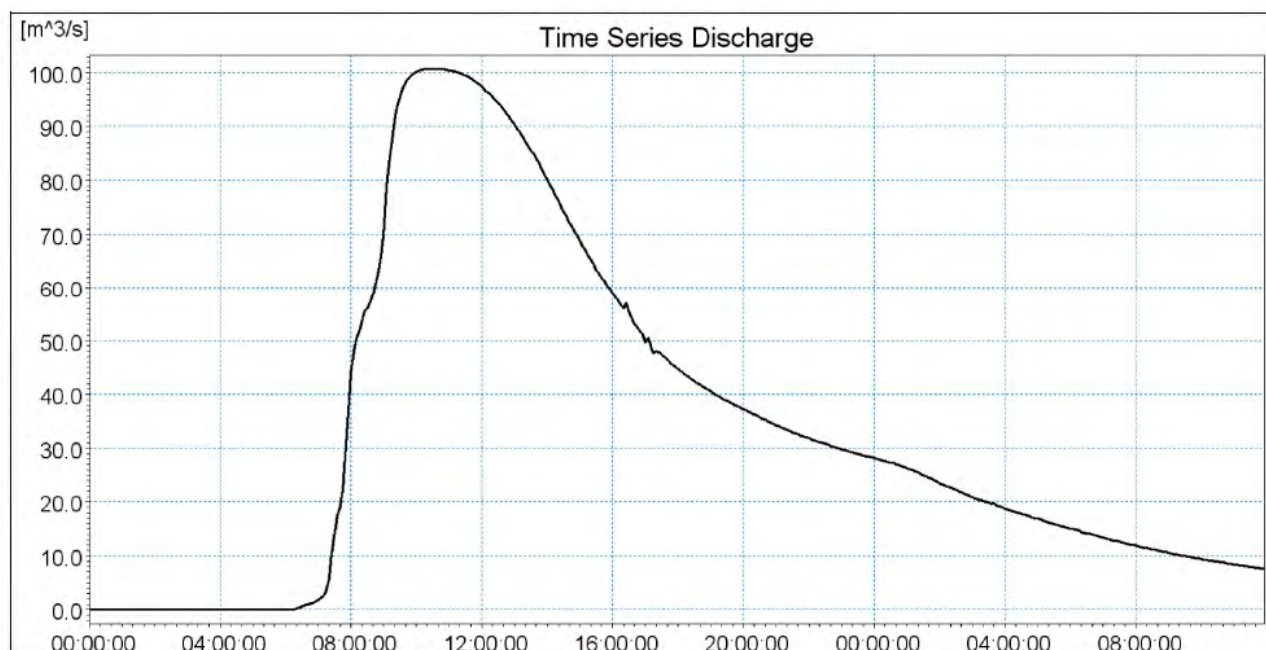


Figura 3. Idrogramma $T=5$ anni in corrispondenza della sezione SV 24 a monte del CSNO.

La Figura 4 **presenta l'idrogramma di piena per $T = 2$ anni**, che risulta caratterizzato da una portata al colmo pari a circa $65 \text{ m}^3/\text{s}$ e da un volume dell'onda pari a circa $2,9 \text{ Mm}^3$.

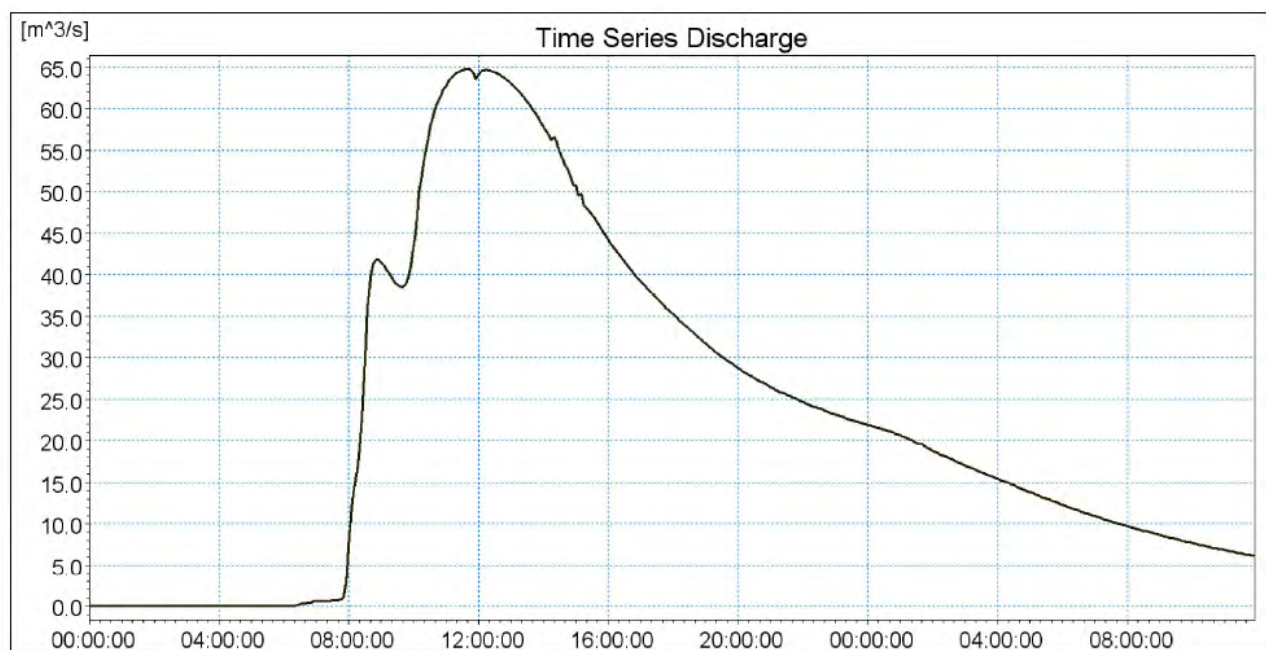


Figura 4. Idrogramma $T=2$ anni in corrispondenza della sezione SV 24 a monte del CSNO.

Considerando che:

- **il tratto tombinato del Seveso in Milano, secondo lo "Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del torrente Seveso nella tratta compresa tra Palazzolo e Milano nell'ambito idrografico di pianura Lambro – Olona" (2011) condotto da Metropolitana Milanese S.p.A.** per conto del Comune di Milano, è caratterizzato da una portata massima convogliabile pari a 40 m³/s,
- **l'unica opera fondamentale di difesa idraulica del territorio nord-milanese e di Milano** attualmente operativa è costituita dal Canale Scolmatore Nord Ovest (CSNO), il quale è in grado di derivare dal Seveso una portata pari a circa 30 m³/s,
- **l'apporto meteorico nel Seveso proveniente dal territorio dei comuni della cintura nord-milanese** a valle della presa del CSNO a Palazzolo può da solo superare, negli eventi più intensi, la suddetta capacità idraulica del tratto tombinato in Milano,

è evidente che il grado di insufficienza del Seveso nel tratto terminale in **attraversamento dell'area urbana di Milano** è molto elevato, anche per eventi con ridotti tempi di ritorno. Tale conclusione è confermata dalla frequenza degli allagamenti osservati in città.

2.1.3 Interventi previsti nello Studio AIPO 2011

A fronte delle criticità idrauliche sopra evidenziate, lo Studio AIPO 2011 individuava (riprendendo **l'impostazione del precedente studio dell'Autorità di Bacino**) una serie di soluzioni progettuali idonee ad una completa sistemazione **idraulica del corso d'acqua, sviluppando anche** le relative analisi di fattibilità tecnica, economica ed ambientale delle opere. Come già detto, tali interventi sono stati dimensionati sull'evento centennale di progetto **adottato dall'Autorità** di bacino del fiume Po, le cui caratteristiche sono già state richiamate.

Per quanto riguarda l'area di bacino più a monte, si è già menzionato che le criticità individuate durante gli eventi di piena sono legate essenzialmente alla presenza di alcuni manufatti insufficienti che creano allagamenti localizzati sia in aree urbanizzate, sia in aree golenali destinate a coltivazioni. Gli interventi previsti dallo studio in tale zona miravano quindi al mantenimento delle aree di allagamento naturale che interessano le zone golenali, al miglioramento, ove possibile, delle capacità di laminazione delle onde di piena, e alla difesa dagli allagamenti dei centri abitati, in cui tali fenomeni risultano incompatibili.

Il tratto compreso tra Lentate sul Seveso e Milano presenta invece livelli di problematicità ben maggiori; a causa della pressione antropica, **l'alveo** del Seveso ha assunto infatti una conformazione tale per cui si ha una diffusa insufficienza delle sezioni e dei manufatti nei riguardi delle portate di piena (anche di entità non elevata), soprattutto nel tratto terminale: come già detto al paragrafo precedente infatti, la portata al colmo con tempo di ritorno pari a 100 anni in ingresso a Milano risulta essere pari a circa 150 m³/s, mentre la portata compatibile in tale tratto (tombinato) è pari a circa 30÷40 m³/s.

Poiché, come già messo in evidenza nello studio AdBPo del **2004**, **l'apporto meteorico** proveniente dal territorio dei comuni a valle del CSNO supera da solo la capacità idraulica di tale tratto, lo Studio

AIPO 2011 ribadiva la necessità di annullare la portata del Seveso a valle della presa del CSNO. Questo implica che la portata in arrivo da monte **per l'evento di progetto**, convenientemente limitata per effetto di importanti laminazioni **poste lungo l'asta del Seveso, deve poter essere totalmente** deviata nel CSNO. Considerato inoltre che il progetto definitivo relativo ai *"Lavori di adeguamento funzionale del Canale Scolmatore di Nord Ovest nel tratto compreso tra Senago (MI) e Settimo Milanese (MI) – MI.E.781"* di AIPO e della Provincia di Milano, aveva come obbiettivo quello di garantire nella sezione del CSNO immediatamente a **monte dell'immissione dello sfioro del T. Garbogera** una portata massima di 25 m³/s, lo Studio AIPO 2011 prevedeva che anche lungo il primo tratto del CSNO fossero disposte opere di laminazione in grado di ridurre la portata di piena centennale derivata dal Seveso fino a tale valore. **Poiché l'onda di piena** di progetto del T. Seveso a monte del CSNO è caratterizzata da un volume di circa 6,7 Mm³ e considerando di poter lasciar proseguire verso valle una portata massima di 25 m³/s (0 a valle della presa del CSNO e 25 m³/s nel CSNO a monte **dell'immissione dello sfioro del T. Garbogera**), il volume di laminazione complessivamente necessario, ammettendo che il complesso delle laminazioni fosse disposto in derivazione e **con un effetto di "taglio" a portata costante (teoria della laminazione ottimale)**, veniva dunque stimato pari a circa 4,4 Mm³, come illustrato nella Figura 5.

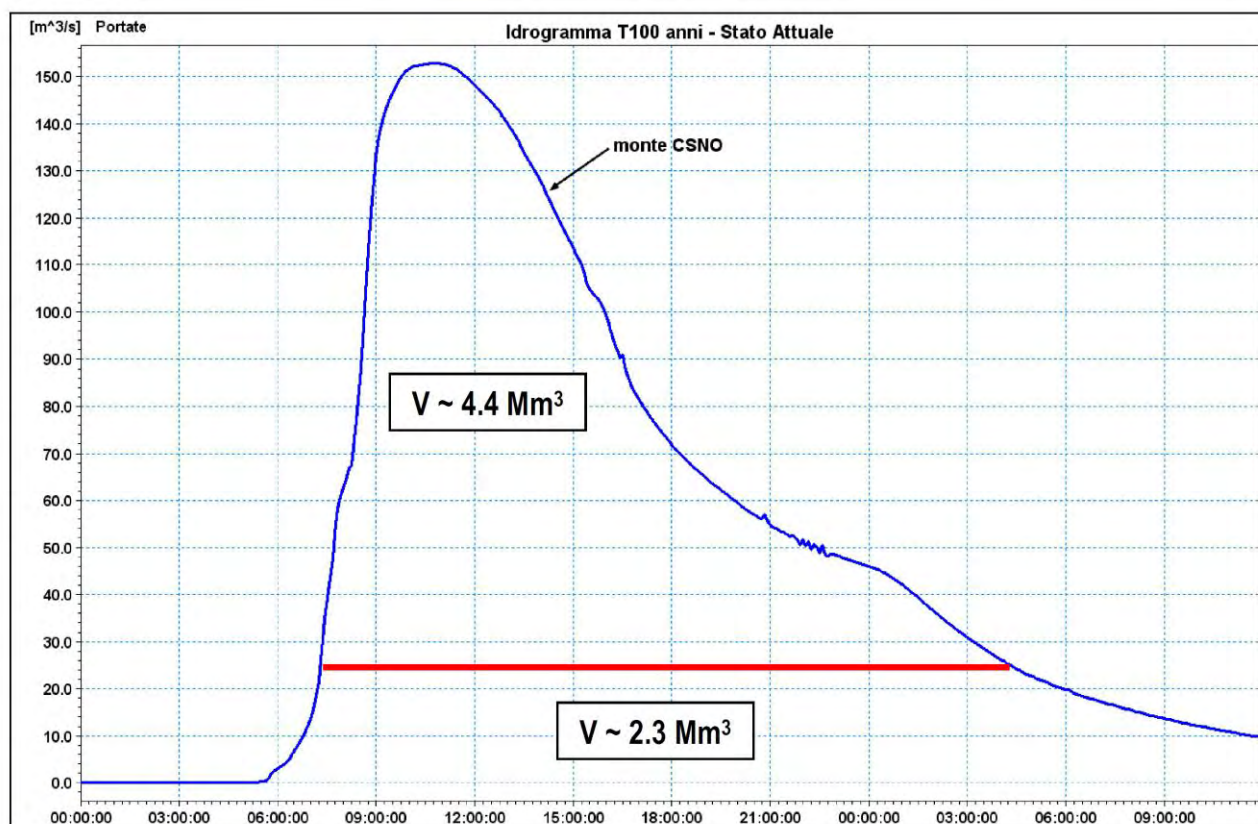


Figura 5. Idrogramma di piena del T. Seveso a monte della presa del CSNO. La linea rossa rappresenta il limite della portata che può proseguire nel CSNO a valle di Senago (intersezione con il T. Garbogera).

Nella localizzazione delle aree di invaso lo Studio AIPO 2011 ha dovuto tener conto dei vincoli esistenti nel bacino, in particolare, nel tratto tra Lentate sul Seveso fino alla presa del CSNO.

L'estrema difficoltà di reperire in questo tratto aree di notevole estensione da adibire a cassa di espansione è soprattutto dovuta alla profondità del fondo alveo rispetto al piano campagna ed alla notevole pressione antropica, che si spinge frequentemente sino alle sponde. Lo studio ha inoltre **verificato che sia l'alto bacino del torrente Seveso (sino a Carimate) sia il bacino del torrente Certesa (sino a Meda)** non presentano caratteristiche morfologiche tali da poter accogliere estesi sistemi di laminazione, in grado di ridurre significativamente le portate. In tale scenario, analizzando la situazione del medio bacino del torrente, lo Studio AIPO 2011 riscontrava che **l'unica consistente** possibilità, data la limitazione degli spazi disponibili, è quella di realizzare i volumi di laminazione mediante scavi piuttosto profondi in aree da attrezzare e restituire alla fruizione pubblica come aree verdi. Solo tramite opere di questo tipo è infatti possibile recuperare le volumetrie necessarie, dal **momento che l'eventuale diversa soluzione di reperire tali volumetrie "in elevazione", cioè mediante casse di espansione con arginature e manufatti di regolazione, imporrebbe "de-urbanizzazioni" del territorio di tale entità (vastità delle superfici da asservire) da risultare di impossibile attuazione.**

A seguito di una vasta analisi dello stato del corso d'acqua e del territorio ad esso limitrofo, lo Studio AIPO 2011 giunse quindi **a porre alla base dell'assetto di progetto del T. Seveso** le seguenti possibili aree di laminazione (vedi Figura 6 e Figura 7):

- a) **aree esondabili di laminazione "golenale" a Vertemate con Minoprio, Cantù e Carimate** (volume di laminazione complessivo pari a circa 220.000 m³);
- b) opere di laminazione in scavo lungo il T. Seveso a Lentate sul Seveso (850.000 m³ di invaso), Varedo (1.500.000 m³) e Paderno Dugnano (950.000 m³);
- c) opere di laminazione in scavo lungo il CSNO a Senago (1.000.000 m³).

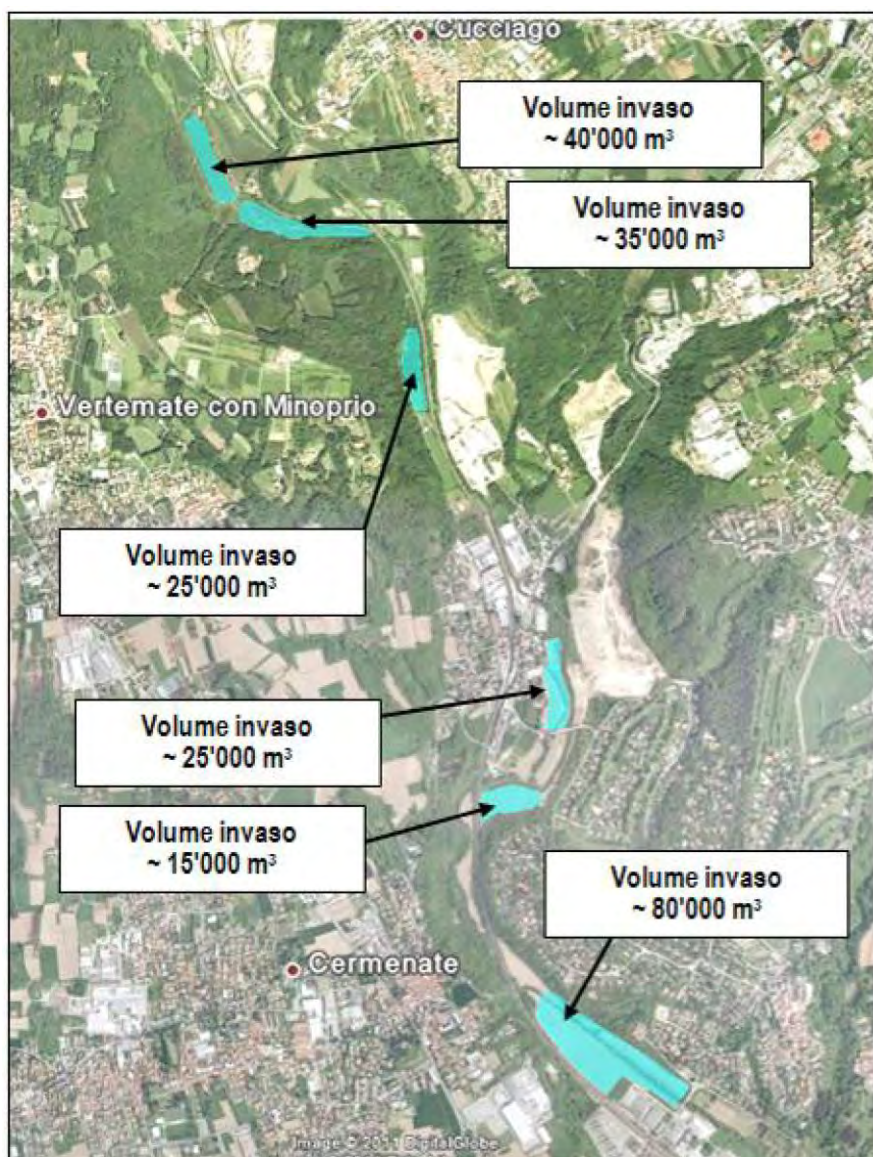


Figura 6. Invasi di laminazione in aree golenali nei comuni di Vertemate con Minoprio, Cantù e Carimate (da Studio AIPO 2011).

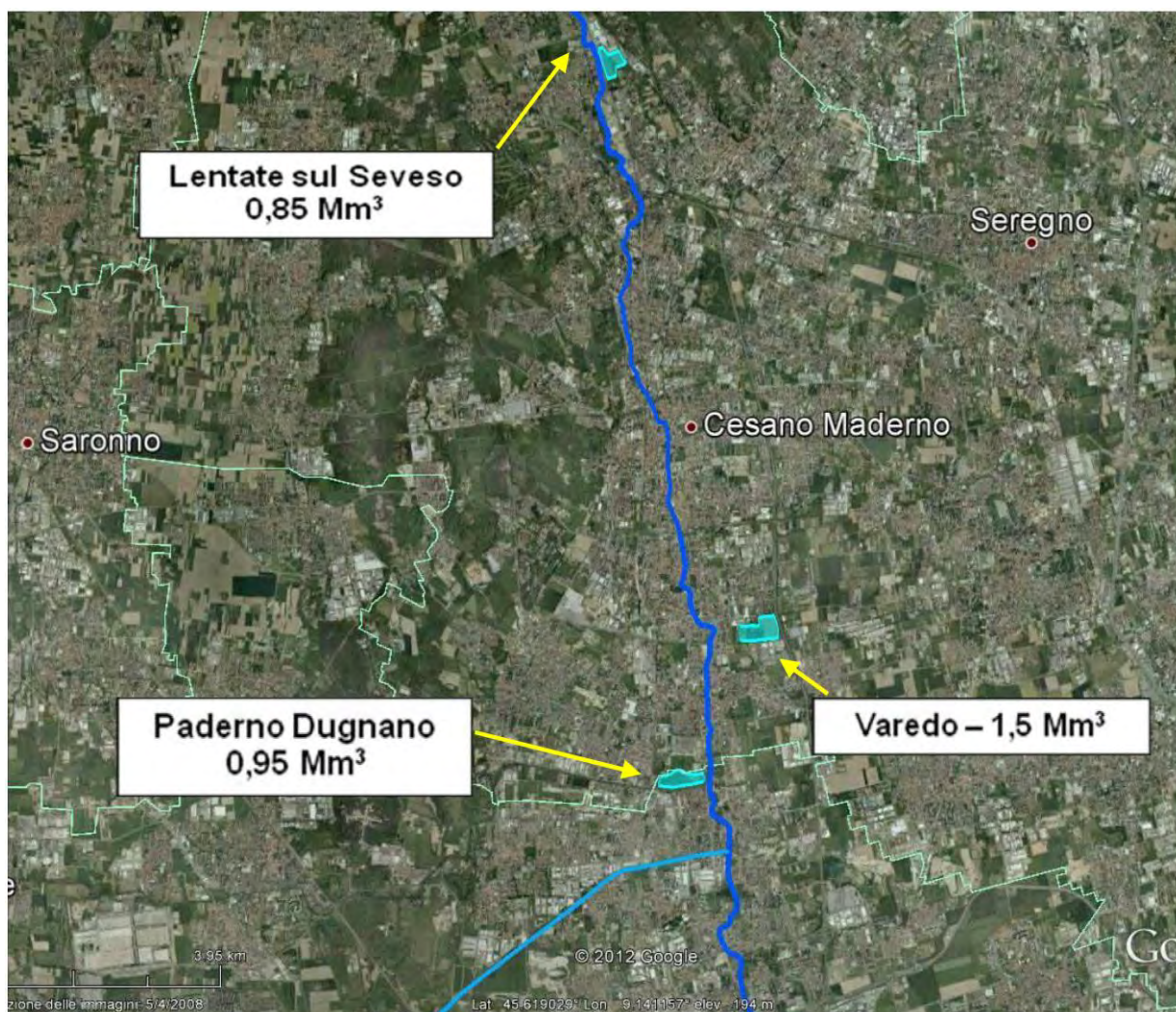


Figura 7. Invasi di laminazione in scavo da Lentate sul Seveso al CSNO (da Studio AIPO 2011).

L'assetto di progetto individuato dallo Studio-AIPo-2011 è stato aggiornato ed integrato nelle successive fasi di progettazione delle aree di laminazione, in particolare nel:

- **"Progetto preliminare di "Adeguamento delle Aree golenali del Torrente Seveso" nei comuni di Carimate, Vertemate con Minoprio e Cantù (CO) – aprile 2015, redatto dall'Associazione Temporanea di Imprese e Professionisti ETATEC Studio Paoletti S.r.l., Studio Paoletti Ingegneri Associati, Beta Studio S.r.l., Studio Associato di Geologia Spada, Dott. Ing. Alessandro Barbon;**
- **Progetto definitivo dell' "Area di laminazione del Torrente Seveso in Comune di Lentate sul Seveso (MB)" – gennaio 2016, redatto dall'Associazione Temporanea di Imprese e Professionisti ETATEC Studio Paoletti S.r.l., Studio Paoletti Ingegneri Associati, Studio Associato di Geologia Spada;**
- **Progetto preliminare dell' "Area di laminazione del Torrente Seveso nei Comuni di Varedo (MB), Paderno Dugnano (MI), Limbiate (MB)" – novembre 2015, redatto dall'Associazione Temporanea di Imprese e Professionisti ETATEC Studio Paoletti S.r.l., Studio Paoletti**

Ingegneri Associati, Beta Studio S.r.l., Studio Associato di Geologia Spada, Dott. Ing. Alessandro Barbon.

Gli aggiornamenti hanno tenuto conto delle proposte di intervento presentate da alcuni Comuni **nell'area settentrionale del bacino, a monte degli interventi originariamente previsti**; nello specifico:

- i comuni di Cavallasca, Grandate, Luisago, Montano Lucino, S. Fermo della Battaglia e Villa **Guardia hanno presentato, nell'ambito del bando regionale per la concessione di** contributi pubblicato sul BURL S.O. n. 43 del 22-10-2014, una proposta progettuale che prevede, tra **l'altro, la realizzazione di n. 3 aree di laminazione golenale per una** volumetria complessiva di circa 150.000 m³;
- **il Comune di Fino Mornasco sta studiando la possibilità di prevedere un'area di** laminazione golenale lungo il Rio Acquanegra, affluente del T. Seveso, per una volumetria di circa 10.000 m³.

Inoltre, nel mese di aprile 2015 è stato redatto il "Progetto preliminare di adeguamento delle aree **golenali nei comuni di Vertemate con Minoprio, Carimate e Cantù"** (Associazione Temporanea di Imprese e Professionisti ETATEC Studio Paoletti S.r.l., Studio Paoletti Ingegneri Associati, Beta Studio S.r.l., Studio Associato di Geologia Spada, Dott. Ing. Alessandro Barbon).

Tali interventi, già previsti nello Studio AIPo 2011, sono stati progettati tenendo conto degli effetti di laminazione conseguenti agli interventi previsti più a monte e cercando di aumentare il volume di laminazione disponibile nelle diverse aree golenali, rispetto a quanto previsto nel suddetto studio.

In particolare, il progetto preliminare ha portato a definire le seguenti opere di laminazione (cfr. Figura 10):

- Comune di Vertemate con Minoprio:
 - Area di laminazione 1: volume pari a 66.500 m³;
 - Area di laminazione 2: volume pari a 71.500 m³;
 - Area di laminazione 3: volume pari a 71.800 m³;
- Comune di Cantù:
 - Area di laminazione 4: volume pari a 52.500 m³;
- Comune di Carimate:
 - Area di laminazione 5: volume pari a 57.500 m³;
 - Area di laminazione 6: volume pari a 202.300 m³.

Complessivamente il volume di invaso nelle sei aree golenali è pari a circa 522.100 m³, superiore di oltre 300.000 m³ rispetto a quanto previsto nello Studio-AIPo-2011. Tale risultato è stato conseguito attraverso interventi di scavo e rimodellamento **per l'abbassamento del piano campagna**.



Figura 8. Invasi di laminazione in aree golenali nei comuni di Vertemate con Minoprio, Cantù e Carimate, secondo quanto previsto nel progetto preliminare (aprile 2015).

Infine, nel mese di agosto 2015 è stato redatto il progetto preliminare delle aree di laminazione in Comune di Lentate sul Seveso (Associazione Temporanea di Imprese e Professionisti ETATEC Studio Paoletti S.r.l., Studio Paoletti Ingegneri Associati, Studio Associato di Geologia Spada); si tratta di **un'area di laminazione** golenale di volumetria pari a 20.000 m³, e **soprattutto di un'area di laminazione** in scavo di volume complessivo pari a 808.000 m³ (cfr. Figura 9).

Complessivamente il volume di invaso in Comune di Lentate sul Seveso è pari a circa 828.000 m³, di poco inferiore rispetto a quanto previsto nello Studio AIPO 2011, che prevedeva un invaso di circa 850.000 m³.



Figura 9. Interventi di laminazione in progetto previsti in Comune di Lentate sul Seveso.

2.2 Finalità specifiche

Nell'ambito della progettazione preliminare del presente intervento, è stato previsto lo spostamento più a sud dell'area di laminazione in scavo in Comune di Varedo originariamente prevista nello Studio-AIPO 2011 (Figura 11) ed il suo accorpamento con l'invaso di Paderno Dugnano (Figura 10).

Il progetto preliminare del nuovo invaso di Varedo, Paderno Dugnano e Limbiate prevedeva quindi la realizzazione di un invaso in scavo del volume complessivo di circa 2,2 Mm³ e della profondità massima di 18 m dal piano campagna, ubicato in sponda destra del T. Seveso, **nell'area dell'ex stabilimento Snia interclusa tra la linea ferroviaria Milano – Como-Chiasso, a est, l'area industriale dismessa, a nord, il Canale Villoresi, a sud, e l'area residenziale di Limbiate, a ovest** (Figura 12).



Figura 10. Area di Laminazione di Paderno Dugnano nello Studio del 2011.



Figura 11. Area di laminazione di Varedo prevista nello Studio del 2011.

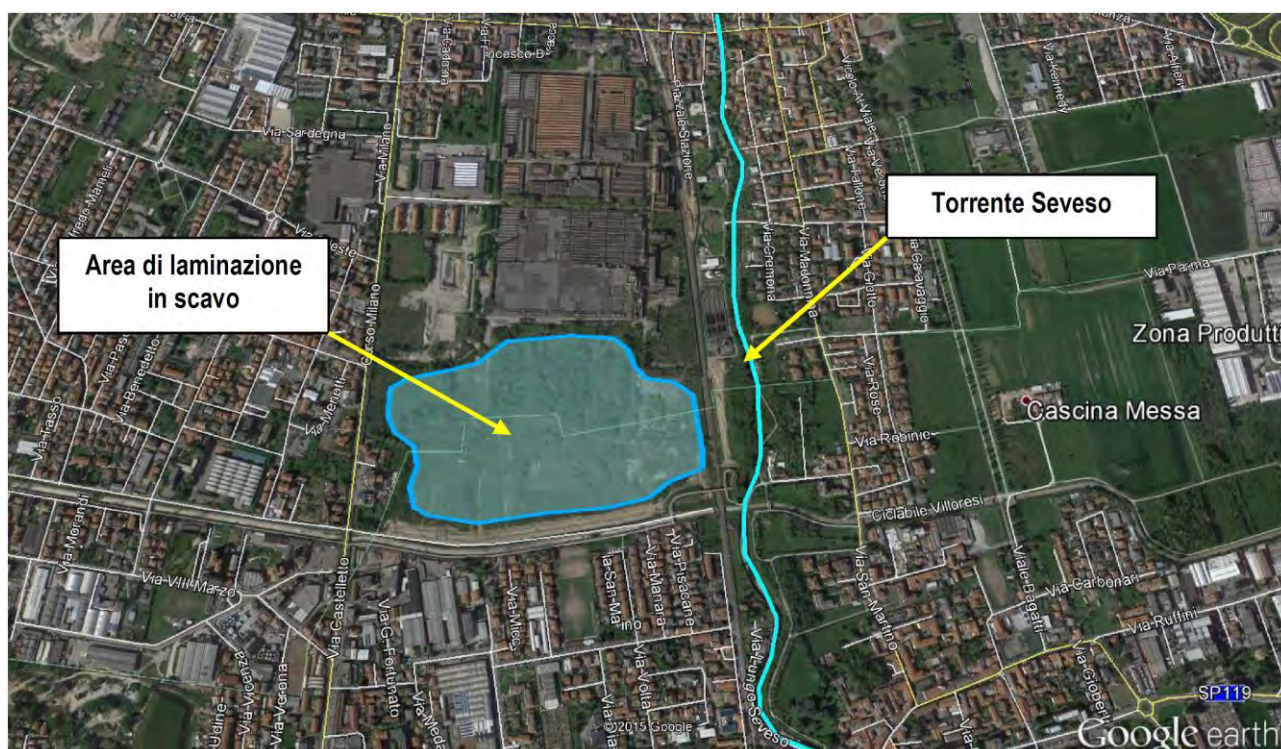


Figura 12. Inquadramento territoriale dell'intervento di laminazione in progetto.

Il progetto preliminare prevedeva inoltre un argine di coronamento fino a quota 176,50 m slm (circa 1,50 m al di sopra del piano campagna), al fine di garantire un adeguato franco di sicurezza sia alla **quota di massima regolazione dell'invaso, pari a 172,80 m slm, sia alla quota di massimo** invaso, pari a 174,80 m slm, prevista nel caso in cui l'evento critico di progetto sopraggiunga successivamente al riempimento della vasca. L'**invaso di laminazione** doveva essere suddiviso in due settori da un argine tracimabile in terra con quota di coronamento pari a 165,00 m slm.

Il primo settore della vasca, **direttamente collegato al canale di alimentazione proveniente dall'opera** di presa, aveva una quota di fondo pari a 160,00 m slm, mentre il secondo settore, alimentato per tracimazione dal primo settore attraverso una soglia di sfioro fissa, aveva una quota di fondo minima pari a 157,00 m slm. Il volume del primo settore compreso tra la quota di fondo e il coronamento **dell'argine di** separazione era previsto pari a 102.500 m³, mentre il volume del secondo settore sino al **coronamento dell'argine** di separazione era pari a 761.250 m³. Oltre quota 165 m slm i due settori erano uniti; il volume tra la quota di coronamento **dell'argine interno e la quota di massima** regolazione era previsto pari a 1.317.450 m³.

La funzione dell'argine di separazione era quella di consentire il contenimento della prima fase dell'evento di piena, caratterizzata da un maggior presenza di materiale solido in sospensione, **all'interno di un'area di estensione più ridotta** (primo settore), al fine di garantire una miglior gestione delle attività di **pulizia dell'invaso**. Inoltre, per eventi di piena caratterizzati da un volume di sfioro **nell'invaso inferiore a circa** 100.000 m³, l'**argine** avrebbe garantito una minor occupazione della vasca in termini di superficie, semplificando di conseguenza le operazioni di pulizia. Di seguito si riporta la **curva di invaso dell'area di laminazione da progetto preliminare**.

	QUOTA [m slm]	AREA [mq]	VOLUME [mc]
INVASO 1	160,0	17.000	
	161,0	18.500	17.750
	162,0	20.000	37.000
	163,0	21.000	57.500
	164,0	22.500	79.250
	165,0	25.000	102.500
INVASO 2	157,0	20.500	
	158,0	43.000	31.750
	159,0	74.500	90.500
	160,0	107.000	181.250
	161,0	111.000	290.250

	QUOTA [m slm]	AREA [mq]	VOLUME [mc]
	162,0	114.000	402.750
	163,0	117.500	518.500
	164,0	121.500	638.000
	165,0	125.000	761.250
INVASO 1 + 2	165,0	150.000	863.750
	166,0	154.000	1.015.750
	167,0	159.500	1.169.500
	168,0	164.000	1.334.250
	169,0	170.500	1.501.500
	170,0	175.000	1.674.250
	171,0	179.500	1.851.500
	172,0	183.500	2.033.000
	172,8	187.000	2.181.200

Tabella 2. Curva di invaso della vasca di Varedo, Paderno Dugnano e Limbiate da progetto preliminare.

Per l'alimentazione dell'invaso di laminazione il progetto preliminare prevedeva la realizzazione di un'opera di presa sul torrente Seveso (vedi Figura 13), costituita da uno sfioratore laterale del tipo a stramazzo con soglia fissa in c.a., ciglio a quota 172.80 m slm (altezza 2,50 m dal fondo alveo), avente una lunghezza pari a 26 m. A valle della soglia di sfioro era prevista inoltre una platea di raccordo con il canale rettangolare chiuso di alimentazione dell'invaso di laminazione, posta a quota 168,75 m slm.

Al fine di creare un restringimento di sezione per limitare la portata defluente verso valle e rendere più efficiente il sopracitato sfioratore laterale dell'opera di presa, il progetto preliminare prevedeva la formazione di una sezione di controllo idraulico senza restringimenti laterali a valle della soglia sfiorante, mediante interposizione di una paratoia piana in acciaio inox di dimensioni 9.0 x 4.0 m.

installate), era localizzata lungo il lato meridionale della vasca di laminazione. **All'interno della** stazione era previsto un doppio sistema di pompe idrovore:

- una prima serie, costituita da n. 2 pompe da 350 kW ciascuna (portata: 3.93 m³/s, prevalenza 7.77 m, rendimento pari a 85.3%), poste a quota 162.0 m slm, per lo svuotamento della porzione di invaso compresa tra quota 171.0 m slm e quota 164.0 m slm, con volume pari a 1.135.000 m³ (circa **52% dell'intero volume di invaso**); nel complesso, le due pompe garantivano una portata media di svuotamento pari a circa 7 m³/s, ed un tempo di svuotamento stimato di circa 45 ore;
- una seconda serie, costituita da n. 4 pompe, da 280 kW ciascuna (portata: 2.0 m³/s, prevalenza 11.3 m, rendimento pari a 78.6%), poste sul fondo della stazione di sollevamento, per lo svuotamento della porzione di invaso compresa tra quota 164.0 m slm e quota 157.0 m slm (fondo invaso), a cui corrisponde un volume idrico pari a 735.000 m³ (circa **33% dell'intero volume di invaso**); **nel complesso, le quattro pompe garantivano una** portata media di svuotamento pari a circa 7 m³/s, ed un tempo stimato per lo svuotamento di circa 29 ore.

Il tempo complessivo per lo **svuotamento dell'intero invaso** dalla quota di massima regolazione era pari a circa 92 ore, ovvero 3,8 giorni. Il sistema di svuotamento consentiva inoltre di svuotare il 75% del volume invasato (pari a 1.650.000 m³) in circa 2,9 giorni, rispettando così le prescrizioni del nuovo RID, che prevede che **il 75% dell'invaso** debba essere svuotato in non più di 3 giorni.

Per lo scarico delle portate sollevate dalla stazione di sollevamento fino al T. Seveso, il progetto preliminare prevedeva un canale a sezione rettangolare chiusa 2x2 m con pendenza **pari al 5%** circa e fondo a quota 171 m **slm all'imbocco (lato sollevamento) e a quota 170 m slm (+1 m rispetto al fondo alveo)** nel punto di restituzione delle portate nel Seveso, situato poco a monte del manufatto di sottopasso del Canale Villoresi. Per l'**attraversamento della** linea ferroviaria Chiasso-Milano, era prevista **l'installazione in spingitubo di una tubazione circolare di 2,5 m di diametro**, con estradosso a quota 173,20 m slm circa (quota ferro circa 174,75 m slm).

Poiché la massima quota di **falda misurata nell'area** di intervento era di poco inferiore a 154 m slm (**-3 m dal fondo vasca**) e le campagne di misure realizzate nell'area hanno mostrato una tendenza della falda superficiale alla risalita, il progetto preliminare prevedeva una serie di misure per risolvere le possibili **interferenze tra falda e invaso in fase di esercizio dell'opera**. **In primo luogo, il progetto prevedeva l'impermeabilizzazione della vasca fino alla quota di massimo invaso, per impedire l'infiltrazione** in falda delle acque invase. La soluzione tecnica individuata era quella della messa in opera di un materassino bentonitico con superficie irruvidita, costituito da uno strato di bentonite calcica ad elevata prestazione e da una lamina poliolefinica dello spessore di 0,12 mm, interclusi fra due geotessili tessuti in PP, **entrambi rivestiti con uno strato ruvido ad elevato indice d'attrito per impedire lo scivolamento del telo e del terreno di copertura**. Il materassino, ricoperto da uno spessore di circa 1 metro di terreno, doveva garantire una permeabilità inferiore a 1 x10⁻⁸ cm/sec.

Il progetto prevedeva inoltre un sistema costituito da una serie di tubazioni drenanti perimetrali, poste alla base delle scarpate, per intercettare e riversare **all'interno** dalle vasca **l'acqua di falda**, al fine di sopprimere eventuali sottospinte (sebbene il dislivello tra fondo finito della vasca e livello

massimo di falda fosse superiore a 1 m). Tali tubazioni dovevano essere dotate di una valvola a clapet per consentire l'ingresso in vasca dell'acqua di falda, ma impedire l'uscita delle acque dalle vasche verso la falda.

Nel progetto preliminare, la funzionalità idraulica dell'opera è stata verificata con riferimento a due possibili scenari:

1. il primo scenario assume che, al verificarsi dell'evento meteorico di progetto con tempo di ritorno 100 anni definito dall'Autorità di Bacino, il bacino a monte della vasca si trovi nella configurazione di progetto prevista dallo Studio AIPO 2011 e successive modifiche;
2. il secondo scenario assume invece che al verificarsi dell'evento di progetto, il bacino si trovi nel suo assetto attuale.

Nel primo caso, l'idrogramma di piena in arrivo alla vasca da monte (vedi Figura 17) risente dell'effetto di tutti gli interventi di laminazione previsti a monte, ed è dato dalla somma dell'idrogramma rilasciato a valle della vasca laminazione di Lentate sul Seveso (vedi Figura 16) e del contributo residuo dei sottobacini afferenti al tratto compreso tra la sezione SV-60 e la sezione SV-27 dell'Autorità di Bacino; tale contributo è prevalentemente costituito dalla portata di piena proveniente dal sottobacino dei torrenti Terrò e Certesa il quale, in corrispondenza della confluenza con il Seveso in Comune di Cesano Maderno, ha una superficie (circa 72 km²) del tutto paragonabile a quella del bacino del T. Seveso stesso (pari a circa 94 km²).

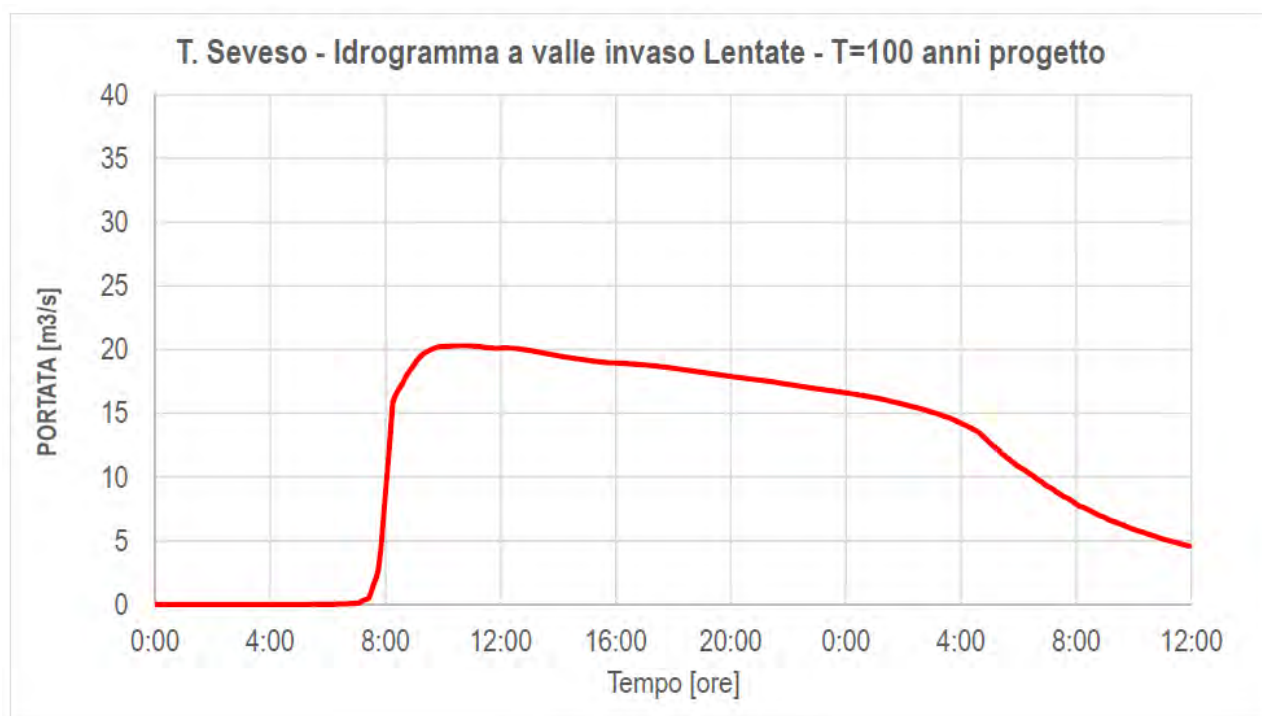


Figura 16. Idrogramma di piena di progetto a valle dell'invaso di laminazione di Lentate sul Seveso.

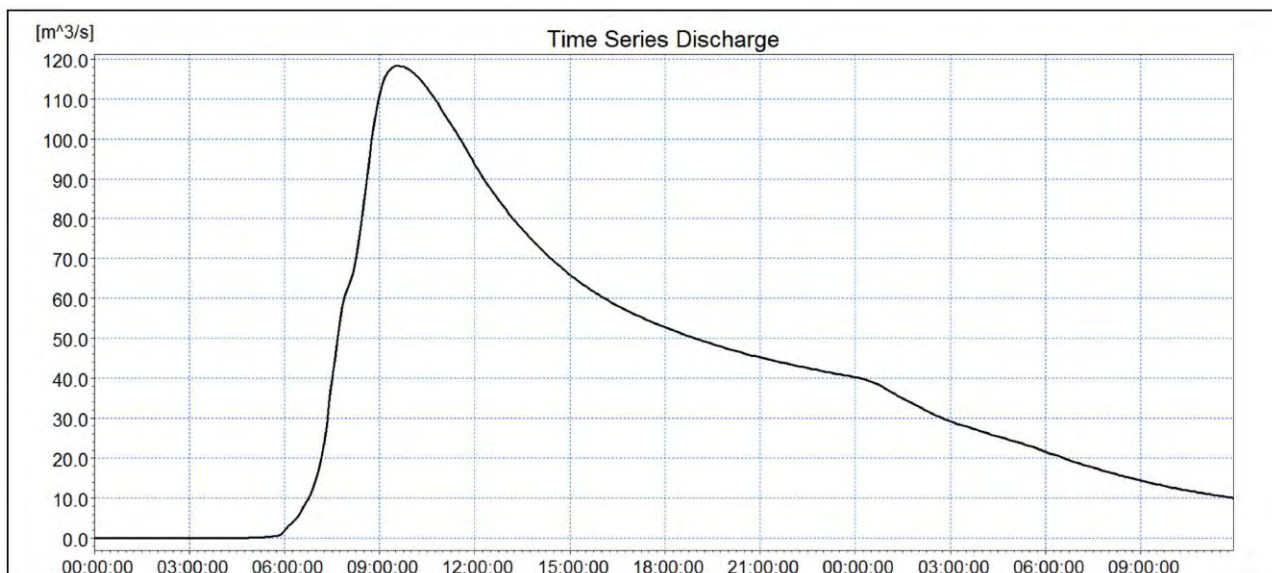


Figura 17. **Idrogramma di piena a monte dell'area di laminazione in scavo di Varedo, Paderno D. e Limbiate nell'assetto di bacino di progetto.**

L'idrogramma dell'assetto attuale, in assenza di tutti gli interventi di laminazione previsti a monte, è invece quello indicato nello Studio AIPO 2011 alla sezione di Palazzolo (vedi Figura 5).

A monte del manufatto di presa della vasca di laminazione in scavo di Varedo, Paderno Dugnano e Limbiate, la portata centennale nella configurazione di progetto è pertanto pari a circa 118 m³/s, a fronte di una portata centennale nella situazione attuale di circa 153 m³/s, con una riduzione della portata di picco pari a circa 35 m³/s.

In fase di progettazione preliminare, il funzionamento dell'invaso di laminazione in scavo è stato analizzato mediante un modello idraulico quasi-bidimensionale, implementato con il codice di calcolo MIKE11 del DHI. La ripartizione delle portate nei due scenari è stata ottenuta regolando l'apertura della paratoia a valle dello sfioratore laterale in modo da ottenere un idrogramma in ingresso alla vasca con volume pari a circa 2.200.000 m³ circa in entrambi i casi.

Le ripartizioni dei picchi di portata **in corrispondenza dell'opera ipotizzate per l'assetto di progetto e per l'assetto attuale sono riportate rispettivamente** in Figura 18 e in Figura 19, mentre la Figura 20 e la Figura 21 riportano gli idrogrammi di piena da progetto preliminare rispettivamente a monte dell'opera di presa, a valle dell'opera di presa e in **ingresso nell'area di laminazione.**

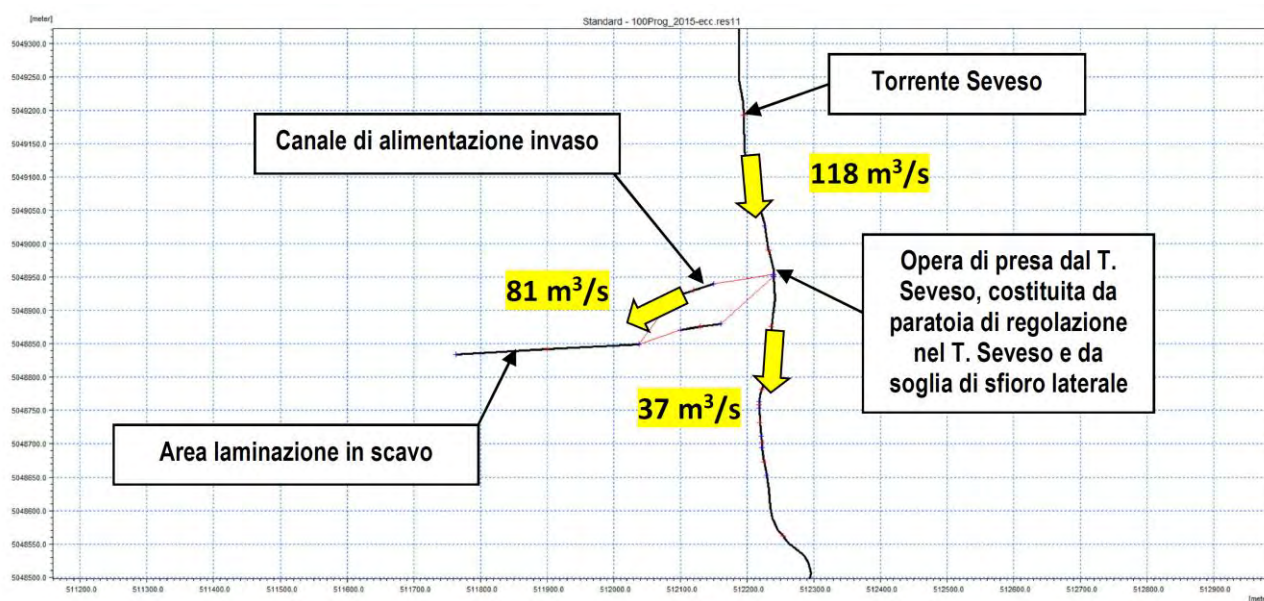


Figura 18. Progetto preliminare: schema del sistema idraulico della vasca di laminazione di Paderno Dugnano, Varedo e Limbiate (TR=100 anni) - assetto di progetto.

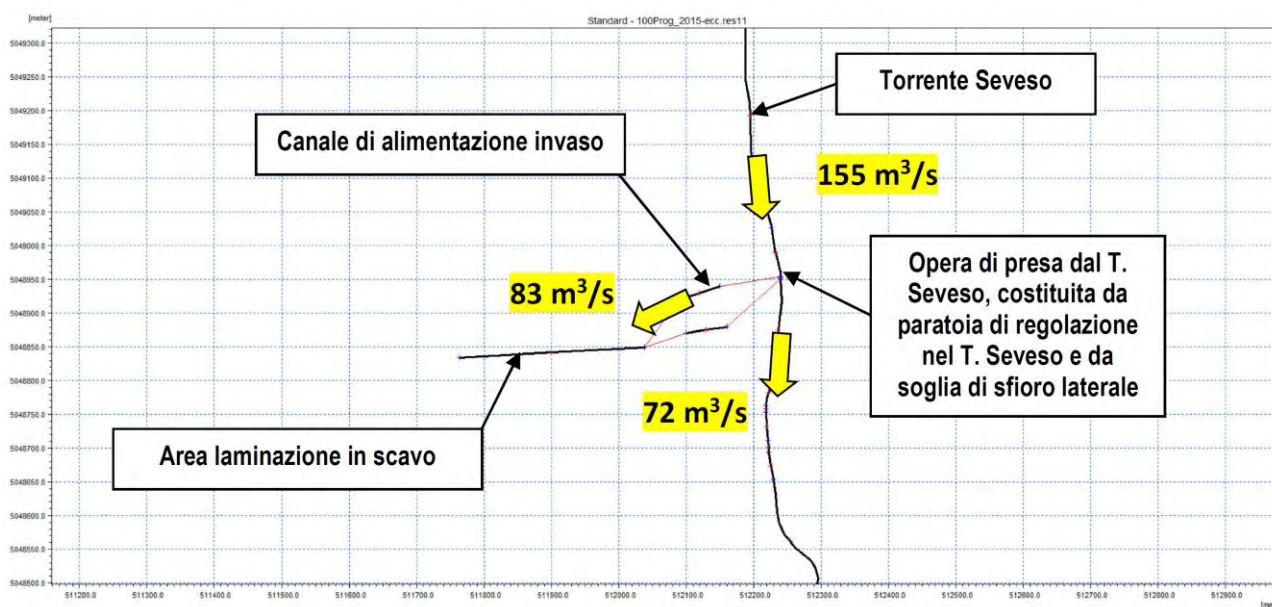


Figura 19. Progetto preliminare: schema planimetrico del sistema idraulico della vasca di laminazione di Paderno Dugnano, Varedo e Limbiate (TR=100 anni) – assetto attuale.

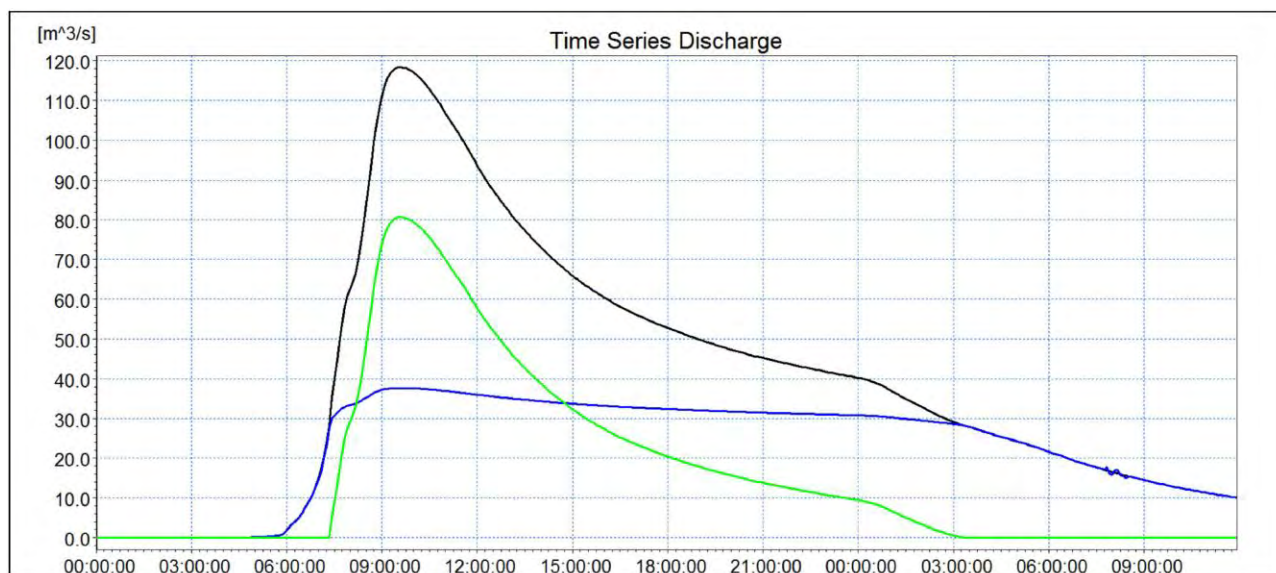


Figura 20. Idrogrammi relativi al sistema idraulico della vasca di laminazione di Varedo, Paderno Dugnano e Limbiate ($T=100$ anni) – assetto di **progetto a monte dell'area di laminazione** (linea nera: monte opera di presa, linea blu: valle opera di presa, linea verde: ingresso area di laminazione – $V \sim 2.200.000 \text{ m}^3$).

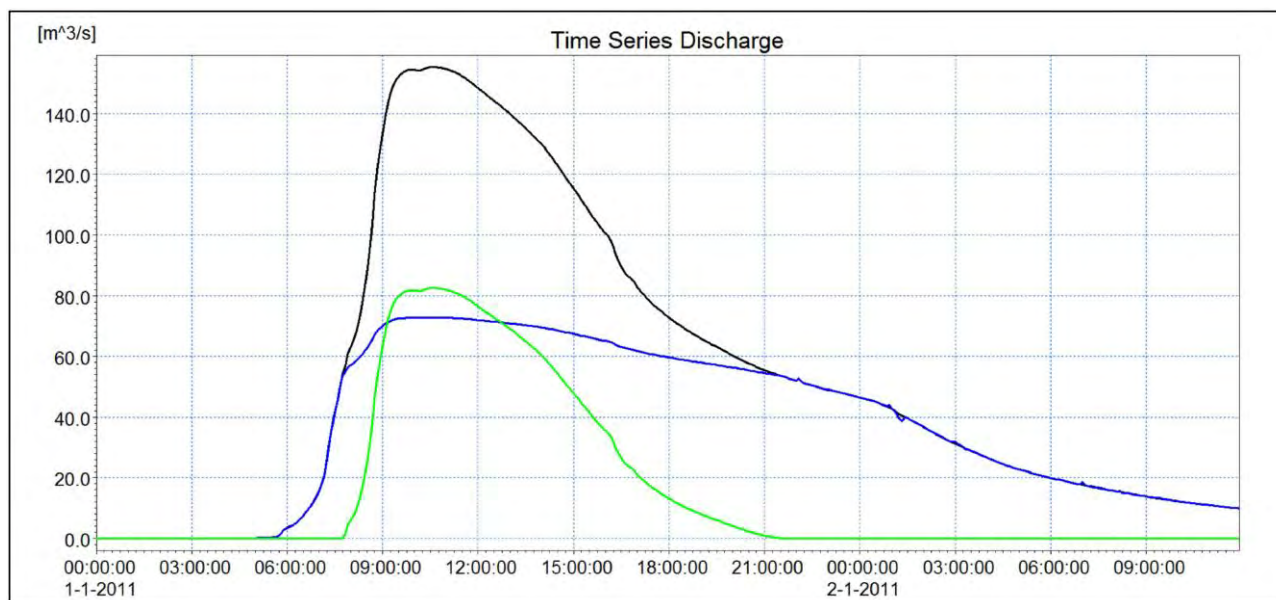


Figura 21. Idrogrammi relativi al sistema idraulico della vasca di laminazione di Varedo, Paderno Dugnano e Limbiate ($T=100$ anni) – **assetto attuale a monte dell'area di laminazione** (linea nera: monte opera di presa, linea blu: valle opera di presa, linea verde: ingresso area di laminazione – $V \sim 2.200.000 \text{ m}^3$).

In fase di progettazione preliminare sono inoltre state effettuate ulteriori simulazioni idrauliche per **verificare la funzionalità dell'opera di laminazione in condizioni di funzionamento eccezionali**. In particolare, è stato ipotizzato che le precedenti onde di piena (con e senza interventi a monte **dell'area di laminazione** in scavo) potessero sopraggiungere in condizioni di area di laminazione già invasata fino al livello di massima regolazione, e di conseguenza sezionata dal Seveso mediante paratoia di esclusione.

In tali condizioni, il progetto preliminare prevedrebbe che la portata deviata dal Seveso nel canale di alimentazione attraverso lo **sfiatore dell'opera di presa** defluisca nuovamente in Seveso, attraverso lo sfioro di emergenza a monte della vasca, generando gli idrogrammi riportati in Figura 22 e Figura 23.

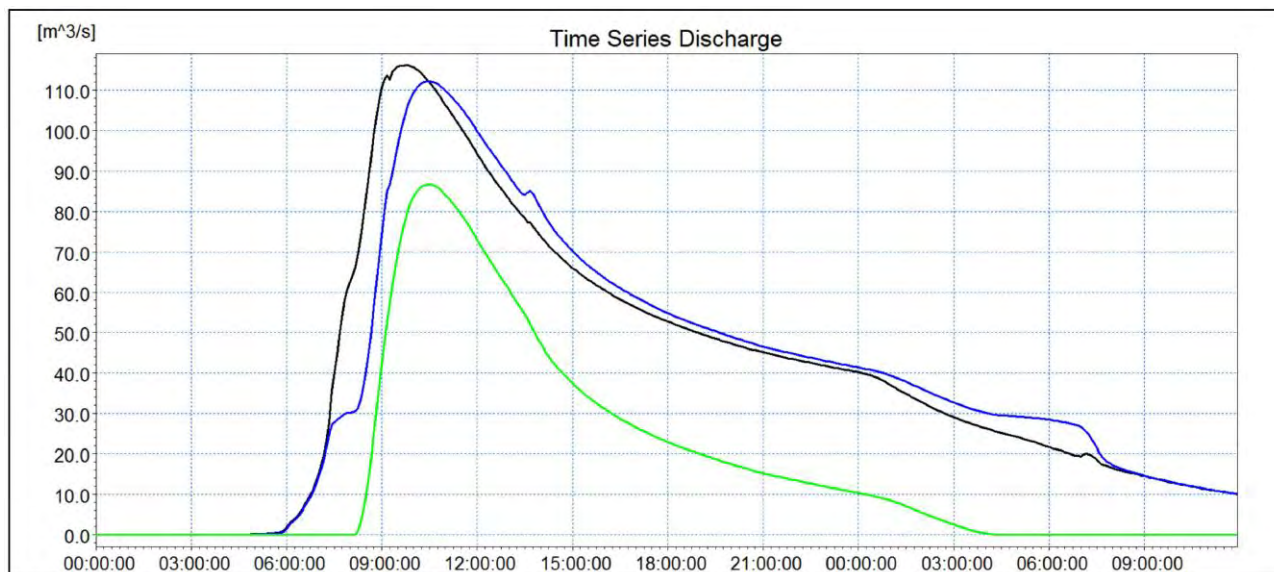


Figura 22. Idrogrammi relativi al sistema idraulico della vasca di laminazione di Varedo, Paderno Dugnano e Limbiate ($T=100$ anni) – **assetto di progetto a monte dell'area di laminazione** – evento eccezionale (linea nera: monte opera di presa, linea blu: valle opera di presa, linea verde: portata defluente attraverso lo sfioro di emergenza; portata in ingresso alla vasca nulla).

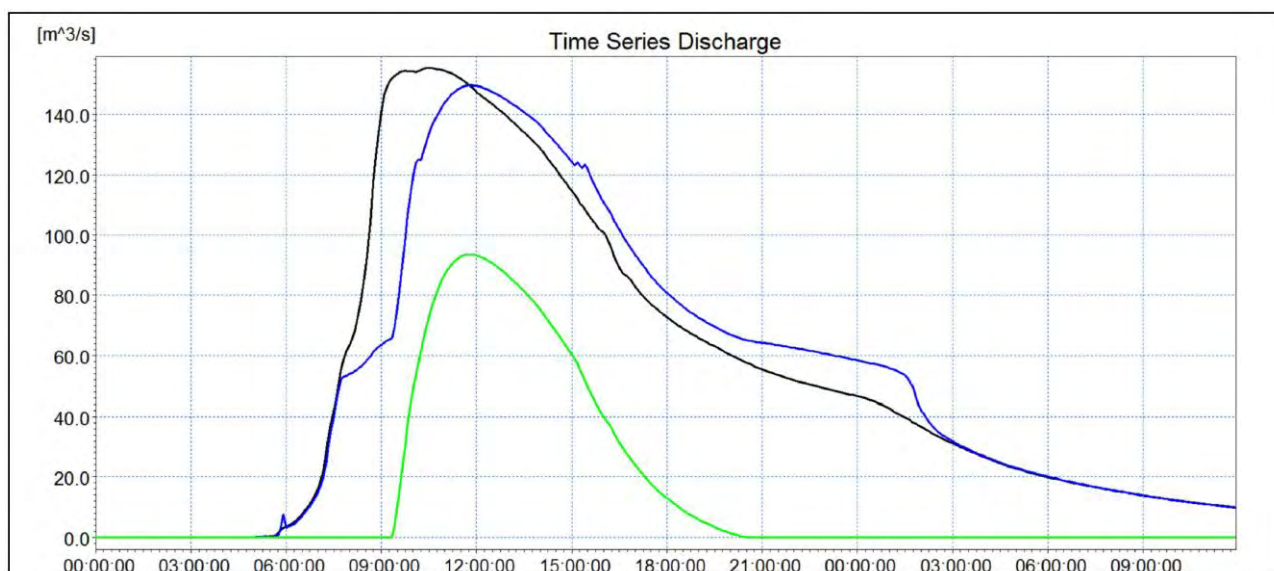


Figura 23. Idrogrammi relativi al sistema idraulico della vasca di laminazione di Varedo, Paderno Dugnano e Limbiate ($T=100$ anni) – **assetto attuale a monte dell'area di laminazione** – evento eccezionale (linea nera: monte opera di presa, linea blu: valle opera di presa, linea verde: portata defluente attraverso lo sfioro di emergenza; portata in ingresso alla vasca nulla).

In tali condizioni, le massime quote d'acqua necessarie per consentire il passaggio delle portate sopra lo sfioro di emergenza sarebbero pari a 174,80 m slm per l'assetto di progetto a monte dell'area di laminazione e 175,70 m slm per lo stato attuale, con franchi rispetto agli argini di coronamento rispettivamente di 1,70 m e 0,80 m.

3 Descrizione dell'opera

Pur mantenendone le finalità e l'impostazione generale, il presente progetto definitivo della vasca di laminazione di Varedo, Paderno Dugnano e Limbiate ha apportato alcune modifiche significative al progetto preliminare sopra illustrato. Tali modifiche, di seguito elencate, si sono principalmente focalizzate sulla risoluzione di alcune criticità e sul miglioramento di alcuni aspetti inerenti la realizzazione, la funzionalità e la gestione **dell'opera**:

1. **Innanzitutto, la quota minima di fondo dell'invaso è stata portata da 157,00 m slm a 159,00 m slm**; in questo modo si sono volute ridurre le possibilità di interazione tra invaso di laminazione e falda, oltre a fornire un maggiore franco di sicurezza nei confronti del sollevamento, alla luce **dell'attuale tendenza alla risalita della falda** (rendendo quindi superflua la realizzazione del sistema drenante previsto nel preliminare); le minori profondità **di scavo hanno inoltre impatti positivi in fase di gestione dell'opera, diminuendo le prevalenze delle pompe necessarie per lo svuotamento dell'invaso**.
2. I canali per il riempimento e lo svuotamento dell'invaso **sono stati modificati, spostandoli a quote inferiori rispetto a quelle originariamente previste**; tale modifica si è resa necessaria in quanto la soluzione prevista nel progetto preliminare appariva particolarmente complessa dal punto di vista esecutivo: infatti, per il canale di alimentazione della vasca, che attraversava la ferrovia con 3 condotti Ø3.2 m da porre in opera con la tecnica dello spingitubo, il preliminare prevedeva un ricoprimento pari a 2.0 m nei tratti al di fuori del rilevato ferroviario e di soli 4.0 m rispetto al piano del ferro, valori ben inferiori al ricoprimento minimo normalmente assunto in questo genere di lavori per evitare smottamenti e assestamenti superficiali, pari a 2 volte il diametro della condotta spinta (nel caso specifico, 6.4 m); nel caso poi del canale di svuotamento, il ricoprimento previsto era addirittura inferiore, circa 1,60 m dal piano del ferro. La soluzione proposta in questa sede prevede sempre il varo a spinta dei canali di collegamento tra Seveso e vasca (limitatamente al tratto in sottopasso alla ferrovia esistente), ma consente di mantenere un ricoprimento minimo di 8 m rispetto al piano del ferro, fornendo così maggiori garanzie in termini di protezione da danneggiamenti e continuità di **esercizio dell'infrastruttura soprastante; l'abbassamento delle quote di fondo** consente inoltre di poter utilizzare gli stessi canali sia per invasare, sia per svuotare la vasca. **L'attraversamento della ferrovia** qui ipotizzato consente infine di risolvere, sottopassandolo a distanza di sicurezza, **l'interferenza** con il collettore fognario DN1200 posato da IANOMI (oggi CAP Holding) nel 2015, posto ad una profondità di circa 1.0÷1.2 m e con andamento parallelo alla ferrovia.
3. **La conformazione dell'opera di presa** è stata modificata al fine di ridurre i livelli idrici in alveo **necessari per l'invaso della vasca**; infatti, **con la geometria dell'opera prevista da progetto preliminare** (soglia sfiorante laterale della lunghezza di 26 m con ciglio di sfioro a quota 172.80 m slm), **la quota d'acqua raggiunta nel Seveso in corrispondenza dello stramazzo durante il funzionamento dell'opera risulterebbe variare tra 174.00 e 174.60 m slm nell'assetto di bacino di progetto e tra 173.70 e 175.00 m slm nell'assetto di bacino attuale**;

considerando che il piano campagna nell'area limitrofa alla presa si trova a quote comprese tra 174,00 e 176,00 m s.l.m., è evidente che, per evitare esondazioni e garantire il normale franco di sicurezza di 1.0 m sul massimo livello di piena, sarebbe necessario procedere ad un **adeguamento delle quote di ritenuta del Seveso a monte dell'opera di presa per un tratto di** diverse centinaia di metri con sovralti delle sponde fino a 2,0 m; tali opere di adeguamento non erano peraltro inserite nel progetto preliminare, mentre rientrano tra gli interventi previsti nel presente progetto definitivo. Al fine di ridurre i sovralti necessari per il **funzionamento dell'opera si è innanzitutto incrementato lo sviluppo della soglia sfiorante sino** ad una lunghezza complessiva di 35,60 m, e si è ridotta la quota del ciglio di sfioro di 15 cm, **portandolo a quota 172,65 m s.l.m.; infine si è modificata la configurazione generale dell'opera** di presa, **inserendo lo sfioratore all'interno di un canale delle dimensioni dell'alveo del Seveso**, ad esso raccordato mediante una curva ad ampio raggio; in questo modo, durante il passaggio delle piene, lo sfioratore si trova posizionato frontalmente rispetto al filone principale della corrente, così che il processo di efflusso a stramazzo della corrente derivata in vasca risulta energeticamente più efficiente.

4. Le griglie metalliche previste nel progetto preliminare sono state sostituite con uno sgrigliatore meccanico automatico posizionato a monte della soglia di derivazione delle portate in vasca; dal momento che le griglie metalliche erano posizionate subito a valle dello sbocco del canale di alimentazione, in una zona difficilmente raggiungibile con i mezzi, **in questo modo si è resa meno complicata la manutenzione dell'opera**; la meccanizzazione del sistema di pulizia delle griglie rende inoltre il sistema meno soggetto ad intasamenti che, qualora si verificassero, potrebbero pregiudicare la funzionalità dell'**opera di presa**.
5. **La quota di coronamento dell'argine divisorio tracimabile tra i due comparti della vasca è** stata portata da 165,00 a 167,00 m s.l.m.; in questo modo il volume del primo comparto della vasca è stato incrementato del 69%, passando dai 102.500 m³ del progetto preliminare a circa 173.000 m³. Scopo di questa miglioria è quello di incrementare i tempi di permanenza **dei volumi sfiorati all'interno del primo comparto, in particolare della componente "di prima pioggia"**, al fine di concentrare la sedimentazione dei solidi in sospensione **in un'area di vasca** ristretta ed agevolare le operazioni di pulizia al termine dello svuotamento; **l'incremento della** volumetria del primo comparto aumenta inoltre la probabilità che il secondo comparto possa **restare vuoto in occasione di eventi minori, riducendo così l'impegno necessario per la** manutenzione.
6. **Al fine di migliorare l'efficienza di gestione dell'invaso, la paratoia a luce fissa** prevista nel progetto preliminare è stata sostituita da una paratoia in regolazione continua, la cui apertura sarà gestita in automatico sulla base delle letture di portata a valle della stessa; a questo scopo si prevede anche la costruzione di un misuratore di portata a risalto circa 21 m a valle della paratoia stessa.

Di seguito si riporta una breve descrizione delle opere previste nel presente progetto definitivo.

3.1 Generalità

Il presente progetto definitivo del nuovo invaso di Varedo, Paderno Dugnano e Limbiate prevede la realizzazione di un invaso in scavo analogo a quello del progetto preliminare, del volume utile complessivo di circa 2,1 Mm³ e della profondità massima di 16 m dal piano campagna. L'invaso è sempre ubicato in sponda destra del T. Seveso, nell'area dell'ex stabilimento Snia interclusa tra la linea ferroviaria Milano – Como-Chiasso, a est, l'area industriale dismessa, a nord, il Canale Villaresi, a sud, e l'area residenziale di Limbiate, a ovest (Figura 12).

Le opere in progetto che costituiscono il sistema idraulico dell'area di laminazione in scavo sono le seguenti (per una descrizione più dettagliata si rimanda alla "Relazione generale" ed alle tavole di progetto):

- invaso di laminazione fuori linea con volume utile complessivo di circa 2.100.000 m³;
- opera di presa dal torrente Seveso, costituita da:
 - o un canale di derivazione a sezione composta, larghezza alla base 12 m, lunghezza circa 35 m, terminante con una soglia di sfioro frontale con ciglio a quota 172,65 m s.l.m., dello sviluppo complessivo di 35,60 m, sezionabile mediante paratoia piana;
 - o una paratoia di regolazione delle portate defluenti a valle della vasca larga 12 m, con altezza di ritenuta pari a 2,80 m ed apertura variabile da un massimo di 2,40 m fino ad un minimo di 1 m;
 - o un misuratore di portata a risalto lungo 14,00 m, larghezza della sezione contratta 6,60 m, rapporto di strozzamento 0,55, posizionato circa 21 m a valle della paratoia e dotato di n° 2 pozzetti di calma per la misura dei livelli posti circa 7,5 m a monte;
- sfioro di emergenza costituito da una soglia laterale lunga 35 m con ciglio a quota 173,90 m s.l.m., posizionata in sinistra al canale di derivazione, a monte della paratoia di esclusione della vasca;
- n° 2 scatolari a sezione rettangolare 3.50x4.50 m + n° 1 scatolare a sezione rettangolare 3.25x3.25 m per l'alimentazione e lo svuotamento dell'invaso, realizzati in sottopasso alla ferrovia esistente mediante spingitubo e collegati al manufatto di presa mediante un manufatto "a pozzo" a pianta rettangolare rettangolare dim. 18,70 x 19,4 m;
- stazione di sollevamento delle acque invase nella vasca di laminazione non scaricabili a gravità, alloggiate nel pozzo di collegamento tra scatolari di riempimento/svuotamento vasca ed opera di presa.

3.2 Invaso di laminazione

In accordo con le previsioni dei precedenti livelli progettuali, la vasca di laminazione ha un volume utile di invaso di circa 2.100.000 m³. L'invaso è perimetrato da un argine di coronamento fino a

quota 176,00 m slm (circa 1,00 m al di sopra del piano campagna attuale), al fine di garantire un adeguato franco di sicurezza alla quota di massimo invaso prevista, pari a 174,08 m slm (vedi verifiche successive). Analogamente al progetto preliminare, **l'invaso di laminazione** è suddiviso in due settori da un argine in terra con quota di coronamento pari a 167,00 m slm, tracimabile per uno sviluppo di circa 150 m. I due settori della vasca saranno inoltre collegati sul fondo mediante n° 3 scatolari in c.a. a sezione rettangolare 2,00x2,00 m lunghi circa 34 m; i tre scatolari avranno la funzione di consentire il deflusso delle acque dal secondo al primo settore durante lo svuotamento **dell'invaso; per impedire il flusso inverso** gli scatolari saranno dotati di clapet.

Il primo settore della vasca, direttamente collegato ai canali di alimentazione provenienti **dall'opera** di presa, ha una quota di fondo pari a 159,00 m slm, mentre il secondo settore, alimentato dal primo settore per tracimazione **dell'argine di separazione** ha una quota di fondo minima pari a 160,00 m slm. Il volume del primo settore **compreso tra la quota di fondo e il coronamento dell'argine di separazione** è pari a circa 173.000 m³, mentre il volume del secondo settore sino al coronamento **dell'argine di separazione** è pari a circa 749.000 m³. Il volume tra la quota di coronamento **dell'argine** interno e la quota di massimo invaso è pari a circa 1.185.000 m³.

Le scarpate della vasca avranno pendenza 1:2 e saranno impermeabilizzate mediante una membrana bitume-polimero elastoplastomerica armata in filo continuo di poliestere non tessuto dello spessore di 4 mm, accoppiata con una geostuoia grimpante costituita da monofilamenti di polipropilene termosaldati stabilizzati ai raggi UV con carbon black, con struttura tridimensionale a doppia cuspidi, dello spessore di 20 mm. Il fondo vasca sarà invece impermeabilizzato mediante stesa e compattazione di terreno classe A2-4 (CNR-UNI 10006) proveniente dalla vagliatura del materiale di scavo, per uno spessore di 1 m.

Di seguito si riporta la curva di invaso dell'area di laminazione.

Quota [m s.l.m.]	Invaso 1		Invaso 2		Invaso 1 + 2	
	Area m ²	Volume cumulato m ³	Area m ²	Volume cumulato m ³	Area m ²	Volume cumulato m ³
159.00	4,100	0				
160.00	20,460	4,100	95,810	0		
160.50	20,905	14,441	97,283	48,273		
161.00	21,450	25,030	98,957	97,333		
161.50	21,992	35,891	100,444	147,184		
162.00	22,370	46,981	102,130	197,827		
162.50	22,923	58,304	103,631	249,267		
163.00	23,322	69,866	105,330	301,508		
163.50	24,940	81,931	106,846	354,552		
164.00	25,050	94,429	108,558	408,403		
164.50	25,442	107,052	110,088	463,064		
165.00	25,700	119,837	111,812	518,539		
165.50	26,310	132,840	113,358	574,832		
166.00	26,630	146,075	115,094	631,945		

Quota	Invaso 1		Invaso 2		Invaso 1 + 2	
[m s.l.m.]	Area	Volume cumulato	Area	Volume cumulato	Area	Volume cumulato
	m ²	m ³	m ²	m ³	m ²	m ³
166.50	27,230	159,540	116,654	689,882		
167.00	27,723	173,278	118,794	748,744	146,517	922,021
167.50					148,590	995,798
168.00					157,370	1,072,288
168.50					159,421	1,151,486
169.00					161,216	1,231,645
169.50					163,489	1,312,821
170.00					165,634	1,395,102
170.50					167,724	1,478,442
171.00					170,023	1,562,878
171.50					171,939	1,648,369
172.00					174,243	1,734,914
172.50					176,165	1,822,516
173.00					178,562	1,911,198
173.50					180,490	2,000,961
174.00					182,785	2,091,780
174.50					184,723	2,183,657
174.75					185,695	2,229,959
175.00					186,903	2,276,534
175.50					188,852	2,370,473
176.00					191,271	2,465,503

Tabella 3. Curva di invaso dell'area di laminazione in progetto.

3.3 Opera di presa

L'alimentazione dell'invaso di laminazione avverrà tramite un'opera di presa sul torrente Seveso, costituita da uno sfioratore del tipo a stramazzo con soglia fissa in c.a., ciglio a quota 172.65 m slm (altezza 2,15 m dal fondo alveo), avente una lunghezza pari a 35,60 m.

Come già detto sopra, lo sfioratore sarà posizionato all'interno di un canale di derivazione a sezione trapezia, lungo circa 35 m e largo 12 m al fondo; il canale avrà dimensioni analoghe all'alveo del torrente Seveso e sarà ad esso raccordato mediante una curva ad ampio raggio, in modo che, durante il passaggio delle piene, il filone principale della corrente si trovi indirizzato verso lo sfioratore stesso. La quota di fondo del canale sarà pari a 169,50 m slm. Davanti allo sfioratore è prevista l'installazione di una paratoia di sezionamento motorizzata a doppia lente (luce nominale 12,00 x 4,50 m) per l'esclusione della vasca, nonché di uno sgrigliatore meccanico (larghezza luci 100 mm) per limitare l'ingresso di materiale solido alla vasca stessa.

Il materiale trattenuto dallo sgrigliatore sarà sollevato in una canalina di raccolta (sezione rettangolare 1,2 x 1,5 m, con angoli smussati, lunghezza 20,70 m, pendenza di fondo 5‰) da un pettine meccanico e da qui spinto all'interno di un pozzetto mediante un flusso d'acqua generato da un'apposita elettropompa sommergibile a flusso assiale ad asse verticale da 55 kW di potenza

nominale (portata al punto di lavoro: 364 l/s, prevalenza 7,2 m e rendimento totale pari a 60%).
L'elettropompa, installata all'interno di un tubo DN 700 in acciaio AISI 304 lungo circa 13,1 m con funzione di mandata, sarà collocata in un pozzetto da 1,30 x 1,30 m profondo 5 m. In fase di manutenzione, **l'elettropompa** potrà inoltre funzionare come pompa di sentina al fine di rendere **l'opera di presa** completamente ispezionabile. Di seguito si riportano le curve caratteristiche della pompa.

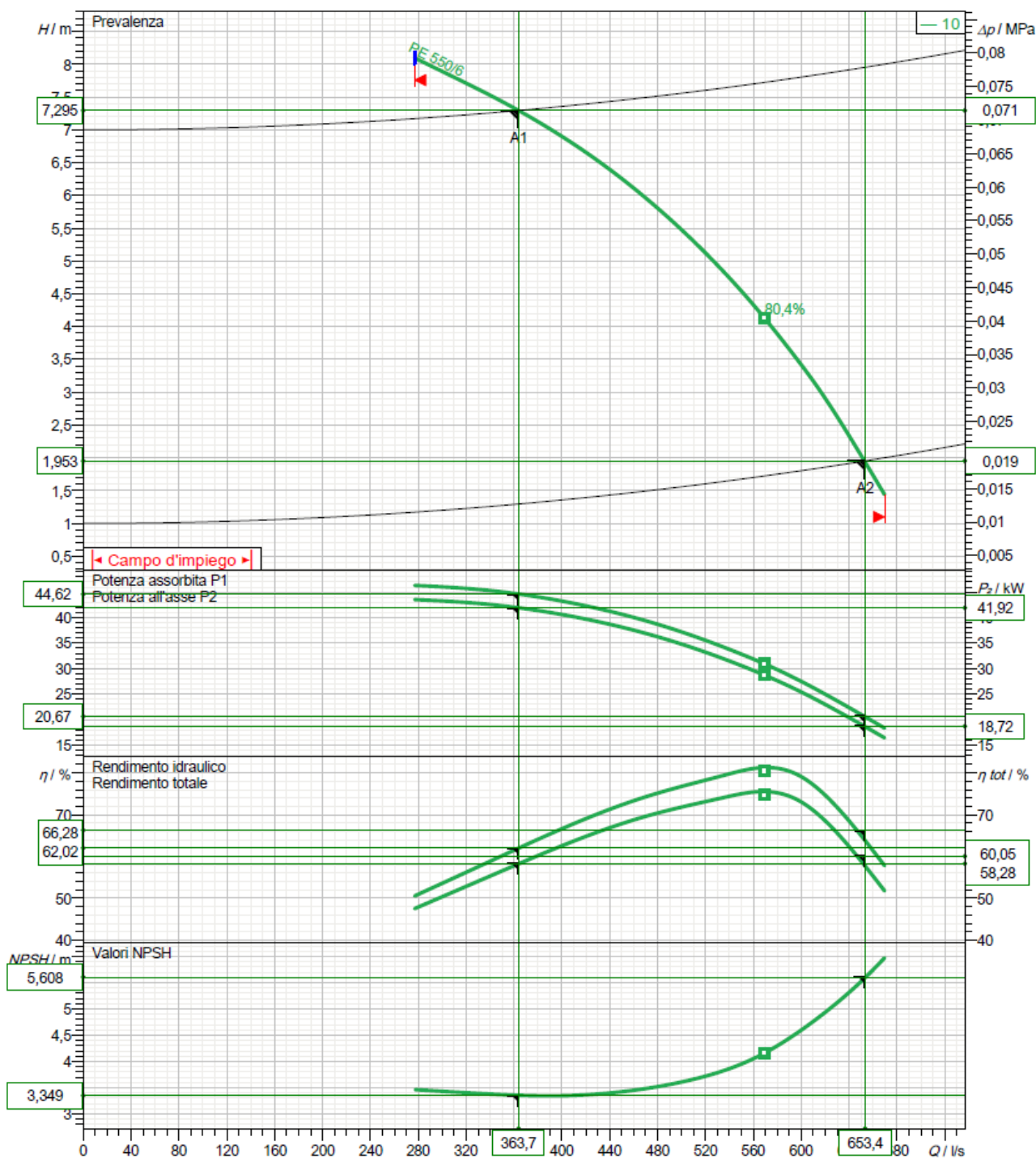


Figura 24. Curve caratteristiche della pompa a servizio dello sgrigliatore.

La ripartizione delle portate in arrivo da monte tra vasca di laminazione e alveo di valle sarà regolata mediante una paratoia a settore larga 12,00 m, con altezza di ritenuta pari a 2,80 m, installata **nell'alveo del Seveso a valle dello sfioratore**. L'apertura della paratoia potrà variare da un minimo di 1 m fino a un massimo di 2,40 m e sarà regolata per mezzo di n°2 pistoni oleodinamici, sulla base delle portate misurate a valle della vasca stessa, in modo da mantenere un rilascio a valle della vasca

costante per tutta la durata **dell'evento, pari a 37 m³/s**. I fermi della paratoia saranno posti a 60 cm dal fondo. Nel tratto di inserimento della paratoia, **l'alveo attuale del Seveso sarà sostituito da un canale cilindrico in c.a. a sezione rettangolare largo 12,0 m**, con fondo piano a quota 170,50 m slm, mentre a monte della paratoia sono previsti interventi di rialzo delle sponde, finalizzati al contenimento dei rigurgiti indotti dalla paratoia stessa. **All'interno del canale cilindrico, circa 21 m a valle della paratoia**, sarà inserito un misuratore di portata a risalto (vedi Figura 25) con rapporto di strozzamento 0,55 (larghezza della sezione contratta 6,60 m) e fondo piano orizzontale; circa 7,5 m a monte della contrazione saranno realizzati n° 2 pozzetti di calma, in cui saranno alloggiati n° 2 sensori piezoresistivi per la misura dei livelli in alveo.

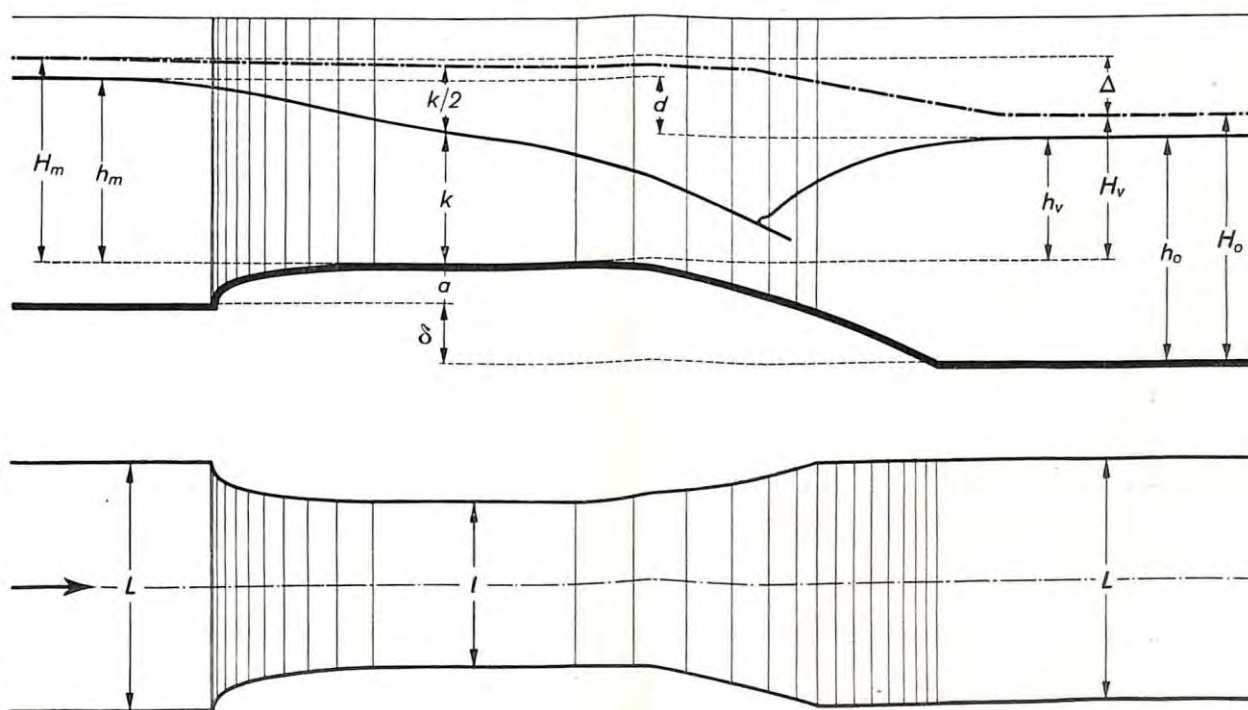


Figura 25. Grandezze caratteristiche di un modellatore a risalto e del processo idraulico che vi ha sede (D. Citrini, "Modellatori a risalto - Guida al Progetto", Centro di Studi per le Applicazioni dell'Ingegneria all'Agricoltura, 1941).

Per il dimensionamento del misuratore si è fatto riferimento agli schemi dei modellatori oggetto di **sperimentazione nel Laboratorio d'Iraulica di Milano negli anni Trenta, ormai ampiamente collaudati** (vedi Figura 26).

Oltre ad essere caratterizzato dalla semimodularità, ossia dall'indipendenza tra portate fluenti e livelli a valle, il modellatore a risalto è il solo mezzo di misura della portata di correnti a pelo libero per cui si sappia determinare la scala di deflusso esclusivamente in base a considerazioni analitiche, le quali derivano dallo studio del processo di movimento che in esso ha sede. La scala teorica può essere **accettata senz'altro per tutti quei casi per cui non si richieda una notevole approssimazione delle misure, bastando che l'errore non superi il 3-4%**, mentre solo per una maggiore precisione è necessaria l'introduzione di coefficienti correttivi sperimentali, che differiscono sempre poco dall'unità.

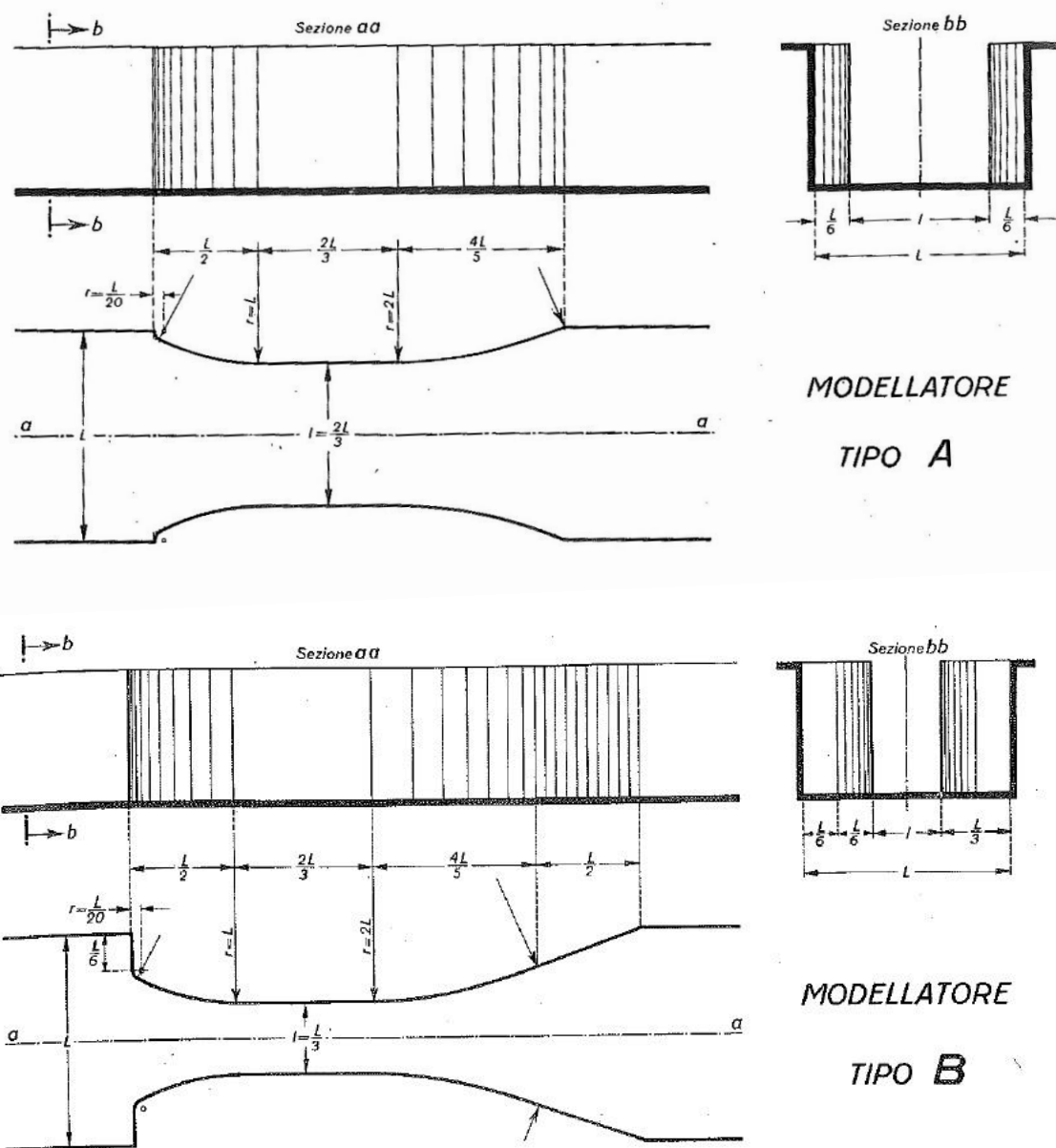


Figura 26. Schemi di modellatori a risalto utilizzati per il dimensionamento del misuratore di portata.

Secondo Citrini (*"Modellatori a risalto - Guida al Progetto"*, Centro di Studi per le Applicazioni dell'Ingegneria all'Agricoltura, 1941), l'espressione della portata di un modellatore a risalto a sezione ristretta rettangolare può essere ricondotta a quella caratteristica degli stramazzi:

$$q = \mu l h_m \sqrt{2 g h_m}$$

dove

q portata fluente

- h_m carico a monte, misurato a partire dalla quota di fondo della soglia, e in una sezione **abbastanza a monte dell'imbocco perché non vi si risenta dell'effetto di chiamata**
- g accelerazione di gravità
- l larghezza del misuratore nella sezione ristretta (6,60 m)
- μ coefficiente di deflusso, pari a $2\sqrt{\frac{1}{r^3}\cos^3\left(\frac{\pi}{3}+\frac{1}{3}\arccos r\right)}$ per modellatori privi di soglia di fondo (0.415)
- r rapporto di strozzamento $\frac{l}{L}$ (0,55)
- L larghezza del canale rettangolare a monte della sezione ristretta (12 m)

Nella Tabella 4 e in Figura 27 si riporta la scala di deflusso teorica del misuratore a risalto.

q [m³/s]	h _m [m]	q [m³/s]	h _m [m]	q [m³/s]	h _m [m]	q [m³/s]	h _m [m]
1	0.19	11	0.94	21	1.44	31	1.87
2	0.3	12	0.99	22	1.49	32	1.91
3	0.39	13	1.05	23	1.53	33	1.95
4	0.48	14	1.1	24	1.57	34	1.99
5	0.55	15	1.15	25	1.62	35	2.03
6	0.62	16	1.2	26	1.66	36	2.06
7	0.69	17	1.25	27	1.7	37	2.1
8	0.76	18	1.3	28	1.75	38	2.14
9	0.82	19	1.35	29	1.79	39	2.18
10	0.88	20	1.39	30	1.83	40	2.21

Tabella 4. Scala di deflusso teorica del misuratore a risalto.

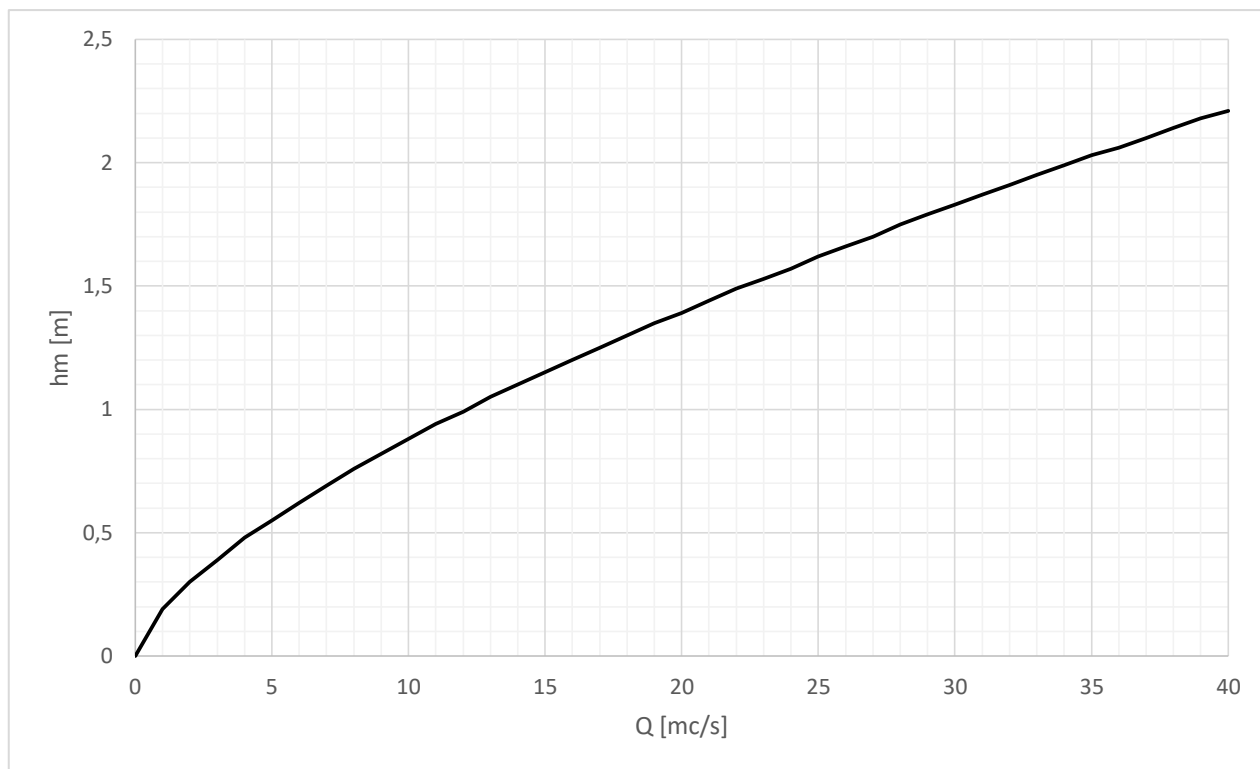


Figura 27. Scala di deflusso teorica del misuratore a risalto.

3.4 Sfiatore d'emergenza

Analogamente al progetto preliminare, anche nel presente progetto è stato previsto uno sfioro di emergenza per la restituzione in alveo delle portate eccedenti la capacità di invaso della vasca.

Lo sfioratore d'emergenza sarà costituito da un muro tracimabile lungo 35 m, con ciglio di sfioro a quota 173,90 m slm; il muro, alto 4,40 m, costituirà la sponda sinistra del canale di derivazione delle portate in vasca.

Le portate di sfioro tracimeranno all'interno di una vasca di dissipazione con fondo a quota 169,50 m slm (-1 m rispetto al fondo alveo del Seveso) costituita da una platea di c.a. dello spessore di 100 cm, situata a destra del canale cilindrico in cui si inseriscono la paratoia ed il misuratore a risalto; **l'abbassamento del fondo ha la funzione di creare un "cuscino" d'acqua a valle dello stramazzo**, al fine di smorzare eventuali turbolenze **generate dall'impatto dell'acqua** a valle del manufatto. La vasca di dissipazione si ricollegherà **all'alveo del Seveso immediatamente a valle del misuratore a risalto**, mediante un raccordo rivestito da una platea in massi e da scogliere in pietrame.

3.5 Canali di alimentazione dell'invaso

Una volta sfiorate oltre la soglia di derivazione, le portate dirette alla vasca di laminazione cadranno **all'interno di un manufatto** interrato a pianta rettangolare 18,70 x 19,40 m, profondo circa 16 m.

Il manufatto, che alloggerà anche le pompe per lo svuotamento dell'invaso (vedi paragrafi successivi), sarà collegato alla vasca di laminazione mediante tre scatolari interrati in sottopasso all'adiacente linea ferroviaria Milano–Erba, dei quali:

- n° 2 scatolari a sezione rettangolare 4,50x3,50 m, lunghi circa 79 m, con quota di fondo costante e pari a 163,50 m slm;
- n° 1 scatolare a sezione rettangolare 3,25x3,25 m, lungo circa 93 m, con quota di fondo pari a **158,50 m slm all'imbocco lato manufatto e a 159,00 m slm** allo sbocco in vasca; la pendenza (del **5‰** circa) verso il manufatto serve per consentire il deflusso a gravità delle acque invase verso le pompe durante la fase di svuotamento della vasca.

3.6 Stazione di sollevamento

Analogamente a quanto previsto nel progetto preliminare, lo svuotamento dell'invaso avverrà per una parte a gravità e per una parte (la più consistente) mediante sollevamento meccanico.

Lo svuotamento a gravità potrà essere effettuato per il volume di invasore compreso tra la quota di massima regolazione, pari a 174.08 m slm, fino alla quota di 171,87 m slm; il volume invaso tra tali due quote è pari a circa 395.000 m³, che corrisponde al 19% del volume di invasore disponibile; come mostrato nei capitoli successivi, la portata media di scarico a gravità sarà pari a circa 12 m³/s, per cui il tempo di svuotamento della prima porzione di invasore sarà pari a circa 9 ore.

Come anticipato nei paragrafi precedenti, le pompe di sollevamento **per lo svuotamento dell'invasore** saranno installate **all'interno dello stesso manufatto interrato di collegamento tra lo sfioro dell'opera di presa ed i canali di alimentazione dell'invasore**. Il fondo del manufatto sarà stato posto alla quota di 157,30 m slm in modo da risultare di 1,70 m inferiore alla minima quota di fondo vasca e poter così garantire la necessaria sommersione delle pompe installate. Come già detto, lo scatolare di **alimentazione dell'invasore al fondo ha inoltre una pendenza** del 5‰ in direzione del manufatto interrato, in modo da consentire il deflusso delle acque invase verso le pompe in fase di svuotamento.

Il sistema di sollevamento previsto sarà costituito da due serie di elettropompe sommergibili a flusso assiale ad asse verticale. La prima serie, costituita da n. 2 pompe da 350 kW di potenza nominale (portata al punto di lavoro: 2400 l/s, prevalenza 9,06 m e rendimento totale pari a 69%), poste sul fondo del manufatto interrato, permetterà lo svuotamento della porzione di invasore compresa tra quota 171,87 m slm e quota 163,50 m slm. **Ognuna delle due pompe sarà installata all'interno di un tubo contenitore in acciaio AISI 304 DN1200** lungo circa 18 m, con scarico DN 1000 a quota 170,50 m slm (quota centro tubo) dotato di clapet. Gli scarichi delle mandate restituiranno le portate sollevate immediatamente **a monte dello sfioro dell'opera di presa**.

La seconda serie di idrovore sarà costituita da n. 2 pompe da 350 kW di potenza nominale (portata al punto di lavoro: 1800 l/s, prevalenza 12,50 m e rendimento pari a 76,6%), poste **anch'esse** sul fondo del manufatto, e permetterà lo svuotamento della porzione di invasore compresa tra quota

168.50 m slm e quota 159,00 m slm (fondo invaso). Ognuna delle due pompe sarà installata **all'interno** di un tubo contenitore in acciaio AISI 304 DN1200 lungo circa 18 m, con scarico DN 1000 a quota 170,50 m slm (quota centro tubo) dotato di clapet. Gli scarichi delle mandate restituiranno **le portate sollevate immediatamente a monte dello sfioro dell'opera** di presa.

Nel complesso, il volume idrico sollevato dalle quattro pompe sarà pari a circa 1.705.000 m³ (circa 81% **dell'intero volume di invaso**). Come mostrato più avanti, la portata media di svuotamento meccanico sarà pari a circa 6,3 m³/s, per cui il tempo stimato per lo svuotamento di tale porzione di invaso è pari a circa 75 ore. In Figura 28 e Figura 29 si riportano le curve caratteristiche delle pompe.

Le portate sollevate dalle elettropompe saranno restituite nel T. Seveso immediatamente a valle dello sfioratore di emergenza, attraverso una coppia di paratoie motorizzate dim. 1,50 x 3,00 m, con quota di fondo 169,50 m slm. **L'apertura delle paratoie sarà regolata in modo da mantenere a monte** di esse un livello costante, pari a 172,60 m slm **per livelli nell'invaso superiori a quota** 164,10 m slm, e a 171,80 m slm **per livelli nell'invaso inferiori a quota** 164,10 m slm. Le paratoie di scarico regolate svolgeranno una duplice funzione: da un lato mantenere a monte un battente sufficiente ad assicurare che lo scarico delle portate di svuotamento non sia rigurgitato dai livelli in Seveso, **dall'altro assicurare** il mantenimento di prevalenze compatibili con il campo di impiego delle pompe di svuotamento e regolarizzarne le variazioni.

Tutti i quadri elettrici di controllo delle pompe e delle paratoie e la cabina di trasformazione MT/BT **saranno localizzati all'interno di un edificio servizi in prossimità dell'opera di presa**.

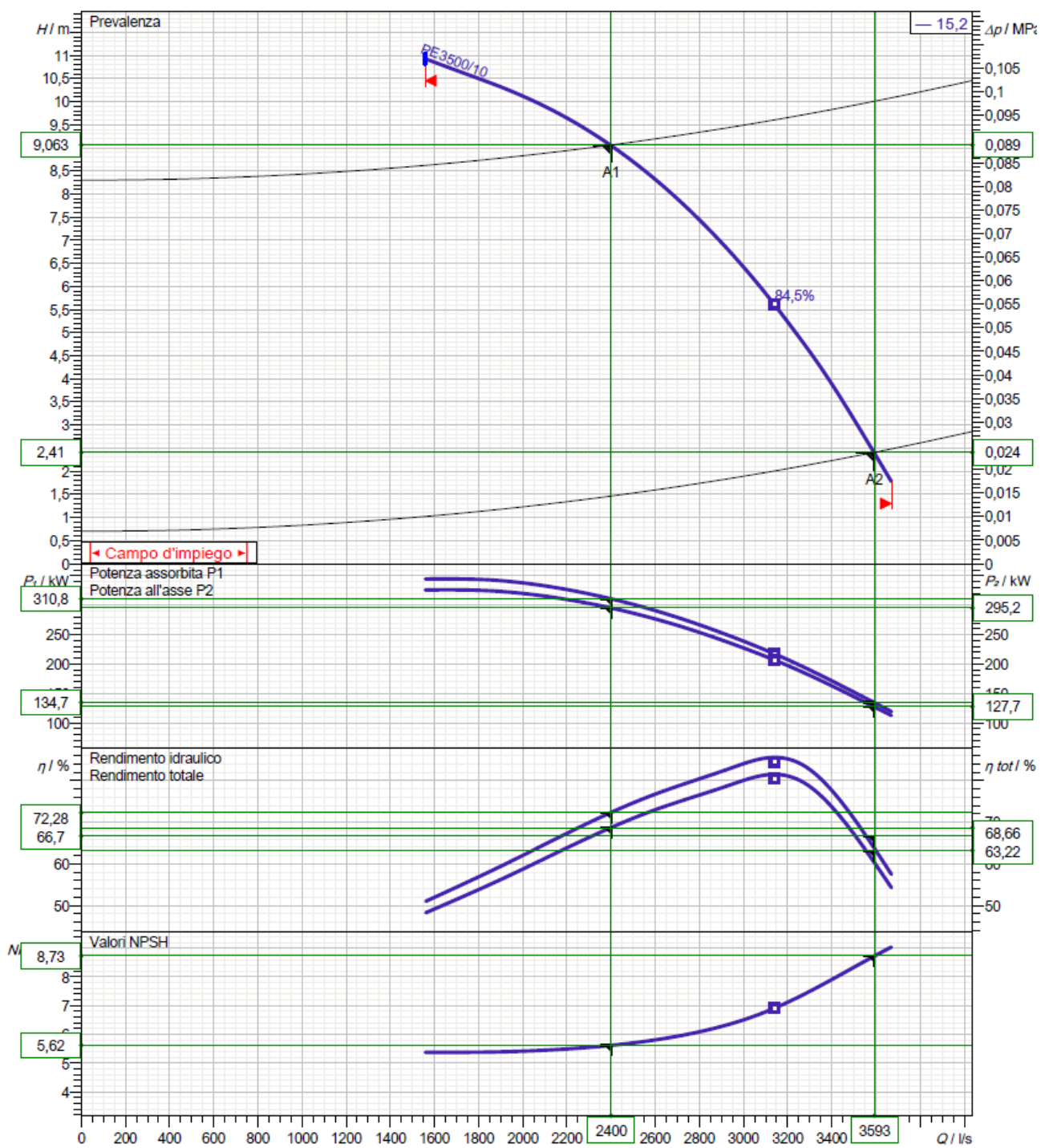


Figura 28. Curve caratteristiche delle pompe da 2400 l/s per lo svuotamento della parte alta dell'invaso.

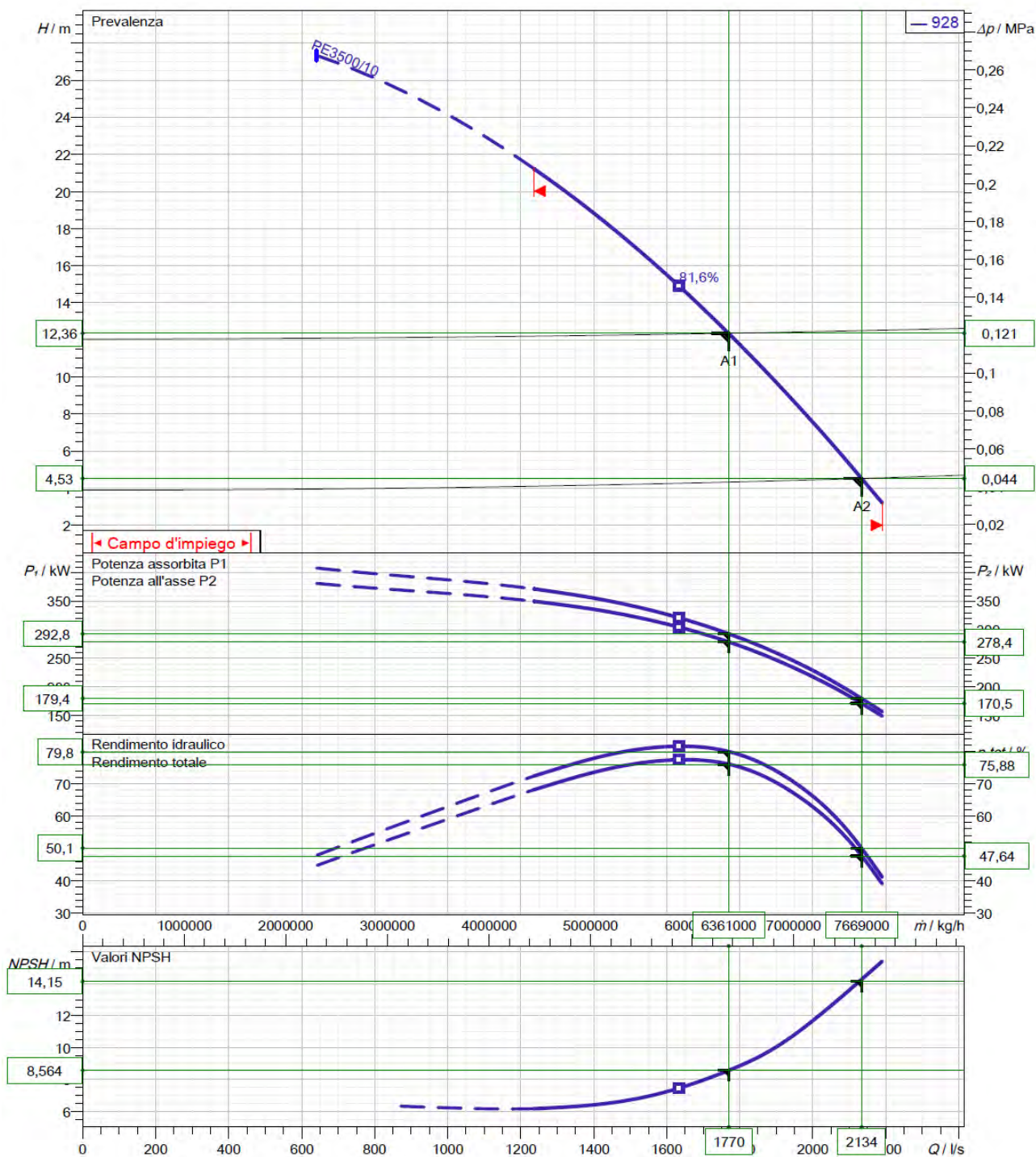


Figura 29. Curve caratteristiche delle pompe da 1800 l/s per lo svuotamento della parte bassa dell'invaso.

4 Sviluppo della progettazione idraulica

Il presente capitolo relaziona in merito alle analisi svolte per verificare la funzionalità idraulica **dell'opera**. Tali analisi sono state articolate in più fasi, facendo di volta in volta riferimento a differenti scenari, al fine di valutare non solo le effettive capacità di laminazione della vasca e la rispondenza alle previsioni della pianificazione di bacino vigente, ma anche i possibili **impatti dell'opera a livello locale**.

A questo scopo sono state svolte le seguenti analisi (vedi anche Tabella 5):

1. **Verifica del funzionamento idraulico dell'opera nello scenario di progetto**
2. **Valutazione del rischio idraulico locale indotto dall'opera**
 - a. in condizioni ordinarie
 - b. in condizioni eccezionali
 - i. **malfunzionamento dell'opera**
 - ii. **resilienza dell'opera**

Fase di verifica	Funzionamento idraulico dell'opera nello scenario di progetto	Valutazione del rischio idraulico locale		
		in condizioni ordinarie	in condizioni eccezionali	
			per malfunzionamento dell'opera	resilienza dell'opera
Evento di riferimento	TR 100 AdBPO	TR 100 AdBPO	TR 100 AdBPO	TR 100 AdBPO
Assetto di bacino	progetto	progetto	progetto	stato di fatto
Condizioni invaso	In funzione, inizialmente vuoto	In funzione, inizialmente vuoto	Non funzionante (paratoia di sezionamento chiusa)	In funzione, inizialmente vuoto

Tabella 5. Quadro di riepilogo delle fasi di lavoro svolte nello sviluppo delle verifiche idrauliche.

Nei paragrafi seguenti **si espongono per ogni fase di lavoro gli obiettivi dell'analisi, gli strumenti utilizzati per le verifiche ed i risultati ottenuti.**

4.1 Verifica del funzionamento idraulico dell'opera nello scenario di progetto

4.1.1 Obiettivi

Obiettivo della verifica è quello di dimostrare che le modifiche introdotte in fase di progettazione definitiva dell'**opera** consentono di migliorare, o in ogni caso di non peggiorare, la capacità di **laminazione dell'opera**, sia in termini di volumi, sia in termini di portate a **valle dell'opera stessa**. Considerato lo stato di avanzamento **dell'iter** per la realizzazione delle opere di laminazione a monte di **Varedo**, la verifica è stata svolta esclusivamente per l'evento con TR 100 anni, nell'ipotesi che il bacino a monte della vasca si trovi nell'assetto di progetto previsto dallo Studio AIPO 2011 e successive modifiche. Di conseguenza si è assunto che l'onda di piena in arrivo alla vasca abbia la **forma dell'idrogramma** in Figura 17, caratterizzato da una portata massima di 118 m³/s ed un volume di circa 5 Mm³.

4.1.2 Strumenti

Allo scopo di analizzare nel modo più esaustivo possibile il funzionamento del sistema idraulico sopra descritto, nello sviluppo della presente progettazione ci si è avvalsi di un modello numerico **bidimensionale dell'opera, implementato mediante il software InfoWorks ICM**. Di seguito si descrivono nel dettaglio i procedimenti seguiti per la costruzione e la taratura del modello.

4.1.2.1 Il codice di calcolo

InfoWorks ICM è un programma di modellazione idraulica sviluppato dalla software house statunitense Innovyze e distribuito in Europa e in Italia dalla società di consulenza e servizi per l'ingegneria idraulica e ambientale HR Wallingford.

Nato per consentire la modellazione numerica integrata di alvei fluviali, reticoli di bonifica e fognature **urbane**, il software si contraddistingue per la **notevole flessibilità, che ne rende adatto l'impiego** in un gran numero di applicazioni caratterizzate da complesse interferenze tra corpi idrici naturali e reticoli fognari e/o di bonifica.

L'interfaccia utente del programma consente di simulare in un unico modello alvei naturali, reti di drenaggio aperte e chiuse e tutti i principali manufatti speciali presenti in ambito fluviale o fognario (ponti, soglie, sollevamenti, scaricatori di piena etc.), nonché di integrare approcci modellistici mono- e bi-dimensionali.

4.1.2.2 Idraulica

Nel caso di applicazioni monodimensionali, InfoWorks ICM simula **il moto idraulico all'interno degli elementi con funzionamento a pelo libero** (siano essi tratti fluviali aperti o tubazioni) mediante integrazione numerica delle equazioni di De Saint Venant:

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gA(S_f - i) = 0 \quad (2)$$

dove:

- A area bagnata del condotto (o del canale);
- Q portata;
- x **ascissa curvilinea lungo l'asse dell'elemento;**
- t tempo;
- g accelerazione di gravità;
- h livello idrico;
- S_f cadente piezometrica;
- i pendenza del fondo.

In **particolare, l'equazione (1) esprime la continuità del moto vario in assenza di afflussi e deflussi laterali**, mentre la (2) esprime la conservazione della quantità di moto.

L'integrazione delle equazioni avviene per via numerica, mediante linearizzazione delle equazioni e risoluzione con metodi basati sulla teoria delle matrici. Come schema di linearizzazione InfoWorks ICM adotta il metodo dei 4 punti di Preissmann, mentre il risolutore utilizzato si basa sul metodo di Newton-Raphson.

Poiché le equazioni (1) e (2) sono valide solo per condotti funzionanti a pelo libero, per permettere **a InfoWorks di simulare il moto vario anche all'interno di condotte in pressione utilizzando il medesimo algoritmo risolutivo senza creare problemi nella transizione da uno stato all'altro, il motore di calcolo adotta la tecnica dello slot di Preissmann**. Tale sistema consente di assimilare la condotta in pressione ad una condotta a pelo libero, inserendo alla sommità della sezione reale una piccola sezione di deflusso fittizia, di area trascurabile ed estensione verticale indefinita.

Il metodo dello slot è indicato per tubazioni in cui è prevedibile una doppia modalità di funzionamento (in pressione e a pelo libero); per i tubi in cui invece il moto in pressione permane costantemente, come le mandate delle stazioni di pompaggio, il software consente di utilizzare un sistema di **equazioni più appropriato, che elimina l'artificio dello slot**.

Per la simulazione del flusso in un dominio bidimensionale, Infoworks ICM utilizza uno schema numerico basato sulle equazioni del moto di onde lunghe in acque basse di De Saint Venant; tali equazioni sono derivabili dalle più generali leggi di Navier–Stokes ipotizzando trascurabili le componenti verticali delle velocità e mediando le componenti **orizzontali delle velocità sull'altezza**

della colonna d'acqua. Nella consueta formulazione differenziale, le equazioni bidimensionali di De Saint Venant assumono la seguente forma:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = q_{1D} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu^2 + gh^2/2) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = S_{0,x} - S_{f,x} + q_{1D}u_{1D} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}(hv^2 + gh^2/2) = S_{0,y} - S_{f,y} + q_{1D}v_{1D} \quad (5)$$

dove

h è l'altezza d'acqua nell'elemento di calcolo;

u e v sono le velocità rispettivamente in direzione x e y ;

$S_{0,x}$ e $S_{0,y}$ sono le pendenze dell'alveo rispettivamente in direzione x e y ;

$S_{f,x}$ e $S_{f,y}$ sono gli attriti rispettivamente in direzione x e y ;

q_{1D} è la portata per unità di area immessa nell'elemento di calcolo;

u_{1D} e v_{1D} sono le componenti di velocità (in direzione x e y rispettivamente) della portata q_{1D} immessa nell'elemento di calcolo.

La formulazione sopra riportata è conservativa, e nel codice di calcolo è discretizzata ai volumi finiti utilizzando uno schema esplicito al primo ordine.

L'algoritmo risolutore di Infoworks ICM consente di rappresentare flussi bidimensionali rapidamente variati, correnti veloci e correnti lente. Nonostante l'algoritmo possa trovare applicazione anche su maglie strutturate, in Infoworks ICM la soluzione agli elementi finiti delle equazioni del moto è calcolata esclusivamente su maglie non strutturate, molto più flessibili e di facile utilizzo quando si vogliano rappresentare forme ed ostacoli complessi. La distinzione tra elementi bagnati ed elementi asciutti del dominio di calcolo è effettuata confrontando le altezze d'acqua con un valore minimo di soglia preimpostato: nel caso in cui la profondità del flusso in un elemento sia inferiore a tale soglia (valore di default pari a 1 mm), l'elemento è considerato asciutto e la velocità in esso è imposta pari a zero. In questo modo il software impedisce la formazione artificiosa di flussi ad elevata velocità nei punti di transizione tra aree bagnate ad aree asciutte.

L'applicabilità dei metodi di soluzione utilizzati da InfoWorks ICM è stata testata in centinaia di studi ed applicazioni, anche con il riscontro di misure idrometriche in bacini sperimentali. Tra le principali limitazioni rilevate si segnalano:

- la semplificazione dei risultati nel caso di elementi molto pendenti, per i quali InfoWorks produce comunque risultati vicini alla realtà;

- **l'imprecisione nella rappresentazione** dei risalti idraulici, in quanto il passaggio da corrente veloce a corrente lenta viene simulato su una certa lunghezza (dell'ordine di qualche metro, variabile a seconda della geometria).

4.1.2.3 Modellazione dei manufatti idraulici

Come già detto sopra, Infoworks ICM consente di simulare numerosi manufatti idraulici come stramazzi e paratoie.

Paratoie

Per la definizione completa di un elemento paratoia, InfoWorks ICM richiede l'inserimento di otto parametri:

1. tipo di paratoia;
2. livello di scorrimento, ossia la quota di fondo della luce sotto la paratoia;
3. larghezza della paratoia B ;
4. coefficiente di deflusso, ossia il parametro C_d **che inserito nelle formule dell'efflusso** sotto battente $Q = C_d B H \sqrt{g D_u^{1/2}}$ (per flusso non rigurgitato) o $Q = C_d B H \sqrt{g (D_u - D_d)^{1/2}}$ (per flusso rigurgitato) determina la relazione tra tiranti idrici D (con D_u tirante a monte della paratoia e D_d tirante a valle della paratoia) e portate effluenti Q ;
5. coefficiente di deflusso secondario, ossia il parametro C_{d2} da utilizzare nella formula **dell'efflusso** sopra uno stramazzo $Q = C_{d2} B \sqrt{g D_u^{1.5}}$ (per flusso non rigurgitato) o $Q = C_{d2} B \sqrt{g D_u} \sqrt{D_u - D_d}$ (per flusso rigurgitato) nel caso in cui i tiranti idrici D siano **inferiori all'apertura** H della paratoia; in alternativa, è anche possibile calcolare il flusso al di sotto della paratoia utilizzando le formule 3-5 del moto bidimensionale;
6. coefficiente di deflusso sopra paratoia, ossia il parametro C_{d2} da utilizzare nella formula **dell'efflusso** $Q = C_{d2} B \sqrt{g D_u^{1.5}}$ (flusso non rigurgitato) o $Q = C_{d2} B \sqrt{g D_u} \sqrt{D_u - D_d}$ (flusso rigurgitato) nel caso in cui i tiranti idrici D **superino l'altezza della paratoia**;
7. apertura della paratoia H ;
8. altezza della paratoia (facoltativo): **sommata all'apertura della paratoia fornisce** la quota di attivazione dello sfioro sopra la paratoia (vedi punto 6).

Soglie

Per la definizione completa di un elemento soglia rettangolare, InfoWorks ICM richiede l'inserimento di cinque parametri:

1. livello della cresta;
2. larghezza della soglia B ;
3. coefficiente di deflusso, ossia il parametro C_d **che inserito nelle formule dell'efflusso**
 $Q = C_d B \sqrt{g} D_u^{3/2}$ (flusso non rigurgitato) o $Q = C_d B D_u \sqrt{g} (D_u - D_d)^{1/2}$ (flusso rigurgitato)
 determina la relazione tra tiranti idrici D sopra la soglia e le portate effluenti Q ;
4. altezza soffitto (facoltativo), **ossia l'altezza d'acqua oltre la quale cessa il funzionamento** a stramazzo della soglia e comincia il funzionamento sotto battente;
5. coefficiente di deflusso secondario, ossia il parametro C_d da utilizzare nella formula **dell'efflusso della paratoia sotto battente** (vedi sopra) nel caso in cui la quota idrica a monte della soglia **superi l'altezza del soffitto** (qualora specificata).

4.1.2.4 Costruzione del modello bidimensionale

Il dominio di calcolo del modello numerico utilizzato nella verifica delle opere in progetto comprende un tronco di Seveso lungo circa 560 m, compreso approssimativamente tra la sezione SV28 **dell'Autorità di Bacino** (ponte di accesso al depuratore IANOMI dismesso) a monte, ed il limite degli interventi in alveo previsti in progetto a valle.

Per la rappresentazione della geometria del terreno e dell'alveo, è stato prodotto un modello digitale del terreno (DTM) in formato TIN (Triangulated Irregular Network), sulla base dei dati topografici e batimetrici rilevati nel corso di un rilievo appositamente realizzato. Il DTM dello stato di fatto è stato quindi opportunamente modificato per rappresentare le elevazioni e gli scavi delle nuove strutture in progetto.

Nel metodo ai volumi finiti, utilizzato da Infoworks per risolvere le equazioni del moto, il dominio di calcolo è suddiviso in elementi, la cui forma e le cui dimensioni possono essere variate per adattarsi alla morfologia del terreno o al grado di dettaglio della soluzione che si vuole ottenere: le zone **caratterizzate da un'orografia maggiormente variabile e complessa, così come le zone in cui è necessario ottenere una maggior risoluzione spaziale dei valori di altezza e velocità dell'acqua, sono** schematizzabili con elementi di minori dimensioni, mentre le zone con pendenze relativamente costanti o distanti dalla zona d'interesse sono modellate con elementi di dimensioni maggiori. Ciò consente di ottenere un ragionevole compromesso tra precisione dei risultati e contenimento dei tempi di calcolo.

La discretizzazione del dominio e le maglie di calcolo sono state prodotte direttamente all'interno del software di modellazione, utilizzando alcune funzionalità che consentono la generazione automatica di mesh ottimizzate a partire da alcuni parametri che regolano, ad esempio, le dimensioni minime e **massime degli elementi, l'ampiezza minima degli angoli di ciascun elemento (fattore importante per evitare instabilità nel modello) e la massima variazione di quota ammessa all'interno di un elemento.**

Le strutture in elevazione all'interno del dominio di calcolo sono state schematizzate come aree a deflusso nullo o, qualora se ne preveda il sormonto, come elementi tracimabili a quote prefissate,

mentre in corrispondenza dei **principali elementi morfologici (fondo del thalweg, cigli di scarpate...)** sono state tracciate delle breaklines, ossia delle tracce che **determinano l'andamento** delle maglie, in modo da ottenere una maggior precisione nella rappresentazione del terreno.

Coerentemente con quanto ipotizzato nelle modellazioni pregresse (Studio AIPO 2011), sono stati assunti i coefficienti di scabrezza di Strickler seguenti:

$30 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ **per l'alveo esistente**

$40 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ **per i tratti d'alveo rivestiti con scogliere o gabbioni**

$70 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ **per i tratti d'alveo in calcestruzzo**

In corrispondenza della paratoia di regolazione è stato inserito un elemento paratoia con livello di scorrimento 170,50 m slm, larghezza 12 m, coefficiente di deflusso 0,60, quota di tracimazione **174,12 m slm**. L'apertura della paratoia è stata scelta in modo tale da garantire che la portata defluente a valle della paratoia nel corso dell'evento non superi i **$37 \text{ m}^3/\text{s}$** , ed è stata considerata fissa per l'intera durata dell'evento.

Lo sfioratore dell'opera di presa è stato modellato come una soglia frontale composta della lunghezza complessiva di 35,60 m, con cresta a quota 172,65 m slm e coefficiente di deflusso 0,405.

Anche lo sfioratore **d'emergenza** è stato modellato come una soglia, della lunghezza di 35,00 m, con cresta a quota 173,90 m slm e coefficiente di deflusso 0,405.

Lo sfioratore dell'opera di presa è stato collegato mediante tre scatolari ad un serbatoio, che rappresenta il primo comparto della vasca di laminazione. Dei tre scatolari, due hanno sezione rettangolare 3,5x4,5 m e lunghezza pari a 71,7 m, mentre il terzo scatolare ha sezione rettangolare 3,25x3,25 m e lunghezza pari a 85,5 m; per tutti gli scatolari si è assunta una scabrezza di Strickler pari a $70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ e dei coefficienti di perdita di imbocco e sbocco sempre pari a 1,0. Il primo comparto della vasca di laminazione è stato infine collegato ad un secondo serbatoio, per simulare il secondo comparto della vasca. Il collegamento tra i due serbatoi è stato modellato mediante una soglia lunga 150,00 m, **con cresta a quota 167,00 m slm e coefficiente di deflusso 0,385**, che rappresenta l'argine di separazione tra i due comparti. Le curve di invaso dei due serbatoi sono state dedotte dalla Tabella 3. La Figura 30 mostra uno stralcio della griglia di calcolo del modello.

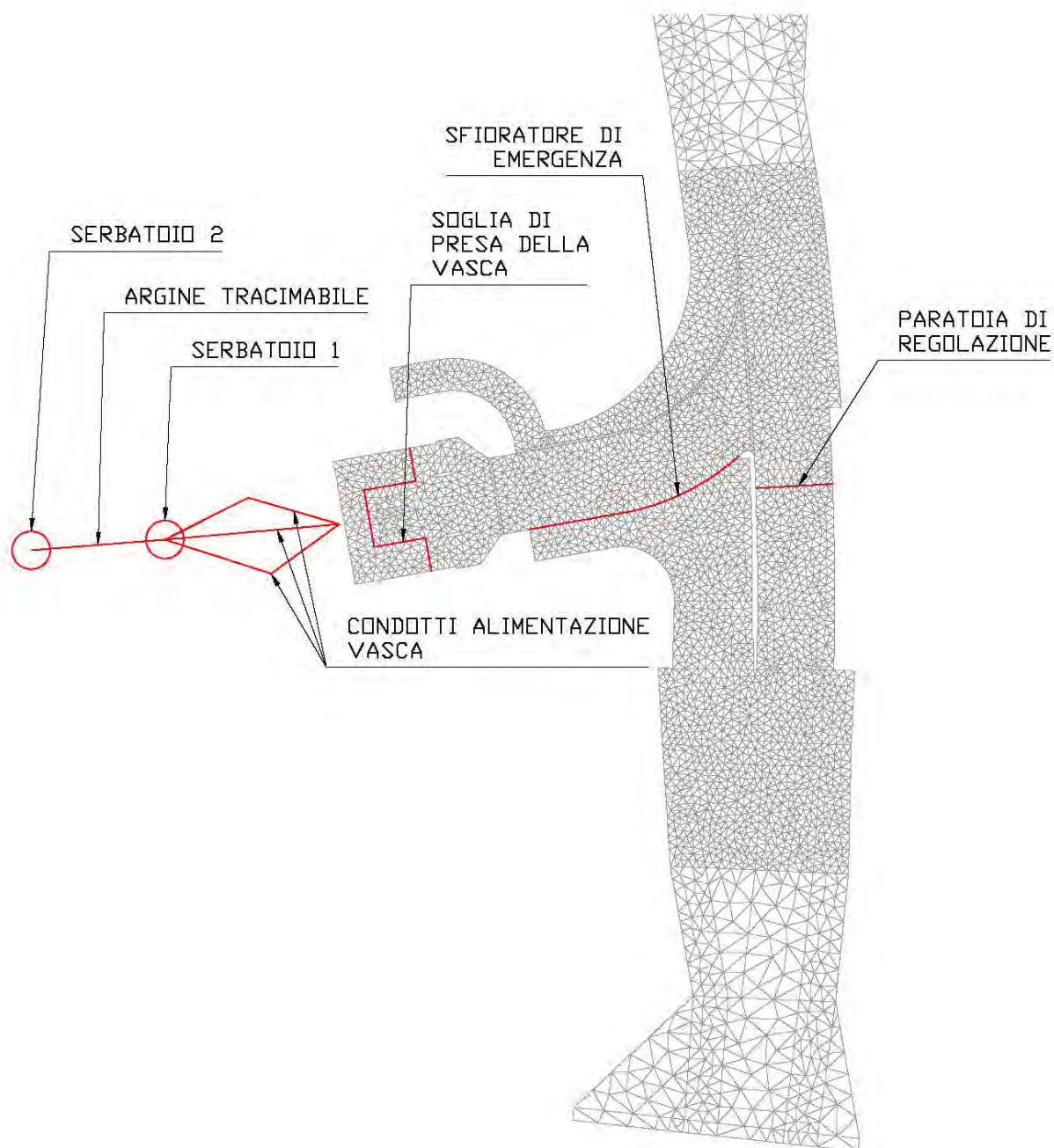


Figura 30. Stralcio della griglia di calcolo del modello bidimensionale

4.1.2.5 Condizioni al contorno

4.1.2.5.1 Condizione al contorno di monte

Come già detto sopra, la verifica di funzionalità idraulica **dell'opera** è stata effettuata assumendo come evento di progetto la piena con TR=100 anni **nell'assetto di bacino di progetto**, ricavata dalle analisi idrologiche ed idrauliche pregresse (Studio AIPO 2011 e successivi aggiornamenti).

La condizione al contorno di monte del modello è rappresentata quindi **dall'idrogramma di piena** in Figura 17, caratterizzato da un picco di portata pari a $118 \text{ m}^3/\text{s}$ e da un volume di circa 5 Mm^3 .

4.1.2.5.2 Condizione al contorno di valle

Al fine di determinare le condizioni al contorno di valle del modello, si è effettuata una simulazione monodimensionale preliminare, estendendo il dominio di calcolo fino alla sezione SV24 dell'Autorità di Bacino, circa 1 km a valle del tombino in sottopasso al Canale Villoresi; in questo modo si è potuta determinare una scala di deflusso da imporre in corrispondenza della sezione di chiusura del modello 2D. La scala di deflusso nel modello 2D è stata imposta inserendo in corrispondenza della sezione di chiusura del modello una soglia tarata.

In ogni caso, la presenza di una sconnessione idraulica in corrispondenza del misuratore a risalto a valle della paratoia (causata dal passaggio della corrente per lo stato critico) rende i risultati del modello poco sensibili alle condizioni imposte alla sezione di chiusura.

4.1.3 Risultati

La Figura 31 mostra gli idrogrammi ricavati dalla simulazione dell'evento di piena centennale nell'assetto di bacino di progetto. Le oscillazioni di portata nell'idrogramma in ingresso alla vasca di laminazione che si osservano dopo circa 14,5 h sono innescate dal pareggiamento dei livelli a monte e a valle della soglia di presa della vasca, che per effetto dell'approssimazione numerica determinano un flusso alternato in ingresso ed in uscita dall'invaso.

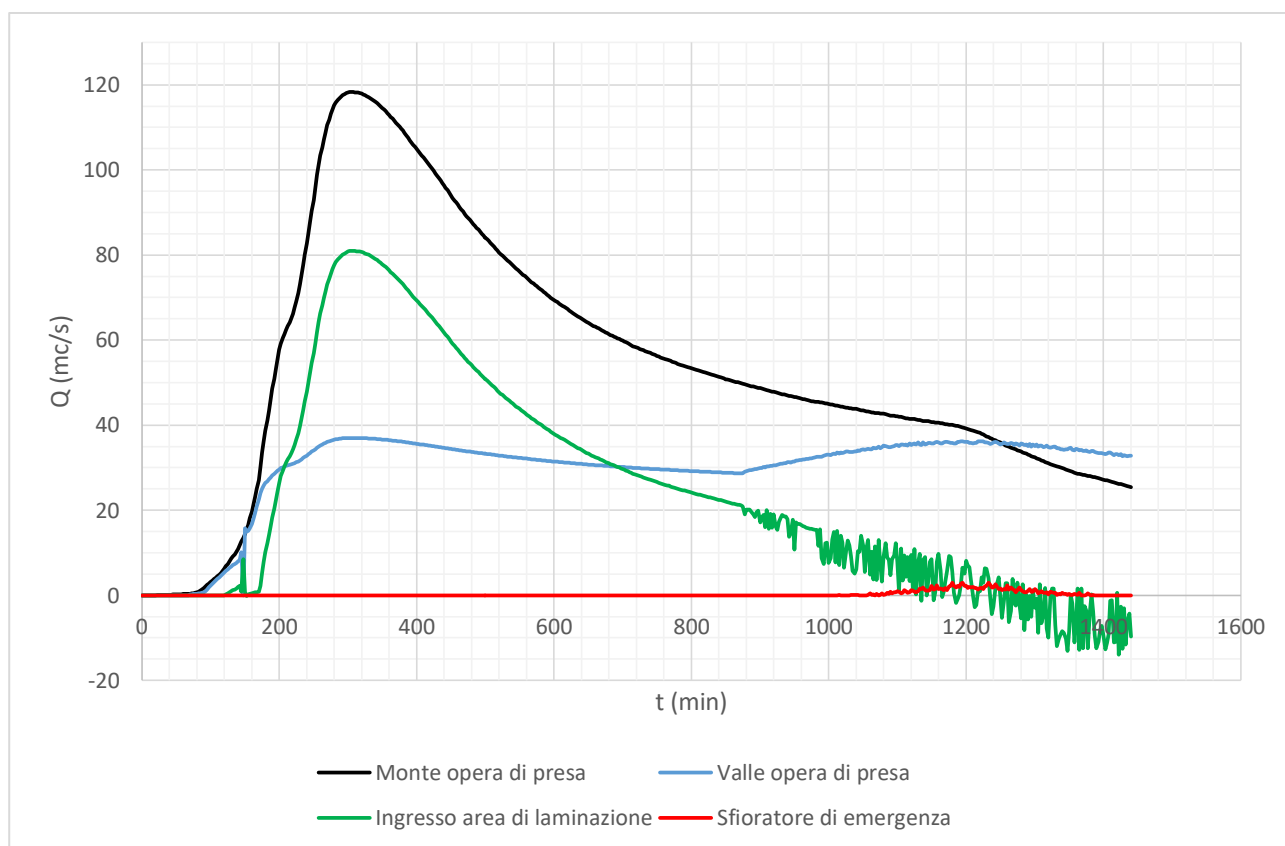


Figura 31. Idrogrammi relativi al sistema idraulico della vasca di laminazione di Varedo, Paderno Dugnano e Limbiate (TR= 100 anni) - assetto di progetto a monte dell'area di laminazione.

I risultati dimostrano come **l'opera di laminazione** sia effettivamente in grado di ripartire le portate in arrivo da monte secondo le previsioni del progetto preliminare: a fronte di una portata di picco in arrivo da monte di 118 m³/s, la massima portata rilasciata a valle della paratoia è infatti pari a 37 m³/s, mentre la massima portata derivata in vasca risulta pari a 81 m³/s.

Con tale ripartizione di portata, il massimo volume invasato in vasca è pari a circa 2.100.000 m³ (di poco inferiore ai 2.181.000 m³ previsti nel progetto preliminare per lo stesso scenario), valore cui corrisponde una quota in vasca di 174.08 m slm. Come mostrato in Figura 31, in corrispondenza del raggiungimento di tale quota il modello evidenzia un rilascio dallo sfioro di emergenza, la cui entità è tuttavia trascurabile (portata massima 3 m³/s, volume complessivo 21.500 m³), considerato anche che la tracimazione **avviene durante la fase di esaurimento dell'onda di piena**.

4.2 Valutazione del rischio idraulico locale indotto dall'opera

4.2.1 Condizioni di funzionamento ordinario

4.2.1.1 Obiettivi

Obiettivo della verifica è quello di dimostrare che la presenza in alveo degli organi di regolazione **dell'invaso non modificano i livelli di piena a monte delle opere di sistemazione previste in progetto**. Anche in questo caso, la verifica è stata svolta esclusivamente per l'evento con TR 100 anni dell'Autorità di Bacino nell'ipotesi che il bacino a monte della vasca si trovi nell'assetto di progetto previsto dallo Studio AIPO 2011 e successive modifiche. Di conseguenza si è assunto che l'onda di piena in arrivo alla vasca abbia la forma dell'idrogramma in Figura 17, con una portata massima di 118 m³/s ed un volume di circa 5 Mm³.

4.2.1.2 Strumenti

Le valutazioni circa gli impatti delle opere sul rischio idraulico locale sono state effettuate sulla base dei risultati delle simulazioni di cui alle precedenti verifiche.

Le quote d'acqua ottenute dal modello bidimensionale dello stato di progetto sono state confrontate con i risultati di una simulazione monodimensionale dello stato di fatto (implementato sempre con Infoworks ICM), costruito sulla base delle sezioni rilevate per lo Studio dell'Autorità di Bacino del 2004 e del rilievo integrativo svolto per la presente progettazione. Il dominio del modello monodimensionale è compreso tra la sezione SV29 (circa 1,1 km a monte del manufatto di sottopasso del Canale Villoresi) e la sezione SV24 (circa 1 km a valle del sottopasso del Canale Villoresi) dell'Autorità di Bacino.

Le scabrezze di Strickler assunte per l'alveo nello stato di fatto sono le stesse previste nello Studio AIPO 2011, ovvero:

- | | |
|-------------------------------------|---|
| 30 m ^{1/3} s ⁻¹ | per i tratti d'alveo naturali |
| 35 m ^{1/3} s ⁻¹ | per i tratti d'alveo in ambito urbanizzato |

Il manufatto di sottopasso del Canale Villoresi è stato schematizzato mediante tre canne in parallelo, ciascuna costituita da:

- un imbocco cilindrico lungo 4,30 m con sezione ad arco, larga 3,50 m e alta 3,75 m;
- uno scatolare cilindrico centrale lungo 9,90 m, con sezione ad arco ribassato larga 3,50 m, alta 3,64 m, con spalle alte 2,00 m;
- uno sbocco cilindrico lungo 3,70 m con sezione analoga **all'imbocco**.

Al manufatto di sottopasso è stata assegnata una scabrezza di Strickler uniforme e pari a $40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, oltre ad un coefficiente di perdita di carico concentrata pari a 0,50 **all'imbocco delle canne**, 0,50 **all'imbocco degli scatolari centrali**, 0,06 allo sbocco degli scatolari centrali e 0,08 allo sbocco delle canne. I coefficienti di perdite concentrate agli sbocchi sono stati determinati in modo da riprodurre **l'effetto di una perdita di Borda** in caso di funzionamento in pressione.

Come condizione al contorno di monte del modello monodimensionale è stato imposto il medesimo idrogramma utilizzato nelle precedenti verifiche (Figura 17), mentre come condizione di valle si è imposto, considerata la distanza della sezione di chiusura a valle, il passaggio per lo stato critico.

4.2.1.3 Risultati

La Tabella 6 pone a confronto il profilo di piena dello stato di fatto da modello monodimensionale con il profilo di piena di progetto da modello bidimensionale.

Sezione	Progressiva	Livello (m slm)		Δ (m)
		SDF	Progetto	
1	0.00	176.21	176.23	0.02
2	20.01	176.16	176.21	0.05
3	25.81	176.14	176.14	0.00
PONTE IANOMI				
4	60.49	175.58	175.55	-0.03
5	80.54	175.51	175.69	0.18
6	100.64	175.43	175.65	0.22
7	121.70	175.24	175.55	0.31
8	141.71	175.19	175.30	0.11
9	161.89	175.19	175.28	0.09
10	181.90	175.15	175.25	0.10
11	201.88	175.09	175.19	0.10
12	221.94	174.99	175.12	0.13
13	241.97	174.91	174.54	-0.37
14	262.00	174.76	174.51	-0.25
15	282.45	174.60	174.43	-0.17
16	303.20	174.54	174.35	-0.19
17	323.44	174.49	174.05	-0.44
18	343.45	174.47	174.05	-0.42
19	363.73	174.40	174.00	-0.40
20	383.75	174.32	174.00	-0.32

Sezione	Progressiva	Livello (m slm)		Δ (m)
		SDF	Progetto	
21	403.70	174.25	174.01	-0.24
22	423.62	174.16	174.04	-0.12
23	443.68	174.14	174.04	-0.10
24	463.80	174.02	174.11	0.09
PARATOIA DI REGOLAZIONE				
25	483.81	173.89	172.69	-1.20
26	503.90	173.75	172.00	-1.75
27	523.92	173.55	171.93	-1.62
28	543.97	173.51	172.01	-1.50
29	564.05	173.40	171.91	-1.49

Tabella 6. Profilo idraulico della piena con $TR=100$ anni (assetto di bacino di progetto): confronto tra stato di fatto e stato di progetto.

I risultati dimostrano che, nello scenario di progetto ipotizzato, i livelli idrici **a monte dell'opera di regolazione** non solo non superano i livelli di piena attuali, ma subiscono anche una lieve riduzione, almeno nei primi 220 m a monte della paratoia (fino alla sezione 13). **L'assenza di rigurgiti significativi per effetto dell'opera in progetto** è giustificata dal fatto che il canale di derivazione delle portate in vasca ha una sezione geometrica paragonabile a quella dell'alveo del Seveso, ed è ad esso raccordato mediante una curva ad ampio raggio; in questo modo, la corrente in arrivo da monte durante la piena, per la maggior parte **avviata all'invaso, non** risulta significativamente influenzata della strozzatura in corrispondenza della paratoia di regolazione, almeno fino al completo riempimento della vasca, che però avviene durante la fase discendente dell'onda.

4.2.2 Condizioni eccezionali

4.2.2.1 Malfunzionamento dell'opera

4.2.2.1.1 Obiettivi

Obiettivo della verifica è quello di dimostrare che nel caso **l'invaso** di laminazione non sia utilizzabile (o perché già pieno, o per ragioni di manutenzione), le opere in alveo non producono un incremento del rischio idraulico al passaggio della piena di progetto. Anche in questo caso, la verifica è stata svolta per l'evento con TR 100 anni dell'Autorità di Bacino nell'ipotesi che il bacino a monte della vasca si trovi nell'assetto di progetto previsto dallo Studio AIPO 2011 e successive modifiche. Di conseguenza si è assunto che l'onda di piena in arrivo alla vasca abbia la forma dell'idrogramma in Figura 17, con una portata massima di $118 \text{ m}^3/\text{s}$ ed un volume di circa 5 Mm^3 .

4.2.2.1.2 Strumenti

Le valutazioni circa gli impatti delle opere sul rischio idraulico locale sono state effettuate utilizzando lo stesso modello idraulico bidimensionale impiegato nelle precedenti analisi. In questo caso si è tuttavia ipotizzato che **l'invaso** di laminazione sia sconnesso dal torrente Seveso per tutta la durata dell'evento, imponendo di conseguenza che l'intera onda di piena transiti a valle dell'opera per

tracimazione dello sfioro di emergenza e della paratoia di regolazione , oltre che attraverso la luce della paratoia stessa.

4.2.2.1.3 Risultati

Prima di ogni altra considerazione, occorre dire innanzitutto che allo stato attuale il tratto di torrente a monte della vasca non è in grado di garantire un adeguato livello di protezione idraulica nei confronti delle piene con tempo di ritorno 100 anni. A riprova di ciò, si riporta di seguito (Tabella 7) il profilo idraulico di stato di fatto per la piena con TR 100 anni **(nell'assetto di bacino di progetto)**, calcolato con il modello monodimensionale già utilizzato per le precedenti verifiche.

Sezione	Progressiva	Livello piena (m slm)	Quota minima di ritenuta (m slm)	Franco (m)
1	0.00	176.21	176.32	0.11
2	20.01	176.16	176.29	0.13
3	25.81	176.14	176.23	0.09
PONTE IANOMI				
4	60.49	175.58	176.61	1.03
5	80.54	175.51	175.87	0.36
6	100.64	175.43	175.67	0.24
7	121.70	175.24	175.48	0.24
8	141.71	175.19	175.83	0.64
9	161.89	175.19	176.00	0.81
10	181.90	175.15	176.00	0.85
11	201.88	175.09	176.00	0.91
12	221.94	174.99	175.50	0.51
13	241.97	174.91	174.65	-0.26
14	262.00	174.76	174.62	-0.14
15	282.45	174.60	174.50	-0.10
16	303.20	174.54	175.67	1.13
17	323.44	174.49	175.79	1.30
18	343.45	174.47	175.68	1.21
19	363.73	174.40	175.44	1.04
20	383.75	174.32	174.35	0.03
21	403.70	174.25	174.22	-0.03
22	423.62	174.16	173.55	-0.61
23	443.68	174.14	173.41	-0.73
24	463.80	174.02	173.47	-0.55
25	483.81	173.89	172.91	-0.98
26	503.90	173.75	173.04	-0.71
27	523.92	173.55	173.71	0.16
28	543.97	173.51	173.86	0.35
29	564.05	173.40	173.51	0.11

Tabella 7. Franchi di sicurezza delle sponde nei confronti della piena con TR 100 anni ($Q_{max} = 118 \text{ m}^3/\text{s}$) allo stato attuale.

Il confronto tra il profilo idraulico e le quote minime di ritenuta delle sezioni attuali mostra come nel tronco di inserimento dell'opera vi siano numerosi tratti caratterizzati da franchi di sicurezza esigui o addirittura negativi. Nella presente progettazione si è quindi tenuto conto del fatto che, indipendentemente dalla realizzazione della vasca, sul tronco di Seveso oggetto di analisi dovranno essere eseguiti lavori per la riduzione del rischio idraulico locale, i quali saranno oggetto di una progettazione separata. Fatta questa premessa, si riporta di seguito un confronto fra il profilo idraulico di progetto del Seveso a vasca funzionante (vedi Tabella 6) ed il profilo idraulico del Seveso con vasca fuori servizio.

Sezione	Progressiva	Livello con vasca in funzione (m slm)	Vasca fuori servizio	
			Livello (m slm)	Δ (m)
1	0.00	176.23	176.24	0.01
2	20.01	176.21	176.21	0.00
3	25.81	176.14	176.16	0.02
PONTE IANOMI				
4	60.49	175.55	175.81	0.26
5	80.54	175.69	175.81	0.12
6	100.64	175.65	175.81	0.16
7	121.70	175.55	175.76	0.21
8	141.71	175.30	175.57	0.27
9	161.89	175.28	175.50	0.22
10	181.90	175.25	175.48	0.23
11	201.88	175.19	175.44	0.25
12	221.94	175.12	175.38	0.26
13	241.97	174.54	175.15	0.61
14	262.00	174.51	175.14	0.63
15	282.45	174.43	175.11	0.68
16	303.20	174.35	175.06	0.71
17	323.44	174.05	175.06	1.01
18	343.45	174.05	175.00	0.95
19	363.73	174.00	174.98	0.98
20	383.75	174.00	175.00	1.00
21	403.70	174.01	174.96	0.95
22	423.62	174.04	174.95	0.91
23	443.68	174.04	175.03	0.99
24	463.80	174.11	175.11	1.00
PARATOIA DI REGOLAZIONE				
25	483.81	172.69	173.88	1.19
26	503.90	172.00	173.73	1.73
27	523.92	171.93	173.71	1.78
28	543.97	172.01	173.50	1.49
29	564.05	171.91	173.25	1.34

Tabella 8. Confronto tra profili di piena per evento $TR=100$ anni (assetto di bacino di progetto) con vasca in funzione e con vasca fuori servizio.

I risultati mostrano che il rigurgito generato dalle opere in alveo in caso di malfunzionamento della vasca **è nell'ordine di 1 m circa, e che tale rigurgito** si propaga verso monte per circa 220 m, fino alla sezione 13; oltre tale distanza le differenze di quote tra i due profili scendono infatti al di sotto dei 30 cm, sino ad annullarsi completamente a monte del ponte del depuratore IANOMI.

Considerato che, come ricordato all'inizio del presente paragrafo, il tronco a monte dell'opera di presa e regolazione dovrà comunque essere oggetto di lavori di adeguamento, nella presente progettazione ci si è limitati a prevedere gli interventi strettamente necessari per il contenimento del rigurgito generato dalle opere in alveo.

La Tabella 9 riporta i franchi i sicurezza garantiti dalle opere di adeguamento di sponda previste in progetto (indicate in rosso). Vista la rarità dello scenario di progetto ipotizzato, che prevede la concomitanza di un malfunzionamento tale da rendere la vasca completamente inservibile e di un evento con tempo di ritorno di 100 anni, nella progettazione delle opere di difesa si è ritenuto sufficiente garantire un franco di sicurezza medio di 50 cm. Verificato inoltre che nel tratto compreso tra la sezione 18 e la sezione 16 le quote di sponda sono sufficienti a garantire tale franco di sicurezza, gli interventi di adeguamento delle sponde sono stati interrotti alla sezione 19. Come mostrato in Tabella 9, le variazioni dei franchi di sicurezza per i tratti a monte degli interventi di contenimento del rigurgito sono mediamente pari a 30 cm, con dei massimi di circa 50 cm; alla luce di tali risultati, si può concludere che mentre gli interventi in progetto garantiscono un adeguato livello di protezione nei 160 m a monte della paratoia, a monte di tale tratto essi non determinano **effetti significativi sull'attuale livello** di rischio idraulico (che richiederebbe misure di intervento a **prescindere dalla realizzazione dell'opera**), in quanto i franchi di sicurezza delle sponde risultano già allo stato attuale insufficienti a contenere la piena di progetto.

Sezione	Progressiva	Quota minima di ritenuta (m slm)	Stato di fatto		Vasca fuori servizio	
			Livello (m slm)	Franco (m)	Livello (m slm)	Franco (m)
1	0.00	176.32	176.21	0.11	176.24	0.08
2	20.01	176.29	176.16	0.13	176.21	0.08
3	25.81	176.23	176.14	0.09	176.16	0.07
PONTE IANOMI						
4	60.49	176.61	175.58	1.03	175.81	0.80
5	80.54	175.87	175.51	0.36	175.81	0.06
6	100.64	175.67	175.43	0.24	175.81	-0.14
7	121.70	175.48	175.24	0.24	175.76	-0.28
8	141.71	175.83	175.19	0.64	175.57	0.26
9	161.89	176.00	175.19	0.81	175.50	0.50
10	181.90	176.00	175.15	0.85	175.48	0.52
11	201.88	176.00	175.09	0.91	175.44	0.56
12	221.94	175.50	174.99	0.51	175.38	0.12
13	241.97	174.65	174.91	-0.26	175.15	-0.50
14	262.00	174.62	174.76	-0.14	175.14	-0.52

Sezione	Progressiva	Quota minima di ritenuta (m slm)	Stato di fatto		Vasca fuori servizio	
			Livello (m slm)	Franco (m)	Livello (m slm)	Franco (m)
15	282.45	174.50	174.60	-0.10	175.11	-0.61
16	303.20	175.67	174.54	1.13	175.06	0.61
17	323.44	175.79	174.49	1.30	175.06	0.73
18	343.45	175.68	174.47	1.21	175.00	0.68
19	363.73	175.63	174.40	1.23	174.98	0.65
20	383.75	175.50	174.32	1.18	175.00	0.50
21	403.70	175.50	174.25	1.25	174.96	0.54
22	423.62	175.50	174.16	1.34	174.95	0.55
23	443.68	175.50	174.14	1.36	175.03	0.47
24	463.80	175.50	174.02	1.48	175.11	0.39
PARATOIA DI REGOLAZIONE						
25	483.81	175.50	173.89	1.61	173.88	1.62
26	503.90	174.50	173.75	0.75	173.73	0.77
27	523.92	173.96	173.55	0.41	173.71	0.25
28	543.97	174.08	173.51	0.57	173.50	0.58
29	564.05	174.07	173.40	0.67	173.25	0.82

Tabella 9. *Variazione dei franchi idraulici indotti dalle opere in progetto per piena con TR 100 anni, nell'assetto di bacino di progetto (in rosso sono indicate le quote di ritenuta di progetto).*

La Tabella 10 mostra la ripartizione del picco di piena centennale nell'assetto di bacino di progetto in corrispondenza delle opere con vasca fuori servizio.

	Monte opera di presa	Sfioratore di emergenza	Tracimazione paratoia di regolazione	Luce paratoia di regolazione
Portata (mc/s)	118.3	62.1	21.6	34.6

Tabella 10. *Ripartizione del picco di piena centennale nell'assetto di bacino di progetto in corrispondenza delle opere con vasca fuori servizio.*

4.2.2.2 Resilienza dell'opera

4.2.2.2.1 Obiettivi

Obiettivo della verifica è quello di dimostrare che l'opera mantiene la sua funzionalità anche in presenza di eventi più gravosi dell'evento di progetto, e che per tali eventi non si hanno incrementi del rischio idraulico locale.

A tale scopo, la verifica è stata svolta per l'evento con TR 100 anni, nell'ipotesi che il bacino a monte della vasca si trovi nell'assetto attuale. Di conseguenza si è assunto che l'onda di piena in arrivo alla vasca abbia la forma dell'idrogramma in Figura 5, con una portata massima di 153 m³/s ed un volume di circa 6,7 Mm³.

4.2.2.2.2 Strumenti

Le valutazioni circa la resilienza delle opere nei confronti di un evento più gravoso di quello di progetto sono state effettuate utilizzando lo stesso modello idraulico bidimensionale impiegato per la **verifica di funzionalità idraulica dell'opera nelle condizioni di progetto**.

4.2.2.2.3 Risultati

La Figura 32 mostra gli idrogrammi ricavati dalla simulazione dell'evento di piena centennale nell'assetto di bacino attuale. Le oscillazioni di portata nell'idrogramma in ingresso alla vasca di laminazione che si osservano dopo circa 8,4 h sono innescate dal pareggiamento dei livelli a monte e a valle della soglia di presa della vasca, che per effetto dell'approssimazione numerica determinano un flusso alternato in ingresso ed in uscita dall'invaso.

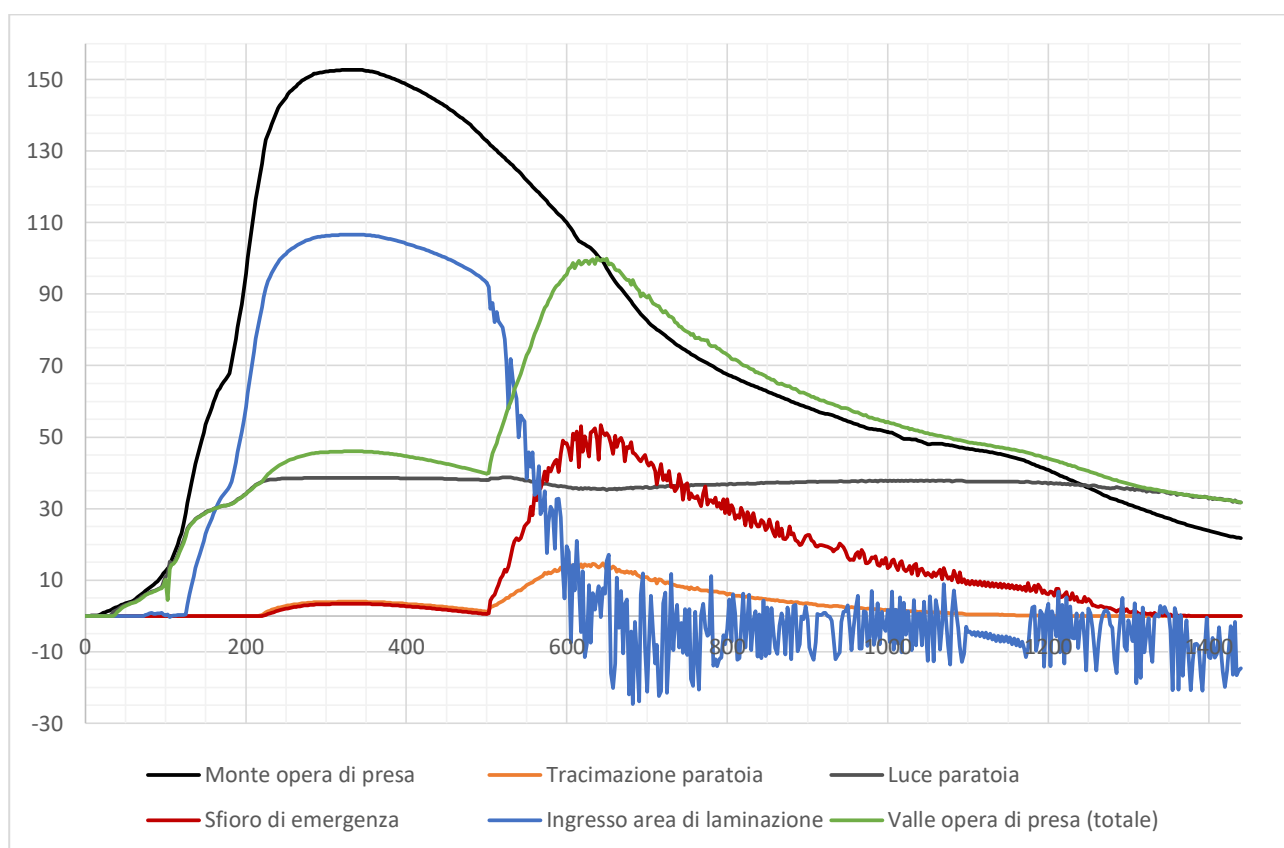


Figura 32. Idrogrammi relativi al sistema idraulico della vasca di laminazione di Varedo, Paderno Dugnano e Limbiate (TR=100 anni) – assetto attuale a monte dell'area di laminazione.

I risultati dimostrano come anche nel caso di un evento decisamente più gravoso di quello di progetto (**portata di picco maggiore del 30%, volume dell'onda maggiore del 34%**), l'opera sia effettivamente in grado di **svolgere un'efficace funzione di laminazione**: a fronte di una portata di picco in arrivo da monte di 153 m³/s, la massima portata rilasciata a valle dell'opera risulta infatti pari a 100 m³/s (riduzione del picco del 35%), mentre il massimo volume invasato in vasca risulta pari a 2.245.000 m³, coincidente con una quota in vasca di 174,83 m slm.

Sezione	Progressiva	Livello (m slm)		Δ (m)
		Vasca fuori servizio (Q _{max} =118 mc/s)	Assetto di bacino attuale (Q _{max} =153 mc/s)	
1	0.00	176.24	176.80	0.56
2	20.01	176.21	176.77	0.56
3	25.81	176.16	176.70	0.54
PONTE IANOMI				
4	60.49	175.81	176.16	0.35
5	80.54	175.81	176.21	0.40
6	100.64	175.81	176.21	0.40
7	121.70	175.76	176.13	0.37
8	141.71	175.57	176.12	0.55
9	161.89	175.50	175.81	0.31
10	181.90	175.48	175.78	0.30
11	201.88	175.44	175.71	0.27
12	221.94	175.38	175.63	0.25
13	241.97	175.15	175.07	-0.08
14	262.00	175.14	174.98	-0.16
15	282.45	175.11	174.89	-0.22
16	303.20	175.06	174.87	-0.19
17	323.44	175.06	174.87	-0.19
18	343.45	175.00	174.82	-0.18
19	363.73	174.98	174.79	-0.19
20	383.75	175.00	174.81	-0.19
21	403.70	174.96	174.79	-0.17
22	423.62	174.95	174.82	-0.13
23	443.68	175.03	174.91	-0.12
24	463.80	175.11	174.95	-0.16
PARATOIA DI REGOLAZIONE				
25	483.81	173.88	173.64	-0.24
26	503.90	173.73	173.46	-0.27
27	523.92	173.71	173.44	-0.27
28	543.97	173.50	173.27	-0.23
29	564.05	173.25	173.07	-0.18

Tabella 11. Confronto tra profili di piena nello scenario di malfunzionamento della vasca e nello scenario di verifica a resilienza.

Per quanto riguarda poi il rischio idraulico a monte dell'opera, il confronto tra il profilo idraulico nello scenario di malfunzionamento della vasca ed il profilo idraulico nello scenario di piena più gravoso di quello di progetto (vedi Tabella 11) dimostra che, a vasca funzionante, il rigurgito indotto dalle opere al passaggio della portata di 153 m³/s è comunque inferiore al rigurgito generato da un picco di portata di 118 m³/s in caso di esclusione della vasca, scenario sul quale sono stati dimensionati

gli interventi di adeguamento delle sponde in progetto. Ribadito quindi che il tratto di torrente a monte dell'opera di presa necessita di interventi di mitigazione del rischio idraulico indipendentemente dalla realizzazione dell'opera, si può comunque affermare che nello scenario simulato l'opera ha un effetto di mitigazione del rischio idraulico locale, a monte e a valle.

5 Valutazione delle modalità e frequenza di attivazione dell'invaso

Nel presente capitolo vengono espone le analisi effettuate allo scopo di definire la frequenza e le modalità dei processi di invaso della vasca in progetto; le analisi sono state svolte sia ipotizzando **l'assenza** degli invasi di laminazione a monte, sia nello scenario di bacino di progetto (assumendo, cautelativamente la sola presenza della vasca di laminazione di Lentate).

Al fine di fornire un quadro abbastanza esauriente dei benefici conseguibili con la realizzazione **dell'opera**, tali analisi sono state sviluppate sia su eventi reali, sia su eventi di riferimento progettuali con tempi di ritorno inferiori a 100 anni.

Le simulazioni effettuate sugli eventi reali consentono infatti di analizzare il comportamento **dell'opera con riferimento agli eventi verificatisi in un determinato periodo, ma non** consentono di attribuire un **valore probabilistico all'evento** di volta in volta preso in considerazione.

Al contrario, le simulazioni impostate sulla ricostruzione modellistica di eventi di riferimento progettuale per diversi tempi di ritorno consentono di esaminare il comportamento delle opere in **eventi "teorici", quindi privi della variabilità tipica degli eventi reali, ma correlati alla scala** probabilistica di rischio.

5.1 Analisi eventi reali

L'analisi degli eventi reali è stata effettuata considerando gli anni compresi tra il 2010 ed il 2014, per i quali si dispone degli **idrogrammi di portata in corrispondenza dell'idrometro di Palazzolo** (ricostruiti utilizzando il modello idrologico-idraulico dello Studio AIPO 2011 nell'ambito delle **progettazione della vasca di Senago**), **a monte dell'opera di presa del CSNO**. Come detto in precedenza, questo periodo di tempo è stato caratterizzato da un notevole numero di eventi meteorici che hanno causato numerose esondazioni in Comune di Milano, in particolare:

- 2010 (n. 8 esondazioni): 3 maggio, 14 maggio, 23 luglio, 5 agosto, 12 agosto, 18 settembre, 1 novembre, 16 novembre;
- 2011 (n. 2 esondazioni): 27 maggio, 6 agosto;
- 2012 (n. 1 esondazione): 12 settembre;
- 2013 (n. 1 esondazione): 23 ottobre;
- 2014 (n. 8 esondazioni): 25 giugno, 8 luglio, 26 luglio, 29 luglio, 3 agosto, 20 agosto, 12 novembre e 15 novembre.

Quello esaminato è dunque un periodo abbastanza esteso e rappresentativo della varietà degli eventi di piena che si formano nel Seveso, dal momento che in esso sono compresi, accanto ad eventi di modesta importanza, anche eventi molto rilevanti come quelli del 18 settembre 2010, 8 luglio 2014, 12 e 15 novembre 2015 che hanno determinato gravissimi allagamenti e danni.

L'analisi dei processi di invaso degli eventi reali è stata eseguita in forma semplificata, ipotizzando che la paratoia in alveo sia regolata **in modo da garantire un rilascio a valle dell'opera di 37 m³/s** al massimo. Di conseguenza si è assunto che gli idrogrammi a valle della paratoia di regolazione non

siano altro che gli idrogrammi in arrivo da monte laminati a 37 m³/s, e che la differenza sia interamente derivata in vasca, sino al suo completo riempimento.

Di seguito si riportano gli idrogrammi simulati per gli eventi sopra indicati.

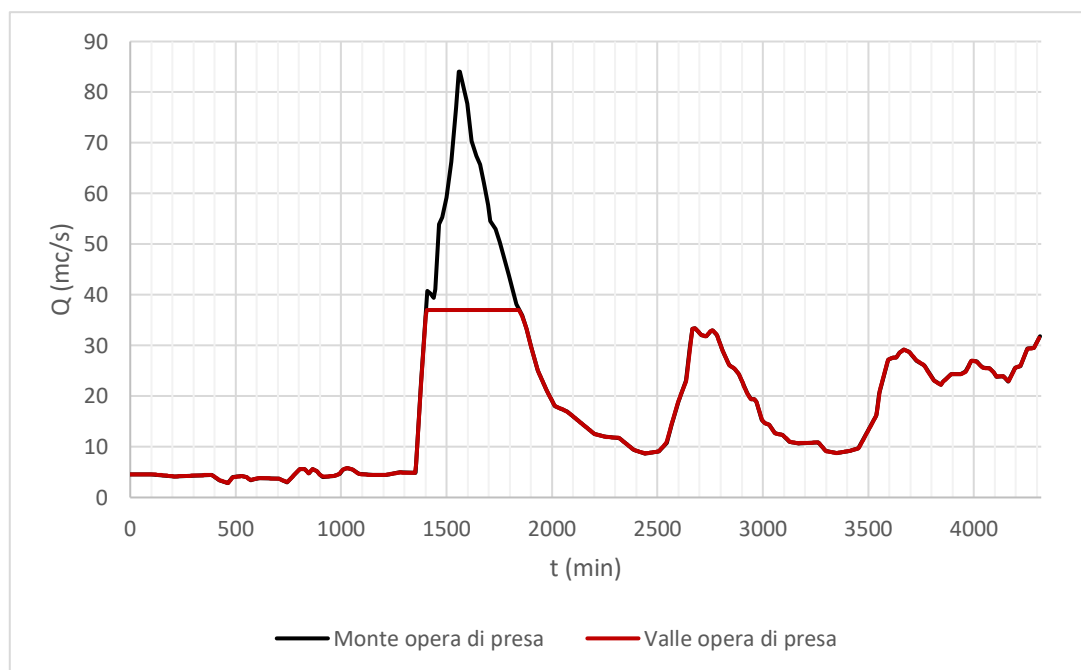


Figura 33. Evento 3 maggio 2010.

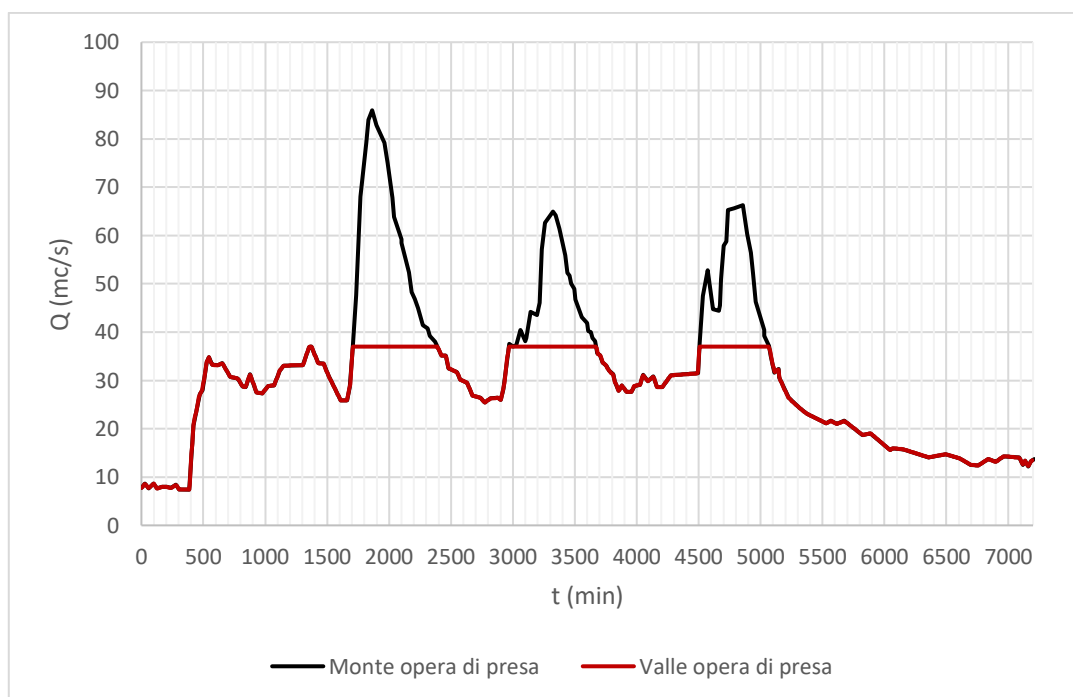


Figura 34. Evento 12-14 maggio 2010.

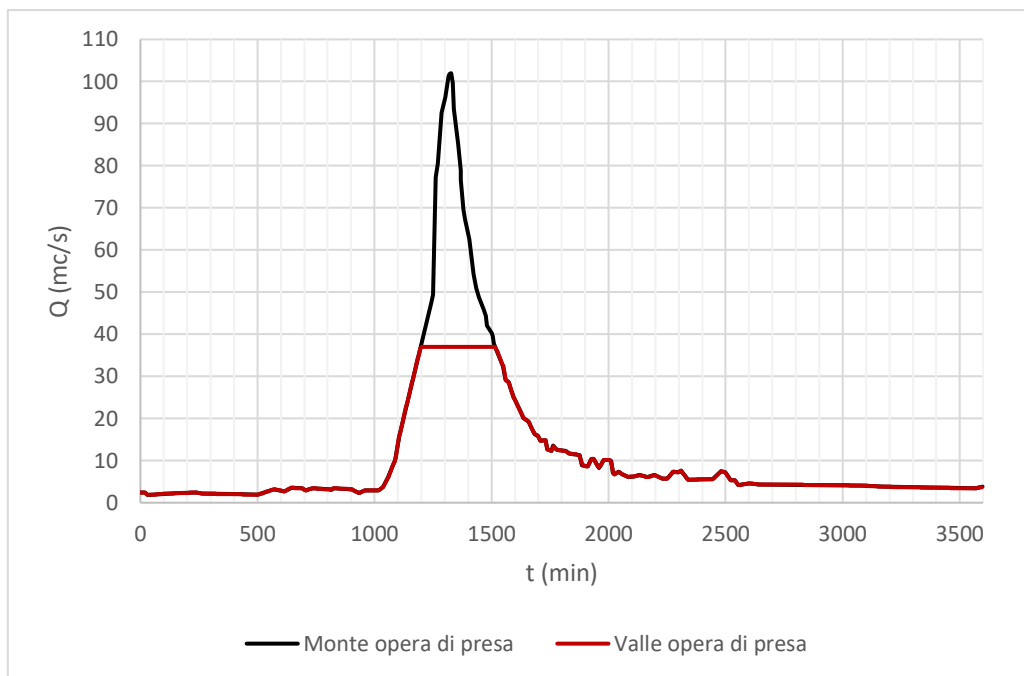


Figura 35. Evento 5 agosto 2010.

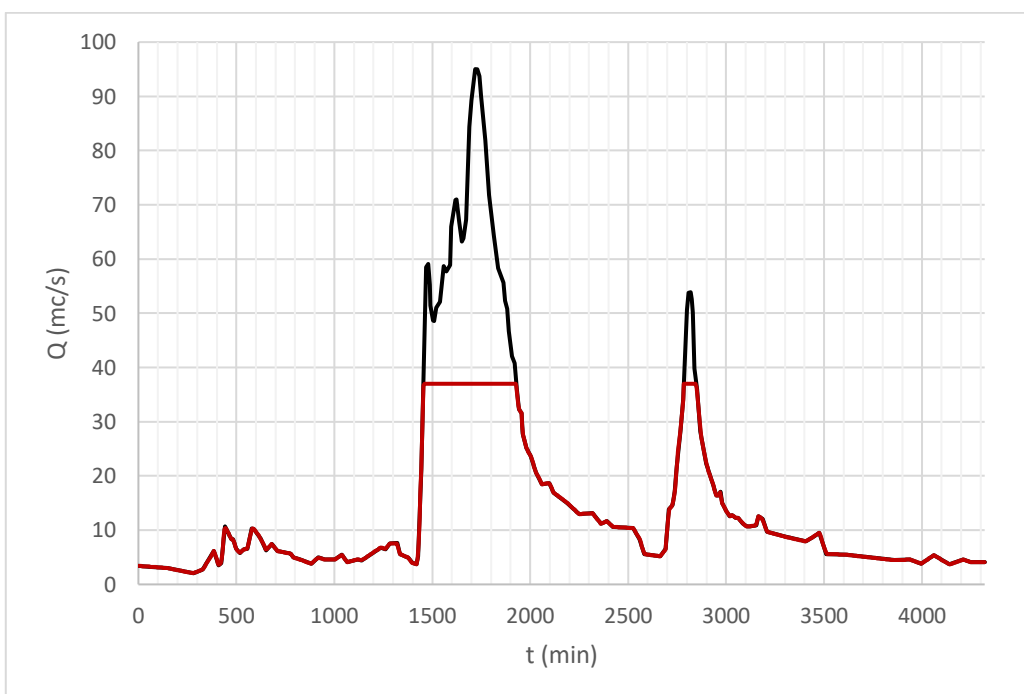


Figura 36. Evento 12 agosto 2010.

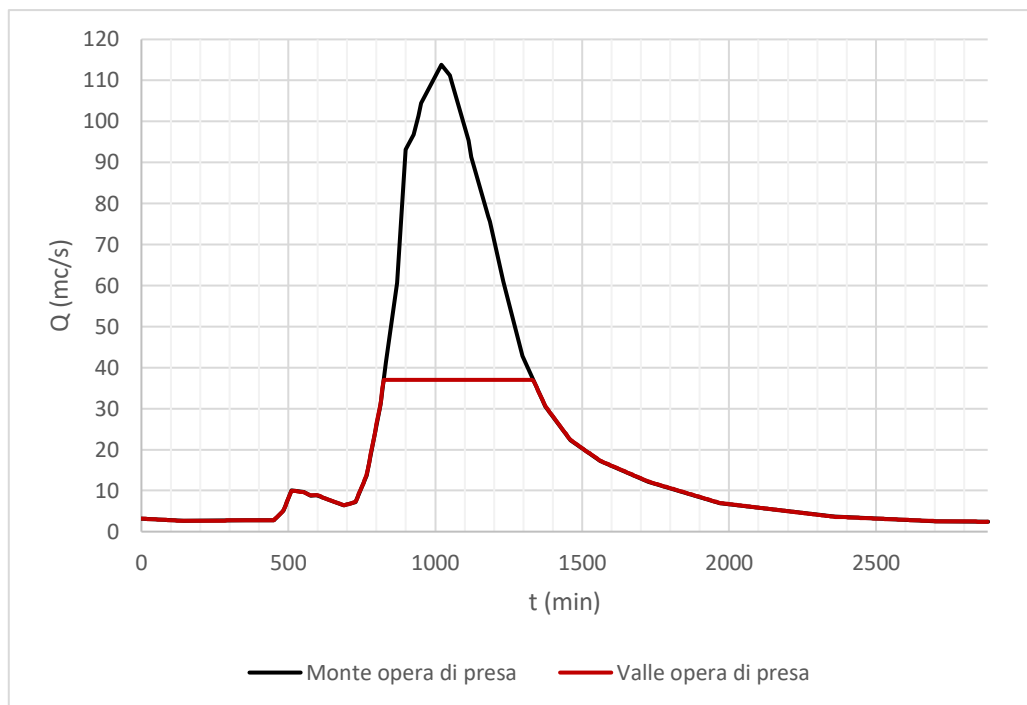


Figura 37. Evento 18 settembre 2010.

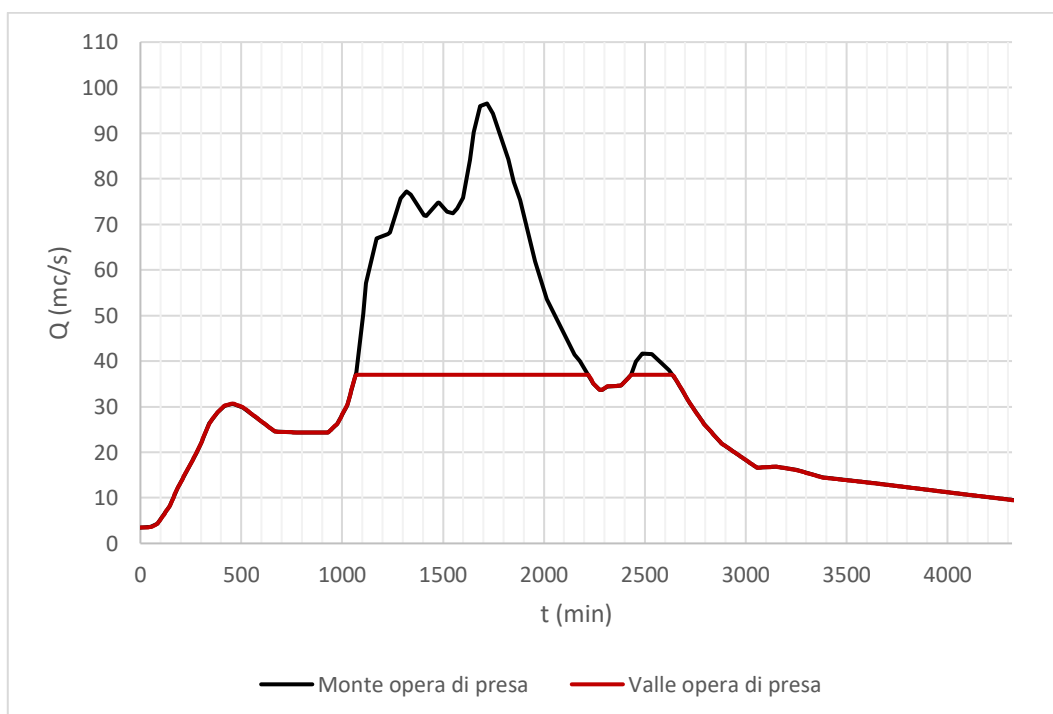


Figura 38. Evento 1 novembre 2010.



Figura 39. Evento 16 novembre 2010.

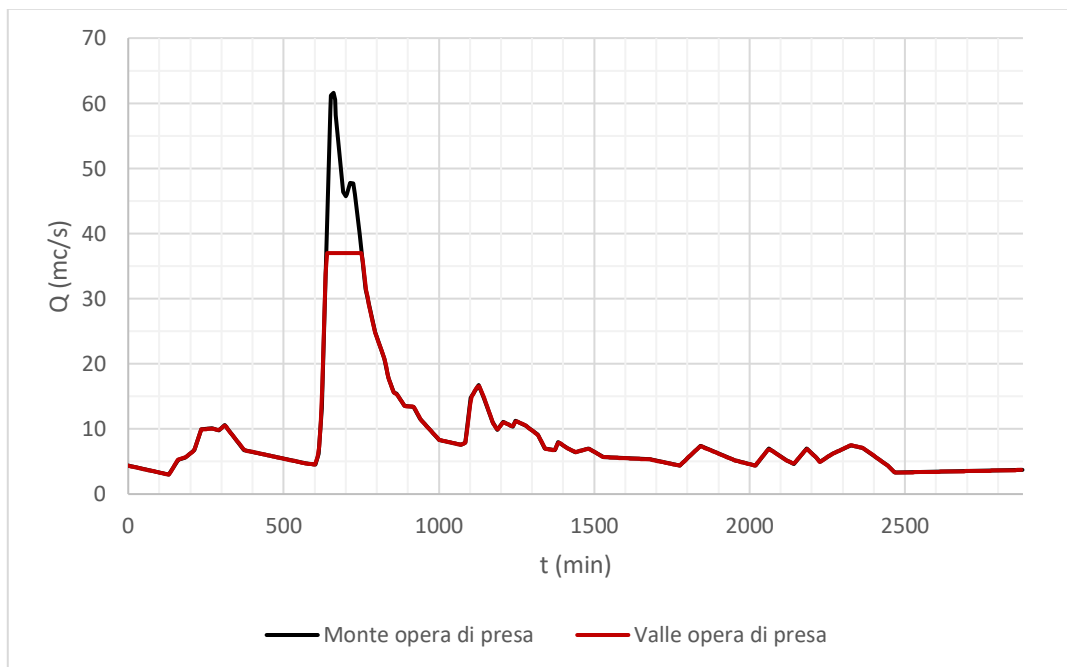


Figura 40. Evento 27 maggio 2011.

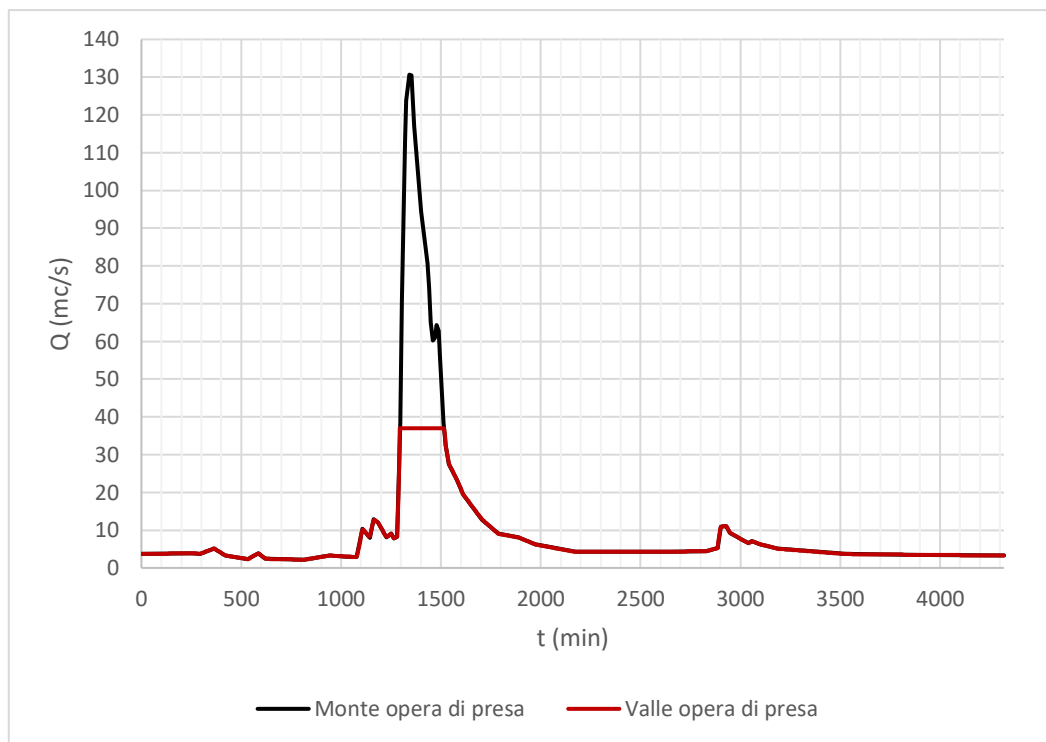


Figura 41. Evento 6 agosto 2011.

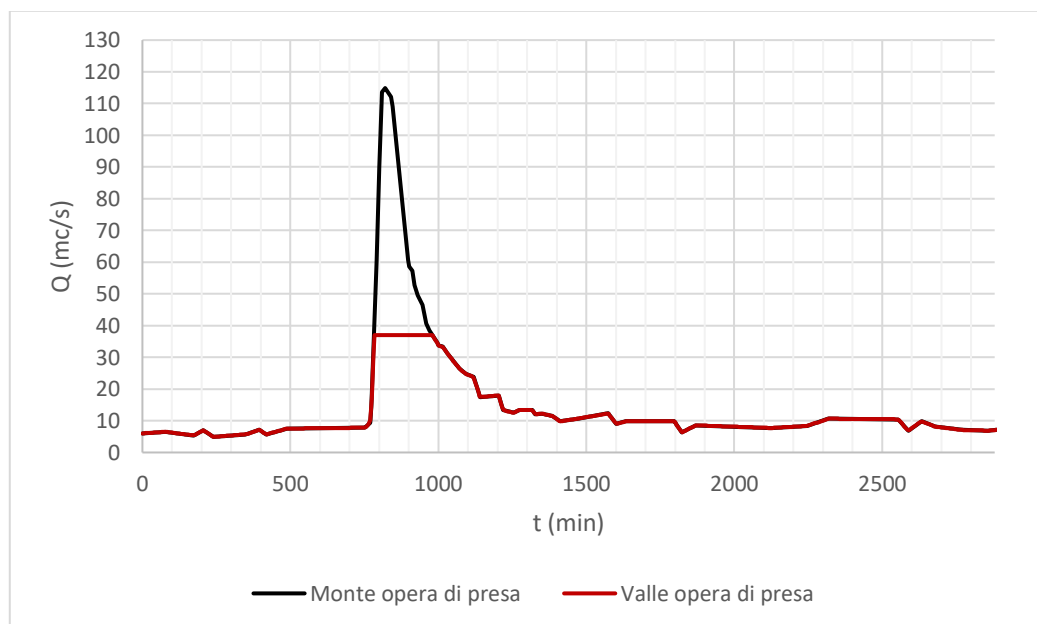


Figura 42. Evento 12 settembre 2012.

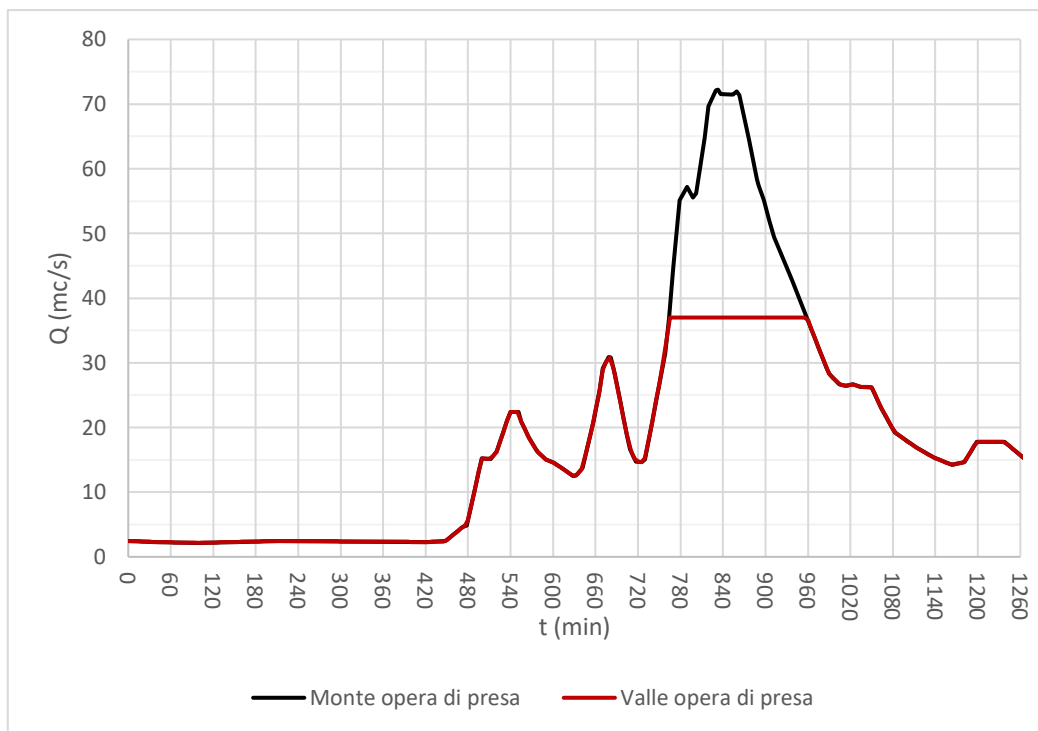


Figura 43. Evento 23 ottobre 2013.

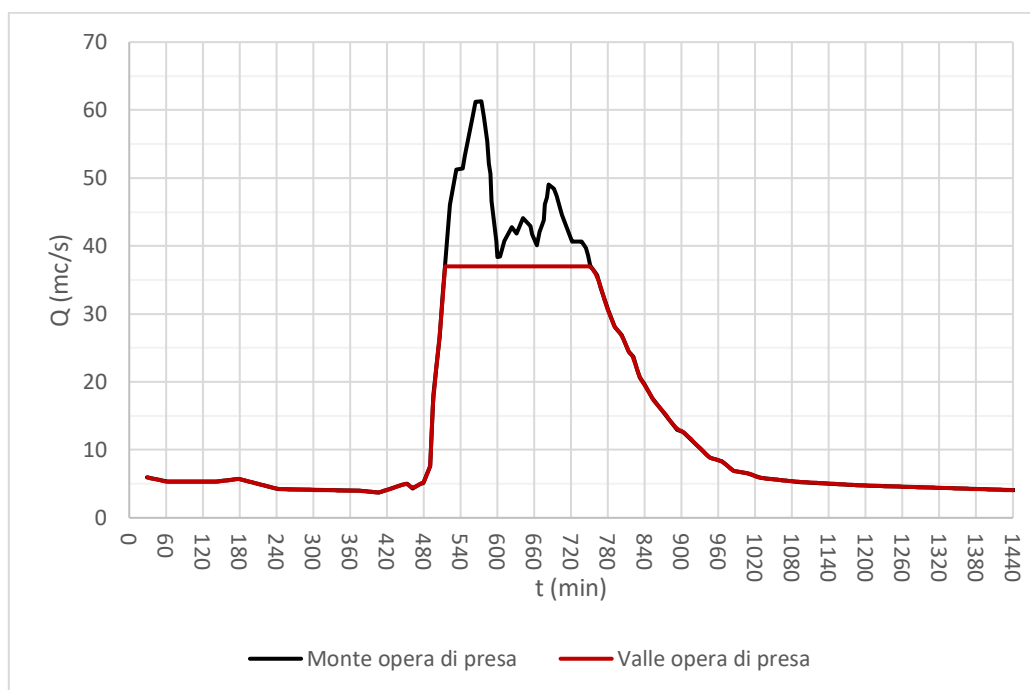


Figura 44. Evento 25 giugno 2014

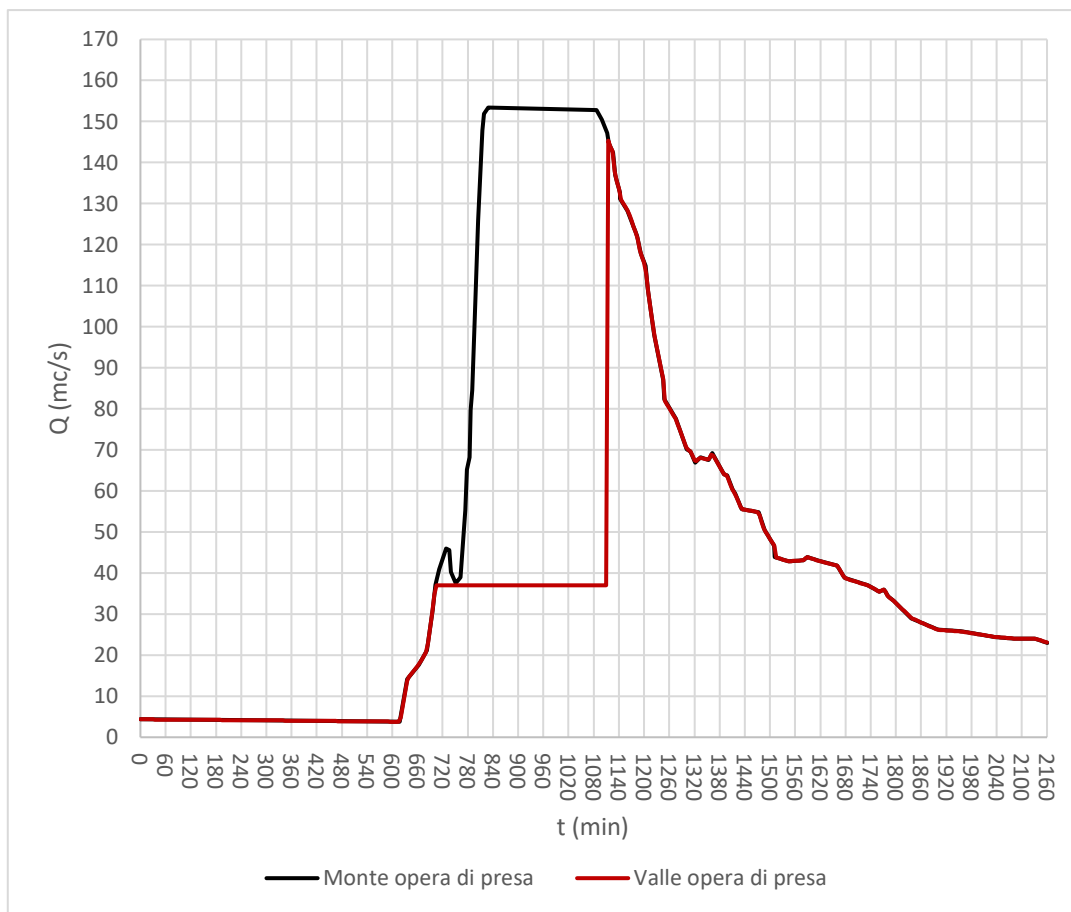


Figura 45. Evento 8 luglio 2014.

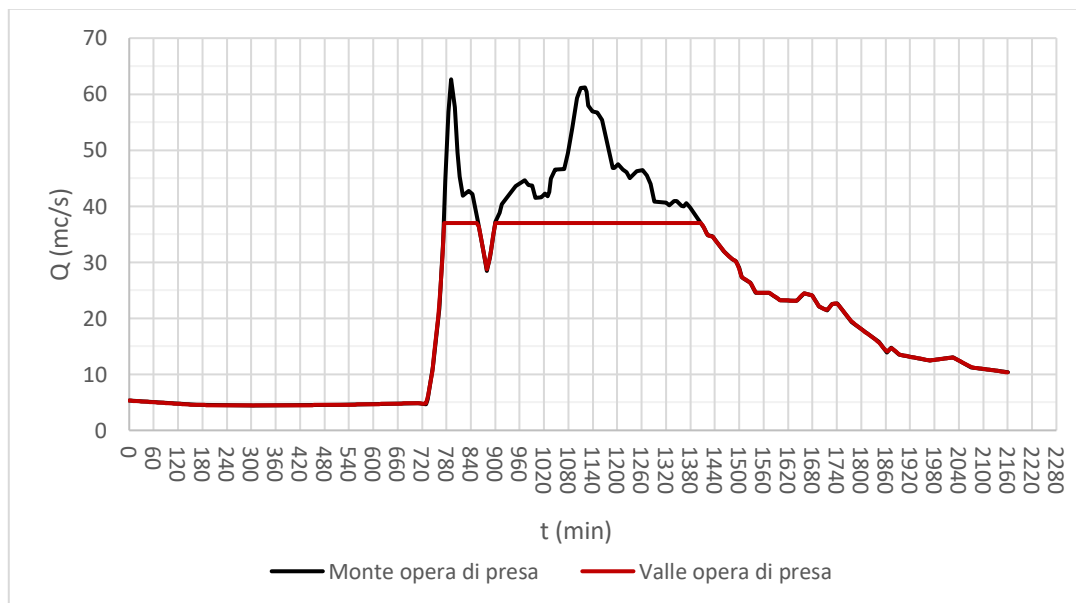


Figura 46. Evento 26 luglio 2014.

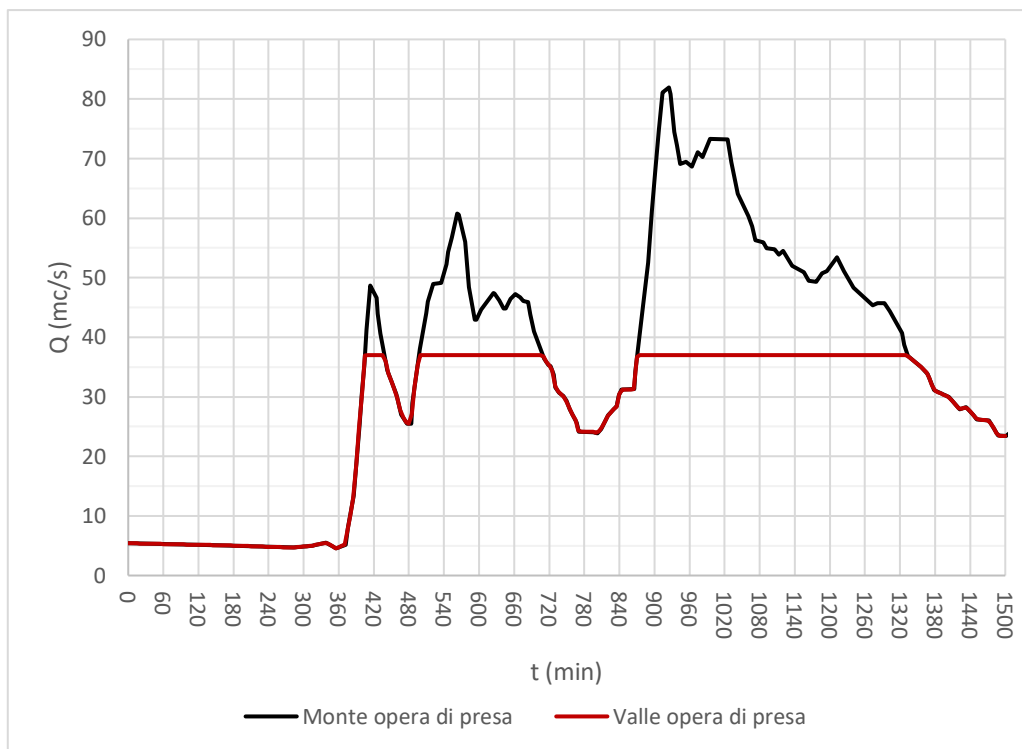


Figura 47. Evento 29 luglio 2014.

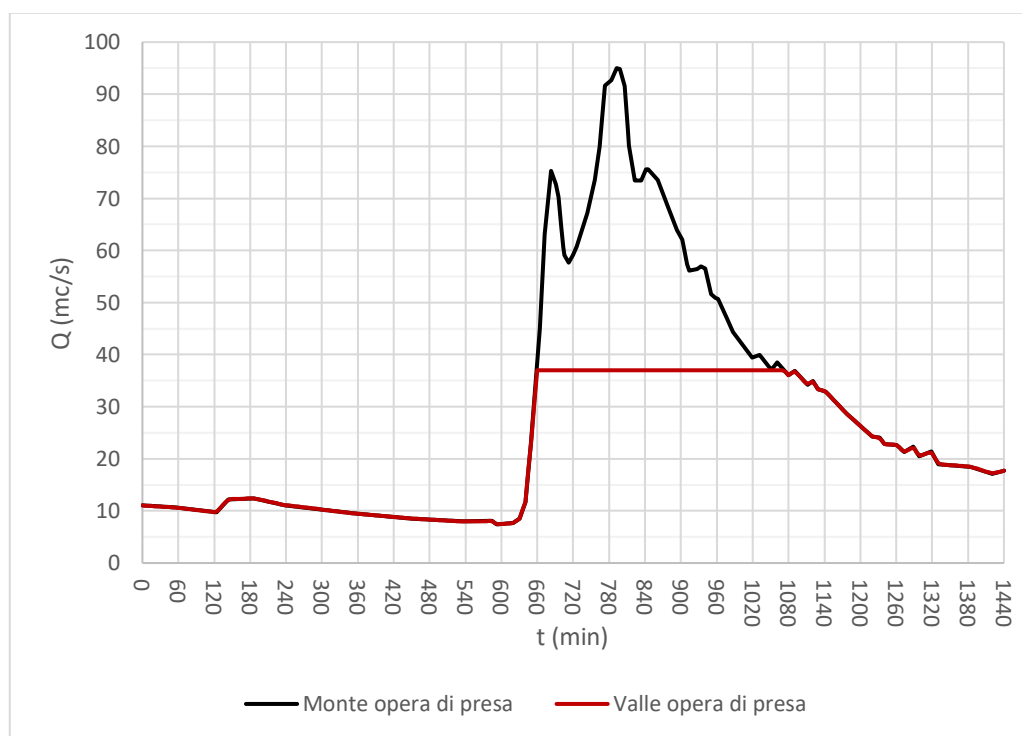


Figura 48. Evento 3 agosto 2014.

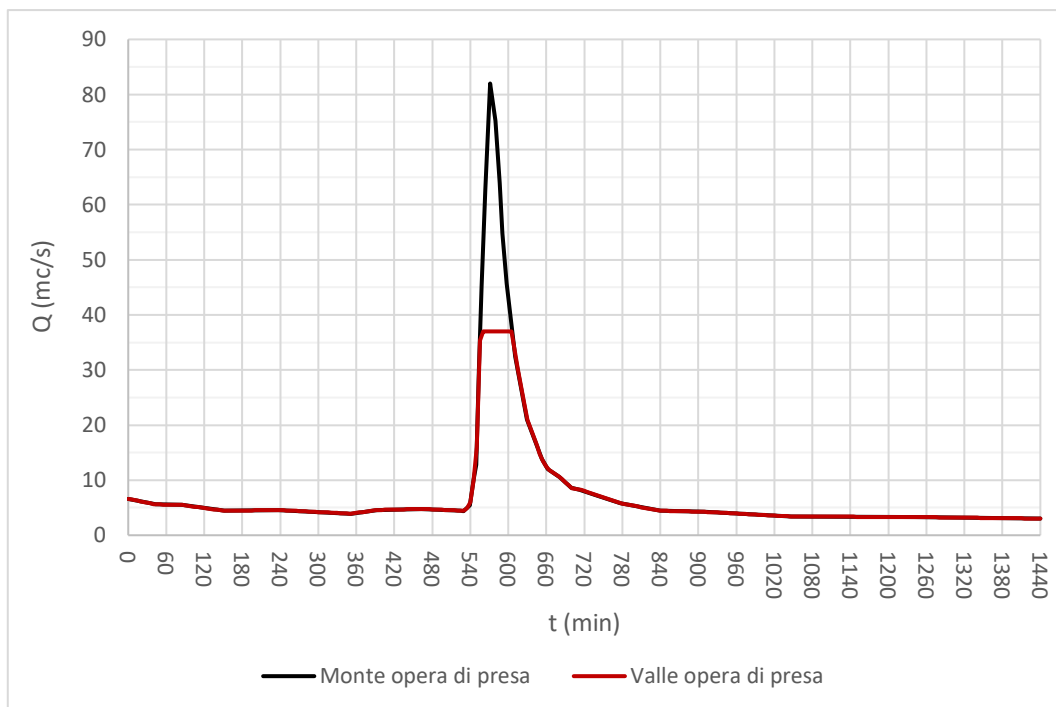


Figura 49. Evento 20 agosto 2014.

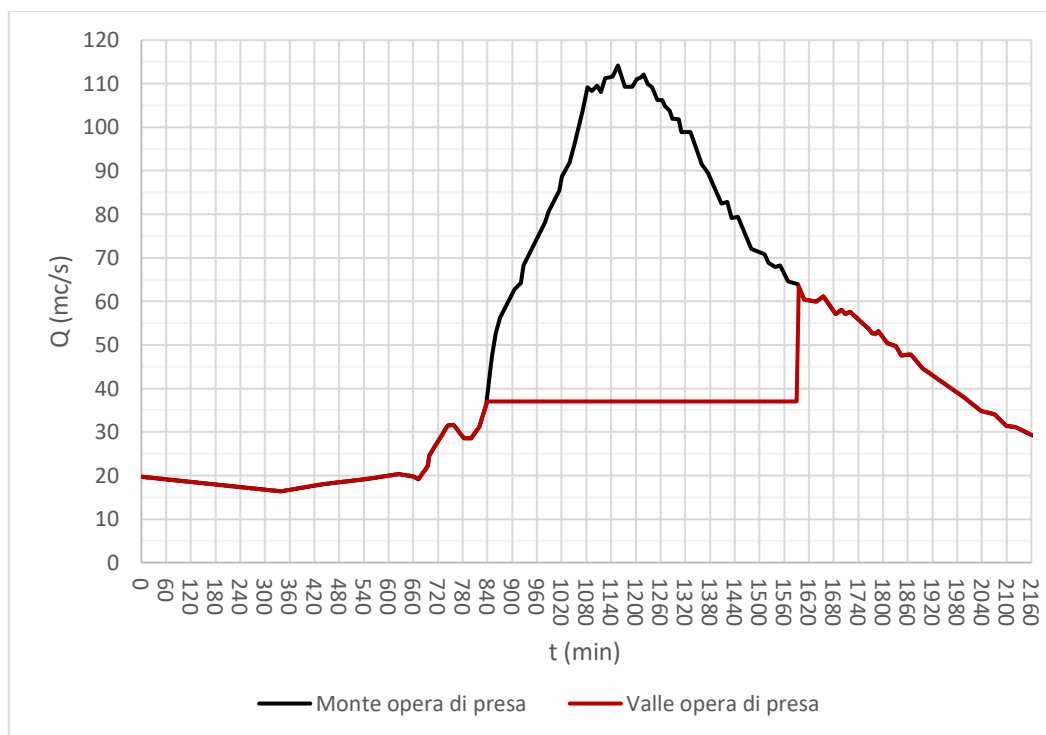


Figura 50. Evento 12-13 novembre 2014.

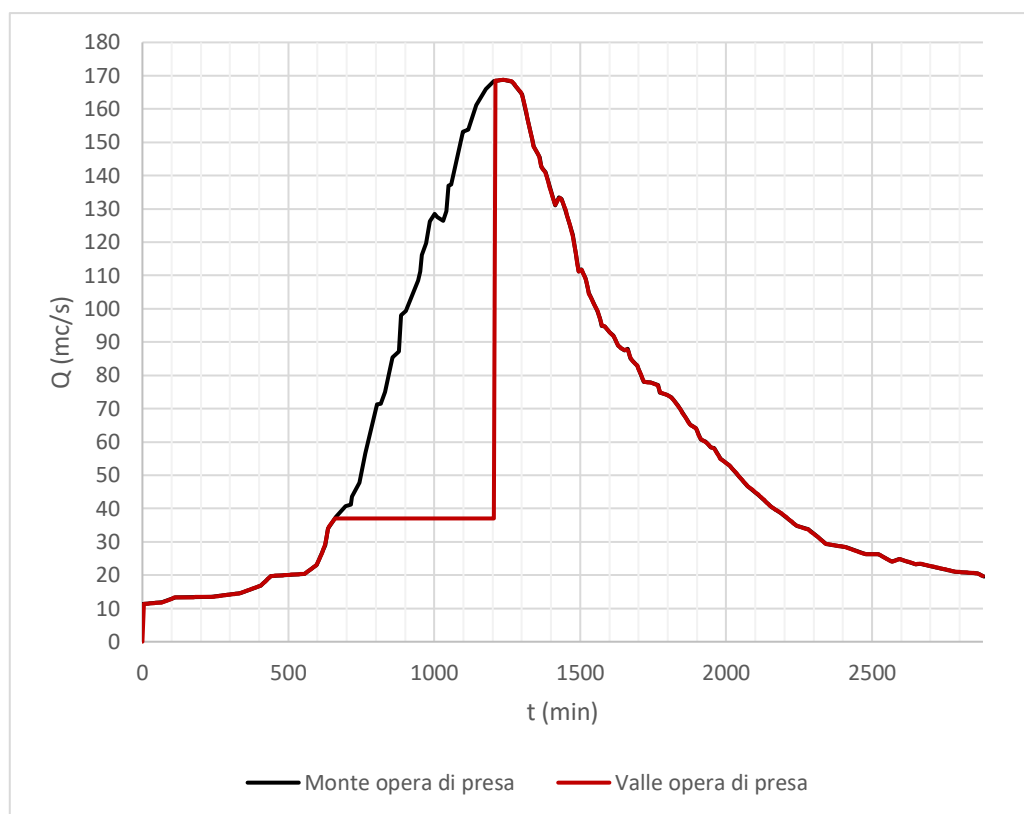


Figura 51. Evento 15 novembre 2014.

La Tabella 12 di seguito riportata riepiloga i risultati ottenuti.

Evento	Volume complessivamente invasato (mc)	Comparto 1		Comparto 2		Comparto 1+2
		Volume (mc)	Quota invaso (m slm)	Volume (mc)	Quota invaso (m slm)	Quota invaso (m slm)
03/05/2010	547,998	173,278	167.00	374,720	163.69	
12/05/2010	1,961,068					173.28
05/08/2010	525,639	173,278	167.00	352,361	163.48	
12/08/2010	813,428	173,278	167.00	640,151	166.07	
18/09/2010	1,337,406					169.65
01/11/2010	2,238,370					174.79
16/11/2010	1,434,266					170.24
27/05/2011	85,153	85,153	163.62			
06/08/2011	663,109	173,278	167.00	489,831	164.75	
12/09/2012	430,220	173,278	167.00	256,943	162.57	
23/10/2013	236,367	173,278	167.00	63,089	160.65	
25/06/2014	128,533	128,533	165.35			
08/07/2014	2,245,000 (3,394,368)					174.83

Evento	Volume complessivamente invasato (mc)	Comparto 1		Comparto 2		Comparto 1+2
		Volume (mc)	Quota invaso (m slm)	Volume (mc)	Quota invaso (m slm)	Quota invaso (m slm)
26/07/2014	318,745	173,278	167.00	145,468	161.48	
29/07/2014	711,496	173,278	167.00	538,219	165.18	
03/08/2014	611,503	173,278	167.00	438,225	164.28	
20/08/2014	69,297	69,297	162.96			
12-13/11/2014	2,245,000 (2,593,155)					174.83
15/11/2014	2,245,000 (5,504,235)					174.83

Tabella 12. Analisi del processo di invaso per eventi reali occorsi nel periodo 2010-2014, nell'ipotesi di bacino di monte nell'assetto attuale (le quote indicate in rosso si riferiscono agli eventi per i quali i volumi di scolmo teorici, indicati tra parentesi, eccedono il limite di resilienza dell'opera, oltrepassato il quale si è ipotizzata l'esclusione della vasca).

Dall'analisi dei dati si osserva che, dei 19 eventi esaminati:

- tre eventi (27/5/2011, 25/6/2014 e 20/8/2014) sarebbero stati completamente contenuti all'interno del primo comparto della vasca, lasciando il secondo comparto completamente vuoto;
- ben nove eventi (3/5/2010, 5/8/2010, 12/8/2010, 6/8/2011, 12/9/2012, 23/10/2013, 26/7/2014, 29/7/2014, 3/8/2014) avrebbero provocato l'allagamento del secondo comparto, senza tuttavia causarne il completo riempimento; le altezze di allagamento all'interno del secondo comparto sarebbero state comprese tra i 0,65 m e i 6,07 m, con una media di 3,53 m;
- tre eventi (12/05/2010, 18/9/2010 e 16/11/2010) sarebbero stati contenuti nella vasca causando tuttavia l'invaso della parte di vasca al di sopra dell'argine di separazione tra i comparti;
- quattro eventi avrebbero ecceduto la capacità di invaso di progetto della vasca (pari a circa 2.100.000 m³); tra questi, l'evento dell'1/11/2010 avrebbe prodotto dei livelli in vasca molto vicini a quelli ottenuti nell'analisi di resilienza dell'opera (174,79 m slm contro 174,83 m slm), mentre per gli eventi del 8/7/2014, 12/11/2014 e 15/11/2014 i volumi di scolmo teoricamente necessari per garantire il rilascio ipotizzato avrebbero ecceduto tale capacità (volume invasabile 2.245.000 m³, massima quota d'invaso 174,83 m slm); di conseguenza, si è ipotizzato che in tali eventi la paratoia di sezionamento dell'invaso fosse chiusa una volta raggiunto il limite di resilienza dell'opera, lasciando defluire verso valle l'intera portata in arrivo da monte; ciò avrebbe determinato un rilascio massimo a valle dell'opera pari a 145 m³/s per l'evento del 8/7/2014 (a fronte di una massima portata da monte di 153 m³/s), 63 m³/s per l'evento del 12/11/2014 (a fronte di una massima portata da monte di 114 m³/s) e 169 m³/s per l'evento del 15/11/2014 (pari alla massima portata in arrivo da monte).

Quest'ultima osservazione conferma ancora una volta come in realtà la funzionalità dell'opera di laminazione in progetto sia fortemente legata alla realizzazione delle opere di laminazione nel bacino a monte della stessa. A ulteriore riprova di ciò sono state svolte ulteriori analisi per verificare la **frequenza di attivazione dell'invaso nell'ipotesi che la vasca** di laminazione di Lentate sul Seveso fosse già stata completata.

Dal progetto definitivo della vasca di Lentate si evince che, nello stato attuale del bacino, l'onda di progetto con TR 100 anni **a monte dell'area di laminazione di Lentate sul Seveso risulta avere un** picco di 78 m³/s (pari al 51% del picco di piena in arrivo alla vasca di Varedo-Paderno Dugnano-Limbiato) ed un volume di circa 3,26 Mm³, pari al 51% del volume in arrivo alla vasca di Varedo-Paderno Dugnano-Limbiato. Ipotizzando che i contributi concorrenti alla formazione degli eventi reali precedentemente analizzati mantengano la stessa distribuzione spaziale **dell'evento di progetto nelle** condizioni di bacino attuali, ovvero 51% in ingresso a monte della vasca di Lentate e 49% in ingresso a valle della vasca stessa, sono stati analizzati due possibili scenari:

1. nel primo scenario si è ipotizzato che la vasca di Lentate lami le onde di piena in modo ottimale con una portata di picco rilasciata a valle di 38,3 m³/s, pari al rilascio per il quale la vasca di Lentate raggiunge il massimo invaso di 808.000 m³ **in occasione dell'evento con TR=100 anni nell'assetto di bacino attuale;**
2. nel secondo scenario si è invece ipotizzato che la vasca di Lentate lami le onde di piena in modo ottimale con una portata di picco rilasciata a valle di 20 m³/s, pari al rilascio massimo **previsto per l'evento con TR=100 anni nell'assetto di bacino di progetto.**

In entrambi gli scenari si è assunto che la capacità di laminazione della vasca di Lentate si esaurisca una volta raggiunto il massimo invaso, pari a 808.000 m³. I risultati delle analisi sono riportati in Tabella 13 e Tabella 14.

Evento	Volume invasato a Lentate (mc)	Vasca di Varedo, Paderno Dugnano e Limbiato					
		Volume complessivamente invasato (mc)	Comparto 1		Comparto 2		Comparto 1+2
			Volume (mc)	Quota invaso (m slm)	Volume (mc)	Quota invaso (m slm)	Quota invaso
03/05/2010	10,314	537,684	173,278	167.00	364,406	163.59	
12/05/2010	36,764	1,924,304					173.07
05/08/2010	53,753	471,886	173,278	167.00	298,608	162.97	
12/08/2010	40,607	772,821	173,278	167.00	599,543	165.72	
18/09/2010	222,609	1,114,798					168.26
01/11/2010	114,136	2,124,235					174.18
16/11/2010	53,389	1,380,877					169.92
27/05/2011	0	85,153	85,153	163.62			
06/08/2011	124,962	538,147	173,278	167.00	364,869	163.60	
12/09/2012	69,318	360,903	173,278	167.00	187,625	161.90	

Evento	Volume invasato a Lentate (mc)	Vasca di Varedo, Paderno Dugnano e Limbiate					
		Volume complessivamente invasato (mc)	Comparto 1		Comparto 2		Comparto 1+2
			Volume (mc)	Quota invaso (m slm)	Volume (mc)	Quota invaso (m slm)	Quota invaso
23/10/2013	0	236,367	173,278	167.00	63,089	160.65	
25/06/2014	0	128,533	128,533	165.35			
08/07/2014	808,000	2,245,000 (2,586,368)					174.83
26/07/2014	0	318,745	173,278	167.00	145,468	161.48	
29/07/2014	3,779	707,718	173,278	167.00	534,440	165.15	
03/08/2014	24,733	586,770	173,278	167.00	413,492	164.05	
20/08/2014	1,085	68,212	68,212	162.91			
12/11/2014	344,829	2,245,000 (2,248,326)					174.83
15/11/2014	808,000	2,245,000 (4,696,235)					174.83

Tabella 13. Analisi del processo di invaso della vasca di Varedo, Paderno Dugnano e Limbiate per eventi reali occorsi nel periodo 2010-2014, nello scenario in cui la vasca a monte di Lentate sul Seveso sia in funzione e lamini le onde di piena ad una portata massima di 38,3 m³/s (le quote indicate in rosso si riferiscono agli eventi per i quali i volumi di scolmo teorici, indicati tra parentesi, eccedono il limite di resilienza dell'opera, oltrepassato il quale si è ipotizzata l'esclusione della vasca).

Evento	Volume invasato a Lentate (mc)	Vasca di Varedo, Paderno Dugnano e Limbiate					
		Volume complessivamente invasato (mc)	Comparto 1		Comparto 2		Comparto 1+2
			Volume (mc)	Quota invaso (m slm)	Volume (mc)	Quota invaso (m slm)	Quota invaso
03/05/2010	250,363	297,635	173,278	167.00	124,357	161.27	
12/05/2010	808,000	1,153,068					168.51
05/08/2010	247,157	278,481	173,278	167.00	105,204	161.08	
12/08/2010	379,018	434,410	173,278	167.00	261,132	162.61	
18/09/2010	648,195	689,211	173,278	167.00	515,934	164.98	
01/11/2010	808,000	1,430,370					170.21
16/11/2010	661,183	773,083	173,278	167.00	599,806	165.72	
27/05/2011	35,841	49,311	49,311	162.09			
06/08/2011	323,480	339,629	173,278	167.00	166,351	161.69	
12/09/2012	206,569	223,651	173,278	167.00	50,373	160.52	
23/10/2013	107,577	128,790	128,790	165.36			
25/06/2014	49,979	78,553	78,553	163.35			
08/07/2014	808,000	2.245.000 (2,586,368)					174.83
26/07/2014	123,744	195,002	173,278	167.00	21,724	160.23	
29/07/2014	315,955	395,541	173,278	167.00	222,263	162.23	
03/08/2014	285,201	326,302	173,278	167.00	153,024	161.55	

Evento	Volume invasato a Lentate (mc)	Vasca di Varedo, Paderno Dugnano e Limbiate					
		Volume complessivamente invasato (mc)	Comparto 1		Comparto 2		Comparto 1+2
			Volume (mc)	Quota invaso (m slm)	Volume (mc)	Quota invaso (m slm)	Quota invaso
20/08/2014	32,088	37,209	37,209	161.56			
12/11/2014	808,000	1,785,155					172.29
15/11/2014	808,000	2.245.000 (4,696,235)					174.83

Tabella 14. Analisi del processo di invaso della vasca di Varedo, Paderno Dugnano e Limbiate per eventi reali occorsi nel periodo 2010-2014, nello scenario in cui la vasca a monte di Lentate sul Seveso sia in funzione e lamini le onde di piena ad una portata massima di 20 m³/s (le quote indicate in rosso si riferiscono agli eventi per i quali i volumi di scollo teorici, indicati tra parentesi, eccedono il limite di resilienza dell'opera, oltrepassato il quale si è ipotizzata l'esclusione della vasca).

Dall'analisi dei dati si osserva che:

- nel primo scenario di regolazione della vasca di Lentate (rilascio massimo a valle della vasca pari a 38,3 m³/s) si osserva che **l'invaso a monte della vasca in progetto è sottoutilizzato** nella maggior parte degli eventi reali osservati: generalmente, i volumi invasati a Lentate ammontano infatti a qualche decina di migliaia di metri cubi, quando non sono addirittura nulli; **un riempimento significativo dell'invaso di Lentate si ha solo per gli eventi del 18/09/2010 (222.000 m³ invasati) e del 12/11/2014 (345.000 m³ invasati)**, nonché per quelli del 8/7/2014 e del 15/11/2014, che determinano il completo riempimento della vasca; in conseguenza di ciò, i benefici in corrispondenza della vasca di laminazione di Varedo, Paderno Dugnano e Limbiate risultano praticamente trascurabili;
- nel secondo scenario di regolazione della vasca di Lentate (rilascio massimo a valle della vasca pari a 20 m³/s) si osserva che la ripartizione dei volumi di laminazione tra le due vasche risulta maggiormente bilanciata; ne consegue che, dei 19 eventi esaminati:
 - quattro eventi (27/5/2011, 23/10/2013, 25/6/2014 e 20/8/2014) sarebbero stati **completamente contenuti all'interno del primo comparto della vasca, lasciando il secondo comparto completamente vuoto**;
 - ben dieci eventi (3/5/2010, 5/8/2010, 12/8/2010, 18/9/2010, 16/11/2010, 6/8/2011, 12/9/2012, 26/7/2014, 29/7/2014, 3/8/2014) **avrebbero provocato l'allagamento del secondo comparto**, senza tuttavia causarne il completo riempimento; le altezze di **allagamento all'interno** del secondo comparto sarebbero state comprese tra i 0,23 m e i 5,72 m, con una media di 2,19 m;
 - tre eventi (12/05/2010, 1/11/2010 e 12/11/2014) sarebbero stati contenuti nella **vasca causando tuttavia l'invaso della parte al di sopra dell'argine di separazione** tra i comparti;
 - solo due eventi (8/7/2014 e 15/11/2014) avrebbero ecceduto la capacità di resilienza dell'opera, determinando un rilascio massimo a valle dell'opera pari a 70 m³/s per l'evento del 8/7/2014 (a fronte di una massima portata da monte di 153 m³/s) e 159

m³/s per l'evento del 15/11/2014 (a fronte di una massima portata da monte di 169 m³/s);

- sebbene la presenza della vasca di Lentate a monte non abbia di fatto influenza sulla frequenza di allagamento della vasca di Varedo-Paderno Dugnano-Limbiato, almeno per la serie di eventi analizzati, essa consente tuttavia di ridurre significativamente (in media di oltre il 40%) i volumi invasati nella vasca in progetto e di conseguenza la durata complessiva di allagamento della vasca.

5.2 Analisi eventi sintetici

Come anticipato all'inizio del presente capitolo, le analisi sulla frequenza e le modalità dei processi di invaso della vasca sopra descritte sono state svolte anche su alcuni eventi di riferimento sintetici con tempi di ritorno inferiori a 100 anni.

In particolare si è fatto riferimento agli idrogrammi di piena con tempo di ritorno di 2, 5 e 10 anni in **corrispondenza della sezione SV24 dell'Autorità di Bacino (a monte della presa del CSNO) dedotti dal progetto definitivo della vasca di Lentate sul Seveso** (vedi anche Figura 2, Figura 3 e Figura 4), la cui analisi idrologica ed idraulica riprende e sviluppa lo Studio AIPO 2011.

5.2.1 Analisi evento per T=2 anni

Nella Figura 52 è riportato l'idrogramma di piena del T. Seveso per T=2 anni, nello stato attuale, a monte della presa dell'invaso di laminazione in scavo.

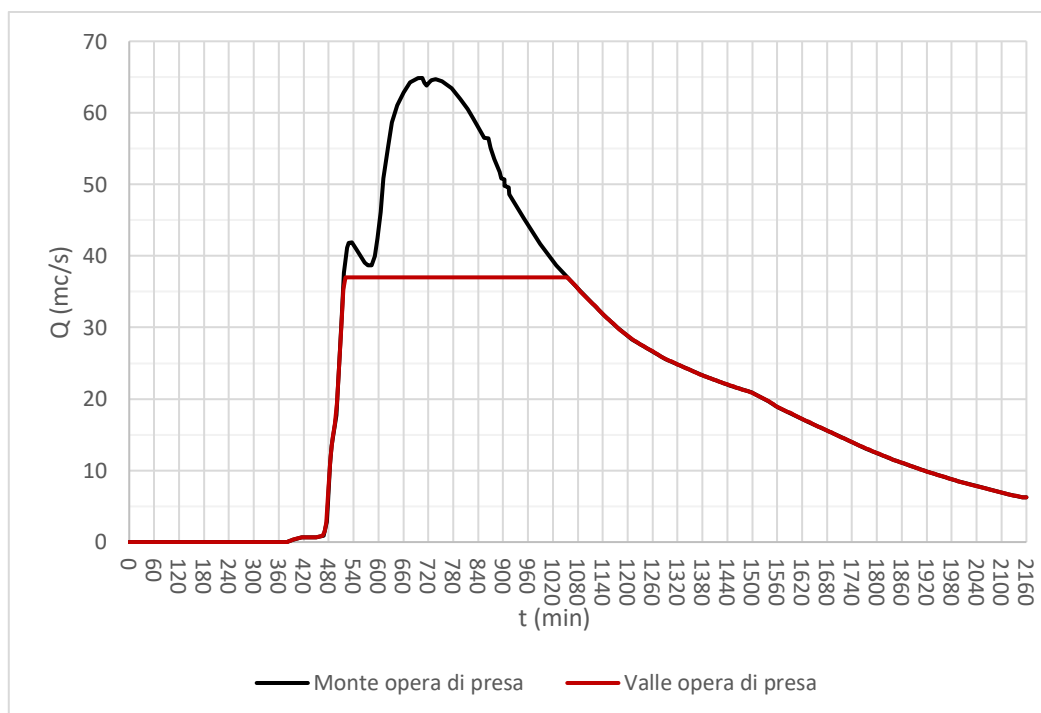


Figura 52. Evento con TR 2 anni nell'assetto di bacino attuale.

Nell'ipotesi che la paratoia in alveo sia regolata in modo da garantire un rilascio massimo verso valle di $37 \text{ m}^3/\text{s}$, la porzione di idrogramma che viene laminata in tale evento è pari a circa 486.000 m^3 , valore per cui si avrebbe il completo riempimento del primo comparto della vasca ed un allagamento del secondo comparto fino a quota $163,11 \text{ m slm}$.

Assumendo invece che la vasca di laminazione di Lentate sul Seveso sia funzionante, e ritenendo in tal caso valide tutte le ipotesi formulate nella precedente analisi degli eventi reali, si ottiene che:

- nel primo scenario (rilascio massimo a valle di Lentate pari a $38,3 \text{ m}^3/\text{s}$) la vasca di Lentate non viene attivata; le modalità di invaso della vasca di Varedo, Paderno Dugnano e Limbiate **sono quindi le stesse che si avrebbero nell'assetto di bacino attuale;**
- nel secondo scenario (rilascio massimo a valle di Lentate pari a $20 \text{ m}^3/\text{s}$) la vasca di Lentate invasa circa 213.000 m^3 (vedi Figura 53); di conseguenza la porzione di idrogramma che viene laminata a Varedo-Paderno Dugnano è pari a circa 273.000 m^3 , valore per cui si avrebbe il completo riempimento del primo comparto della vasca ed un allagamento del secondo comparto fino a quota $161,03 \text{ m slm}$.

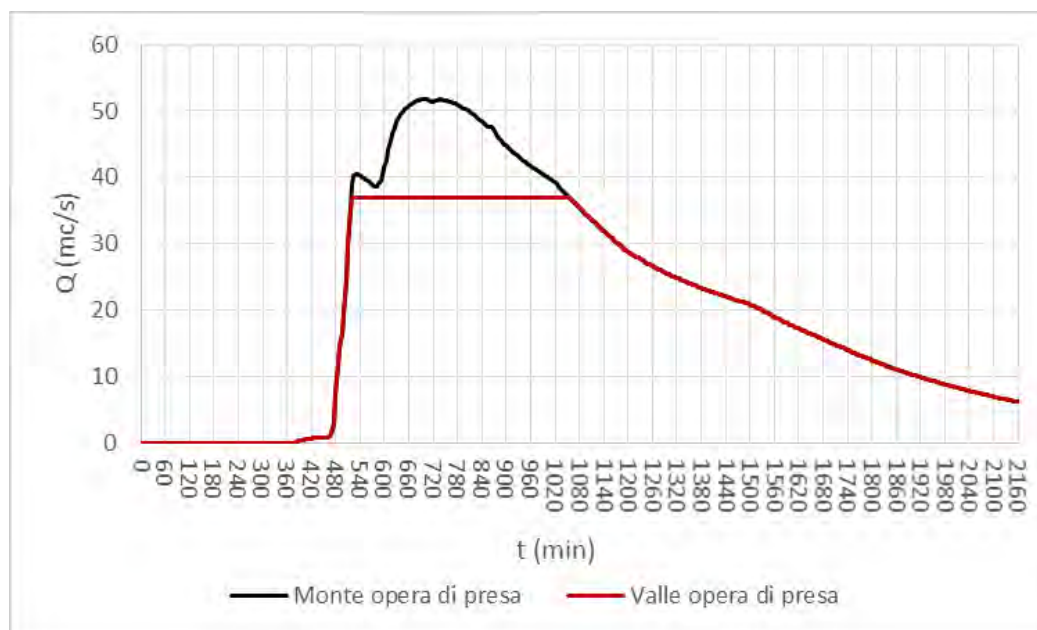


Figura 53. *Evento con TR 2 anni nell'assetto di bacino di progetto – rilascio massimo a valle della vasca di Lentate $20 \text{ m}^3/\text{s}$.*

5.2.2 Analisi evento per $T=5$ anni

Nella Figura 54 è riportato l'idrogramma di piena del T. Seveso per $T=5$ anni, nello stato attuale, a monte della presa dell'invaso di laminazione in scavo.

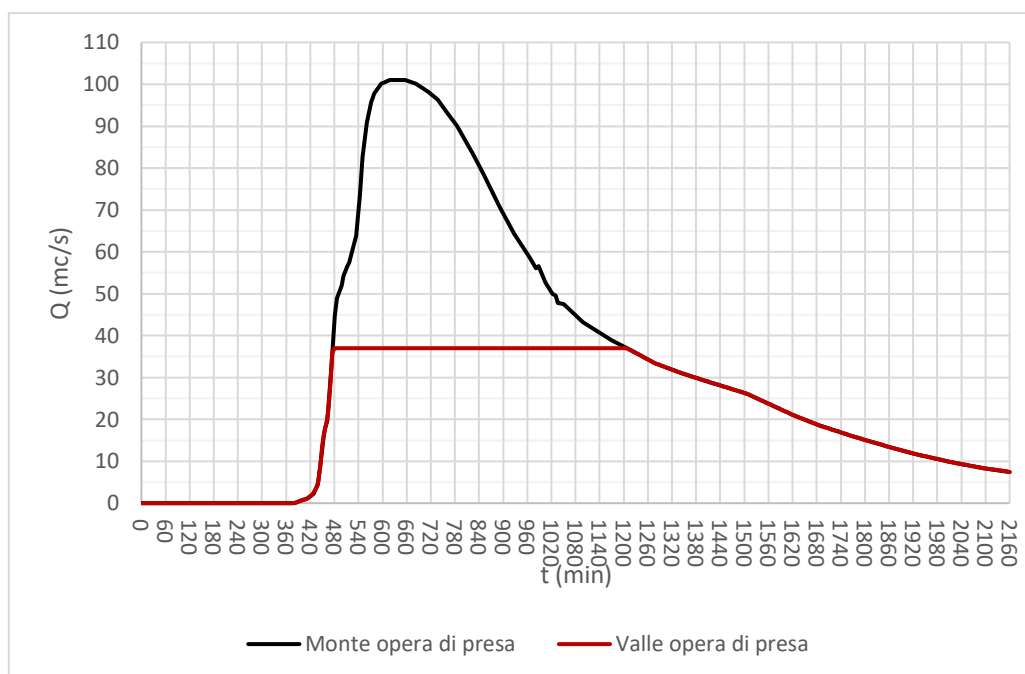


Figura 54. Evento con TR 5 anni nell'assetto di bacino attuale.

Nell'ipotesi che la paratoia in alveo sia regolata in modo da garantire un rilascio massimo verso valle di $37 \text{ m}^3/\text{s}$, la porzione di idrogramma che viene laminata in tale evento è pari a circa $1.468.000 \text{ m}^3$, valore cui corrisponde un livello in vasca pari a $170,44 \text{ m slm}$.

Assumendo invece che la vasca di laminazione di Lentate sul Seveso sia funzionante, e ritenendo in tal caso valide tutte le ipotesi formulate nella precedente analisi degli eventi reali, si ottiene che:

- nel primo scenario (rilascio massimo a valle di Lentate pari a $38,3 \text{ m}^3/\text{s}$) la vasca di Lentate invasa circa 181.000 m^3 (vedi Figura 55); di conseguenza la porzione di idrogramma che viene laminata a Varedo-Paderno Dugnano è pari a circa $1.287.000 \text{ m}^3$, valore cui corrisponde un livello in vasca pari a $169,34 \text{ m slm}$;
- nel secondo scenario (rilascio massimo a valle di Lentate pari a $20 \text{ m}^3/\text{s}$) la vasca di Lentate invasa circa 701.000 m^3 (vedi Figura 56); di conseguenza la porzione di idrogramma che viene laminata a Varedo-Paderno Dugnano è pari a circa 767.000 m^3 , valore per cui si avrebbe il completo riempimento del primo comparto della vasca ed un allagamento del secondo comparto fino a quota $165,67 \text{ m slm}$.

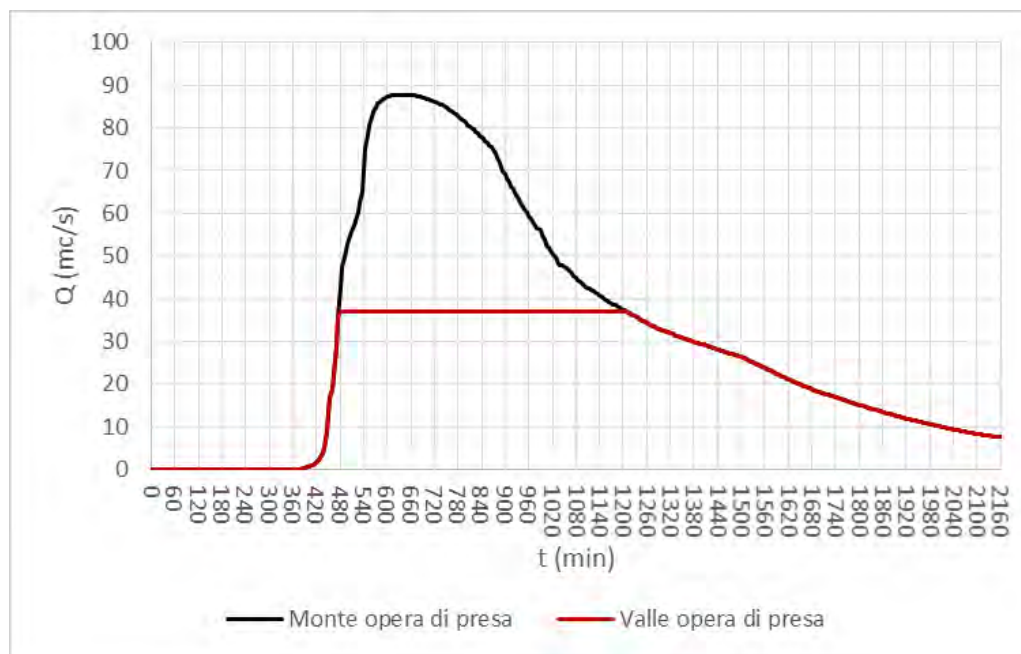


Figura 55. **Evento con TR 5 anni nell'assetto di bacino di progetto** – rilascio massimo a valle della vasca di Lentate 38,3 m³/s.

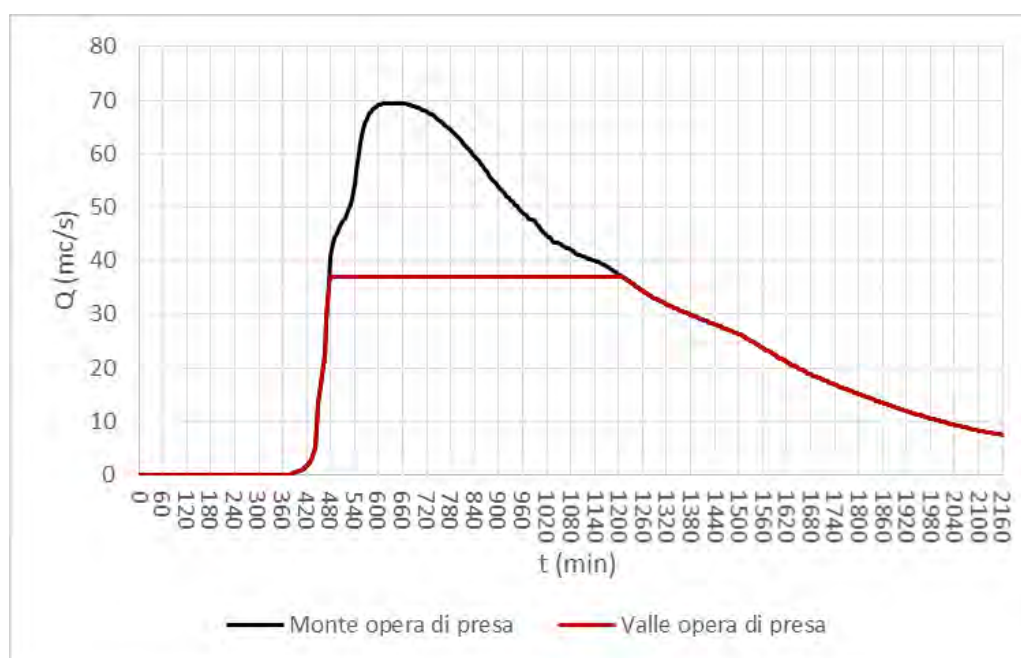


Figura 56. **Evento con TR 5 anni nell'assetto di bacino di progetto** – rilascio massimo a valle della vasca di Lentate 20 m³/s.

5.2.3 Analisi evento per T=10 anni

Nella Figura 57 è riportato l'idrogramma di piena del T. Seveso per T=10 anni, nello stato attuale, a monte della presa dell'invaso di laminazione in scavo.

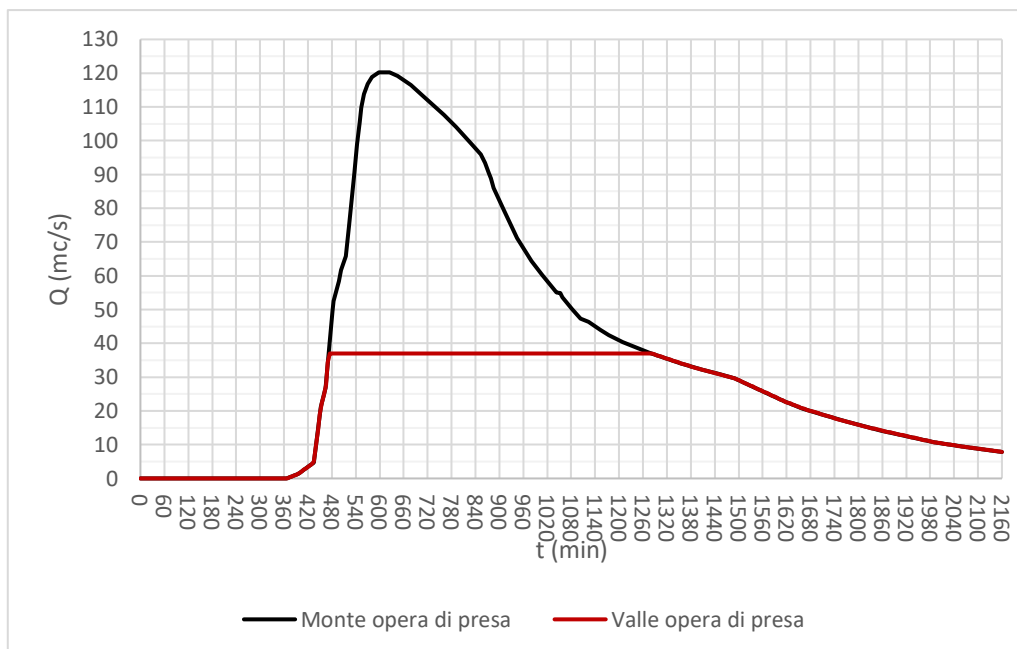


Figura 57. Evento con TR 10 anni nell'assetto di bacino attuale.

Nell'ipotesi che la paratoia in alveo sia regolata in modo da garantire un rilascio massimo verso valle di $37 \text{ m}^3/\text{s}$, la porzione di idrogramma che viene laminata in tale evento è pari a circa $2.014.000 \text{ m}^3$, valore cui corrisponde un livello in vasca pari a $173,57 \text{ m slm}$.

Assumendo invece che la vasca di laminazione di Lentate sul Seveso sia funzionante, e ritenendo in tal caso valide tutte le ipotesi formulate nella precedente analisi degli eventi reali, si ottiene che:

- nel primo scenario (rilascio massimo a valle di Lentate pari a $38,3 \text{ m}^3/\text{s}$) la vasca di Lentate invasa circa 374.000 m^3 (vedi Figura 58); di conseguenza la porzione di idrogramma che viene laminata a Varedo-Paderno Dugnano è pari a circa $1.639.000 \text{ m}^3$, valore cui corrisponde un livello in vasca pari a $171,45 \text{ m slm}$;
- nel secondo scenario (rilascio massimo a valle di Lentate pari a $20 \text{ m}^3/\text{s}$) la vasca di Lentate raggiunge il massimo invaso, pari a circa 808.000 m^3 (vedi Figura 59); di conseguenza la porzione di idrogramma che viene laminata a Varedo-Paderno Dugnano è pari a circa $1.206.000 \text{ m}^3$, valore cui corrisponde un livello in vasca pari a $168,84 \text{ m slm}$.

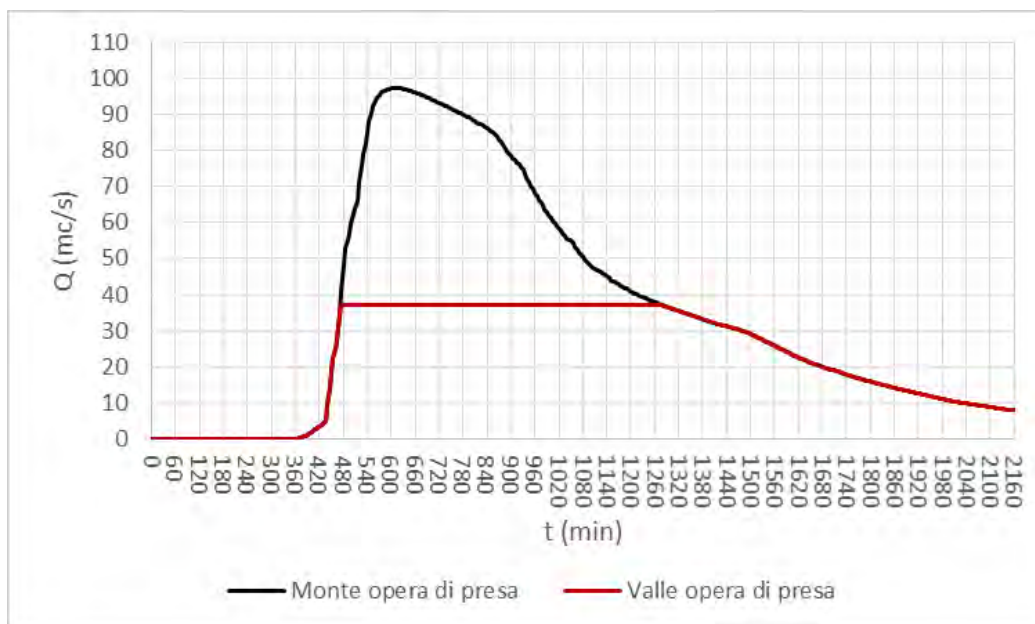


Figura 58. Evento con TR 10 anni nell'assetto di bacino di progetto – rilascio massimo a valle della vasca di Lentate 38,3 m^3/s .

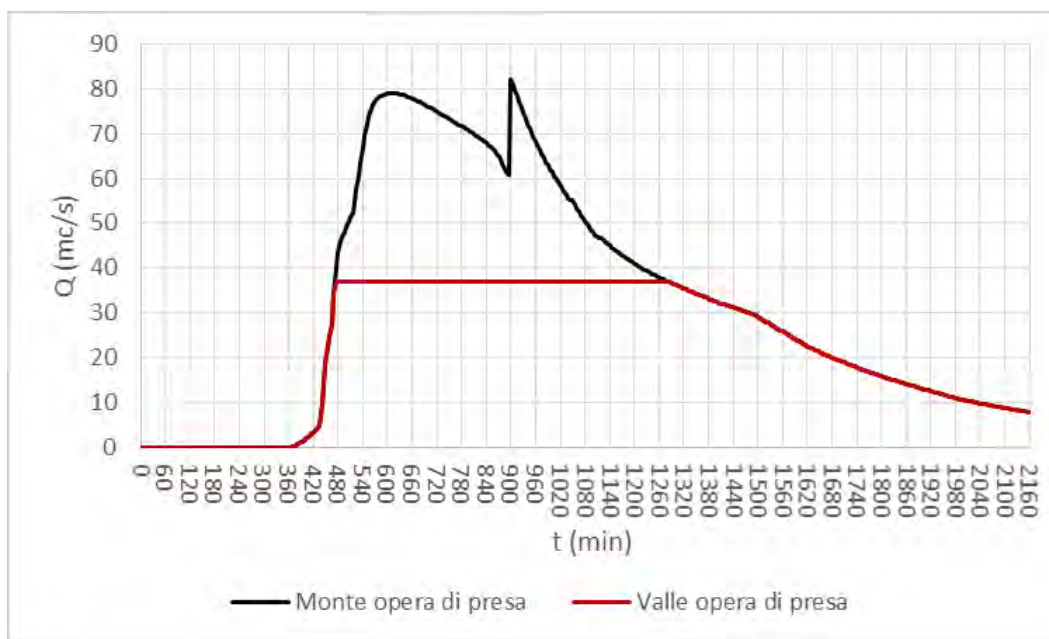


Figura 59. Evento con TR 10 anni nell'assetto di bacino di progetto – rilascio massimo a valle della vasca di Lentate 20 m^3/s .

6 Processo di svuotamento dell'invaso

Come già detto al paragrafo 3.6, a causa della configurazione del piano campagna e delle quote **relative all'alveo del torrente Seveso**, la vasca di laminazione è realizzata per la quasi totalità in scavo, con fondo a quote fino a circa 16 m inferiori rispetto al piano campagna e 12 m inferiori rispetto a quelle **dell'alveo del Seveso**.

Per tale motivo, al termine degli eventi di piena i volumi invasati saranno scaricati nel Seveso con le seguenti modalità:

1. Svuotamento a gravità: sarà effettuato per la porzione di vasca compresa tra la quota di massimo invaso di progetto, pari a 174.08 m slm, fino alla quota di attivazione delle pompe di sollevamento, che in base alle curve caratteristiche (vedi Figura 28) è stata posta pari a 171,87 m slm; il volume invasato tra tali due quote è pari a circa 395.000 m³, che corrisponde al 19% circa del volume di invaso disponibile
2. Svuotamento per sollevamento meccanico: **quando il livello idrico all'interno dell'invaso** sarà prossimo a 171,87 m slm, la differenza di carico tra vasca e torrente Seveso, e di conseguenza la portata scaricata a gravità, tenderà a ridursi sino ad annullarsi; di conseguenza, per **lo svuotamento dell'invaso** saranno azionate le pompe poste sul fondo della stazione di **sollevamento**; **l'uso delle** elettropompe sommerse consentirà di svuotare la restante porzione di vasca posta tra la quota 171,87 m slm e la quota di fondo, pari a 159,00 m slm. Il volume che dovrà essere scaricato per sollevamento sarà pari a circa 1.709.000 m³ (circa 81% dell'invaso totale).

Le caratteristiche dell'impianto di sollevamento sono già state descritte nel precedente paragrafo 3.6. Nel presente capitolo si riportano le elaborazioni svolte per il calcolo dei tempi di svuotamento della vasca.

6.1 Svuotamento a gravità

Il calcolo del tempo necessario per completare lo svuotamento a gravità della parte superiore dell'invaso è stato effettuato sotto le seguenti ipotesi:

- il rilascio delle portate di svuotamento della vasca avverrà con flusso inverso rispetto a quello di riempimento, e sarà controllato dalla paratoia di regolazione in alveo, che limiterà la portata a valle della vasca (pari alla somma delle portate di svuotamento e delle portate in arrivo da monte) ad un massimo di 37 m³/s;
- durante lo svuotamento a gravità della vasca, le portate in arrivo da monte sono costanti e pari a 10 m³/s;
- la scala di deflusso del Seveso in corrispondenza del punto di restituzione delle portate è pari alla scala di deflusso a valle della paratoia di regolazione, dedotta dalle simulazioni bidimensionali svolte (vedi Figura 60);

- le portate di svuotamento della vasca sono date dalla somma delle portate stramazzanti **sopra lo sfioro di presa dell'invaso, calcolate con la classica formula $Q = \mu L h \sqrt{2gh}$** (dove Q è la portata, μ il coefficiente di efflusso pari a 0,405, L la larghezza della soglia pari a 35,6 m, h è il carico idraulico sopra la soglia), e delle portate uscenti dalle quattro bocche di scarico 0,8x1,2 m, calcolate con la formula **$Q = \mu A \sqrt{2g\Delta h}$** (dove Q è la portata, μ il coefficiente di efflusso pari a 0,60, **A l'area complessiva delle bocche pari a 4x0,8x1,2 m**, Δh è la differenza di carico tra monte e valle); nel caso la somma delle portate rilasciate a valle della paratoia (comprese quelle in arrivo da monte) ecceda i 37 m³/s, si assume che la paratoia intervenga per limitare i rilasci; di conseguenza, considerate le ipotesi precedenti, la portata di svuotamento non potrà mai eccedere i 27 m³/s.

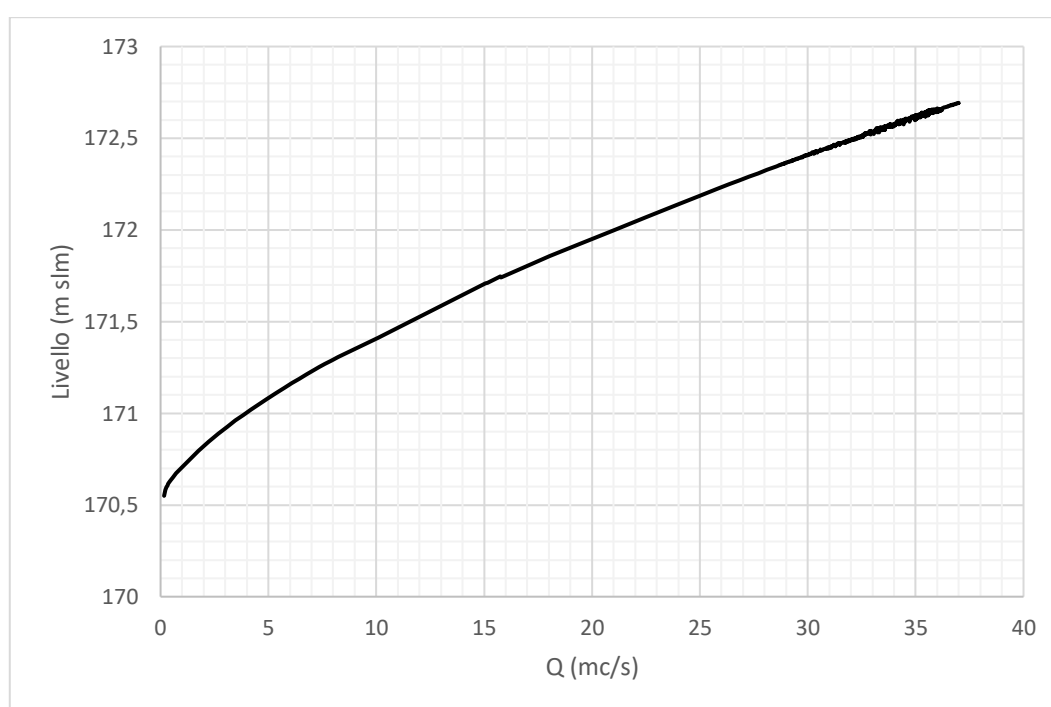


Figura 60. Scala di deflusso a valle della paratoia di regolazione da modello bidimensionale.

I risultati dei calcoli, riportati in Figura 61, mostrano che lo svuotamento a gravità della vasca ha una durata complessiva di poco superiore alle 9 ore (a fronte di una durata di 18 h prevista nel progetto preliminare); la portata media di svuotamento risulta quindi essere pari a circa 12 m³/s.

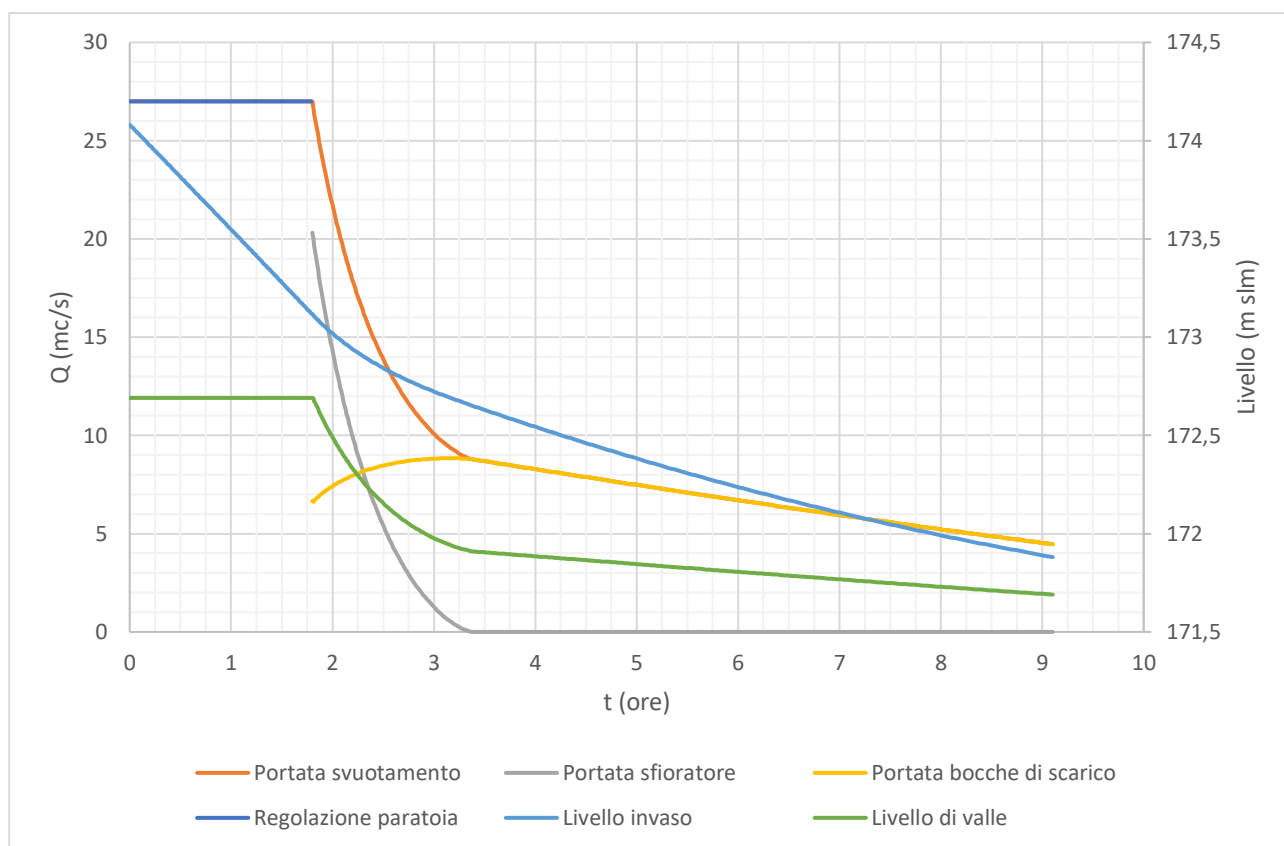


Figura 61. Andamento delle portate di svuotamento e dei livelli idrici durante la fase di svuotamento a gravità della vasca.

6.2 Sollevamento meccanico

Terminata la fase di svuotamento a gravità **dell'invaso, prima di azionare le pompe** di svuotamento **dell'invaso**, occorrerà chiudere sia la paratoia di sezionamento della vasca, sia le due paratoie motorizzate (dim. 1,50 x 3,00 m, fondo a quota 169,50 m slm) di restituzione delle portate invase. Queste ultime, una volta avviate le pompe, saranno messe in regolazione per mantenere un carico costante in corrispondenza degli sbocchi delle mandate. In questo modo sarà possibile garantire variazioni di prevalenza delle pompe molto graduali, in quanto la prevalenza varierà solo in funzione dei livelli in vasca, ed assicurare a monte delle paratoie il carico necessario per garantire lo scarico delle portate nel torrente minimizzando gli effetti di rigurgito.

Il calcolo del tempo necessario per completare lo svuotamento meccanico dell'invaso è stato effettuato sotto le seguenti ipotesi:

- l'**apertura delle paratoie** di scarico sarà regolata in modo da mantenere a monte di esse un livello costante, pari a 172,60 m slm **per livelli nell'invaso superiori a quota** 164,10 m slm, e a 171,80 m slm **per livelli nell'invaso inferiori a quota** 164,10 m slm;
- le quote di attacco e di stacco della coppia di pompe da 2400 l/s utilizzate per svuotare la parte alta di invasore saranno rispettivamente pari a 171,87 m slm e a 163,50 m slm; la

relazione tra portate sollevate e prevalenza delle pompe è stata dedotta dalla curva in Figura 28;

- la quota di attacco della coppia di pompe da 1800 l/s utilizzata per svuotare la parte inferiore di invaso sarà pari a 168,50 m slm; la relazione tra portate sollevate e prevalenza delle pompe è stata dedotta dalla curva in Figura 29;
- la prevalenza delle pompe è stata calcolata sommando al dislivello geodetico (dato dalla differenza tra livello in vasca e livello di regolazione delle paratoie) le perdite di carico distribuite nelle mandate (calcolate assumendo un k_s di Strickler pari a $110 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$), le perdite di imbocco (pari a $0,5 V^2/2g$), le perdite di sbocco (pari a $V^2/2g$) e le perdite di carico nel clapet (assunte pari a 0,20 m per $V \leq 2 \text{ m/s}$ e a $0,41 V^2/2g$ per $V > 2 \text{ m/s}$).

I risultati dei calcoli, riportati in Figura 62 e in Figura 63, mostrano che lo svuotamento meccanico della vasca ha una durata complessiva di poco superiore alle 75 ore (in linea con le 74 ore previste nel progetto preliminare), con una portata media di svuotamento pari a circa $6,3 \text{ m}^3/\text{s}$.

Di conseguenza, il tempo complessivo **per svuotare l'invaso** risulta pari a circa 84 ore, di cui 9 ore a gravità e 75 ore per sollevamento meccanico; complessivamente la portata media di svuotamento del sistema è pari a $7 \text{ m}^3/\text{s}$.

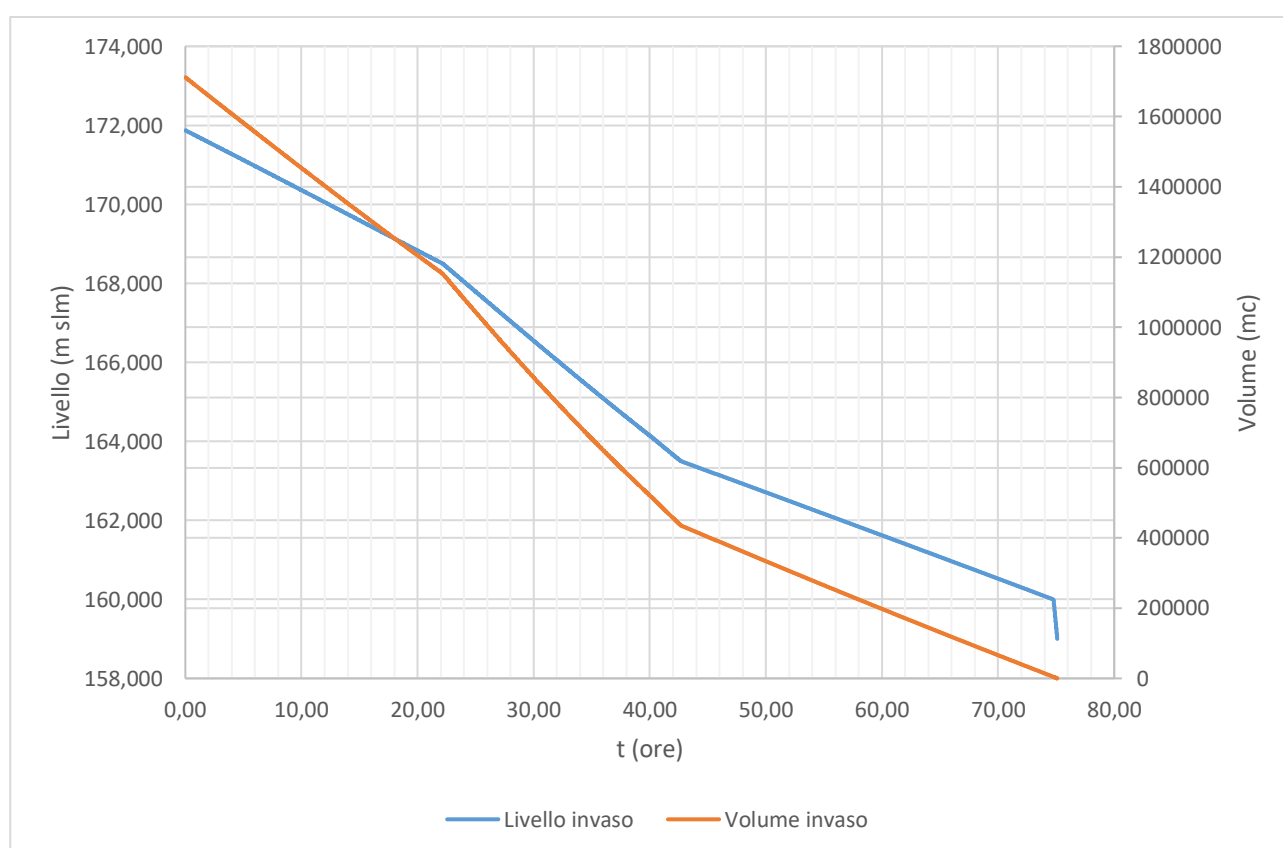


Figura 62. Andamento dei volumi e dei livelli di invaso durante la fase di svuotamento meccanico della vasca.

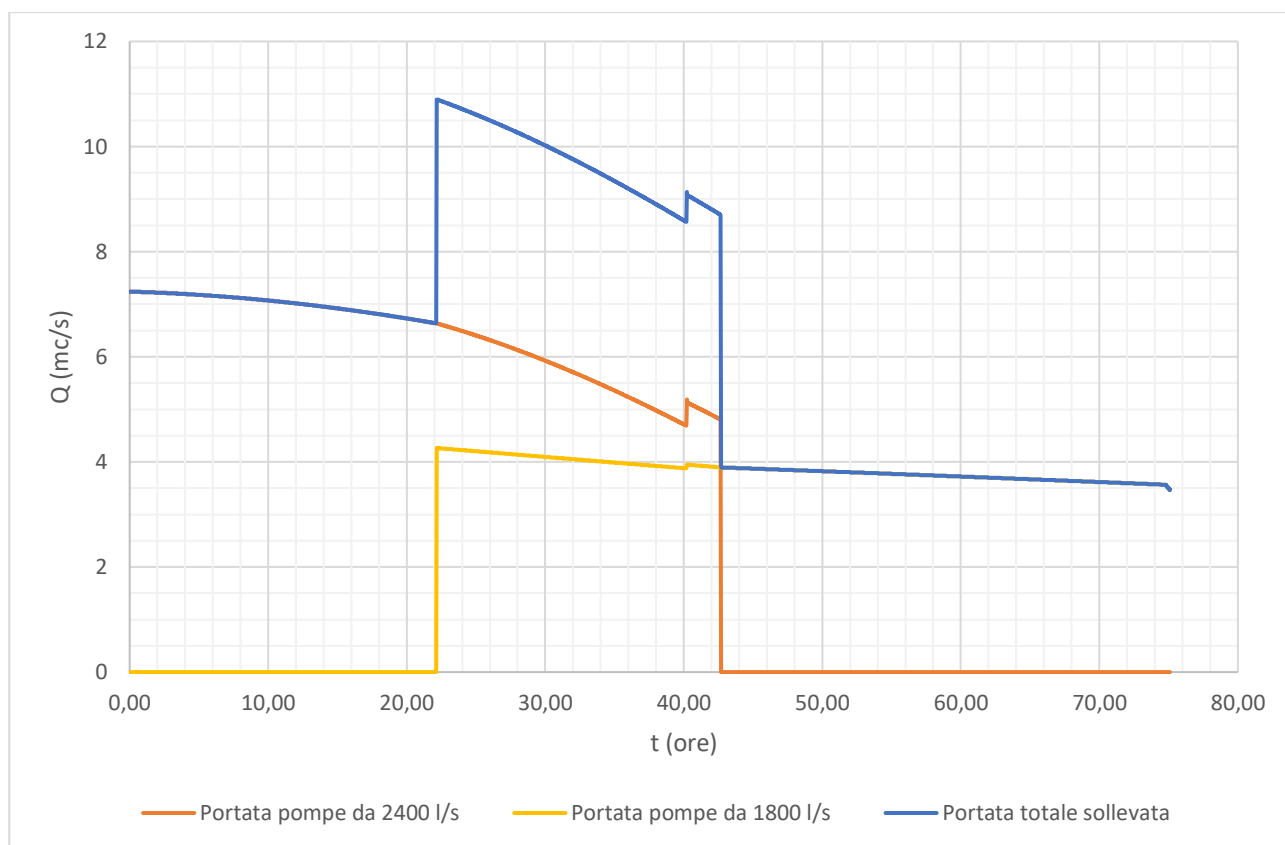


Figura 63. Andamento delle portate sollevate meccanicamente durante la fase di svuotamento dell'invaso.

Per lo svuotamento del 75% dell'invaso, pari a 1.580.000 m³ (invaso residuo pari a circa 527.000 m³), occorrono poco più di 2 giorni (49 ore circa), valore inferiore ai 3 giorni richiesti dal RID.

Milano, giugno 2017

Responsabile Progettazione Generale
Dott. Ing. Fulvio Bernabei