



COMUNE DI  
ANNONE DI BRIANZA



Regione  
Lombardia



COMUNE DI  
SIRONE



COMUNE DI  
OGGIONO

# AREA DI LAMINAZIONE DELLE PIENE DEL TORRENTE GANDALOGGIO E ALTRI NEI COMUNI DI OGGIONO, SIRONE E ANNONE (LC)

## PROGETTO ESECUTIVO



### PROGETTAZIONE E CONSULENZE



ABBA.SOLUTIONS Scarl  
Via Cavour 80 - 20833 Giussano (MB)  
web: [www.abba.solutions](http://www.abba.solutions)  
mail: [info@abba.solutions](mailto:info@abba.solutions)  
pec: [abba.solutions@pec.it](mailto:abba.solutions@pec.it)

### PROGETTISTI / GRUPPO DI LAVORO

Ing. Daniele Giuffrè  
Ing. Stefano Minà  
Ing. Marco Pozzoli  
Ing. Chiarangela Perego  
Ing. Chiara Vellani  
Ing. Maria Teresa Olmeo  
Arch. Carla Galbiati

### REDATTO

Ing. Marco Pozzoli

### REVISIONATO

Ing. Stefano Minà

### APPROVATO

Ing. Daniele Giuffrè

### COMMITTENTE

Parco Regionale della Valle del Lambro  
Via Vittorio Veneto, 19  
20844, Triuggio MB

### DESCRIZIONE

## RELAZIONE IDRAULICA

### DATA

Aprile 2020

### SCALA

### COMMESSA

LAMBRO.001

### ELABORATO

E02

### REVISIONE

### DATA

### RIFERIMENTO EMISSIONE / REVISIONE

## Sommario

<b>PREMESSA</b>	<b>2</b>
<b>1. APPLICAZIONE DELLA L.R. 8/1998</b>	<b>3</b>
<b>2. INQUADRAMENTO GENERALE</b>	<b>5</b>
<b>3. SINTESI DELLE OPERE IN PROGETTO</b>	<b>7</b>
3.1. L'AREA DI LAMINAZIONE	7
3.2. LE OPERE	9
3.3. CARATTERISTICHE DELL'INVASO	12
<b>4. ANALISI DI DAM - BREAK</b>	<b>13</b>
4.1. OPERA DI REGOLAZIONE	13
4.1.1. DOMINIO DI INDAGINE	14
4.1.2. OROGRAFIA DELL'AREA DI INDAGINE	15
4.1.3. MODELLAZIONE IDRAULICA	17
4.1.3.1. Geometria e proprietà idrauliche del modello	18
4.1.3.2. Condizioni al contorno e condizioni iniziali	23
4.1.3.3. Caratteristiche della breccia	23
4.1.3.4. Durata della simulazione e passo temporale	28
4.1.3.5. Risultati ottenuti	28
4.2. ARGINE NORD	37
4.2.1. DOMINIO DI INDAGINE	40
4.2.2. OROGRAFIA DELL'AREA DI INDAGINE	41
4.2.3. MODELLAZIONE IDRAULICA	43
4.2.3.1. Geometria e proprietà idrauliche del modello	44
4.2.3.2. Condizioni al contorno e condizioni iniziali	46
4.2.3.3. Caratteristiche della breccia	48
4.2.3.4. Durata della simulazione e passo temporale	50
4.2.3.1. Risultati ottenuti	51
<b>5. CONCLUSIONI</b>	<b>63</b>
<b>ALLEGATO A - DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO DI MOTO VARIO DI HEC-RAS</b>	<b>66</b>
CASO MONODIMENSIONALE	66
CASO BIDIMENSIONALE	68
SINTESI DEI PASSI DELLA PROCEDURA DI CALCOLO	70

## Premessa

La presente relazione idraulica, in fase esecutiva di progettazione, ha lo scopo di integrare la modellazione idrologico – idraulica del progetto definitivo, su cui si è basato il dimensionamento delle opere costituenti l'area di laminazione, al fine di fornire tutti gli elementi necessari all'autorità competente per la valutazione del progetto ai sensi della L.R. 8/1998. La legge prevede infatti che debba essere il progetto definitivo ad essere sottoposto a tale verifica ma, vista la complessità – non tanto dal punto di vista tecnico quanto gestionale – del problema in esame, la volontà comune all'ente finanziatore (Regione Lombardia) e all'ente attuatore/stazione appaltante (Parco Valle Lambro) è stata quella di redigere un piano di gestione dell'area di laminazione (*Piano di regolazione dello strumento idraulico*, redatto dagli scriventi nel novembre 2018 a valle dell'approvazione del progetto definitivo in conferenza dei servizi) in cui si delineassero le linee guida per le modalità di esercizio ottimali dell'area che fosse condiviso da tutti gli stakeholders influenzati dall'intervento, prima di avviare la procedura di verifica.

Il comportamento idrologico-idraulico della Piana dei Pascoli e dei territori limitrofi, comprensivi dell'intera Area a Rischio Significativo regionale n°11 (PGRA Regione Lombardia), nonché del bacino del torrente Pescone situato a Nord della Piana, è stato ampiamente analizzato nelle precedenti fasi progettuali del presente intervento, nonché nei numerosi studi idrologico-idraulici che hanno accompagnato il lungo iter procedurale del progetto *Interventi di sistemazione idraulica dei torrenti Bevera e Gandaloglio in Comune di Molteno e limitrofi (LC) – Lotto 1*, complementare al presente lavoro in quanto relativo al dimensionamento dell'opera di presa lungo il torrente Gandaloglio. Alla luce dei risultati così ottenuti si giudica dunque non necessario, in fase di progettazione esecutiva, verificare ulteriormente il dimensionamento delle opere dal punto di vista idraulico (se non per le poche modifiche non essenziali che verranno descritte all'interno della relazione) ritenendo adeguatamente accurati i valori del tirante idrico raggiunto in condizioni di massimo invaso dell'area di laminazione e della quota di coronamento per i rilevati di contenimento della stessa, calcolati durante il progetto definitivo.

Il contributo originale di questa fase della progettazione, che costituisce il fulcro della presente relazione ed è un aspetto obbligatorio da indagare ai sensi della L.R. 8/1998, è la modellazione idraulica dei potenziali fenomeni di collasso ("dam-break") che potrebbero verificarsi lungo i rilevati di contenimento dell'area di laminazione.

I successivi capitoli saranno organizzati secondo la seguente scaletta:

- applicazione della L.R. 8/1998 al caso in esame;
- inquadramento generale del nodo idraulico di Molteno allo stato di fatto;
- sintesi delle caratteristiche delle opere in progetto così come prevista all'interno del progetto definitivo;
- analisi a collasso dell'opera di regolazione e dell'Argine Nord dell'area di laminazione, effettuata rispettivamente mediante modellazione mono e bidimensionale in moto vario;
- conclusioni.

## 1. Applicazione della L.R. 8/1998

La disciplina delle attività di progettazione, realizzazione ed esercizio di un invaso avente le caratteristiche del presente intervento (altezza del coronamento inferiore a 15 metri e volume di invaso inferiore a  $10^6 \text{ m}^3$ ) è di competenza regionale, ai sensi dell'art. 89, c.1, lett. b del D.Lgs 8/1998. Per Regione Lombardia, la normativa di riferimento in merito è costituita da:

- la L.R. 8/1998 (in seguito *Legge 8* per brevità), *Norme in materia di costruzione, esercizio e vigilanza degli sbarramenti di ritenuta e dei bacini di accumulo di competenza regionale*;
- le linee guida alla applicazione della stessa (D.g.r. 5 marzo 2001, 7/3699, in seguito *Delibera 7/3699* per brevità), *Direttive per l'applicazione della legge regionale 23 marzo 1998, n. 8, in materia di costruzione, esercizio e vigilanza degli sbarramenti di ritenuta e dei bacini di accumulo di competenza regionale*;

La Legge 8, tuttavia, è stata scritta nell'ottica di regolamentare gli invasi di piccole e medie dimensioni aventi funzione principalmente idroelettrica e situati "in linea" lungo corsi d'acqua montani, caratterizzati da valli incise racchiuse da versanti acclivi. Partendo da questo presupposto, si illustrano di seguito le principali criticità che si riscontrerebbero volendo applicare rigorosamente la normativa rispetto al caso in esame:

- l'intervento previsto ha solamente funzione di laminazione delle piene;
- l'area di laminazione del torrente Gandaloglio è un'opera interamente in derivazione, che recapita il proprio deflusso in uscita in parte in un differente corso d'acqua (la Bevera di Molteno, in cui il torrente Gandaloglio confluisce a valle dell'opera di presa) e in parte in un differente bacino idrografico (la rete di canali confluyente nel torrente Pescone, il quale recapita in ultimo nel lago di Annone);
- il progetto dell'area di laminazione è distinto e successivo al progetto della relativa opera di presa (*Interventi di sistemazione idraulica dei torrenti Bevera e Gandaloglio in Comune di Molteno e limitrofi (LC) – Lotto 1* contenente il canale di derivazione del torrente Gandaloglio, attualmente in attesa della consegna dei lavori), poiché la soluzione originaria prevedeva il libero spaglio delle portate derivate all'interno dell'area dei Pascoli e nelle aree adiacenti;
- operando in un'area pianeggiante e urbanizzata, la geometria e le dimensioni dei rilevati di contenimento, e conseguentemente le caratteristiche idrauliche dell'intervento, sono legate alla geomorfologia del territorio e ai vincoli urbanistici esistenti (presenza di strutture e infrastrutture sensibili). In particolar modo:
  - l'area di laminazione è caratterizzata da un volume di massimo invaso significativo (circa  $500'000 \text{ m}^3$ ) ma da un'altezza del coronamento contenuta (massimo 2 metri lungo le arginature, 2,5 metri nei pressi dell'opera di regolazione);
  - tale volume di massimo invaso corrisponde a un tempo di ritorno di 50 anni, mentre il volume d'invaso corrispondente alla quota di coronamento aumenta fino a  $630'000 \text{ m}^3$ . Questo valore risulta inferiore al tempo di ritorno dell'evento da adottare per il dimensionamento delle strutture relative a un invaso avente volume superiore a  $100'000 \text{ m}^3$  (500 anni). Tuttavia, alzare ulteriormente la quota di coronamento arginale per incrementare il tempo di ritorno dell'evento di progetto e/o per rispettare i valori dei franchi di sicurezza previsti al capitolo 7.4 della Delibera 7/3699 non risulta possibile poiché:
    - il tirante interno all'area di laminazione sarebbe troppo alto per consentire il passaggio di ulteriori portate provenienti dal canale derivatore;

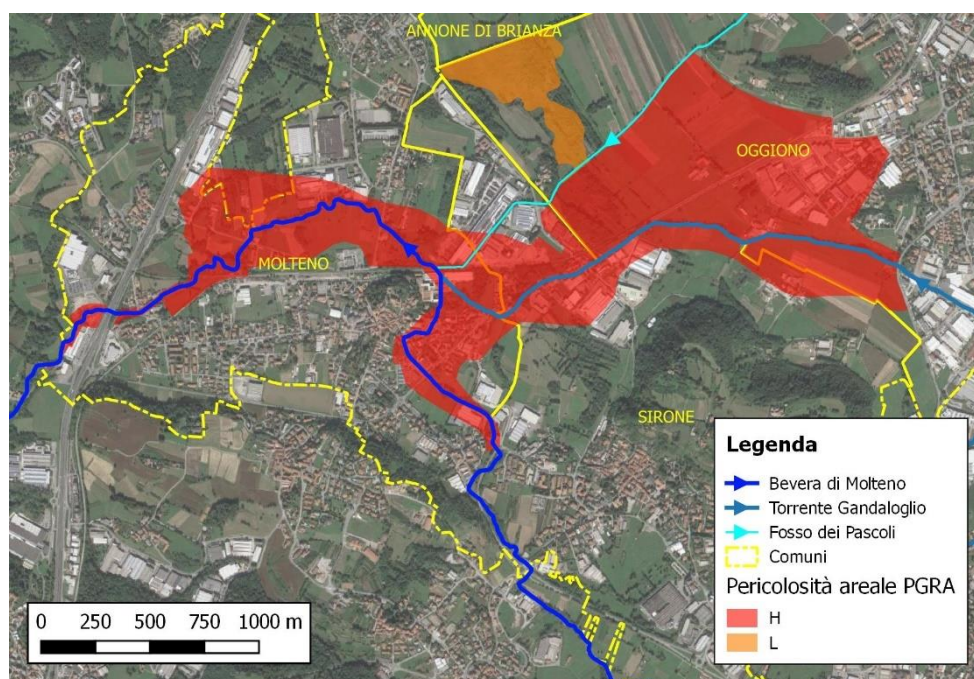


- non si rispetterebbe più il franco di sicurezza (1 m) rispetto al piano di appoggio dei binari previsto per le reti ferroviarie (la linea ferroviaria Lecco-Albate camerlata viene attraversata dal canale derivatore);
- l'analisi di collasso ("dam-break") maggiormente degna di attenzione non riguarda l'opera di regolazione (che è stata comunque analizzata), bensì il rilevato denominato *argine nord*. La dinamica di questo evento è – in tal caso – fortemente bidimensionale e pertanto la sua verifica è difficilmente riconducibile alla schematizzazione proposta al capitolo 9.4 della Delibera 7/3699.

Alla luce di quanto riportato finora, pur essendo in presenza di un volume di laminazione superiore ai 100'000 m<sup>3</sup>, si ritiene inevitabile l'applicazione dell'approccio "caso per caso", così come definito al capitolo 1 della Delibera 7/3699, nell'applicazione della normativa al caso in esame, fermo restando la necessità di fornire all'autorità competente tutti gli elementi necessari per una esaustiva valutazione del progetto e del suo impatto sulle dinamiche idrauliche delle aree e dei corsi d'acqua di valle.

## 2. Inquadramento generale

Come anticipato nel sottocapitolo precedente, l'area circostante il Comune di Molteno costituisce, almeno dalla fine del secolo scorso, un'importante criticità idraulica a livello regionale, tanto da essere classificata come Area a Rischio Significativo (ARS) all'interno dell'ultimo Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA), quasi interamente al livello massimo di pericolosità (H, Figura 1).



**Figura 1:** perimetrazione della pericolosità idraulica per il nodo idraulico di Molteno secondo il PGRA

Il comune lecchese si trova infatti in prossimità di un nodo idraulico che vede la confluenza di due corsi d'acqua di dimensioni sufficienti da essere inseriti all'interno del reticolo principale regionale (D.g.r. 4229/15 e s.m.i.) con le seguenti caratteristiche:

- torrente Bevera di Molteno (o di Brianza): nasce dal Comune di Colle Brianza e si sviluppa in direzione Est-Ovest fino al Comune di Costamasnaga, in cui avviene l'immissione nel fiume Lambro, di cui ne è il più importante affluente con i suoi circa 17 km di asta principale. Al km 10 avviene l'attraversamento dell'abitato di Molteno e la confluenza con il Torrente Gandaloggio;
- torrente Gandaloggio: altro corso d'acqua pedemontano con origine in Comune di Galbiate e sviluppo complessivo dell'asta di circa 8 km fino all'attraversamento dell'abitato di Molteno e successiva immissione nella Bevera di Molteno immediatamente a valle dello stesso.

Osservando l'immagine in *Figura 1*, si vede come entrambi i corsi approccino il Comune da Sud-Est, con la Bevera che ne attraversa il centro abitato mentre il Gandaloggio ne costeggia il lato Est. Il tratto "urbano" di entrambi i corsi d'acqua è stato soggetto, negli anni '90, a un massiccio intervento regolarizzazione da parte del Genio Civile, con la riprofilatura e l'artificializzazione (in calcestruzzo e massi) del letto e delle sponde dell'alveo. In tale occasione si è anche realizzata una vasca di sedimentazione per ciascun corso d'acqua a monte del loro ingresso nell'abitato. Tutti e due i torrenti, inoltre, presentano diversi attraversamenti di varia natura (la Bevera all'interno del centro abitato, il Gandaloggio soprattutto lungo il tratto di monte in cui corre parallelo alla SP49) che ne limitano la massima portata defluibile in condizioni di pelo libero, per essere poi intubati all'uscita del territorio comunale nei pressi dell'ex fabbrica Segalini – per una lunghezza di circa 100

metri – a valle della quale avviene la confluenza. Procedendo a valle per ulteriori 50 metri, la Bevera di Molteno subisce l'immissione del Fosso dei Pascoli, il canale che raccoglie buona parte delle acque di drenaggio dell'omonima Piana situata circa 600 m in direzione Ovest in Comune di Oggiono, un'area di circa 60 ettari in parte a uso agricolo e in parte (le zone più depresse) area naturale di tipo acquitrinoso, caratterizzata da pendenze molto ridotte e posta lungo lo spartiacque approssimativo tra i sottobacini della Bevera di Molteno (bacino del fiume Lambro) e del torrente Pescone (bacino del fiume Adda previo scarico nel lago di Annone), che verrà trasformata in area di laminazione per il torrente Gandaloglio con i lavori del presente intervento.

Il sistema idraulico nel suo complesso drena una superficie di circa 30 km<sup>2</sup>, in gran parte coincidente con la Brianza lecchese, la cui progressiva urbanizzazione/impermeabilizzazione, unitamente alla riduzione delle aree naturalmente inondabili (per l'aumentato valore esposto delle stesse causa differente destinazione d'uso) hanno inevitabilmente portato alla situazione di grave insufficienza attuale del nodo idraulico già da almeno vent'anni, quando vennero commissionate le prime versioni dei progetti che vedranno la loro conclusione con il presente lavoro, per cui eventi meteorologici di intensità relativamente contenuta (pochi anni di tempo di ritorno) possono causare ingenti disagi alla popolazione e danni a proprietà private e infrastrutture pubbliche di importanza rilevante (es. SP49, linea ferroviaria Molteno - Lecco).

### 3. Sintesi delle opere in progetto

Si riporta di seguito la descrizione delle componenti che determinano il funzionamento dell'area di laminazione della Piana dei Pascoli (opera di presa, opera di restituzione, rilevati arginali, etc.), contenuta all'interno del documento Piano di regolazione dello strumento idraulico, realizzato dagli scriventi nel novembre 2018, a valle dell'approvazione del progetto definitivo in conferenza dei servizi. Le modifiche (non essenziali) fatte durante la presente fase di progettazione esecutiva sono indicate nel testo e – se necessario – ulteriormente trattate nei capitoli successivi. Per la descrizione dettagliata della modellazione idrologico – idraulico che ha condotto al dimensionamento dell'area di laminazione e delle succitate opere si rimanda ai seguenti lavori:

- Area di laminazione delle piene del torrente Gandaloglio e altri nei comuni di Oggiono, Annone e Sirone (LC), (2018) progetto definitivo, realizzato dalla società ETATEC Studio Paoletti s.r.l.;
- Interventi di sistemazione idraulica dei torrenti Bevera e Gandaloglio in Comune di Molteno e limitrofi (LC) – Lotto 1, (2001, agg. 2014) progetto esecutivo, realizzato dalla società ETATEC Studio Paoletti s.r.l. .

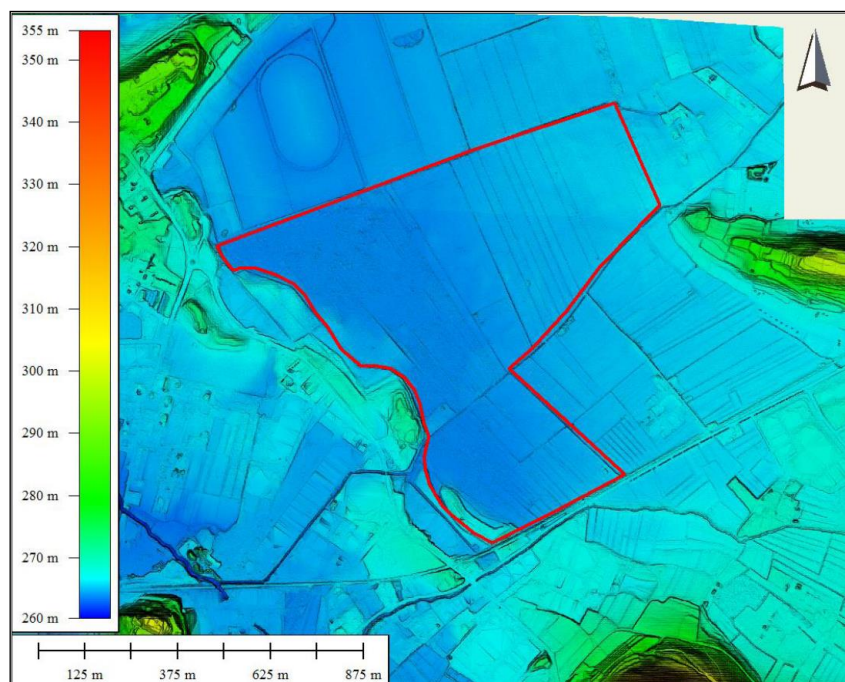
#### 3.1. L'area di laminazione

L'area di esondazione, denominata anche "piana della Poncia" o "piana dei Pascoli", è un'area di superficie complessiva di circa 65 ha delimitata dal confine tra Annone e Oggiono a NNW, dalle pertinenze più prossime alle imprese agricole locali e dal Fosso dei Pascoli a ENE, dalla linea ferroviaria Molteno – Lecco e dalla SP 49 (via per Molteno) a SSE e dagli esigui rilievi posti a WSW. Questa zona risulta lievemente declive verso W e qui si trova il suo punto più depresso posto a poco meno di 264 m s.l.m. (*Figura 3*) e questo, unito al fatto che in questo punto non esiste uno sfogo idraulico verso valle e che il reticolo esistente di bonifica drena verso il fosso dei Pascoli più in basso, comporta una stagnazione permanente delle acque nella parte SSW, come si può anche evincere dalla copertura vegetazionale visibile dall'ortofoto di seguito riportata (*Figura 2*), caratterizzata da piante palustri e dalla carenza di copertura arborea.



*Figura 2: Dettaglio dell'area oggetto di intervento*





**Figura 3:** Andamento altimetrico dell'area

Il paleolago presente fu bonificato nel corso dei secoli con un fitto sistema di canali confluenti a sud nel Fosso dei Pascoli, quindi nella Bevera, e a nord nel torrente Pescone, quindi nel lago di Annone. Nelle parti più elevate e meglio drenate si riscontra infatti la presenza di appezzamenti coltivati, in successione (procedendo verso NNE) prima a prato quindi a tipi di seminativi più specifici.

Di seguito vengono riportate alcune foto (*Figura 4, Figura 5*) scattate nel 2016 che ritraggono efficacemente le condizioni della piana della Poncia da differenti angolazioni.



**Figura 4:** Veduta panoramica della zona sud della piana della Poncia dal Fosso dei Pascoli



**Figura 5:** Veduta panoramica della zona nord-ovest della piana dalla strada confinale con la Nuova Poncia

L'area della Poncia risulta quindi avere uno spartiacque di incerta definizione, presumibilmente variabile a seconda dei tiranti presenti data la conformazione pianeggiante, ed afferisce parzialmente al Fiume Lambro, tramite la Bevera, e parzialmente al Fiume Adda, tramite il Torrente Pescone e il Lago di Annone.

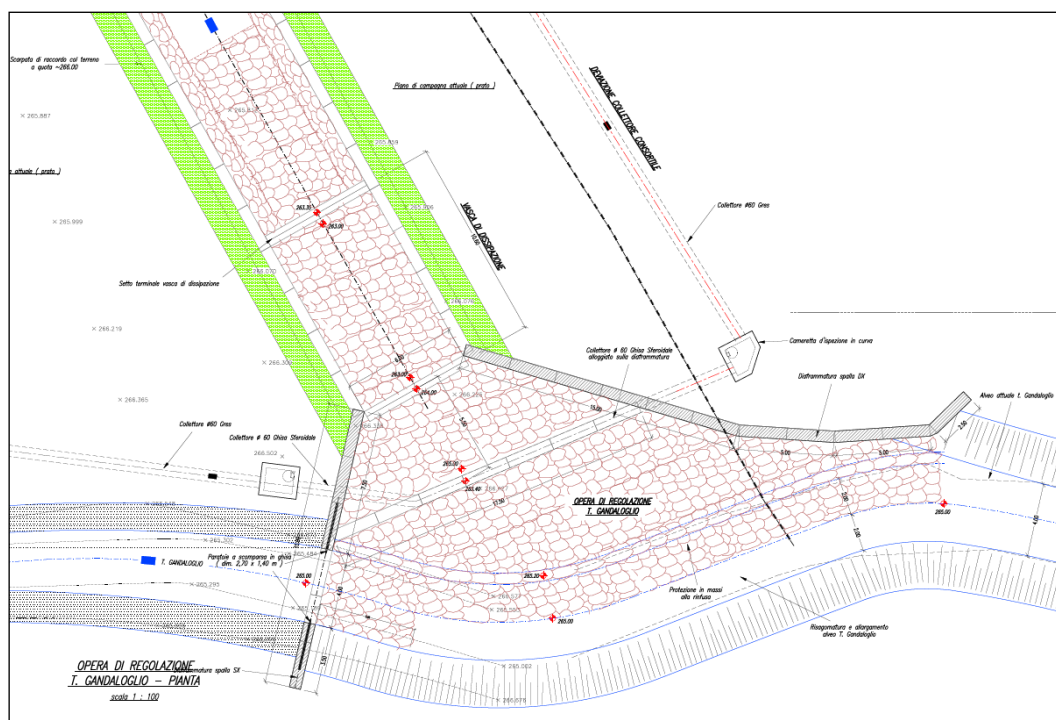
### 3.2. Le opere

Il sistema di opere che si vanno a realizzare prevede il convogliamento della portata di piena del Torrente Gandaloglio attraverso un canale scolmatore, che sarà realizzato poco a monte dell'abitato di Molteno, fino all'area di laminazione.

Tale convogliamento avverrà grazie alla presenza di una soglia sfiorante (Figura 6), localizzata in sponda destra e lunghezza di circa 17 m, che convoglierà le portate eccedenti i 4 m<sup>3</sup>/s verso un canale scolmatore diretto all'area di laminazione. Trasversalmente all'alveo, in corrispondenza della sezione terminale della soglia, troveranno collocazione una serie di diaframmi di chiusura nei quali sarà ricavato l'alloggiamento per due paratoie atte a bloccare, anche completamente, il deflusso delle portate verso valle. Queste paratoie saranno quindi potenzialmente in grado di interrompere il deflusso sul Gandaloglio indirizzando l'intera portata verso il canale scolmatore.

La portata sfiorata oltre la soglia accederà ad una vasca di dissipazione mediante uno scivolo in pietrame; la vasca di dissipazione, della lunghezza di 10 m, terminerà con una piccola soglia di circa 35 cm, finalizzata alla localizzazione del risalto all'interno della vasca. Il passaggio dalla vasca di dissipazione all'area di allagamento controllato avverrà mediante un canale scolmatore che sottopassa la S.P. 49 e la linea ferroviaria fino alla confluenza con il Fosso dei Pascoli.

Ubicate poco a monte del sottopasso alla S.P. 49 e alla linea ferroviaria, saranno presenti due paratoie di sconnessione, realizzate per fini manutentivi; nella gestione ordinaria dell'opera, queste rimarranno completamente sollevate.



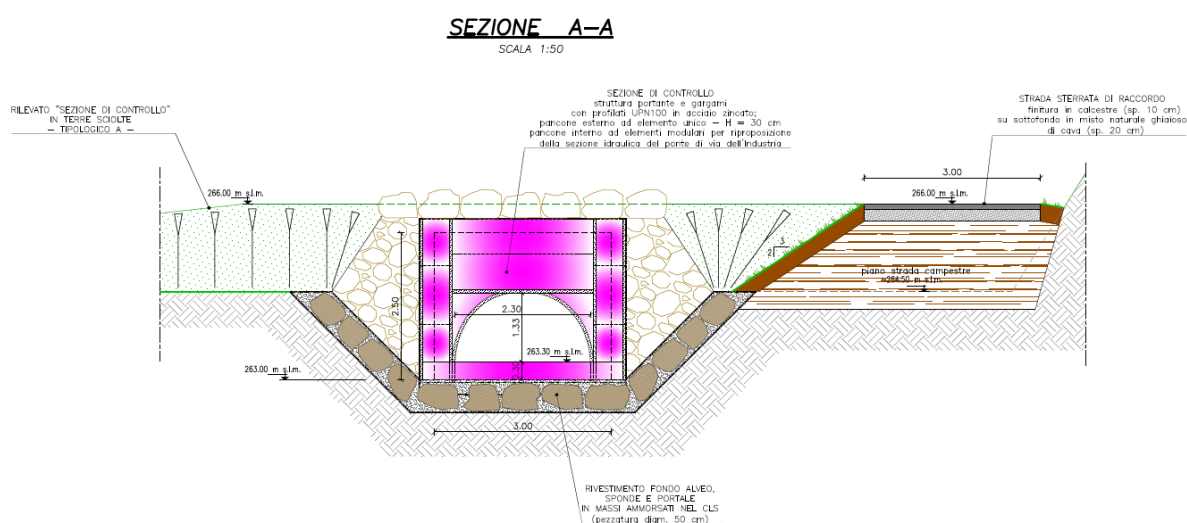
**Figura 6:** Vista in pianta dell'Opera di regolazione (Progetto Esecutivo Lotto 1)



Le acque provenienti dal canale scolmatore avranno poi modo di spagliare nell'area di allagamento, delimitata in parte da arginature realizzate in terre sciolte e terre armate in parte dalla presenza del rilevato ferroviario e del rilievo naturale.

L'acqua in ingresso all'area, proveniente dal Gandaloglio e dal Fosso dei Pascoli, potrà infine defluire verso la Bevera nei seguenti modi:

- in gran parte attraverso una sezione di controllo posta a circa 120 m a monte di via dell'Industria, in grado di controllare autonomamente le portate defluenti dal Fosso dei Pascoli. Questa sarà costituita da una successione di manufatti scatolari rettangolari in cls di dimensioni 3,0 x 2,5 m tali da garantire la continuità idraulica al Fosso dei Pascoli. Sulla sezione di ingresso dei manufatti verrà installata una struttura sagomata con carpenteria metallica in acciaio zincato tale da riprodurre esattamente la geometria dell'imbocco del ponte di via dell'Industria. La sezione di controllo, che avrà uno sviluppo in pianta di circa 10 m, sarà successivamente inglobata in un argine di chiusura che, sviluppandosi su una lunghezza di 130 m, terminerà in corrispondenza di un piccolo rilievo naturale boscato;
- in parte attraverso chiaviche di controllo e tombotti (sostituiti, nel progetto esecutivo, da tubazioni in calcestruzzo di diametro 500 mm, il cui funzionamento idraulico è descritto nel sottocapitolo 4.2) che saranno realizzate in corrispondenza del rilevato arginale nord, a garanzia della continuità con il reticolo esistente, e convoglieranno le acque lungo canali diretti al Torrente Pescone; infine, al raggiungimento di tiranti superiori alla quota di 265,20 m s.l.m. (corrispondenti a eventi caratterizzati da un tempo di ritorno superiore ai 50 anni), attraverso il manufatto di sfioro verso uno dei canali interni alla proprietà "la Nuova Poncia", appartenenti al RIM, diretto verso il Torrente Pescone.



**Figura 7:** Vista in sezione della sezione di controllo in progetto sul Fosso dei Pascoli

E' fondamentale rilevare come la sezione di controllo del Fosso dei Pascoli (Figura 7), posta a monte dell'attraversamento di via dell'Industria, ricalchi perfettamente l'attraversamento stradale di valle e, sebbene dotato di paratoia, questo verrà, a meno di necessità manutentive, lasciato completamente aperto. Non sarà infatti necessaria alcuna regolazione della stessa poiché, per effetto combinato della sua geometria e dei rigurgiti indotti dalla confluenza del Fosso dei Pascoli nella Bevera, in occasione di eventi di piena del bacino di  $T_R=50$  e di massimo riempimento della vasca la massima portata transitante sarà pari a circa  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

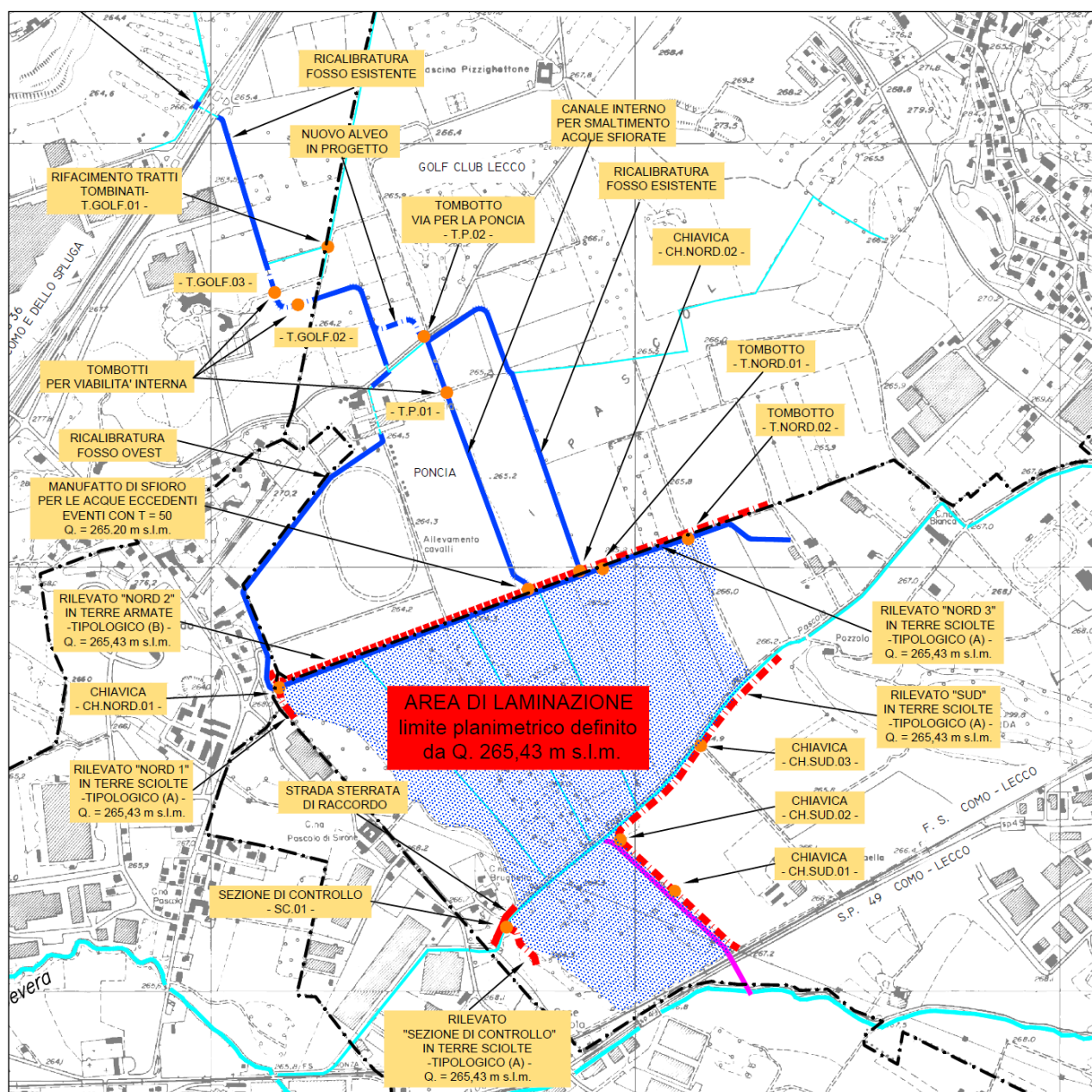


Figura 8: Vista d'insieme (Progetto Definitivo Lotto 2)

Col riempimento progressivo dell'invaso, il tirante, qualora raggiungesse e superasse quota 265,20 m s.l.m. (23 cm sotto la quota di coronamento delle arginature), attiverrebbe, come appena esposto, lo sfioro presente lungo l'arginatura NORD in modo tale da permettere lo scarico delle portate eccedenti la capacità di accumulo dell'invaso in corrispondenza di un punto specifico lungo il reticolo esistente.

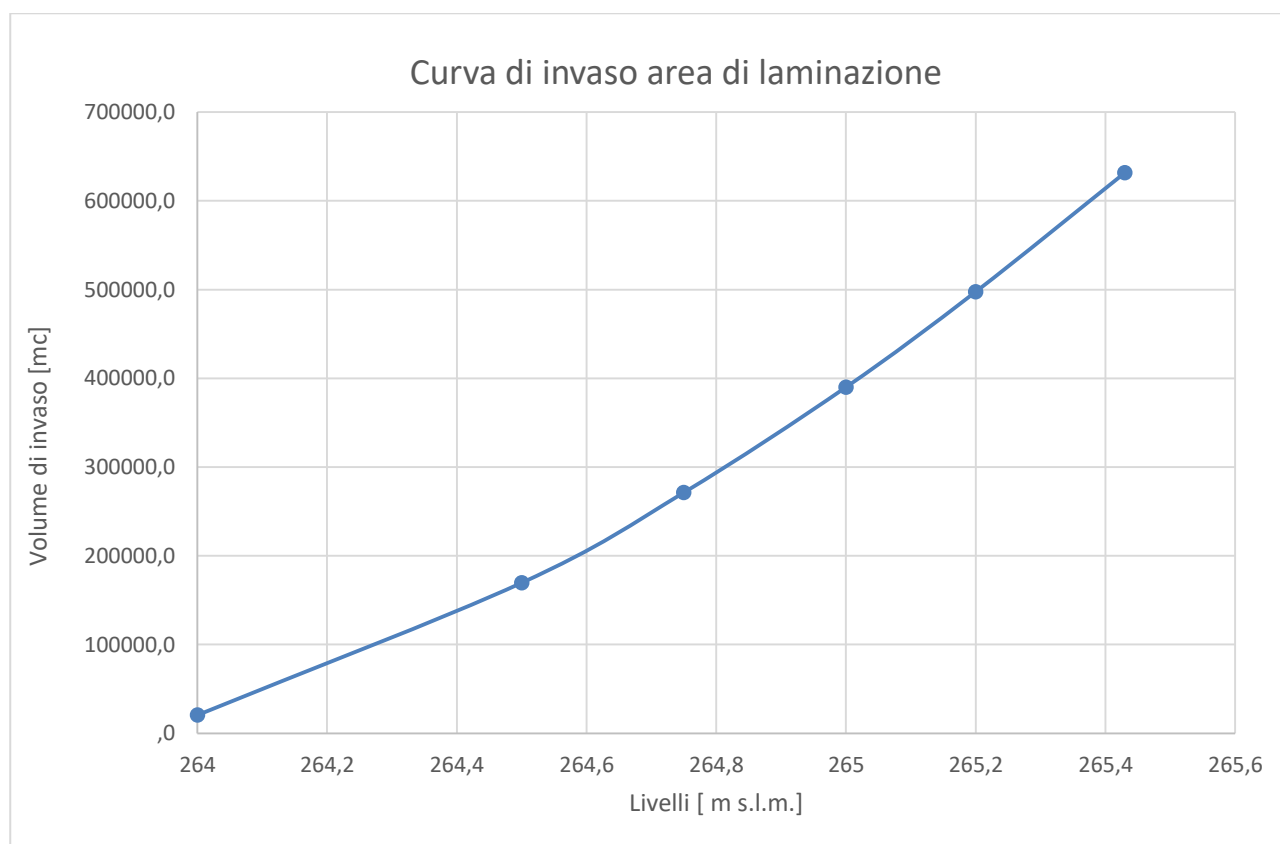
Col progressivo riempimento della vasca e il conseguente innalzamento dei tiranti idrici al suo interno, si ridurrà progressivamente, fino ad annullarsi, il passaggio di portata dal Gandaloglio verso l'area di laminazione: a vasca piena infatti, l'acqua proveniente dal Gandaloglio sarà impossibilitata a deviare verso il bypass continuando il suo percorso lungo il torrente e ripristinando le condizioni di allagamento presenti "ante-operam", l'eventuale ulteriore riempimento, in questo caso, sarebbe dovuto al solo contributo del Fosso dei Pascoli.

### 3.3. Caratteristiche dell'invaso

L'acqua proveniente dal bypass e dal Fosso dei Pascoli avrà a disposizione un'area di invaso di circa 63 ha; se si considera il volume compreso tra la quota più profonda del piano campagna all'interno dell'area e la quota di 265,20 m s.l.m. corrispondente alla quota di incipiente sfioro, il volume disponibile sarà pari a circa 500.000 m<sup>3</sup> (Figura 9).

La sommità arginale prevista in progetto sarà ovunque fissata alla quota 265,43 m s.l.m. con la sola eccezione della punto in cui si colloca la soglia di sfioro. Il margine di volume di invaso all'interno del quale si attiverà la soglia di sfioro permetterà di invasare ulteriori 130.000 m<sup>3</sup>, corrispondenti al volume compreso tra la quota di incipiente sfioro e quella di sommità arginale, scaricando verso nord una portata che non supera 1,5 m<sup>3</sup>/s.

Il massimo volume di invaso disponibile sarà quindi pari a circa 630.000 m<sup>3</sup>;



**Figura 9:** Curva di invaso dell'area di laminazione

## 4. Analisi di Dam - Break

Illustrato il comportamento dell'area di laminazione in condizioni di esercizio, rimane – in questa fase della progettazione – da effettuare la verifica delle conseguenze, sul piano idraulico, che l'eventuale collasso di parte delle opere di contenimento dell'invaso avrebbe sui territori di valle. Il lavoro è stato impostato basandosi sulle seguenti considerazioni preliminari:

- noto l'andamento orografico dell'area di interesse, le modellazioni in effettuate nelle precedenti fasi di progettazione e le testimonianze degli eventi alluvionali avvenuti in passato, si ritiene che l'analisi di collasso debba essere effettuata per le seguenti strutture:
  - rilevato dell'opera di regolazione lungo il Fosso dei Pascoli;
  - rilevato denominato "Argine Nord", che separa l'area di laminazione dai terreni della proprietà "La nuova Poncia".
- Dal momento che l'andamento del terreno all'esterno del rilevato denominato "Argine Sud", in direzione della Cascina Redaella, risulta in contropendenza, e si livella rapidamente con il coronamento dell'argine, non si considera necessario procedere alla verifica di collasso per tale struttura;
- come anticipato al capitolo 1, l'applicazione della metodologia contenuta al punto 9.4 della *Delibera 7/3699* per la verifica a collasso è di difficile applicazione al caso in esame, consistente in un vaso per la cui altezza di coronamento ( $< 5$  m) non sarebbe necessaria la verifica, ma il cui volume d'invaso ( $> 10^5$  m<sup>3</sup>) la renderebbe necessaria per i 20 km a valle. Fatta questa considerazione, si è ritenuto di operare scegliendo criticamente, per ciascuno dei due casi analizzati, l'estensione del dominio di indagine, l'orografia di riferimento, la tipologia di modellazione, le caratteristiche della breccia, le condizioni idrauliche iniziali e al contorno. Ciascuno degli aspetti appena elencati verrà illustrato in dettaglio nei sottocapitoli successivi.
- cautelativamente, si decide di considerare la condizione di massimo riempimento fisicamente possibile per l'area di laminazione al momento del collasso, con il tirante idrico coincidente con la quota di coronamento arginale ( $z = 265.43$  m s.l.m.) anziché la quota di massimo vaso calcolata durante la progettazione definitiva ( $z = 265.20$  m s.l.m.), alla quale si attiva lo scolmatore superficiale presente lungo l'Argine Nord.

### 4.1. Opera di regolazione

Come illustrato all'interno della sintesi del progetto definitivo, in condizioni di esercizio l'opera di regolazione – costituita da un canale in calcestruzzo armato realizzato all'interno del rilevato di contenimento dell'area di laminazione – si comporta come una bocca tarata non regolata avente sezione trasversale rettangolare di dimensioni  $3 \times 2.5$  m e lunghezza 10 m, con in testa l'apposizione di un pancone profilato in acciaio zincato che riproduce la sezione di imbocco del ponte di via dell'industria (Comune di Sirone) posto all'incirca 120 metri a valle (stralcio della planimetria e della sezione frontale di progetto in *Figura 10*), al fine di emularne il comportamento idraulico. Il coronamento del rilevato arginale raggiunge quota 266 m s.l.m., ma solamente in corrispondenza della struttura, per poi raccordarsi alla quota di progetto (265.43 s.l.m.) una volta allontanatosi dalla stessa.



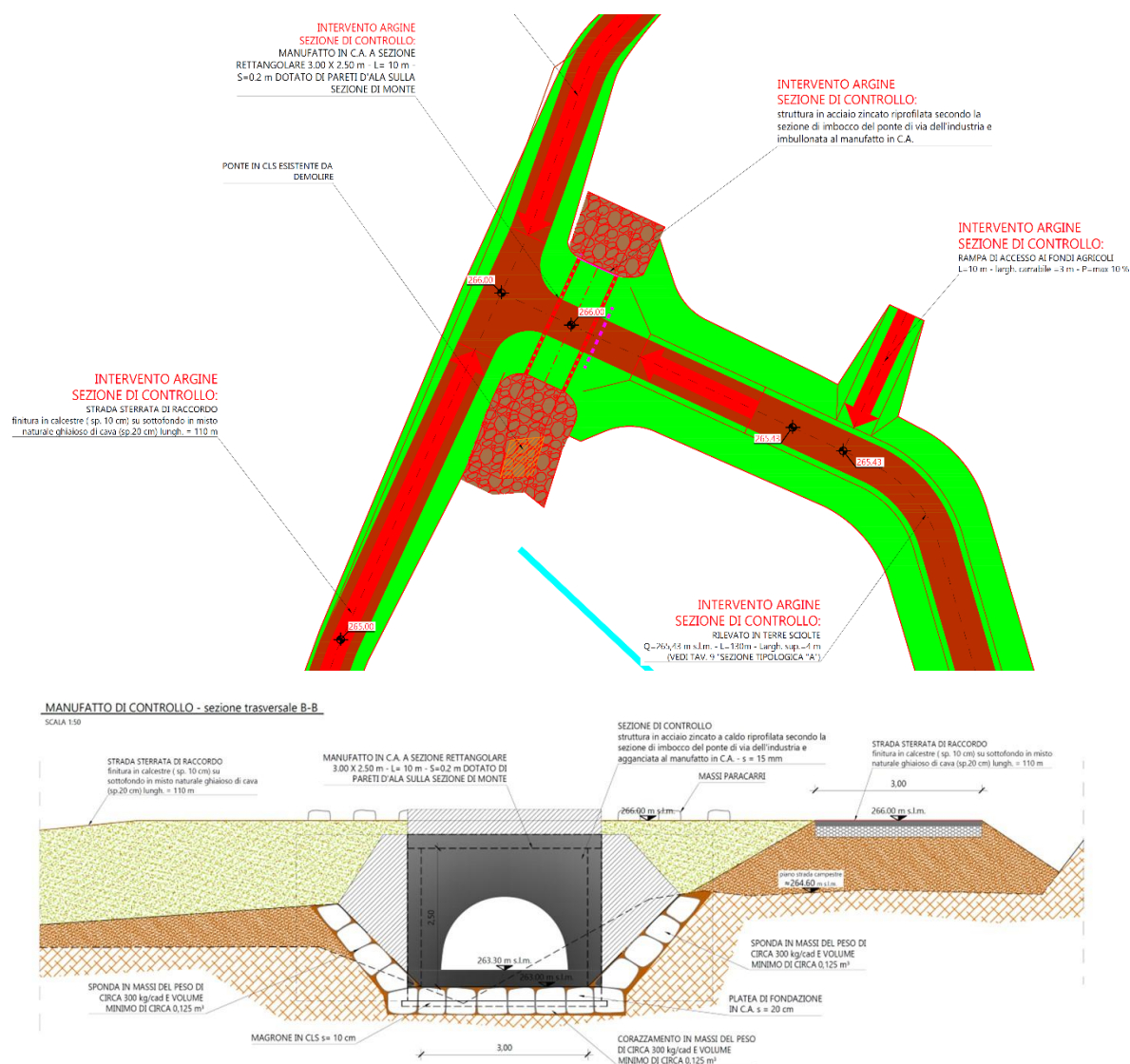


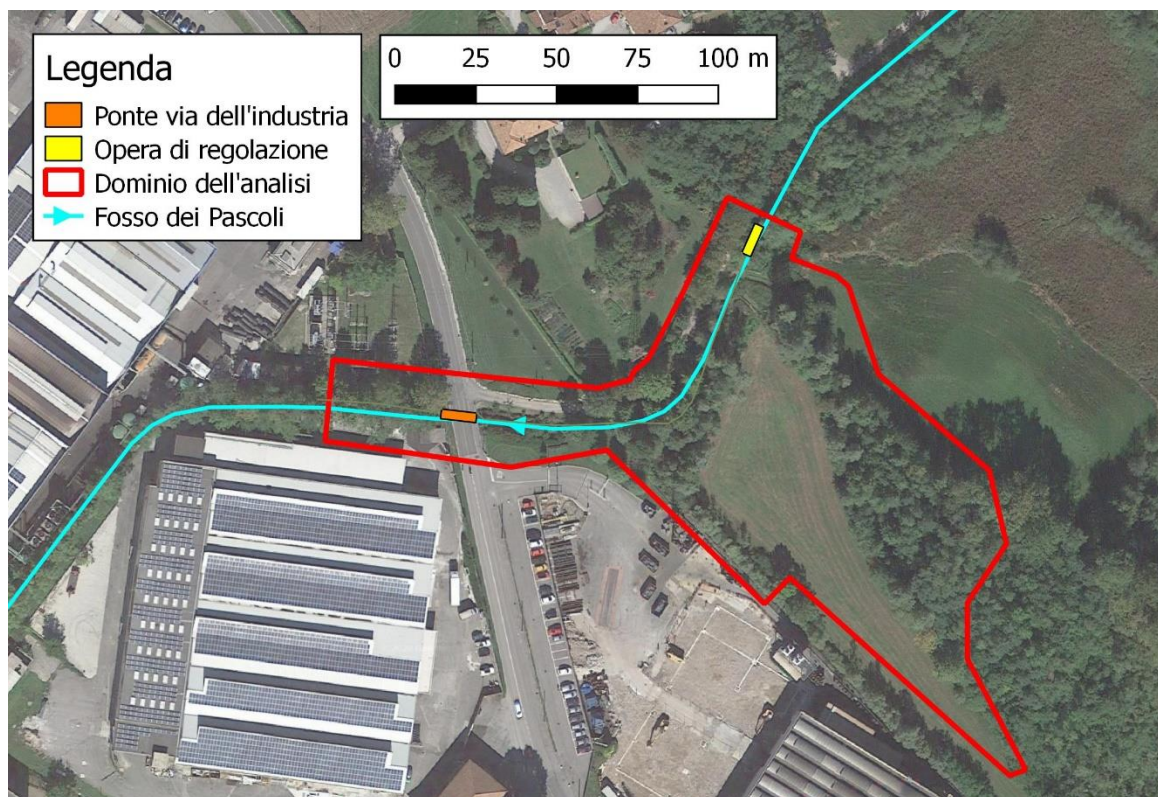
Figura 10: vista in planimetria e sezione frontale di monte di progetto dell'opera di regolazione

Si è precedentemente illustrato come, durante un evento di piena, il comportamento idraulico della sezione di controllo dipenderà, esattamente come allo stato di fatto succede con il ponte di Via dell'industria, dal livello di piena raggiunto dalla Bevera di Molteno alla confluenza con il Fosso dei Pascoli, poiché il rigurgito della prima limita fortemente le portate in uscita dalla Piana. Volendosi mettere nella situazione peggiore possibile, si osserva tuttavia che le dinamiche corrivative dell'onda di piena all'interno della Bevera di Molteno sono sensibilmente più rapide (dell'ordine di qualche ora) dei tempi di svuotamento dell'area di laminazione (dell'ordine delle decine di ore), pertanto è conservativo ma verosimile ipotizzare che il collasso avvenga a vasca (quasi) piena ma a Bevera "bassa", ovvero in assenza del profilo rigurgitato di corrente lenta lungo il Fosso dei Pascoli generato dalla condizione al contorno di valle.

#### 4.1.1. Dominio di indagine

Dal momento che l'opera di regolazione è stata realizzata con il fine di replicare – 120 m più a monte lungo il Fosso dei Pascoli – il comportamento idraulico del ponte di Via dell'industria, al fine di garantire l'isolamento del capannone industriale della società Italforge, posto in sinistra idraulica tra le due strutture, nei confronti dell'area di laminazione (lungo il perimetro di tale proprietà verrà comunque realizzato, con un intervento

separato, un muro di protezione avente quota di coronamento pari a 266 m s.l.m.), il comportamento atteso in caso di collasso della prima è un allargamento dell'area di laminazione fino al secondo, con condizioni all'uscita pressoché inalterate. Con questa premessa, il dominio di indagine (Figura 11) è stato definito come segue:



**Figura 11:** dominio di indagine per la modellazione idraulica del fenomeno di dam-break dell'opera di regolazione

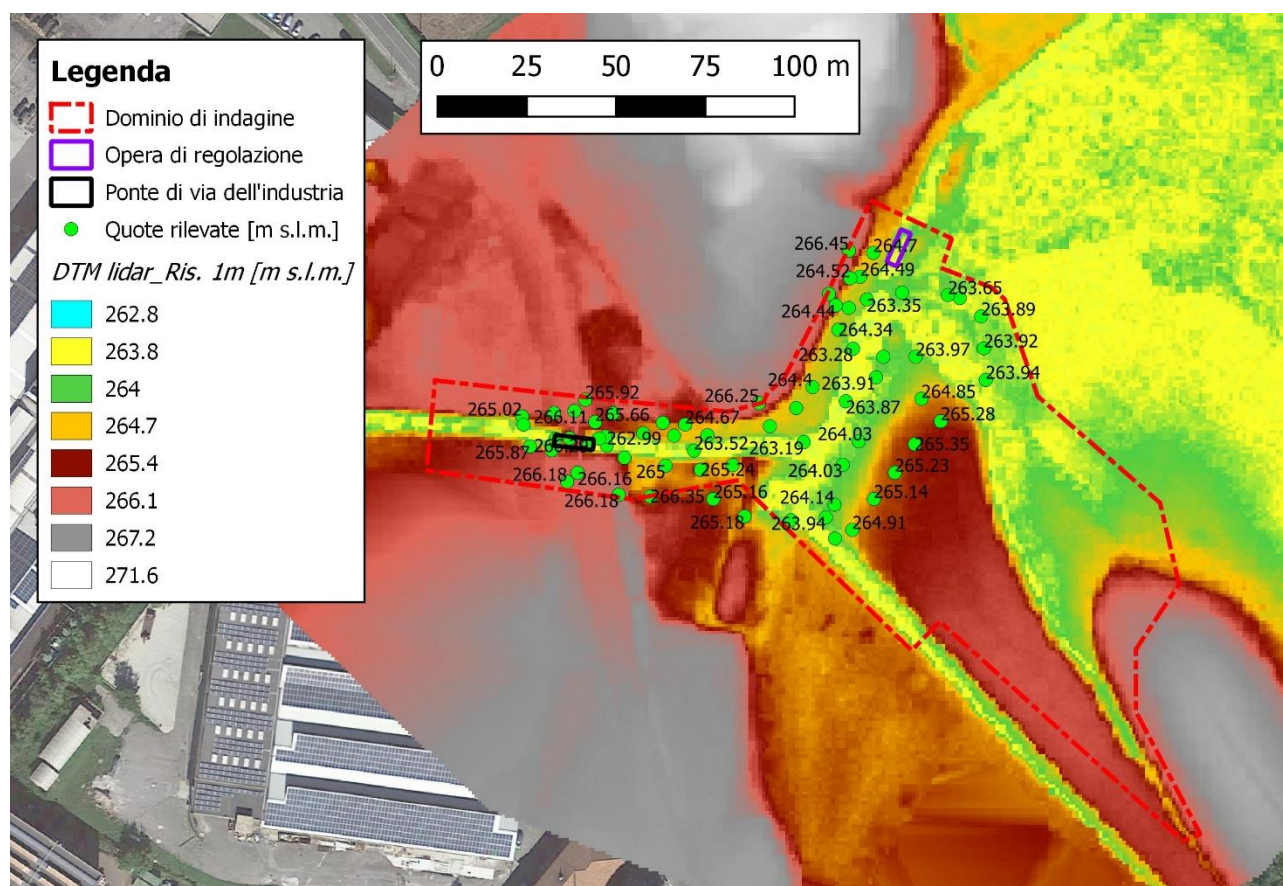
- a monte, il modello inizia pochi metri oltre l'opera di regolazione, con l'area di laminazione che viene rappresentata come un unico elemento di tipo serbatoio: visto il grande volume invasato a confronto del modesto tirante idrico, oltre alle pendenze in generale molto ridotte ( $< 0.5\%$  pressoché ovunque), si può ragionevolmente assumere che l'apertura di una breccia di dimensioni anche significative all'interno del profilo arginale non consenta di sviluppare fenomeni rilevanti dal punto di vista idrodinamico all'interno della Piana dei Pascoli, per cui si renderebbe necessaria un'analisi dell'area di laminazione come elemento 2D (molto onerosa in termini computazionali);
- a valle, il modello idraulico si spinge fino a circa 40 metri a valle del ponte di via dell'industria, prima della confluenza con la Bevera di Molteno. Si è infatti ritenuto che a tale distanza (come poi dimostrato dai risultati ottenuti) l'effetto del dam-break dell'opera di regolazione risultasse già poco significativo;
- in sinistra e in destra idraulica, il dominio è stato esteso fino a raggiungere quote superiori alla quota di coronamento dei rilevati arginali dell'area di laminazione (265.43 m s.l.m.);

#### 4.1.2. Orografia dell'area di indagine

In una zona caratterizzata da pendenze estremamente ridotte, un'accurata definizione dell'altimetria dell'area di indagine è di fondamentale importanza per impostare correttamente la geometria del modello idraulico. Per il caso in esame, l'intero dominio è coperto dal DTM a risoluzione 1 m ottenuto con tecnica LIDAR e fornito dal ministero dell'ambiente. Nonostante in generale il dato altimetrico associato a questo prodotto



sia adeguato alle esigenze della modellazione idraulica (precisione dichiarata 15 cm), le ridotte dimensioni del Fosso dei Pascoli, unitamente alla folta vegetazione e alle sopracitate basse pendenze hanno reso necessario un rilievo planoaltimetrico di maggiore dettaglio del tratto in esame, realizzato in diverse campagne durante la progettazione definitiva. Come si può osservare in *Figura 12*, dal confronto tra le quote del DTM e del rilievo si nota che la precisione dichiarata è rispettata pressocchè ovunque tranne che all'interno dell'alveo inciso (dove la presenza d'acqua costituisce un'ulteriore fonte di incertezza nella stima delle quote di fondo partendo da dati aerofotogrammetrici), lungo cui le quote del DTM risultano uniformemente più elevate delle quote rilevate di un valore variabile tra i 20 e i 60 cm.



**Figura 12:** confronto tra il DTM a ris. 1 m e i dati del rilievo topografico di dettaglio

Per ottenere il dato planoaltimetrico da utilizzare come base del modello idraulico, si è dunque proceduto a sovrapporre le due informazioni, sostituendo alle celle del DTM di partenza rappresentanti l'alveo inciso del Fosso dei Pascoli le medesime del DTM ottenuto a partire dai dati (più accurati) dei rilievi a terra. Si è così ottenuto il modello digitale del terreno presentato in *Figura 13*, in cui l'alveo inciso è caratterizzato, all'interno del dominio di indagine, da una geometria in linea con i rilievi (e la progettazione definitiva). Sono stati inoltre inseriti, all'interno dello stesso, i profili del profilo spondale di protezione della proprietà Italforge e del rilievo di raccordo dell'opera di regolazione rispetto al terreno naturale sopraelevato in direzione Sud.

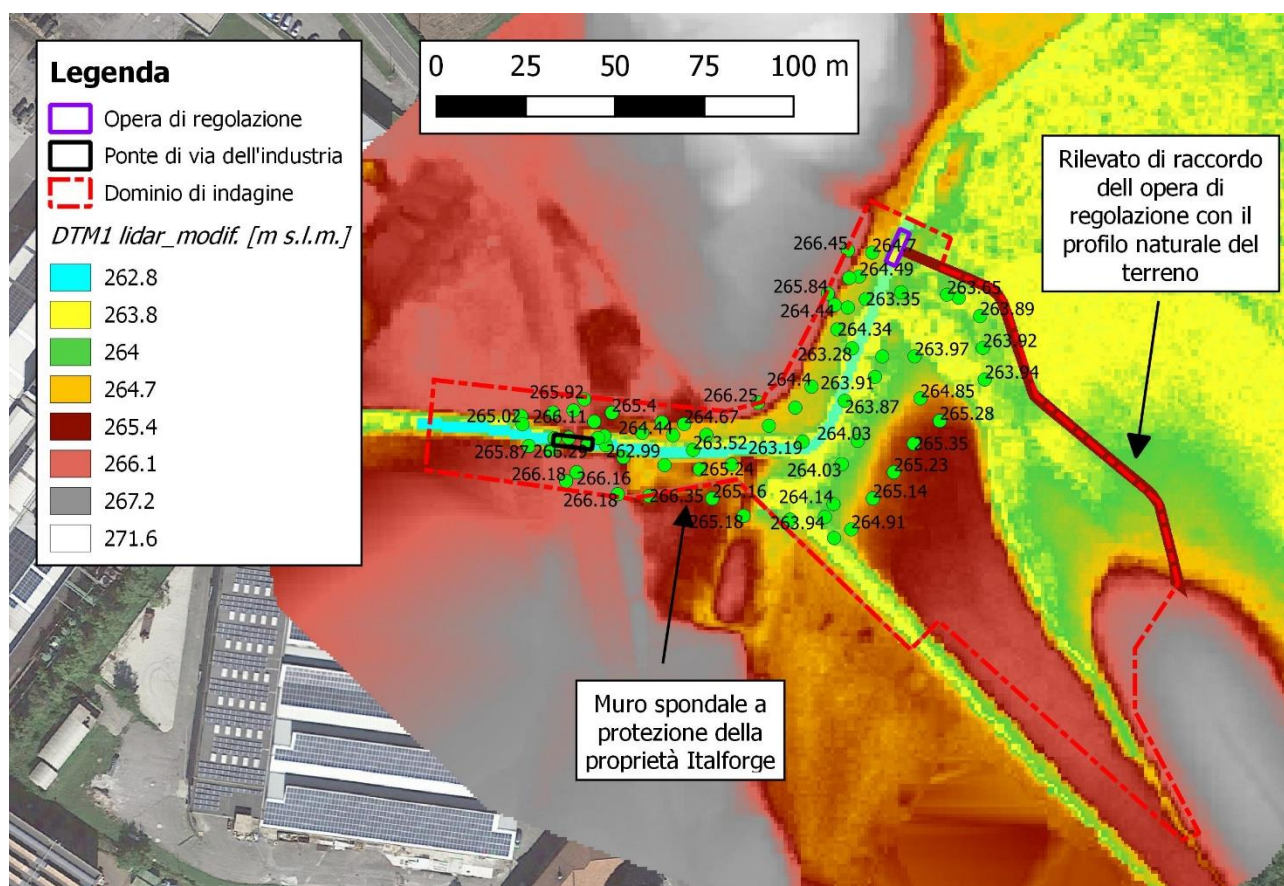


Figura 13: DTM integrato con i dati del rilievo topografico

#### 4.1.3. Modellazione idraulica

Definiti il dominio di indagine e il relativo modello digitale del terreno, si può ora realizzare il modello idraulico per l'analisi a collasso del rilevato nei pressi dell'opera di regolazione. Dovendo analizzare un fenomeno dinamico ed evolutivo, è necessaria un'analisi di moto vario. Osservando poi la conformazione del dominio di indagine, si nota come, in questo caso, il collasso possa essere adeguatamente studiato adottando un modello misto 1D/2D (rispettivamente il Fosso dei Pascoli e l'area golenale in sinistra idraulica).

Un modello di questo tipo ha una risoluzione necessariamente numerica, pertanto si è scelto di implementarlo utilizzando il software Hec-Ras, sviluppato dall'US Army Corp of Engineers (USACE). Note geometria (e mesh per le analisi 2D), caratteristiche idrauliche, condizioni iniziali e condizioni al contorno del sistema, nonché durata e passo temporale della simulazione, il programma risolve le equazioni di De Saint Venant del moto vario utilizzando il metodo dei volumi finiti e fornendo – per ciascuna sezione e/o cella, a secondo del tipo di analisi effettuata – i valori delle principali variabili di stato (tiranti idrici e velocità della corrente) per ogni istante di tempo simulato. Una descrizione esaustiva delle equazioni che governano il moto vario in condizioni mono e bidimensionale, nonché della metodologia risolutiva delle stesse adottata dal programma, viene fornita all'interno dell'allegato A alla presente relazione e, ancora più in dettaglio, all'interno del *Hydraulic Reference Manual* (Ver. 5.0) di Hec Ras.

Nei successivi paragrafi verranno illustrati in dettaglio i seguenti aspetti:

- geometria e proprietà idrauliche del modello;
- condizioni iniziali e condizioni al contorno;

- definizione della breccia per l'analisi a collasso;
- durata e passo di simulazione;
- risultati ottenuti.

#### 4.1.3.1. Geometria e proprietà idrauliche del modello

Come anticipato nei sottocapitoli precedenti, l'analisi di dam-break dell'opera di regolazione prevede lo studio del tratto del Fosso dei Pascoli a valle della stessa, fino a oltre il ponte di Via dell'industria, per una lunghezza complessiva di circa 180 m, approssimativamente coincidente con l'estensione del rilievo planoaltimetrico di dettaglio. Nonostante tale valore possa apparire ridotto, verrà dimostrato che gli effetti del collasso a valle del ponte di Via dell'industria si possono considerare trascurabili rispetto alle normali condizioni "di esercizio" durante un evento di piena.

L'analisi dell'altimetria del dominio di indagine ha portato alla scelta di un modello misto mono e bidimensionale per l'analisi a collasso del rilevato, sulla base delle seguenti considerazioni:

- il Fosso dei Pascoli, in qualità di unico ingresso e uscita dal sistema, costituisce la sede della gran parte del deflusso, e la sua modellazione in termini 1D consente un'analisi dei risultati più appropriata al caso in esame rispetto a una modellazione bidimensionale;
- lungo la sponda destra la strada campestre di accesso alla Piana dei Pascoli segue parallelamente il corso d'acqua ad una quota di circa 1.5 m superiore rispetto al fondo alveo, fungendo da golena destra all'interno del modello monodimensionale;
- la sponda sinistra presenta invece un'area di espansione che si estende per circa 100 metri prima che il terreno raggiunga la quota di coronamento dei rilevati arginali, oltre a un piccolo impluvio che raccoglie i deflussi provenienti da Sud. In questo caso, si è scelto di modellare l'intera area come un area 2D, connessa al Fosso dei Pascoli mediante un apposito sfioratore laterale posto al termine della golena sinistra dell'elemento monodimensionale (golena larga circa 12 metri e tracciata seguendo l'orografia del terreno).

La geometria del modello costruito in Hec-Ras viene illustrata in *Figura 14*, e di seguito se ne elencano tutte le principali componenti e le relative proprietà:



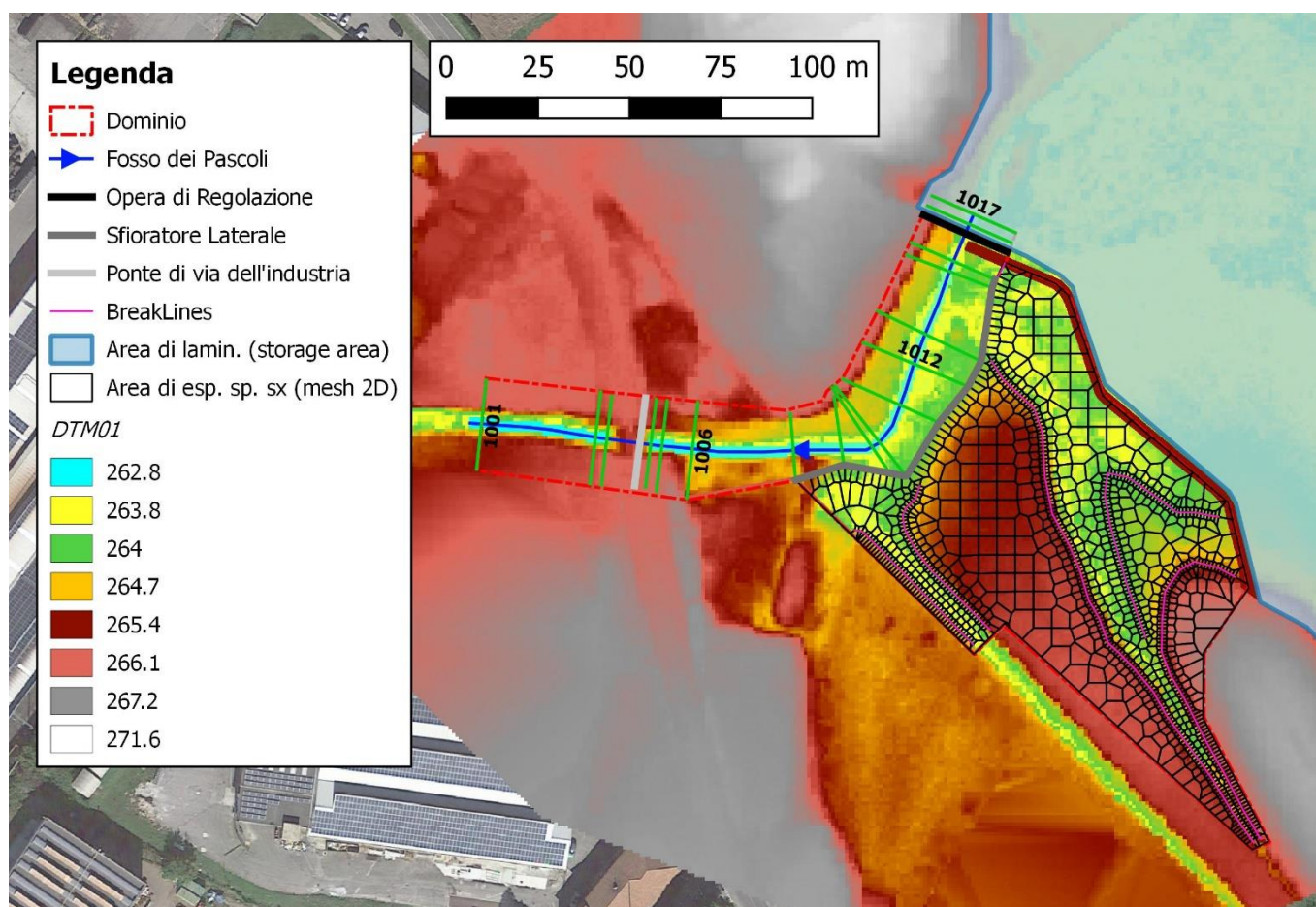


Figura 14: schematizzazione della geometria del modello idraulico dell'opera di regolazione in Hec-Ras

- corso d'acqua Fosso dei Pascoli: elemento 1D di tipo "river", lungo circa 180 metri e suddiviso in 17 sezioni trasversali (1017 – 1001 da monte verso valle, es. Figura 15), a loro volta interpolate fino ad ottenere una distanza non superiore a 3 metri tra l'una e l'altra. Per il coefficiente di scabrezza di Manning si mantiene il valore assunto durante la progettazione definitiva, pari a  $0.07 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  per fondo alveo e aree golenali;

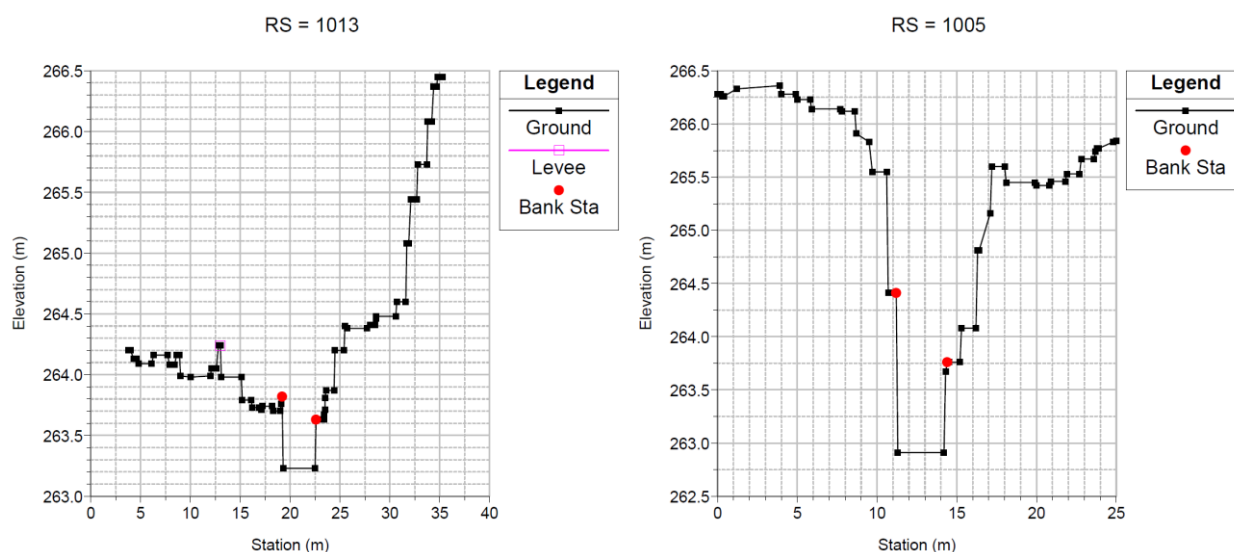
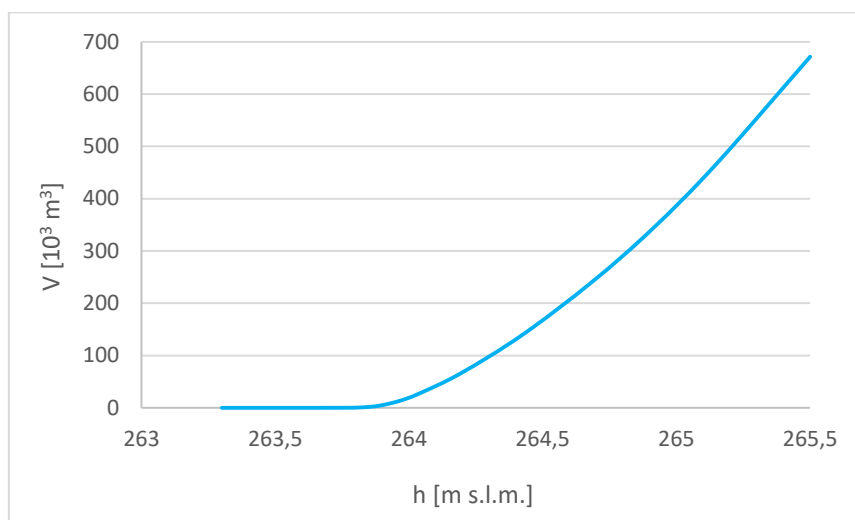


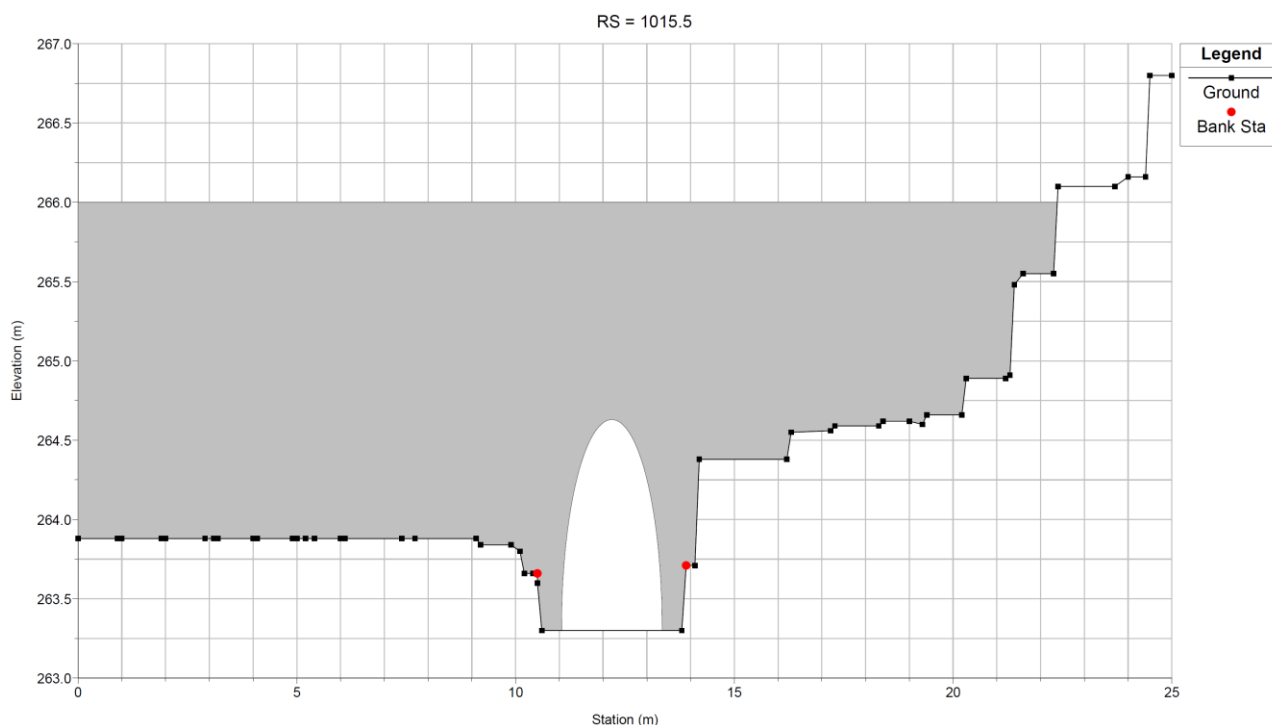
Figura 15: sezioni tipo del modello del Fosso dei Pascoli

- area di laminazione della Piana dei Pascoli: elemento 1D di tipo "storage area", è di fatto un serbatoio a cui viene assegnata la relazione tirante idrico – volume propria dell'area di laminazione, ricavata dal DTM (Figura 16). È connessa al corso d'acqua tramite la sezione 1017, che assume lo stesso tirante idrico del serbatoio ad ogni istante di tempo;



**Figura 16:** curva d'invaso dell'area di laminazione

- opera di regolazione: elemento 1D di tipo "inline structure", situato tra le sezioni 1016 e 1015 (vista da monte in Figura 17). La bocca tarata viene modellata come elemento "culvert", secondo la geometria del pancone in acciaio posto all'imbocco e descritto in precedenza. Le caratteristiche della breccia sono illustrate nel relativo paragrafo;



**Figura 17:** vista di monte dell'opera di regolazione nel modello in Hec-Ras

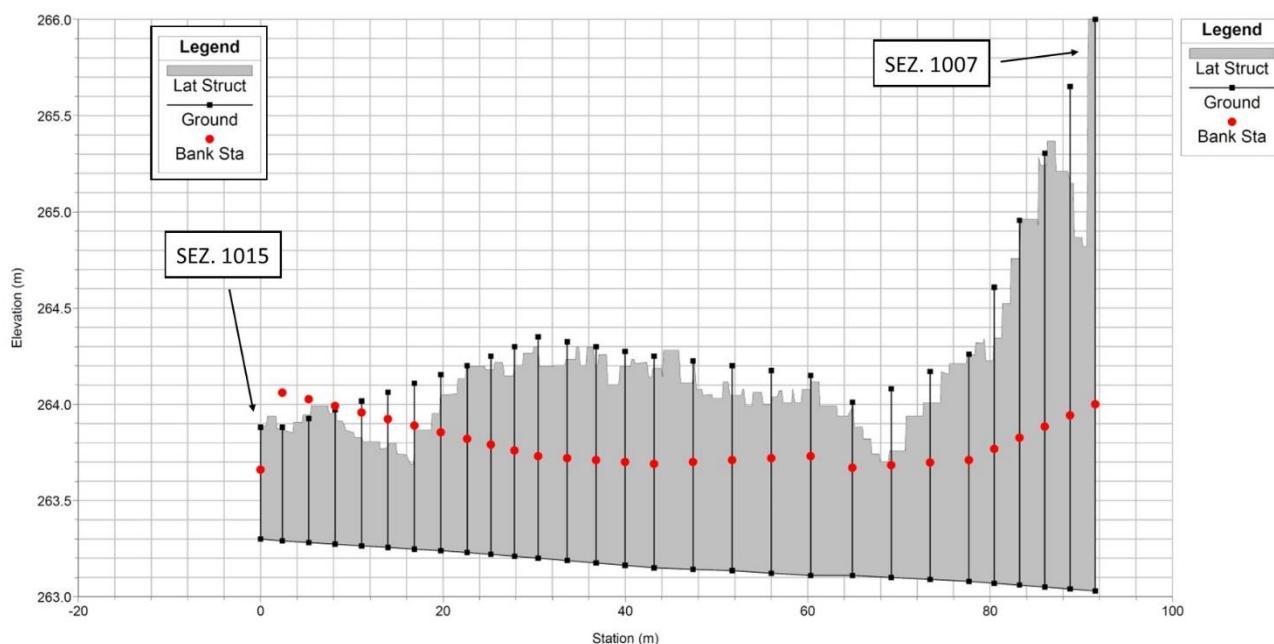
Le caratteristiche idrauliche della bocca tarata sono specificate in *Tabella 1*:

DATI CULVERT	
Forma	Arco
W [m]	2.3
H [m]	1.33
L [m]	10
C <sub>en</sub>	0.5
C <sub>ex</sub>	1
n [m <sup>1/3</sup> /s]	0.013
Z <sub>inv up</sub> [m s.l.m.]	263.3
Z <sub>inv down</sub> [m s.l.m.]	263.3

**Tabella 1:** caratteristiche dell'elemento culvert che rappresenta l'opera di regolazione

Dove W [m] e H [m] sono rispettivamente la larghezza alla base e l'altezza massima dell'intradosso dell'arco; L [m] è la lunghezza dell'intubamento; C<sub>en</sub> e C<sub>ex</sub> sono i coefficienti necessari alla stima delle perdite di carico concentrate all'ingresso e all'uscita dell'opera; n [m<sup>1/3</sup>/s] è il coefficiente di scabrezza di Manning; Z<sub>inv up</sub> [m s.l.m.] e Z<sub>inv down</sub> [m s.l.m.] sono le quote di fondo alveo a monte e a valle dell'opera di regolazione.

- sfiatore laterale in golena sx: elemento di connessione 1D/2D tra il Fosso dei Pascoli e l'area di espansione posta in sinistra idraulica. Non è una struttura fisicamente esistente, ma segue il profilo orografico del terreno come indicato in *Figura 18*.



**Figura 18:** rappresentazione dello sfiatore laterale fittizio che costituisce l'elemento di connessione tra il Fosso dei Pascoli e l'area 2D in sinistra idraulica



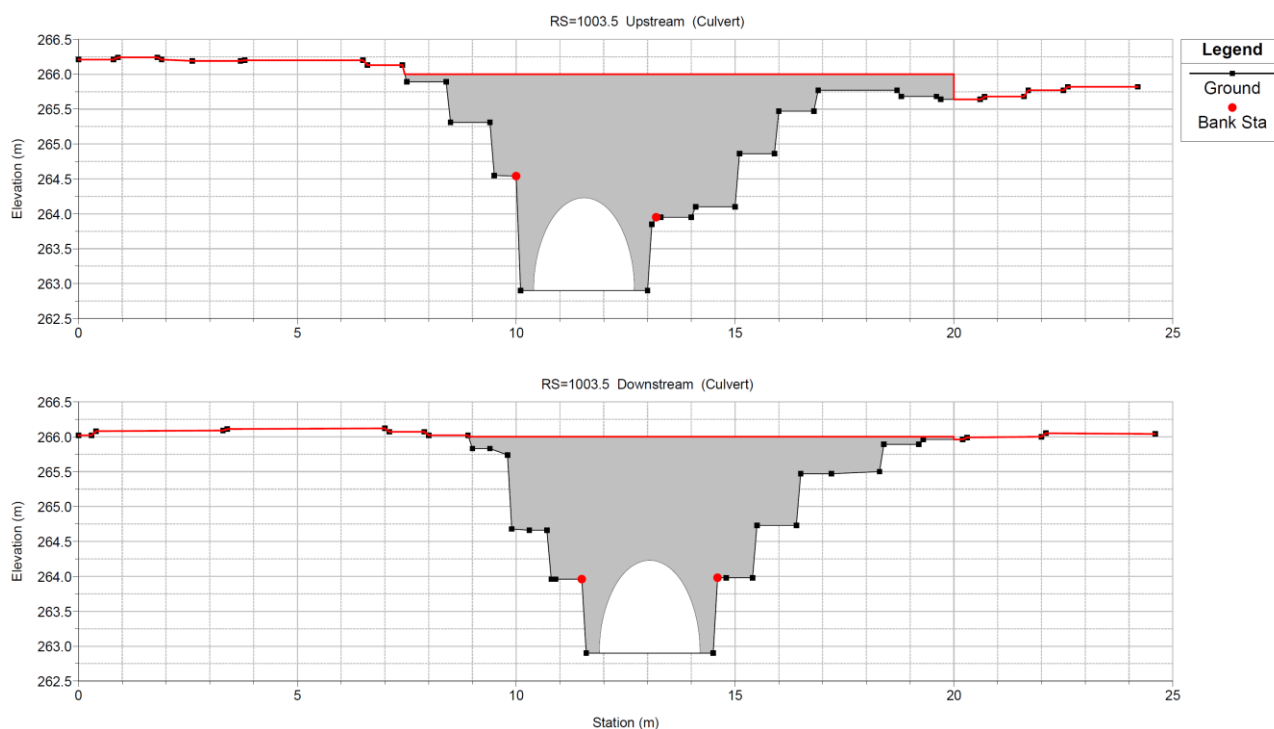
Dove *Lat Struct* rappresenta la quota di “sfioro” del terreno golenale e *Ground* la quota di fondo dell’alveo inciso del Fosso dei Pascoli.

Lungo complessivamente 91 m, il valore del coefficiente di efflusso (0.2) è stato scelto sulla base dei valori contenuti in *Tabella 2*, tratta dal *2D Modeling User’s Manual* di Hec-Ras (Ver. 5.0).

What is being modeled with the Lateral Structure	Description	Range of Weir Coefficients
Non elevated overbank terrain. Lat Structure not elevated above ground	Overland flow escaping the main river.	<b>0.2 to 0.5</b> SI Units: 0.11 to 0.28

**Tabella 2:** valore del coefficiente di efflusso da assegnare allo sfioratore laterale

- ponte di Via dell’industria: elemento 1D di tipo “culvert”, realizzato con caratteristiche geometriche e idrauliche identiche all’opera di regolazione, eccezion fatta per la lunghezza (11 m anziché 10 m) e la quota di fondo alveo (262.9 m s.l.m. a monte e a valle dell’opera). Si riporta in *Figura 19* la vista di monte e di valle della sezione trasversale, posta tra le sezioni 1006 e 1005.



**Figura 19:** vista di monte e di valle del ponte di Via dell’industria all’interno del modello in Hec-Ras

- area di espansione in sx idraulica: elemento 2D di tipo “2D Flow Area”, connesso al Fosso dei Pascoli attraverso lo sfioratore laterale precedentemente descritto. La modellazione è fatta utilizzando una mesh non strutturata da circa 1500 elementi (*Figura 14*), aventi di base forma quadrata di lato 5 m, ridotta progressivamente a 1 m in corrispondenza delle break lines, tracciate per meglio adattare la mesh all’orografia del terreno. A tutti gli elementi è assegnato un valore di scabrezza di Manning pari a  $0.07 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ .

#### 4.1.3.2. Condizioni al contorno e condizioni iniziali

Trattandosi di un sistema con un unico ingresso e uscita in condizioni 1D, le uniche condizioni al contorno da imporre sono all'inizio e alla fine del Fosso dei Pascoli (rispettivamente sez. 1017 e 1001), scelte secondo i seguenti criteri:

- a valle, nella già citata ipotesi in cui la Bevera di Molteno non causa rigurgito in direzione del ponte di Via dell'industria, si ipotizza una condizione di moto uniforme (*normal depth* in Hec-Ras) con pendenza del fondo pari alla pendenza media del Fosso dei Pascoli lungo il tratto indagato (0.3%);
- a monte, una condizione al contorno non è in realtà necessaria in quanto implicitamente fornita dalla legge altezza – volume dell'elemento serbatoio rappresentante l'area di laminazione. Tuttavia, si è comunque deciso di inserire un idrogramma in ingresso all'area di laminazione pari alla portata in uscita dalla stessa per l'intervallo di tempo compreso tra l'avvio della simulazione e l'inizio del processo di apertura della breccia (fissato arbitrariamente un'ora dopo). L'obiettivo è quello di mantenere il massimo riempimento della vasca mentre si ottiene un profilo di piena pre-collasso che possa essere confrontato con il risultato a Dam-Break avvenuto. L'idrogramma ha portata naturalmente costante e fissata pari a  $4.88 \text{ m}^3/\text{s}$  a seguito di un processo di tipo trial-and-error, e durata pari a un'ora.

Dovendo realizzare un'analisi di moto vario, diventa necessario definire anche le condizioni iniziali del modello, in particolare:

- il tirante idrico interno all'area di laminazione, fissato in termini assoluti alla quota di coronamento dei rilevati arginali (265.43 m s.l.m.);
- la portata interna al Fosso dei Pascoli, che come anticipato nelle condizioni al contorno è stata determinata pari a  $4.88 \text{ m}^3/\text{s}$  iterando le simulazioni fino a raggiungere la convergenza con la portata in uscita dal serbatoio;
- il tirante idrico interno all'area di espansione bidimensionale in sinistra idraulica, anch'esso determinato in maniera iterativa fino a convergere con il tirante idrico del Fosso dei Pascoli, alla quota di 265.07 m s.l.m.

Oss. da tale valore – solo 35 cm più basso rispetto tirante interno all'area di laminazione – si può già intuire un'evidenza che verrà illustrata nei risultati, ovvero l'importante rigurgito del profilo di corrente lenta a partire da valle fino all'opera di regolazione anche in condizioni "indisturbate" rispetto alla Bevera di Molteno;

#### 4.1.3.3. Caratteristiche della breccia

La stima delle caratteristiche (modalità, geometria, tempo di formazione) della breccia che porta al (parziale) collasso di una struttura di contenimento di un invaso è un aspetto tanto cruciale quanto incerto nell'ambito di un'analisi di Dam-Break. Esse dipendono infatti, oltreché dalla conformazione dell'invaso e delle opere delle strutture di ritenuta (geometria, volume invasato, materiali utilizzati, tiranti idrici raggiunti, etc.), anche da condizioni – soprattutto in fase di innesco – difficilmente prevedibili a priori e associate a criticità localizzate dovute a un ventaglio di possibili cause quali difetti costruttivi, deterioramento nel tempo, mancata manutenzione, etc.

La stima dei parametri della breccia può essere fatta adottando modalità differenti, a seconda dei dati a disposizione e del problema affrontato. In particolare, è possibile:

- confrontare il proprio invaso con i dati storici provenienti da dighe collassate in passato di caratteristiche similari;
- sfruttare equazioni regressive prodotte dall'analisi dei dati di collasso di invasi di varia natura;
- utilizzare modelli fisicamente basati che stimolino le proprietà della breccia sulla base del confronto tra la velocità (o lo sforzo tangenziale) della corrente e le caratteristiche di erodibilità del materiale costituente l'opera di ritenuta;

Prendendo come riferimento il testo *Using Hec-Ras for Dam Break Studies*, prodotto dall'USACE nel 2014 e poi riportato all'interno del *2D Modeling User's Manual*, gli scriventi condividono il principio espresso nell'elaborato secondo cui l'approccio più solido alla modellazione non risieda tanto nella scelta di un metodo piuttosto che un altro (scelta peraltro spesso condizionata dai dati a disposizione), quanto in un'analisi "ad ampio spettro" dell'intero processo di dam-break in cui, una volta individuati tutti i potenziali meccanismi di collasso dell'opera, si proceda ad una prima stima ragionevole della breccia, seguita da un'analisi di sensitività dei suoi maggiori parametri al fine di verificare la suscettibilità del risultato finale al variare degli stessi.

Per quanto riguarda il caso in esame, si parte dalla considerazione preliminare per cui, anche nel caso più gravoso, il tirante idrico nell'area di laminazione sarebbe di circa 2 m rispetto al fondo alveo e 1.5 m lungo il resto del profilo del rilevato. Considerando, come già accennato, che il rigurgito del profilo idrico da valle lungo il Fosso dei Pascoli, anche nella condizione più sfavorevole, ridurrebbe il dislivello del pelo libero tra monte e valle dell'opera di regolazione a poche decine di centimetri, è verosimile attendersi, dal punto di vista idraulico, conseguenze di moderata entità a seguito di un'eventuale collasso, indipendentemente dalle dimensioni della breccia. Ciononostante, per la determinazione della stessa si è proceduto nel modo seguente:

- 1) identificazione e collocazione spaziale del probabile meccanismo di collasso. Pur essendo i rilevati arginali realizzati in terra, l'ipotesi di collasso per sormonto (overtopping) viene esclusa a priori in quanto al superamento di questa quota (per cui sarebbe comunque necessario un tempo di ritorno superiore ai 100 anni secondo il modello sviluppato in fase di progettazione definitiva) tutti i rilevati arginali si attiverebbero come sfioratori di emergenza (oltre 1 km di lunghezza), rendendo improbabile la formazione di un tirante idrico apprezzabile al di sopra della quota di coronamento. Rimane dunque la possibilità che si attivi un meccanismo di erosione interna (piping), sfruttando un piano di debolezza creatosi all'interno del rilevato arginale che favorisca la progressiva infiltrazione d'acqua. La condizione peggiore ipotizzabile è che ciò accada lungo la sponda sinistra del fosso dei pascoli, dove il tirante idrico raggiunge le quote massime rispetto al fondo, e in particolare in corrispondenza dell'interfaccia tra la struttura della bocca tarata, in cls, e il rilevato in terra.
- 2) stima delle caratteristiche della breccia. Per la determinazione dei parametri caratterizzanti la breccia (larghezza media,  $B_{ave}$  [m]; tempo di formazione,  $t_f$  [h]) si sono utilizzate tre tra le formule regressive proposte all'interno del documento *Using Hec-Ras for Dam Break Studies*, tutte quante ottenute a partire da dati di collassi di opere di ritenuta di piccole-medie dimensioni realizzate con terreni a bassa permeabilità. La sintesi delle formule utilizzate e dei valori calcolati per il caso in esame sono sintetizzate rispettivamente in *Tabella 3* e *Tabella 4*.

SET DI EQUAZIONI	INCOGNITE		PARAMETRI			VARIABILI	
	$B_{ave}$ [m]	$t_F$ [h]	$K_0$ [/]	$C_b$ [/]	$S$ [m/m]	$V_w$ [m <sup>3</sup> ]	$h_b$ [m]
Von Thun & Gillette	$2.5h_w + C_b$	$B_{ave}/(4h_w)$		6.1	0.4	630'000	1.55
Froelich (1995)	$0.1803K_0V_w^{0.32}h_b^{0.19}$	$0.00254V_w^{0.53}h_b^{-0.9}$	1		0.9		
Froelich (2008)	$0.27K_0V_w^{0.32}h_b^{0.04}$	$63.2(V_w/(gh_b^2))^{1/2}$	1		0.7		

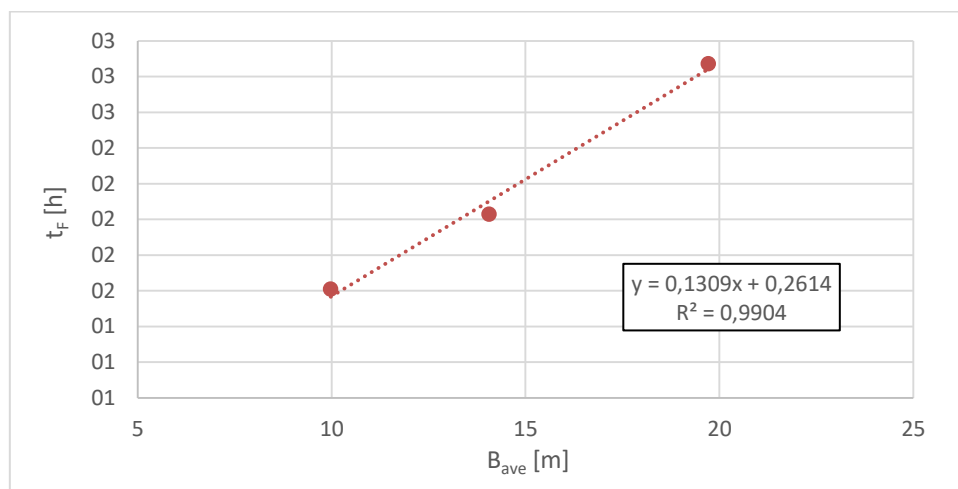
**Tabella 3:** formule regressive utilizzate per il calcolo dei parametri della breccia

SET DI EQUAZIONI	RISULTATI	
	$B_{ave}$ [m]	$t_F$ [h]
Von Thun & Gillette	9.98	1.61
Froelich (1995)	14.06	2.03
Froelich (2008)	19.71	2.87

**Tabella 4:** valori dei parametri della breccia per l'opera di regolazione ottenuti dalle formule regressive

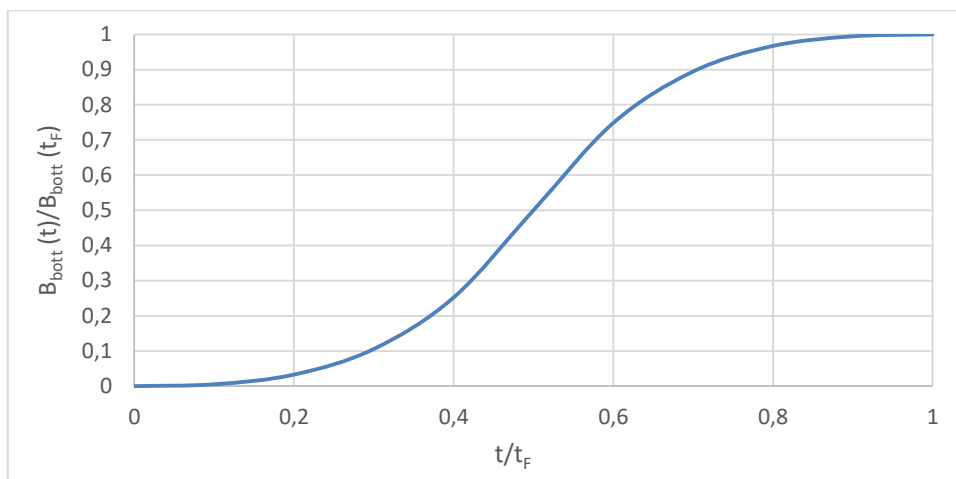
dove  $K_0$  e  $C_b$  sono coefficienti adimensionali;  $S$  [m/m] la pendenza delle sponde della breccia completamente formata;  $V_w$  [m<sup>3</sup>] il volume invasato e  $h_b$  [m] il tirante idrico interno all'area di laminazione all'istante di apertura della breccia.

Dai risultati ottenuti, tra loro abbastanza consistenti, si intuisce una correlazione lineare tra larghezza media e tempo di formazione della breccia, esplicitata nel grafico in *Figura 20*.



**Figura 20:** correlazione tra larghezza media finale e tempo di formazione della breccia

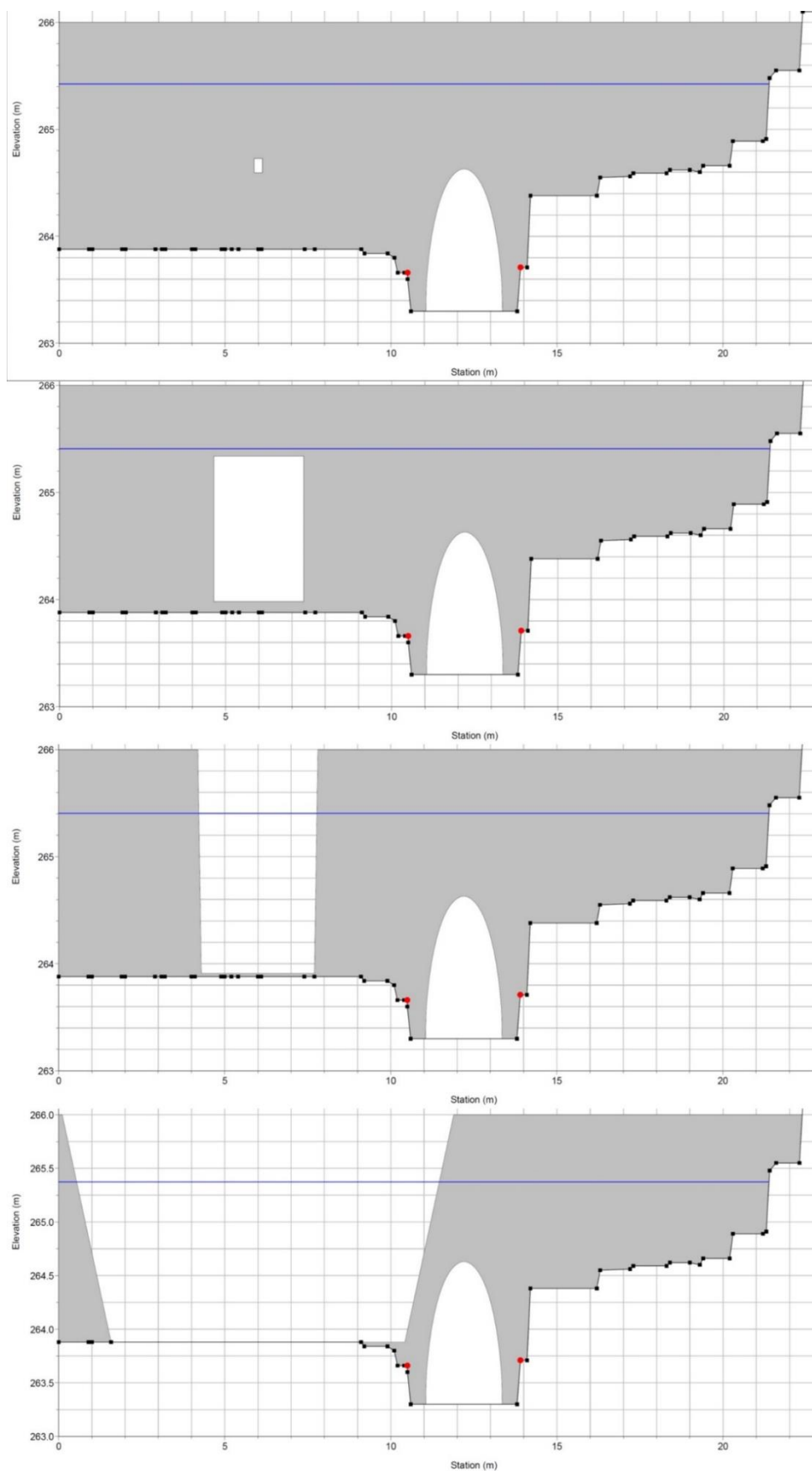
Si è dunque deciso di implementare nel modello 3 diverse casistiche (denominate  $B_1$ ,  $B_2$  e  $B_3$ ), aventi valori di  $B_{ave}$  pari rispettivamente a 10, 15 e 20 m e i relativi valori di  $t_F$  calcolati mediante la relazione di cui sopra, pari rispettivamente a 1.57, 2.22 e 2.8 ore. Il valore di pendenza delle sponde  $S$  viene fissato a un valore intermedio di 0.7 m/m per tutti e tre i casi, il coefficiente di efflusso a battente  $C_{or}$  a 0.55, e la relazione tra sviluppo della geometria della breccia (rappresentata dalla sua larghezza al fondo,  $B_{bott}$ ) e il tempo di formazione segue la relazione sinusoidale del grafico in *Figura 21*:



**Figura 21:** relazione di avanzamento della breccia rispetto al rispettivo tempo di formazione

Hec-Ras assegna di default il tasso di espansione orizzontale anche allo sviluppo verticale, effettuando il passaggio da luce a battente a sfioro a stramazzo ( $C_{weir}$  pari a 1.44) nel momento in cui l'intradosso della breccia raggiunge la quota del pelo libero di monte. Nel caso specifico, il rapporto del tasso di espansione verticale/orizzontale è stato portato a 0.5 a seguito di un processo di ottimizzazione per tentativi, alla ricerca della massima portata di picco in uscita.

Si riportano in *Figura 22* le fasi principali di sviluppo della breccia nella casistica B<sub>1</sub>.



**Figura 22:** fasi di formazione della breccia lungo l'opera di regolazione



A conclusione della spiegazione sulle modalità di stima della breccia, si fa presente che, per il caso in esame, vengono fatte due ipotesi preliminari a favore di sicurezza:

- l'invase è trattato alla stregua di un invase permanente, quando invece il suo tempo di svuotamento è al più dell'ordine dei pochi giorni, il che rende naturalmente più difficoltosa la formazione di una breccia all'interno di un rilevato caratterizzato da valori di conducibilità idraulica modesta, a meno della presenza di preesistenti percorsi di filtrazione preferenziali;
- si è scelto di modellare la breccia in prossimità della bocca tarata (nei casi di  $B_{ave}$  pari a 15 e 20 m breccia e bocca tarata si uniscono), quando nella realtà le pareti d'ala in cemento armato a sostegno della struttura ne bloccherebbero l'avanzata, per le seguenti ragioni:
  - a livello numerico, mantenere la breccia nella frazione monodimensionale rende il modello sensibilmente più snello e stabile;
  - dal punto di vista idraulico, si valuta in questo modo anche il caso catastrofico di collasso dell'intera struttura.

#### 4.1.3.4. Durata della simulazione e passo temporale

La durata della simulazione deve essere sufficientemente grande da garantire il decorso del fenomeno analizzato (in questo caso il dam-break), fino al raggiungimento di una nuova condizione di equilibrio. Come spesso accade, anche in questo caso si è proceduto per tentativi tenendo in considerazione i valori dei tempi di formazione della breccia, e giungendo a una durata della simulazione di 6 ore.

Il passo temporale ( $\Delta t$  [s]), nelle analisi di moto vario, si determina solitamente mediante la regola di Courant:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{v_w}$$

dove  $\Delta x$  [m] è la distanza media tra sezione (1D) o la dimensione lineare media delle celle (2D) e  $v_w$  [m/s] è la celerità di propagazione dell'onda, stimabile in prima approssimazione (limite superiore) come 1.5 volte la massima velocità media della corrente in una data sezione/cella.

Considerando un  $\Delta x$  mediamente pari a 3 metri e un valore massimo della velocità media intorno a 1 m/s si ottiene un valore di  $\Delta t$  inferiore a 2 secondi, consistente con il limite inferiore del range di passo temporale consigliato per casi di Dam-Break (1-60 secondi, in questo caso il valore è basso poiché le sezioni sono molto ravvicinate vista la scala del problema). Verificato che il modello fosse stabile in tutte le analisi svolte, si è stabilito il passo temporale di 1 secondo.

#### 4.1.3.5. Risultati ottenuti

La presentazione dei risultati è organizzata in modo da mettere in risalto gli aspetti più importanti delle analisi condotte, e in particolare è suddivisa nei seguenti punti:

- profilo longitudinale del Fosso dei Pascoli in condizione pre, durante e post collasso;
- idrogramma in uscita dall'opera di regolazione (sez. 1015);
- idrogramma dello sfioratore laterale fittizio tra Fosso dei Pascoli e area 2D in sx idraulica;
- rappresentazione planimetrica della distribuzione di tiranti e veloci pre, durante e post collasso.

#### Profilo longitudinale di piena

Si mostrano di seguito i profili longitudinali di corrente (*Figura 23 - Figura 26*) per le tre casistiche  $B_1$ ,  $B_2$  e  $B_3$  – oltre a un quarta casistica  $B_0$  (caratt.  $B_{ave} = 5$  m,  $t_F = 0.92$  h), estrapolata dalla curva in *Figura 20* con il solo

scopo di individuare la situazione maggiormente severa – ai seguenti istanti di tempo [hhmm]: 0010; 0135; 0200; 0600.

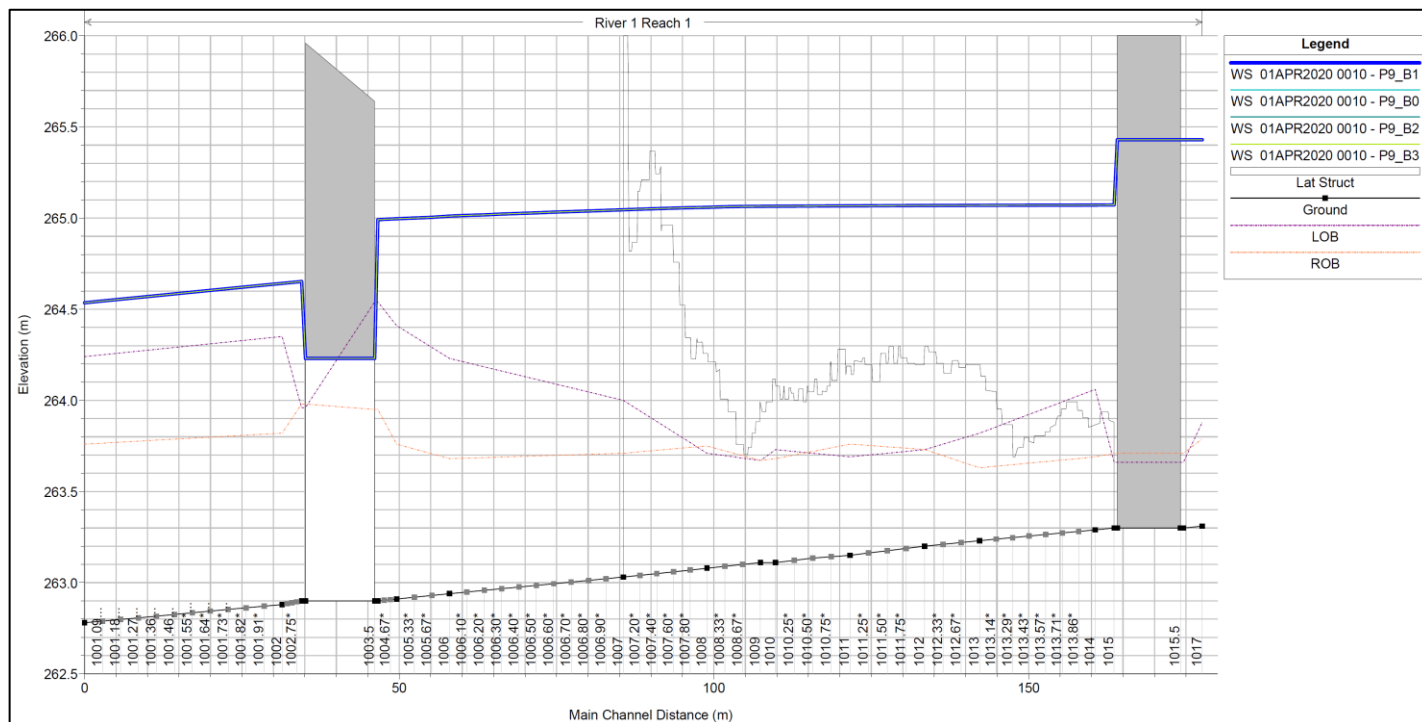


Figura 23: profilo longitudinale del Fosso dei Pascoli,  $t$  [hhmm] = 0010

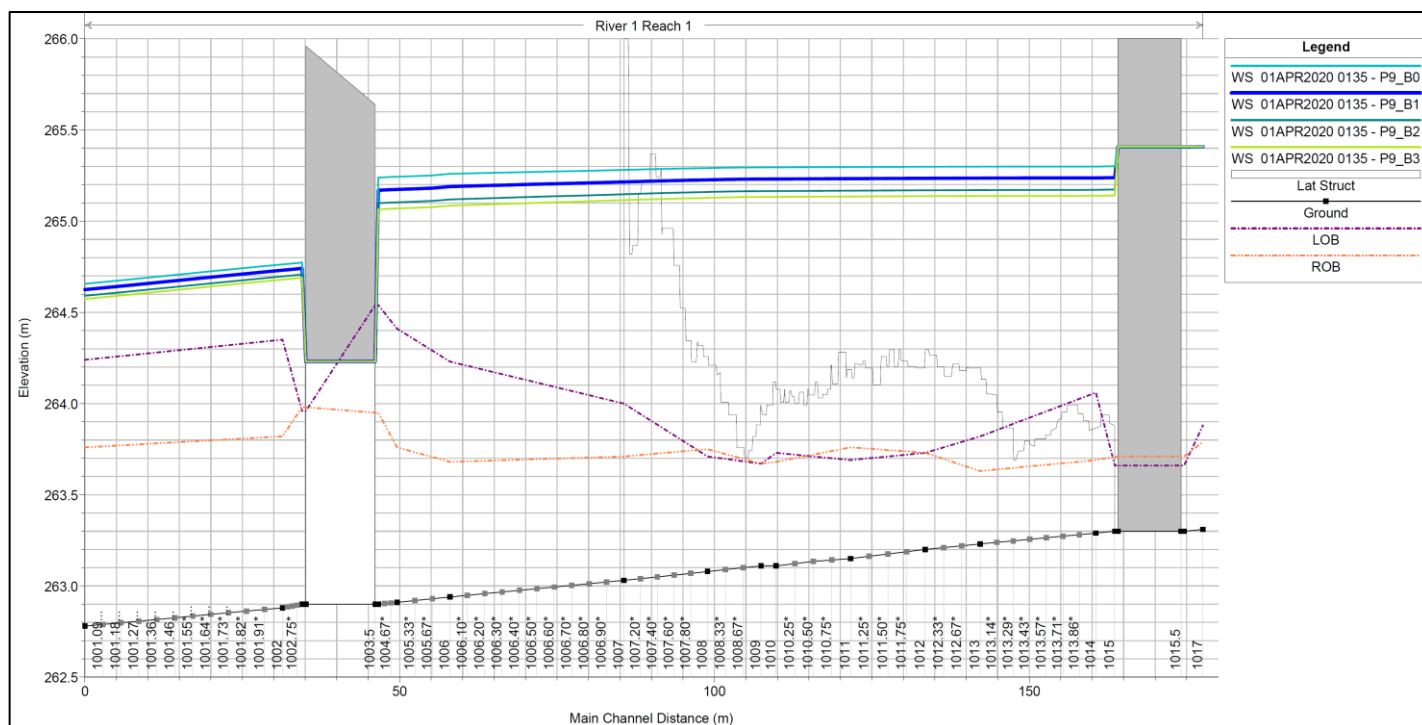


Figura 24: profilo longitudinale del Fosso dei Pascoli,  $t$  [hhmm] = 0135

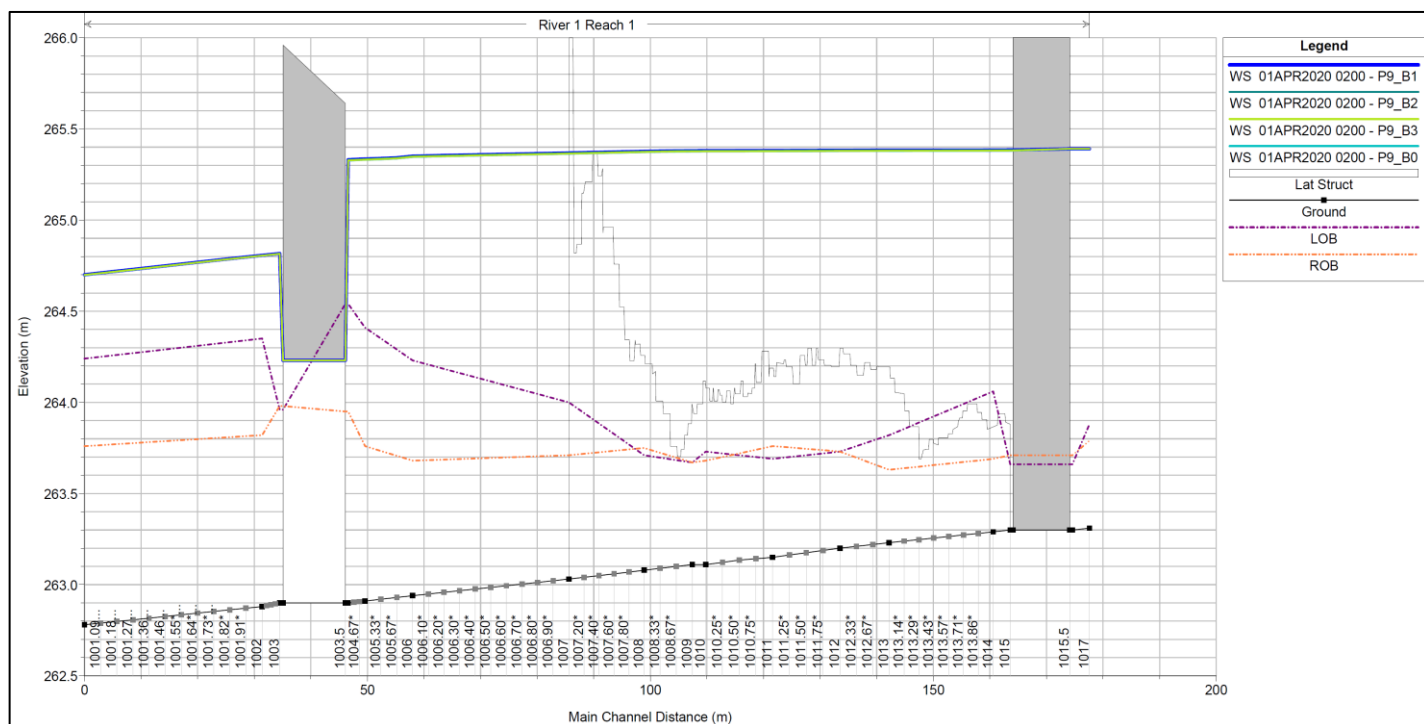


Figura 25: profilo longitudinale del Fosso dei Pascoli,  $t$  [hhmm] = 0200

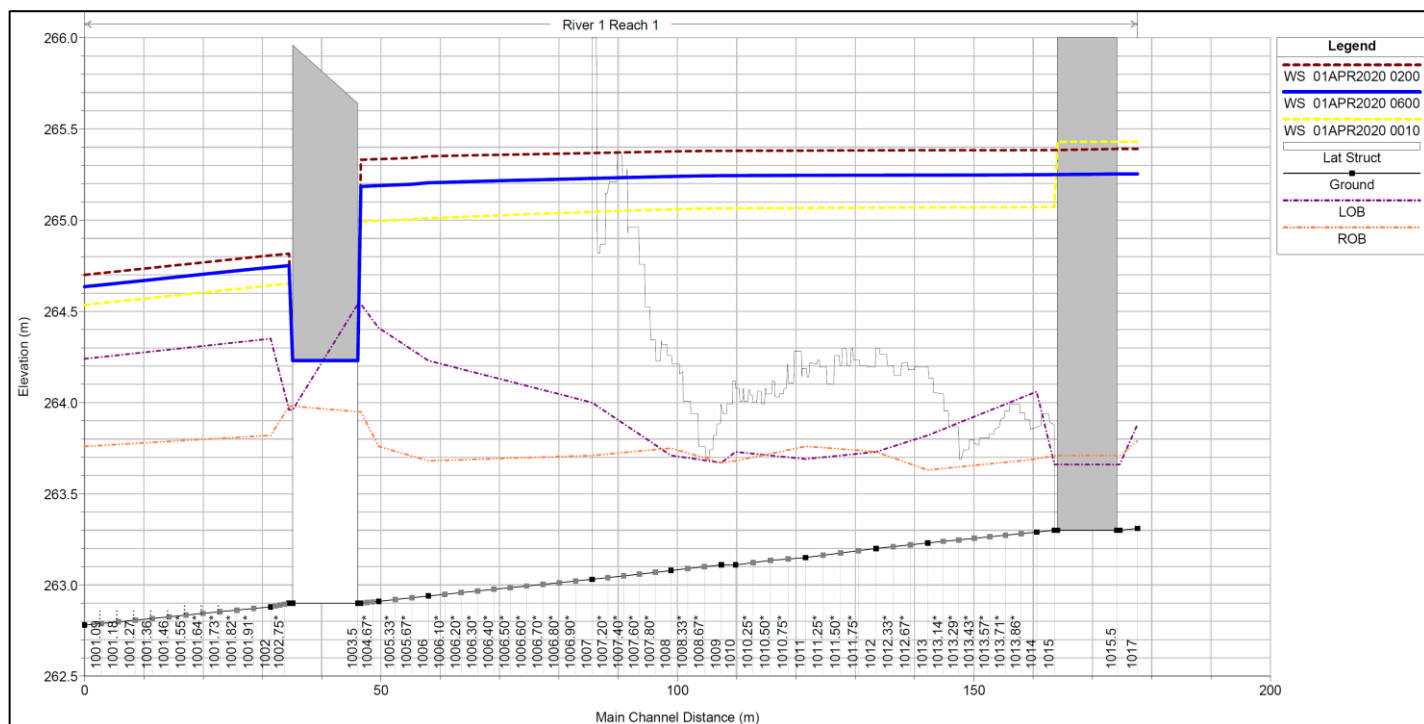


Figura 26: profilo longitudinale del Fosso dei Pascoli,  $t$  [hhmm] = 0600

Oss. all'interno delle varie immagini, le due strutture in grigio rappresentano l'opera di regolazione (a monte, sez.1015.5) e l'attraversamento di via dell'industria (a valle, sez. 1003.5); il profilo vuoto denominato "Lat Struct" rappresenta il profilo dello sfioratore laterale fittizio utilizzato per connettere il Fosso dei Pascoli

all'area 2D in sinistra idraulica; le linee denominate "LOB" e "ROB" rappresentano il limite delle aree golenali sinistra e destra lungo il corso d'acqua.

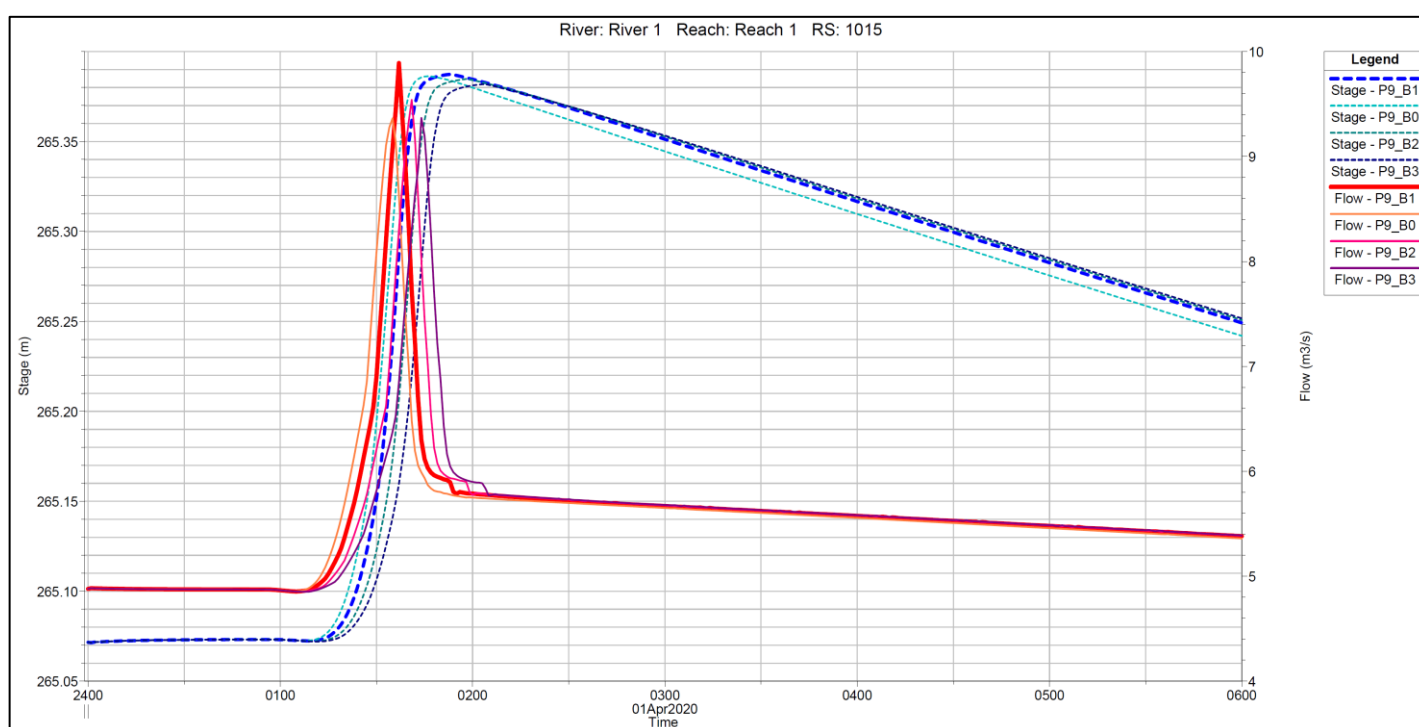
Dall'osservazione dei profili idrici emergono le seguenti considerazioni:

- l'istante 0010 rappresenta la situazione pre-collasso: si nota immediatamente come, anche in assenza di una forzante sulla condizione di valle dovuta a una situazione di Bevera di Molteno "alta", all'interno del Fosso dei Pascoli si instaura un profilo di corrente fortemente lenta – dovuto alla combinazione di pendenze molto basse e valori di scabrezza relativamente elevati – che rigurgita fino all'opera di regolazione. Le perdite di carico di entità maggiore sono quelle concentrate che si hanno in corrispondenza delle due strutture, funzione dei valori di velocità della corrente in ingresso e dei coefficienti  $C_{en}$  e  $C_{ex}$  indicati in *Tabella 1*, i cui valori sono stati assegnati sulla base di quanto tipicamente indicato in letteratura per casistiche di questo tipo (tombinatura con luci a spigolo vivo, cfr. *Hydraulic Design of Highway Culverts*, 3rd edition, 2012). Si nota in ogni caso che la differenza di tirante tra monte e valle dell'opera di regolazione è di circa 35 cm, per cui non è verosimile aspettarsi delle onde di piena significative a seguito del parziale collasso della struttura di ritenuta;
- l'istante 0135 è stato scelto in quanto ben rappresentativo del processo di formazione dell'onda di piena – che ricordiamo avere tempi differenti nelle quattro casistiche considerate – a seguito dell'inizio del processo di dam-break. In tutte le casistiche si può osservare un processo di livellamento del profilo di corrente interno al Fosso dei Pascoli con il tirante idrico dell'area di laminazione, assistendo a una sorta di "espandimento" di quest'ultima fino al ponte di Via dell'industria. Relativamente all'analisi del transitorio, si può facilmente notare come le 4 situazioni non differiscano tra loro di più di 20 cm in termini di tiranti idrici in nessun punto del corso d'acqua;
- l'istante 0200 ben rappresenta la fine del transitorio: per tutti e quattro i casi la traslazione dell'onda di piena dall'opera di regolazione al ponte di Via dell'industria è conclusa o prossima alla conclusione, e a monte di quest'ultimo si raggiungono i massimi valori del tirante idrico: circa 265.35 m s.l.m., essenzialmente il livello dell'area di laminazione al netto delle perdite distribuite lungo il percorso (scompare, di fatto, la perdita concentrata dovuta all'opera di regolazione);
- l'istante 0600 è l'istante finale della simulazione, e per esso si riporta il solo profilo B1 (il più severo dal punto di vista dell'onda prodotta, come verrà mostrato in seguito), messo a confronto con i rispettivi profili agli istanti 0010 (giallo) e 0200 (marrone). Dalla comparazione emerge chiaramente come, dopo aver raggiunto il massimo profilo all'istante 0200, l'area di laminazione "espansa" procede a svuotarsi esattamente come avrebbe fatto in assenza del collasso – si ricorda che le caratteristiche idrauliche dell'opera di regolazione e del ponte sono analoghe – andandosi via via ad avvicinare alla condizione iniziale. Si sottolinea infine come in corrispondenza della sezione di valle (sez. 1001) si mantenga sempre un profilo di moto uniforme con una differenza tra condizione iniziale e condizione finale di poco più di 10 cm, giustificando l'ipotesi iniziale di considerare trascurabili gli effetti del collasso ancora più a valle.

#### Idrogramma in uscita dall'opera di regolazione

Dopo aver analizzato gli effetti del dam-break dal punto di vista della variazione in termini di tiranti idrici prodotta lungo il Fosso dei Pascoli, si passa alla valutazione delle onde di piena prodotte, andando a osservare gli idrogrammi in uscita dall'opera di regolazione (sez. 1015). Dall'immagine in *Figura 27*, emergono le seguenti considerazioni:

- la portata "pre evento" risulta di poco inferiore ai 5 m<sup>3</sup>/s, in linea con il valore di portata massimo defluibile dal ponte di Via dell'industria in condizioni indisturbate ipotizzato nelle precedenti fasi della progettazione (molto superiore al valore effettivo di deflusso – quantificato in circa 1.5 m<sup>3</sup>/s nella progettazione definitiva – in condizioni di Bevera "alta");
- in termini di portate di picco, le 4 casistiche mostrano risultati tra loro molto consistenti (tutte comprese tra 9 e 10 m<sup>3</sup>/s, con un massimo di 9.85 m<sup>3</sup>/s per il caso B<sub>1</sub>, evidenziato in grassetto), dimostrando un generale bilanciamento nell'importanza delle dimensioni e dei tempi di formazione della breccia. In ogni caso, in termini quantitativi, l'aumento di portata prodotto è piuttosto ridotto, all'incirca uguale alla portata "di base" in assenza del collasso. La coda degli idrogrammi mostra portate in uscita più elevate rispetto alla condizione iniziale, dovute naturalmente alle mutate condizioni geometriche dell'opera di regolazione, tuttavia in progressivo abbassamento (al pari dei relativi tiranti idrici) a causa del progressivo svuotamento dell'area di laminazione di monte.



**Figura 27:** idrogrammi e tiranti idrici della sezione a valle dell'opera di regolazione

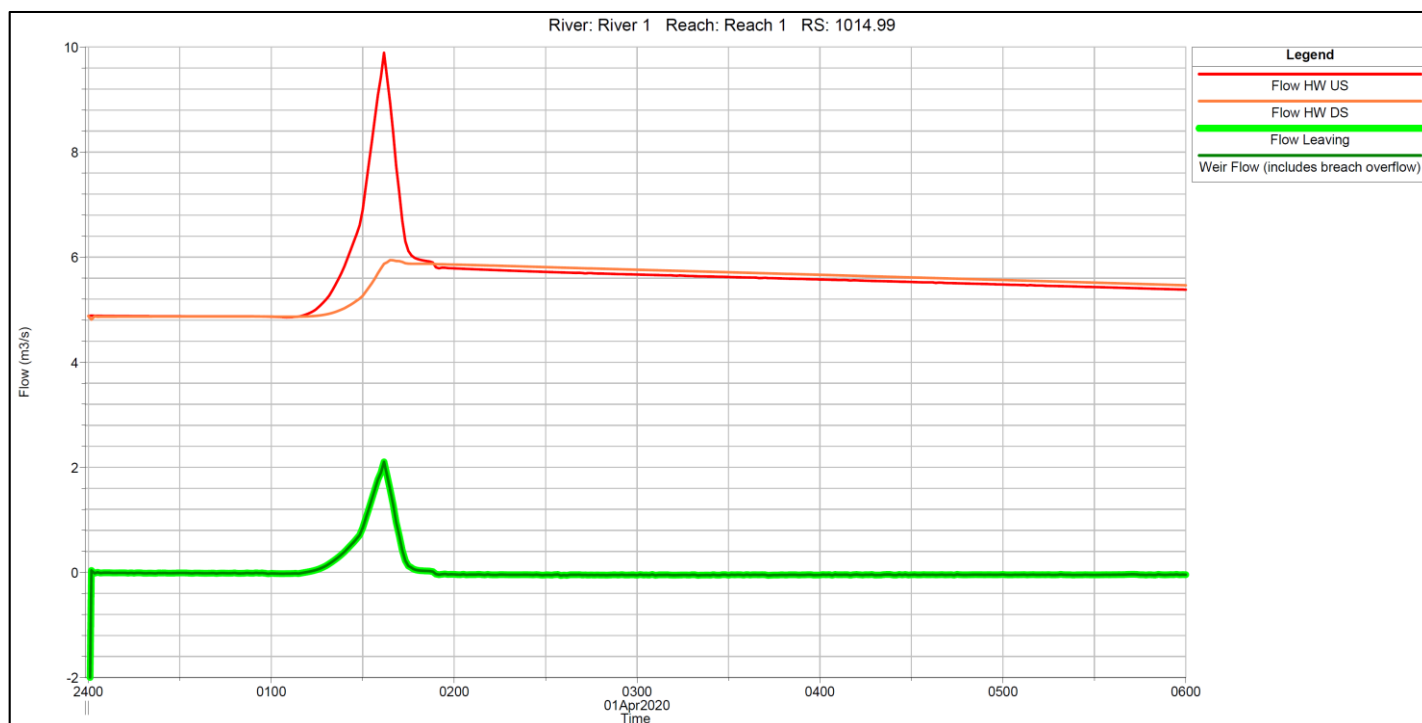
### Idrogramma dello sfioratore laterale

Il successivo aspetto rilevante da indagare è il funzionamento dello sfioratore laterale (RS 1014.99) che mette in comunicazione la golena sinistra del Fosso dei Pascoli con l'area di espansione – modellata come area 2D – presente in sinistra idraulica. Il grafico *Figura 28* mostra, per il solo caso B1 (il più severo tra i quattro studiati), l'andamento dell'idrogramma in corrispondenza dello sfioratore laterale (in verde e positivo se in ingresso all'area 2D), comparato agli idrogrammi delle sezioni di testa (1015, studiata al punto precedente) e di coda (1007) presenti nel Fosso dei Pascoli, in relazione allo sfioratore. Si traggono le seguenti conclusioni:

- l'onda di piena del Fosso dei Pascoli risulta fortemente smorzata tra l'inizio e la fine dello sfioratore laterale, risultando pressoché nulla in corrispondenza della sezione 1007;
- ciò è dovuto non solo al fisiologico "schiacciamento" dell'onda via via che ci si allontana dall'opera di regolazione collassata, ma anche alla quota rilevante di deflusso (circa il 40% per una portata di picco

superiore ai 2 m<sup>3</sup>/s) che dal Fosso dei Pascoli si trasferisce nell'area di espansione mediante lo sfioratore laterale;

- il volume accumulato all'interno di quest'ultima negli istanti successivi al collasso viene poi lentamente rilasciato nelle ore successive, come dimostrato dai valori di portata dello sfioratore durante la coda dell'evento (poche decine di l/s diretti verso il Fosso dei Pascoli) e il conseguente leggero incremento di portata nella sezione 1007 rispetto alla sezione 1015.



**Figura 28:** idrogramma in ingresso all'area 2D in sinistra idraulica tramite lo sfioratore laterale

#### Andamento planimetrico di tiranti idrici e velocità della corrente

Si mostrano infine gli andamenti planimetrici delle due variabili di maggiore interesse (tiranti idrici e velocità della corrente, rispettivamente in Figura 29 e Figura 30), per le durate [hhmm] 0010 (pre collasso), 0135 (durante il collasso – solo velocità) 0200 (post collasso) e 0600 (fine simulazione – solo tirante), sempre per la simulazione considerata maggiormente critica, ovvero la B<sub>1</sub>. L'analisi delle immagini in generale conferma quanto già esposto commentando i risultati precedenti, in particolare:

- dall'osservazione dei tiranti idrici si nota come il dam-break causi l'espansione dell'area di laminazione fino al ponte di Via dell'industria, con un aumento delle altezze idriche di 20-30 cm essenzialmente in tutto il dominio di indagine (si può notare anche una leggera espansione della superficie bagnata nel passaggio dall'istante 0010 a 0200);
- una volta raggiunti i massimi valori di h, in corrispondenza di 0200, inizia un lento svuotamento dell'area di laminazione "espansa", governata dal ponte di Via dell'industria. Si può infatti notare come tra gli istanti 0200 e 0600 la riduzione in termini di tiranti idrici sia difficilmente coglibile in quanto consiste in pochi cm.
- l'attuale strada campestre situata in sponda destra del Fosso dei Pascoli tra l'opera di regolazione e il ponte di via dell'industria risulta allagarsi sulla base delle quote del DTM attuale, seppur con tiranti relativamente modesti (inferiori a 80 cm ovunque). In fase di cantiere la suddetta strada verrà rialzata

concordemente fino a raggiungere la quota di coronamento arginale (265.43 m s.l.m.), in modo da garantire l'accessibilità continua all'opera in qualsiasi situazione;

- l'analisi delle velocità mostra, prima del collasso, dei valori relativamente significativi (intorno a 1 m/s) solamente in corrispondenza del tratto finale (sez. 1007-1001), dove l'alveo del Fosso dei Pascoli risulta costretto in una sezione ridotta e pertanto la velocità aumenta. Osservando la situazione durante il collasso, si vede che in questa fase si assiste a un moderato incremento della velocità della corrente a valle dell'opera di regolazione (sez. 1015), rimanendo comunque su valori medi abbastanza modesti (0.5 m/s), per poi ritornare essenzialmente a una situazione analoga a quella di partenza a breccia completamente formata (0200).



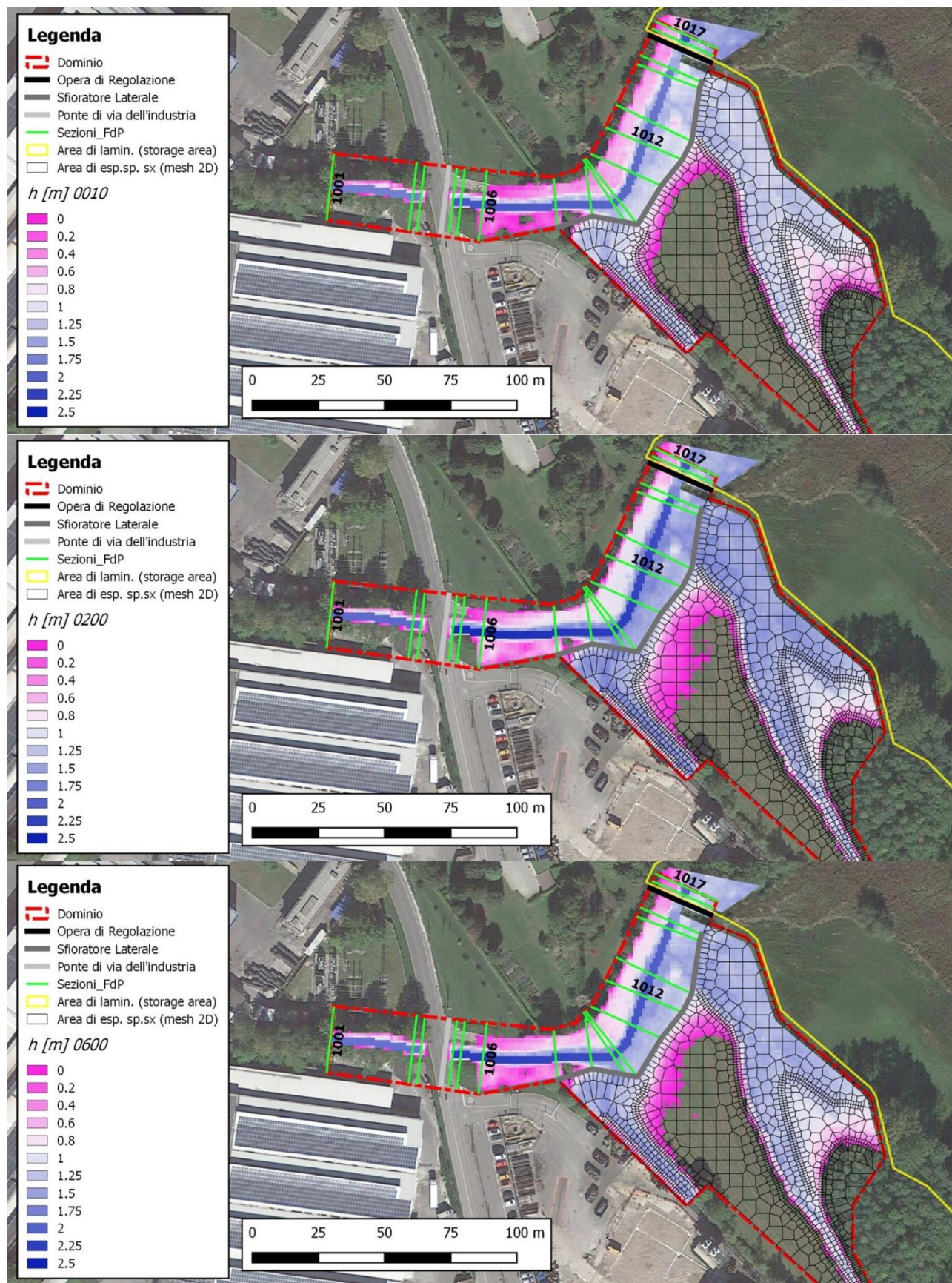


Figura 29: distribuzione planimetrica dei tiranti idrici all'interno del dominio di indagine per gli istanti [hhmm] 0010, 0200, 0600



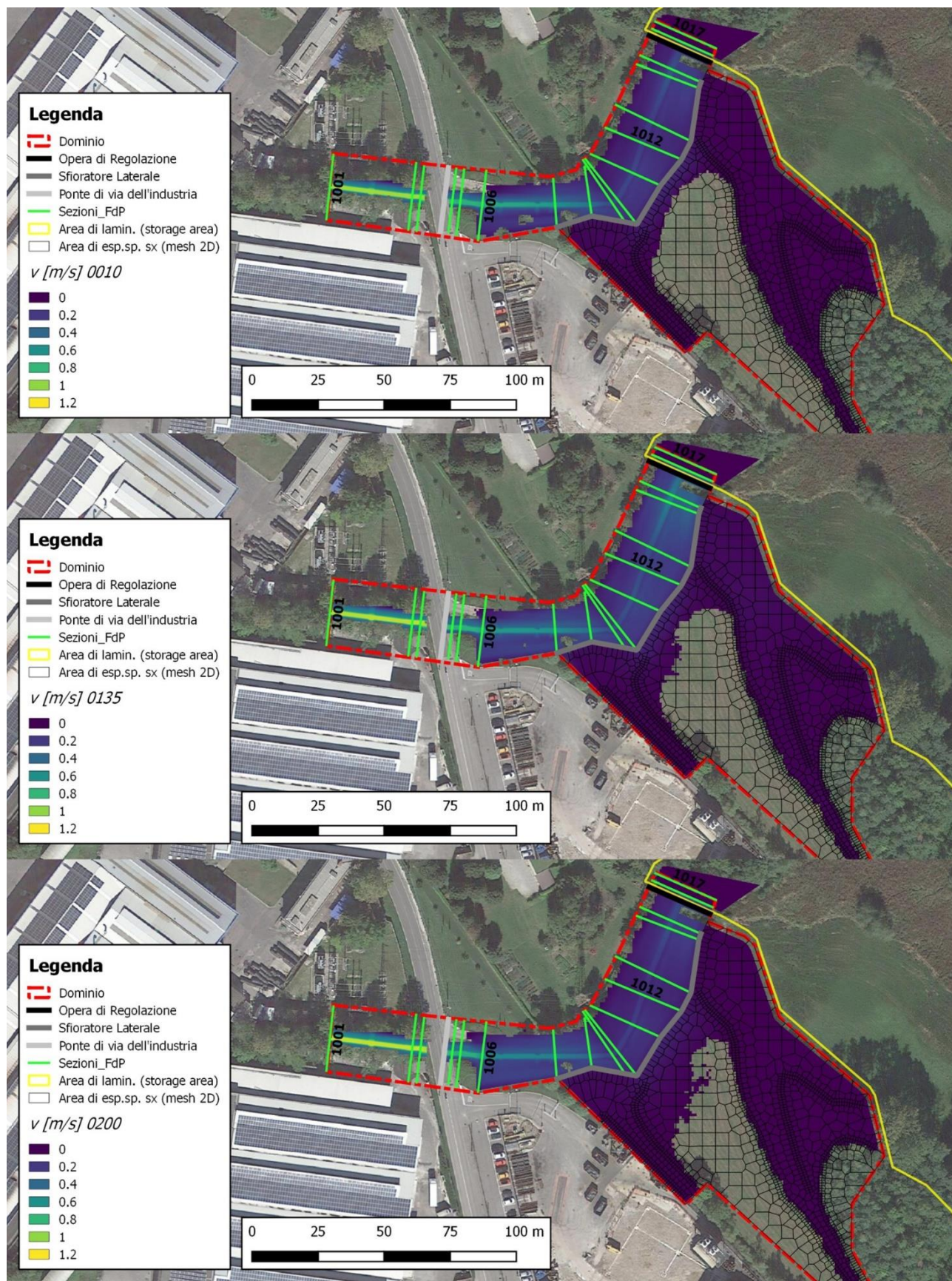
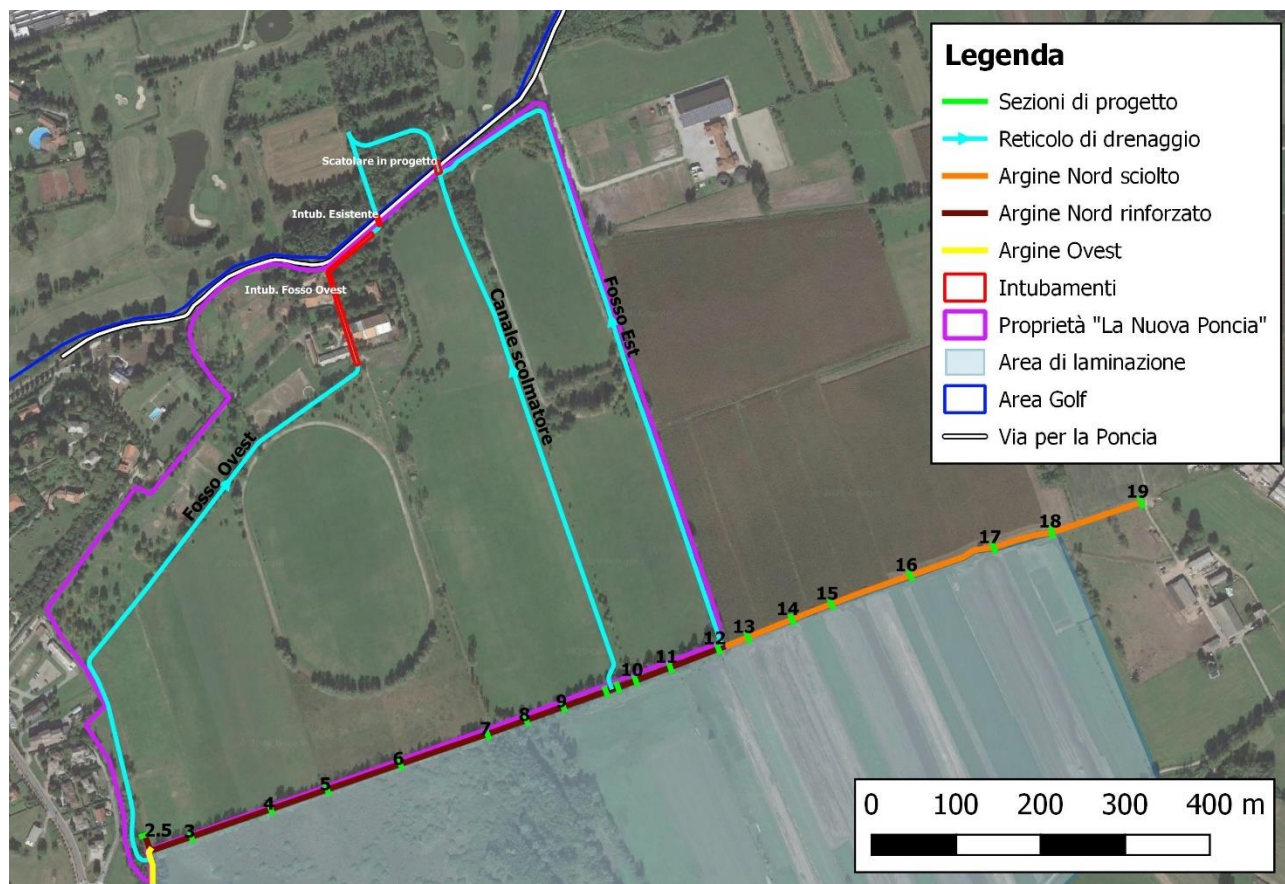


Figura 30: distribuzione planimetrica delle velocità all'interno del dominio di indagine per gli istanti [hhmm] 0010, 0200, 0600



## 4.2. Argine Nord

L'altra struttura da verificare nei confronti di un possibile dam-break tra le opere in progetto è il rilevato denominato Argine Nord. Come dall'immagine in *Figura 31*, esso consiste in un rilevato che delimita la Piana dei Pascoli lungo il lato settentrionale, separandola dai terreni della proprietà privata "La Nuova Poncia" e da altre proprietà private (interessate solo marginalmente da un potenziale meccanismo di collasso), situate a Est e a Ovest della stessa.



**Figura 31:** planimetria generale dell'Argine Nord e dei principali elementi situati a valle di interesse per l'analisi

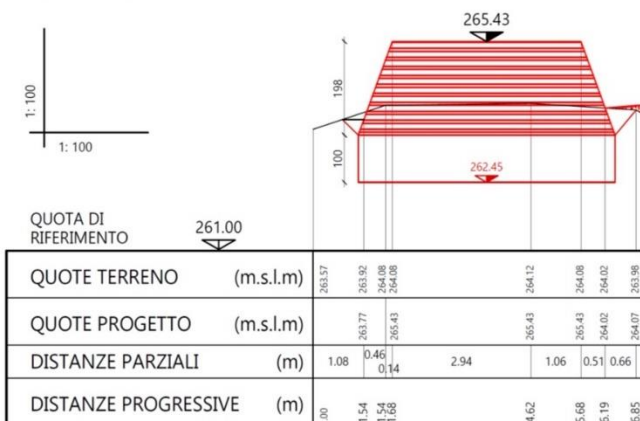
Lo sviluppo arginale (dir. Ovest-Est) è suddiviso nelle seguenti componenti:

- un primo tratto in terre sciolte, denominato Argine Ovest, della lunghezza di circa 40 metri, raccorda l'Argine Nord con il profilo rialzato esistente del terreno che delimita gran parte del lato Ovest dell'area di laminazione;
- un secondo tratto (sez. 2.5 – 12), in terre rinforzate, della lunghezza di circa di 700 metri, si estende lungo l'intero confine meridionale della Nuova Poncia, contenendo al suo interno (tra le sezioni 9 e 10, *Figura 32*) lo sfioratore di emergenza per eventi superiori ai 50 anni di tempo di ritorno, posto a quota 265.2 m s.l.m. (si ricorda che il coronamento del rilevato arginale, con per tutta l'area di laminazione, è posto a quota 265.43 m s.l.m.). In questo tratto la struttura possiede un'altezza media di circa 1.5 metri, raggiungendo la massima elevazione (2 metri) nei pressi della sezione 5 (*Figura 32*);
- un terzo tratto (sez. 12 – 19) in terre sciolte, lungo complessivamente 420 metri, a separare l'area di laminazione dagli altri terreni (essenzialmente a uso agricolo) posti a Est della Nuova Poncia. La

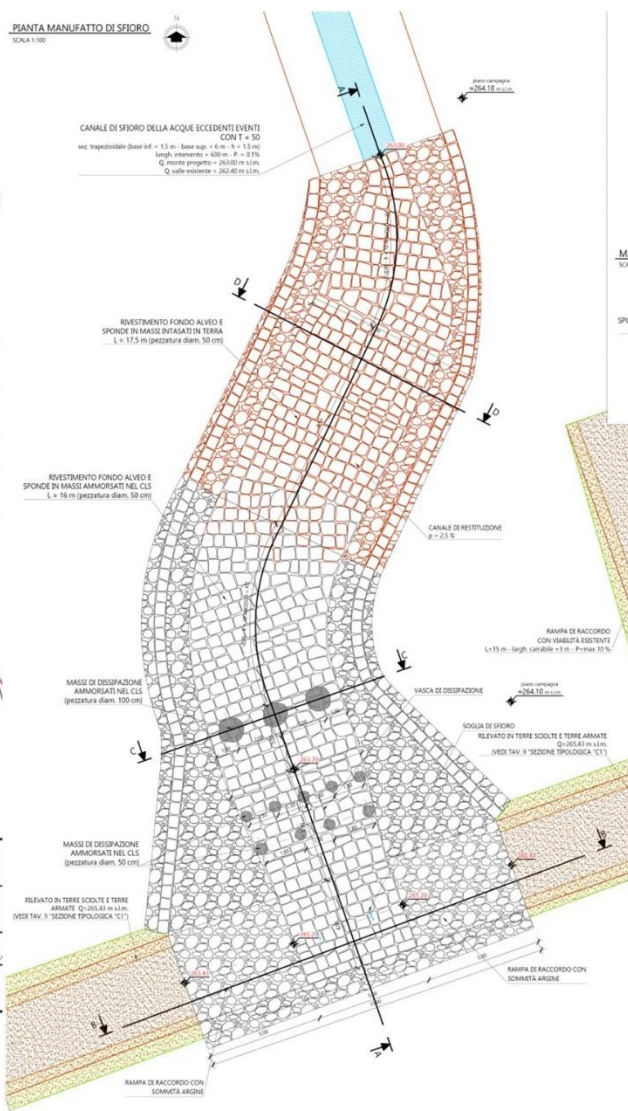
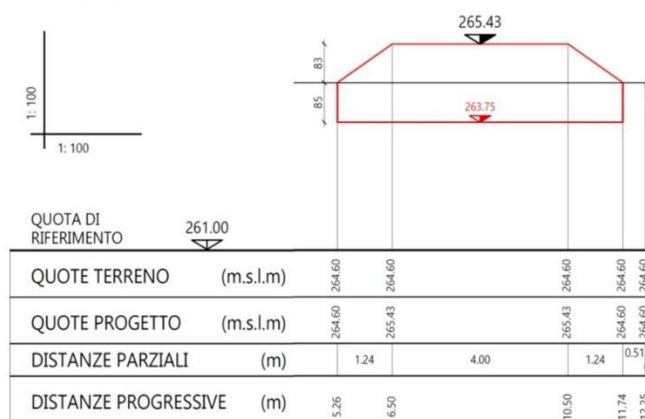
struttura in questo tratto possiede un'elevazione ridotta, che va da 80 cm nei pressi della sezione 13 (Figura 32) fino a livellarsi con il piano campagna alla sezione 19.

**SEZIONE 5nord**

PRG. 306.96 m


**SEZIONE 13nord**

PRG. 836.28 m

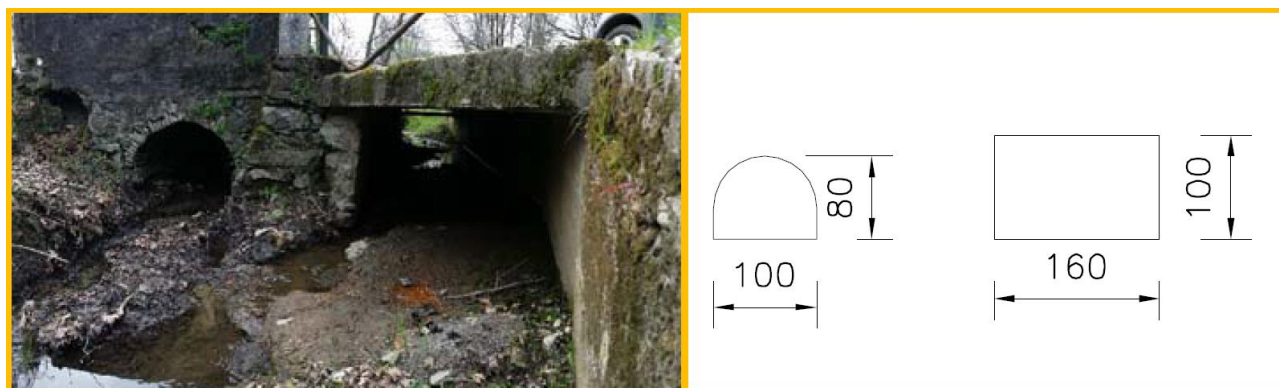


**Figura 32:** sezioni trasversali (sx) e particolare costruttivo dello sfioratore di piena dell'Argine Nord (dx)

Dall'Argine Nord si dipartono i 3 canali che in costituiscono la rete di drenaggio della Piana dei Pascoli in direzione Nord, attraversando la proprietà della Nuova Poncia per poi immettersi nei territori del Golf di Annone di Brianza. In particolare:

- il fosso Ovest e il fosso Est sono canali esistenti che verranno riprofilati (larghezza del fondo alveo pari a 1 m, sponde a 45° fino al raccordo con il piano campagna, pendenza  $\approx 0.1\%$ ) in modo da ottimizzarne l'efficienza idraulica e rimarranno entrambi connessi all'area di laminazione anche in condizioni di magra mediante una tubazione in calcestruzzo ( $\phi$  500) che attraversa il rilevato, rispettivamente all'attacco dell'Argine Ovest e nei pressi della sezione 12. Nel progetto definitivo erano originariamente previste delle chiaviche dotate di paratoie a funzionamento manuale, ma si è scelto in questa fase di sostituirle con le tubazioni per ridurre i costi dell'opera e gli oneri di gestione. Le tubazioni sono state dimensionate in modo da garantire un deflusso a valle non superiore all'1.5

$\text{m}^3/\text{s}$  (come illustrato all'interno del sottocapitolo dei risultati) indicati all'interno del progetto definitivo come portate defluente dall'area di laminazione in direzione del torrente Pescone. Il fosso Ovest percorre il profilo occidentale della Nuova Poncia fino a essere intubato nei pressi della zona edificata mediante un scatolare, per poi tornare a cielo aperto per un breve tratto lungo il confine settentrionale prima di uscire dalla proprietà attraversando Via per la Poncia (Comune di Annone Brianza) mediante un altro (doppio) scatolare attualmente esistente (Figura 33). Il fosso Est analogamente percorre l'intero confine orientale della proprietà, per poi correre parallelo a Via per la Poncia e ricongiungersi al fosso Ovest prima di attraversarla. Tuttavia, nella configurazione di progetto, il fosso Ovest verrà fatto confluire al nuovo scatolare di attraversamento di Via per la Poncia, realizzato per il canale scolmatore derivante dallo sfioratore dell'Argine Nord;



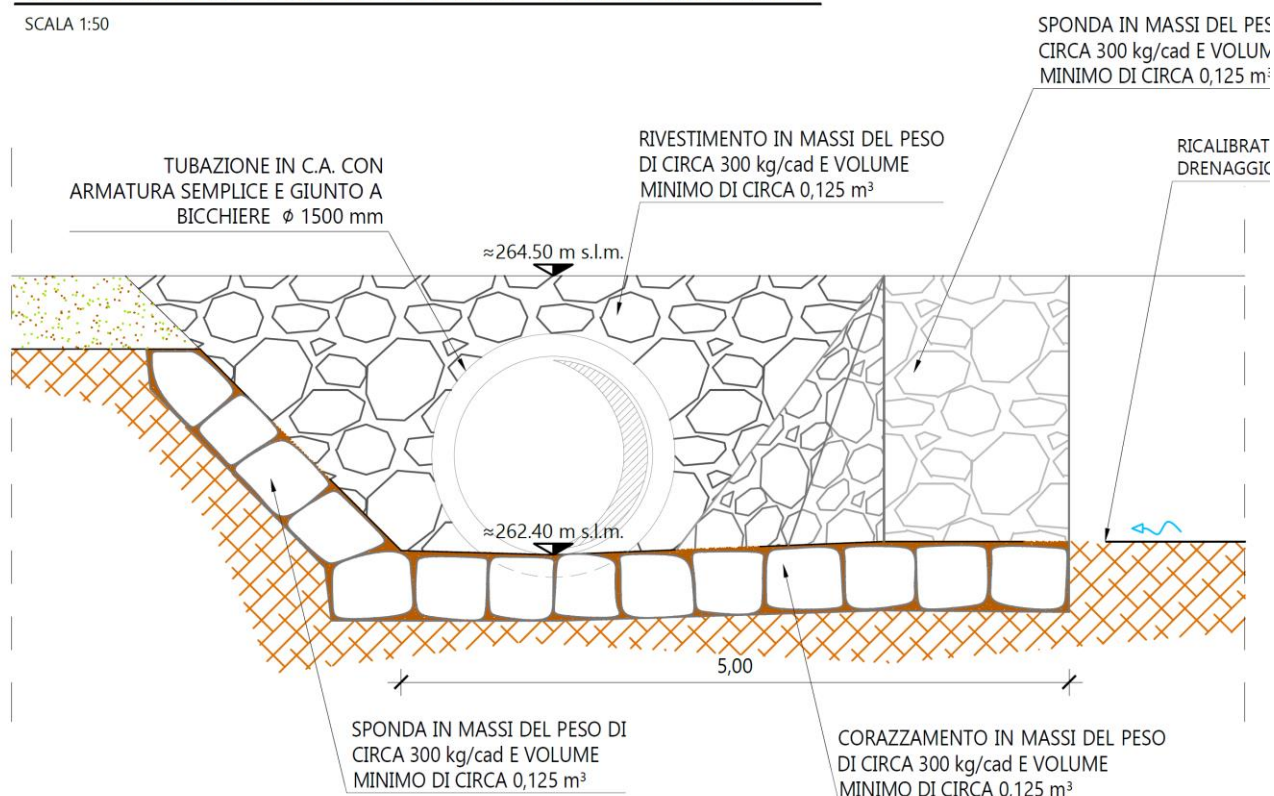
**Figura 33:** geometria dell'attraversamento esistente di Via per la Poncia, stralcio tavola di stato di fatto del prog. preliminare

- il canale scolmatore derivante dallo sfioro di superficie precedentemente descritto verrà realizzato ex-novo a spese della proprietà della Nuova Poncia, e consisterà in un canale a sezione trapezoidale (larghezza di fondo alveo 1.5 metri, sponde inclinate a 30°, pendenza  $\approx 0.1\%$ ) di lunghezza 600 metri, che percorrerà in maniera rettilinea il territorio della Nuova Poncia fino a raggiungere Via per la Poncia, dove si congiungerà con il fosso Est prima di immettersi nella nuova tubazione di attraversamento in calcestruzzo ( $\phi 1500$ , Figura 34) in direzione dei territori del Golf Club di Annone Brianza. Anche in questo caso, il progetto definitivo prevedeva uno scatolare in calcestruzzo armato vibrocompresso di dimensioni 2750 x 1750 mm, sostituito con la sopracitata tubazione al fine di contenerne i costi. La tubazione è verificata considerando che la portata attesa in condizioni di massimo riempimento della vasca (circa  $2.2 \text{ m}^3/\text{s}$  come somma dei contributi del canale scolmatore e del fosso Est indicata all'interno del sottocap. dei risultati) è inferiore alla portata massima defluibile a pelo libero (circa  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ , come da scala delle portate contenuta in Figura 41)



**ATTRAVERSAMENTO VIA PER LA PONCIA - sezione trasversale B-B**

SCALA 1:50



**Figura 34:** sezione frontale di monte del nuovo attraversamento di Via per la Poncia (canale scolmatore e fosso Est)

#### 4.2.1. Dominio di indagine

Come per l'analisi a collasso dell'opera di regolazione, anche in questo caso il dominio di indagine si è determinato – sulla base delle considerazioni fatte durante la progettazione definitiva – volendo includere al suo interno le aree più significativamente suscettibili di danni rilevanti in caso di dam-break. Nella presente situazione, tuttavia, le dimensioni rilevanti dell'area da indagare e il fatto che l'analisi è stata svolta necessariamente in 2D, hanno imposto l'obbligo di ottimizzare la vastità della superficie indagata, al fine di contenere i tempi computazionali entro limiti ragionevoli.

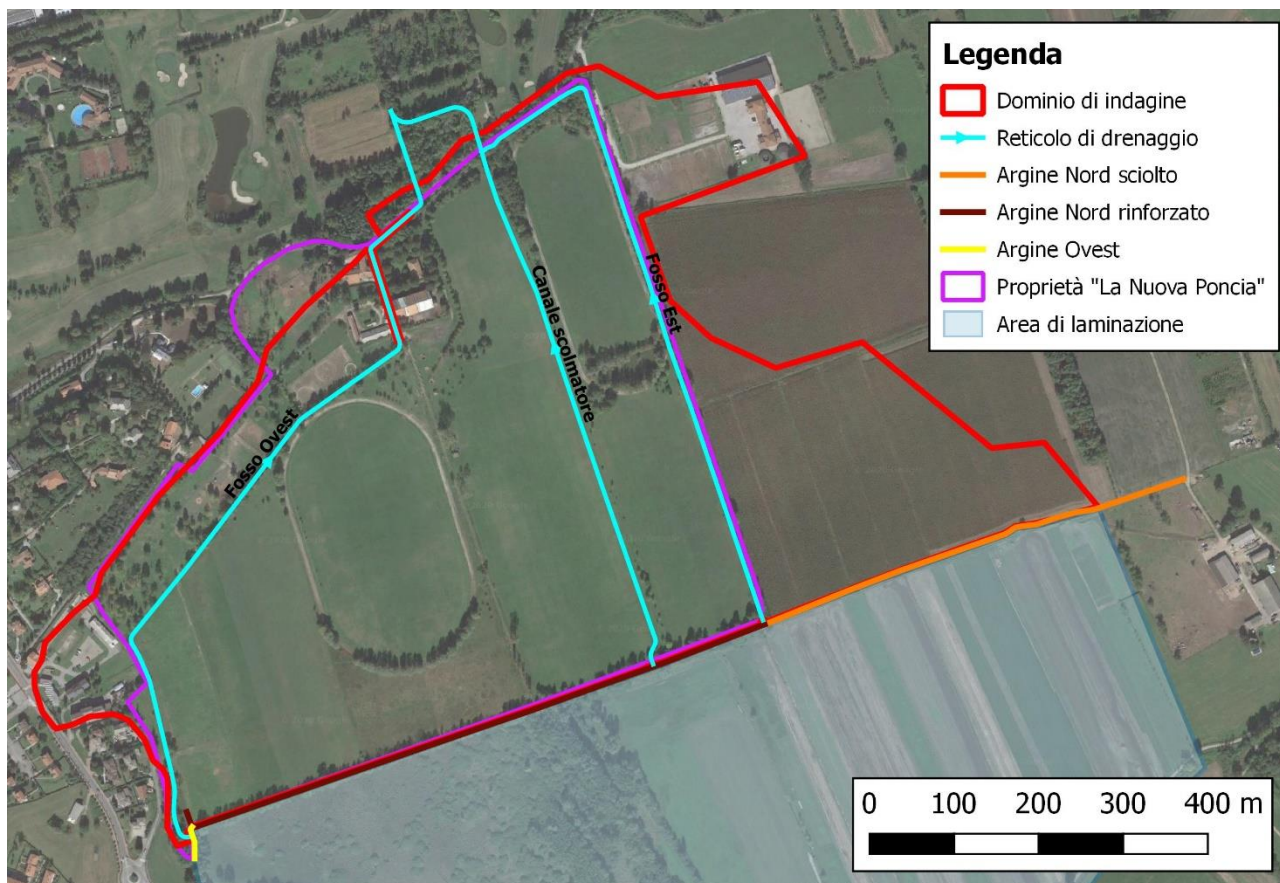
L'area indagata (superficie complessiva 53 ha, planimetria in *Figura 35*) coincide in buona parte con i terreni della proprietà della Nuova Poncia, in quanto:

- a Sud, il rilevato arginale la separa dall'area di laminazione, che anche in questo caso verrà modellata come elemento concentrato di tipo "serbatoio";
- a Ovest, l'area si estende fino a superare la quota di coronamento del rilevato arginale (265.43 m s.l.m.) lungo il terreno esistente che ascende in direzione di Via Aldo Moro (Comune di Molteno). L'estremità Ovest include una serie di edifici che non fanno parte della proprietà della Nuova Poncia;
- a Nord il limite è ancora una volta dettato dall'andamento naturale del terreno, che supera la quota di coronamento arginale ancora all'interno della proprietà della Nuova Poncia, andando all'incirca a sovrapporsi con Via Per la Poncia nella zona Nord-Est. Si è deciso di non includere l'area del golf all'interno della simulazione, giudicando relativamente modeste le potenziali conseguenze che si



avrebbero in tale area nei confronti di un eventuale parziale collasso dell'Argine Nord, come meglio illustrato all'interno dei risultati/conclusioni.

- a Est, il piano campagna si alza in maniera abbastanza uniforme oltre il fosso Est, e anche in questo caso il limite del dominio segue all'incirca l'isoipsa del coronamento arginale.



**Figura 35:** dominio di indagine per la modellazione idraulica del fenomeno di dam-break dell'Argine Nord

#### 4.2.2. Orografia dell'area di indagine

La determinazione della base piano-altimetrica di riferimento per la presente analisi ha richiesto una fase di preprocessamento un po' più elaborata rispetto all'opera di regolazione per giungere a un risultato soddisfacente.

Il dato di partenza, in questo caso, è il DTM regionale a risoluzione 5 metri, in quanto il DTM a risoluzione metrica, ricavato da dati lidar, è disponibile solo per una minima parte oltre l'Argine Nord. Tuttavia, per poter impiegare un dato a risoluzione così grossolana (più grande, ad esempio, della larghezza dei canali costituenti la rete di drenaggio interna al dominio) è stato necessario procedere ai seguenti passaggi preliminari:

- innanzitutto, dal confronto tra i punti del rilievo topografico effettuato a terra per la progettazione definitiva, il DTM1 (dove disponibile) e il DTM5, è emerso che, pur adottando tutti e tre il medesimo sistema di riferimento proiettato (UTMWGS84 zona 32N), il DTM5 mostra un chiaro discostamento rispetto agli altri due dati piano-altimetrici, come mostrato in *Figura 36* (angolo Sud-Ovest del dominio). Si è dunque proceduto a una traslazione del DTM5 di circa 12.5 m in direzione Ovest e 8.5 m in direzione Nord, al fine di allinearli correttamente con gli altri dati piano-altimetrici;

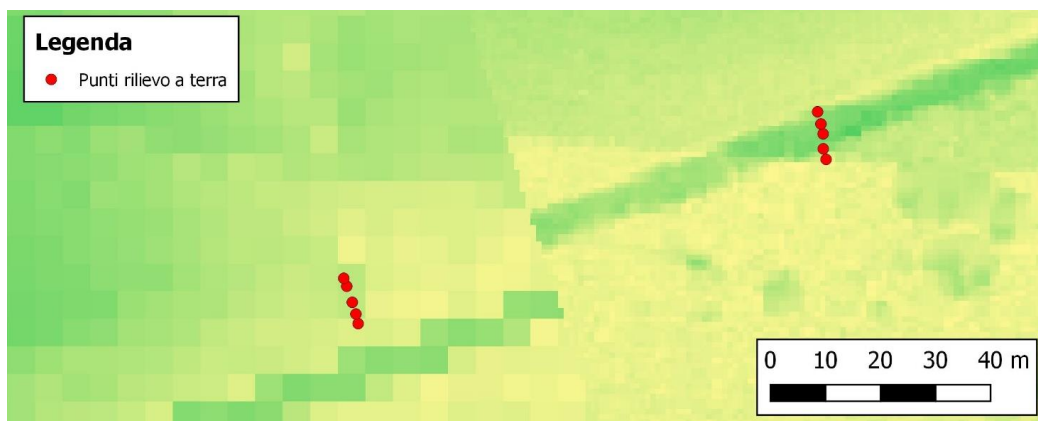


Figura 36: scostamento del DTM5 rispetto al DTM1 e al rilievo topografico di dettaglio

- oltre che sull'aspetto planimetrico, le quote del DTM5 originario risultano generalmente più elevate rispetto ai corrispettivi a quelle misurate a terra con strumentazione GPS a precisione centimetrica, con una differenza media di circa +40 cm sulla base di 42 punti misurati, distribuiti all'interno del dominio di indagine (Figura 37). Questa differenza non viene considerata accettabile in quanto a sfavore di sicurezza (quote più elevata significa portate in ingresso al sistema dalla breccia e tiranti idrici mediamente inferiori), pertanto, dall'osservazione dei singoli punti e in particolare di quelli maggiormente vicini al profilo arginale, si è deciso di applicare un abbassamento di 30 cm alle quote del DTM5, al fine di renderlo il più aderente possibile ai dati misurati con rilievo a terra (le quote della zona Nord rimangono ancora sensibilmente più elevate – 30/60 cm – ma si è reputato più corretto massimizzare la rispondenza tra le quote del DTM e le quote rilevate nei pressi del rilevato arginale, tenendo in conto della possibilità di avere quote più basse lungo il limite Nord del dominio mediante alcune raccomandazioni *ad hoc* inserite nelle conclusioni).

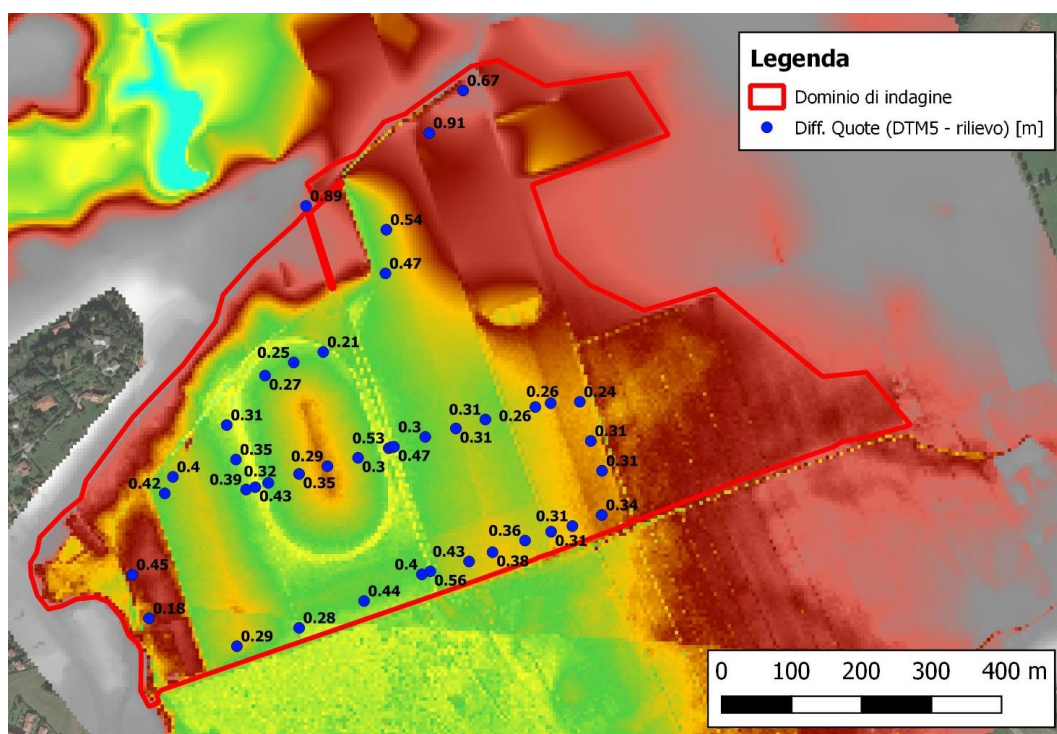
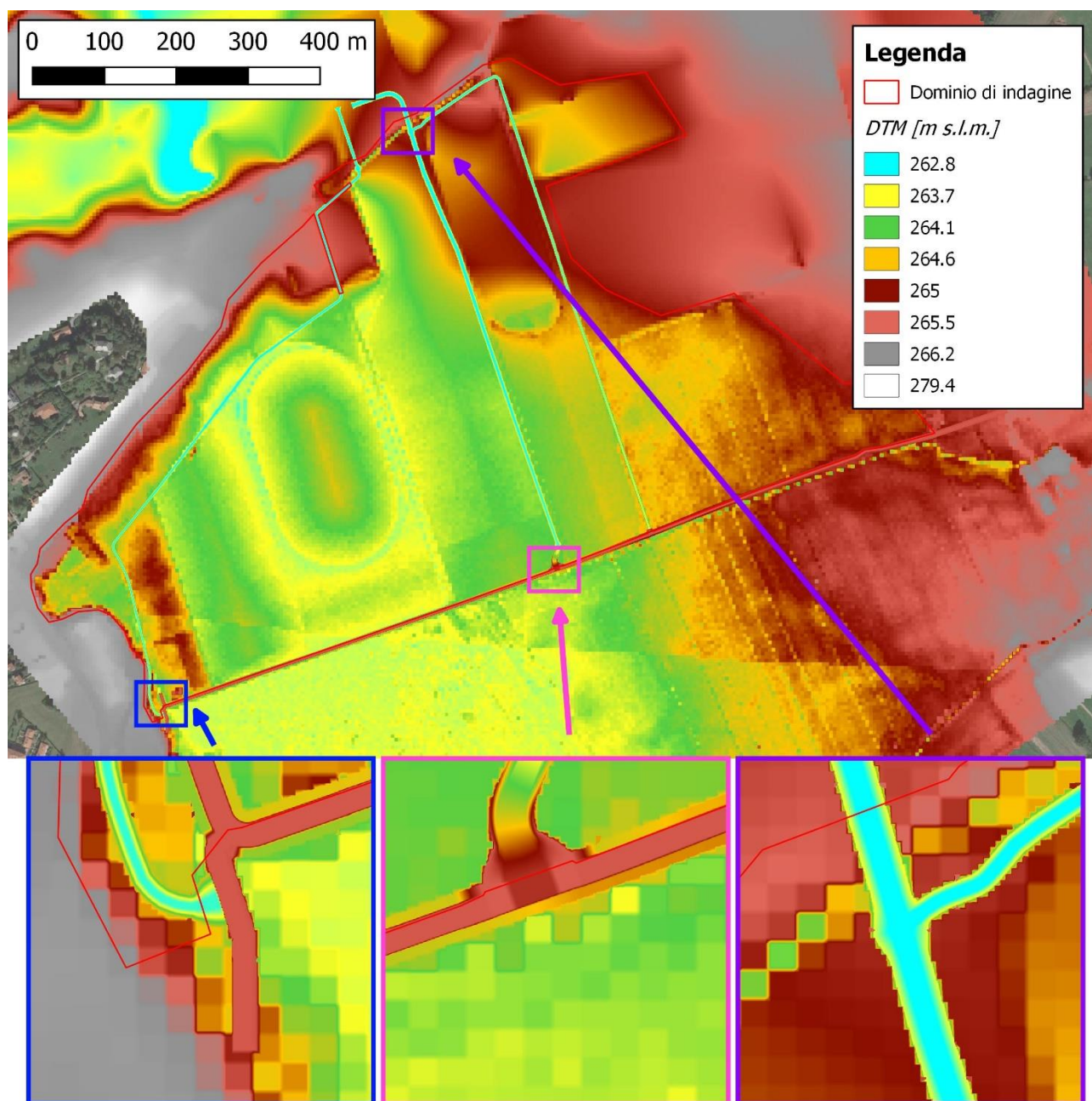


Figura 37: differenza tra le quote del DTM5 e dei relativi punti misurati durante il rilievo a terra



Una volta terminato il preprocessamento sul DTM5, si definisce il dato planoaltimetrico di partenza inserendo in quest'ultimo le modifiche della configurazione di progetto, ovvero l'argine Nord e il relativo sfioratore superficiale, i fossi Est e Ovest riprofilati e il canale scolmatore. Il risultato finale, salvato come DTM a risoluzione 0.1 m per garantire un'adeguata rappresentazione dei canali, viene mostrato in *Figura 38*.



*Figura 38: modello digitale del terreno in input al modello idraulico del dam-break per l'Argine Nord*

#### 4.2.3. Modellazione idraulica

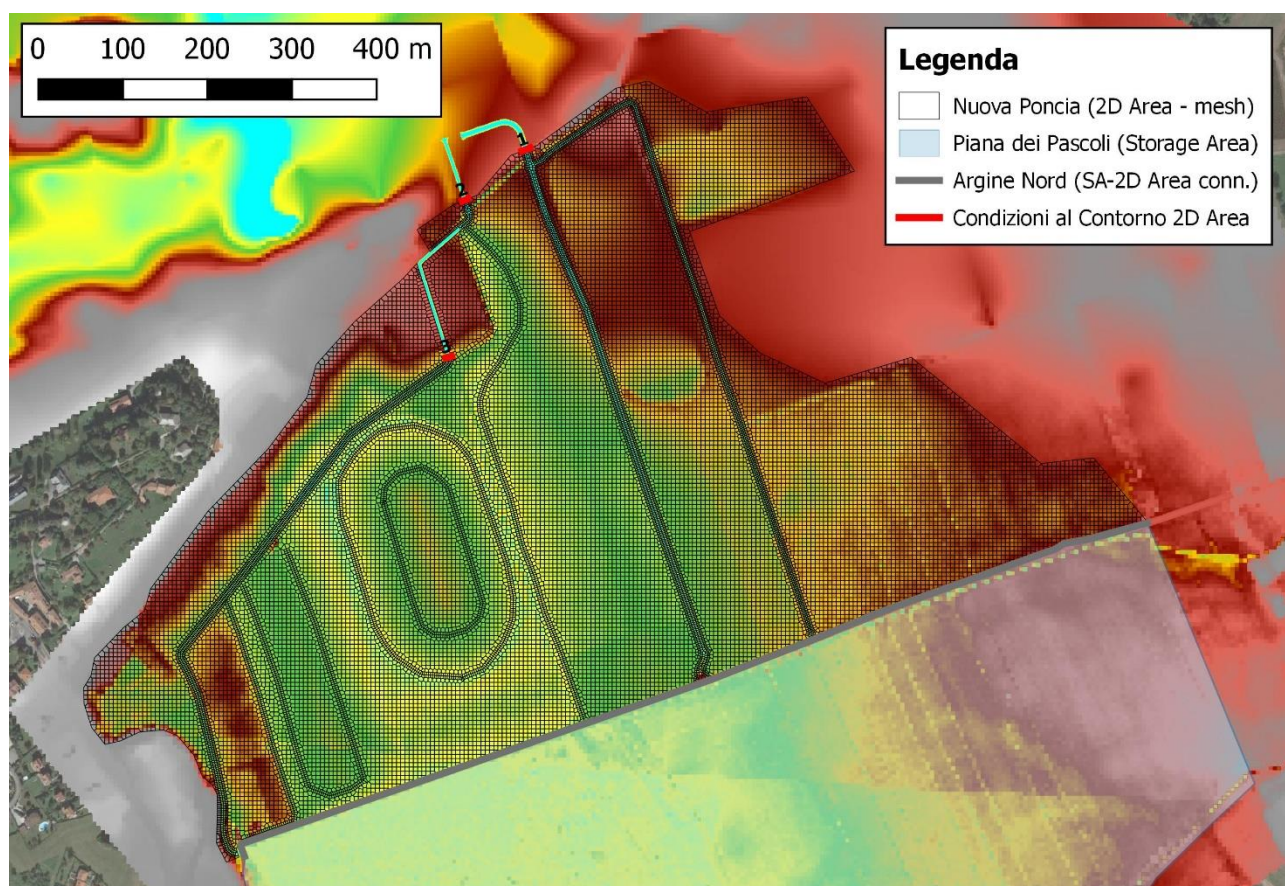
A seguito della definizione del dominio d'indagine e della relativa orografia di riferimento, si può procedere alla definizione del modello idraulico per l'analisi di dam-break del rilevato. Esattamente come per l'opera di regolazione l'analisi è stata condotta tramite il software Hec-Ras, impostando però in questo caso un modello interamente bidimensionale – pur sempre di moto vario secondo le equazioni di De Saint-Venant (illustrate in dettaglio in allegato A) – vista la tipologia del problema in esame.

Anche in questo caso, l'argomento verrà declinato secondo i seguenti punti.

- geometria e proprietà idrauliche del modello;
- condizioni iniziali e condizioni al contorno;
- definizione della breccia per l'analisi a collasso;
- durata e passo di simulazione;
- risultati ottenuti.

#### 4.2.3.1. Geometria e proprietà idrauliche del modello

La modellazione idraulica del (parziale) collasso dell'Argine Nord necessita un approccio differente rispetto a quanto illustrato per l'analogo fenomeno nel caso dell'opera di regolazione: in questo caso infatti, il rilevato arginale risulta esteso lungo un fronte superiore a 1 km e – come verrà dettagliatamente illustrato in seguito – manca l'elemento di forte monodirezionalità della corrente che invece caratterizzava il Fosso dei Pascoli: se è infatti vero che è presente una rete di canali all'interno dell'area (composta dai fossi Est e Ovest e dal canale scolmatore), essa non veicola il grosso dell'onda di piena formatasi a seguito dell'apertura della breccia verso l'uscita dal dominio indagato, ma sostanzialmente drena le acque diffuse all'interno dell'intera area della Nuova Poncia a seguito degli estesi allagamenti prodotti dal collasso. Vista la forte componente bidimensionale che caratterizza l'intero processo di avanzamento dell'onda di piena, l'intero sistema (Figura 39) viene modellato attraverso le seguenti componenti:



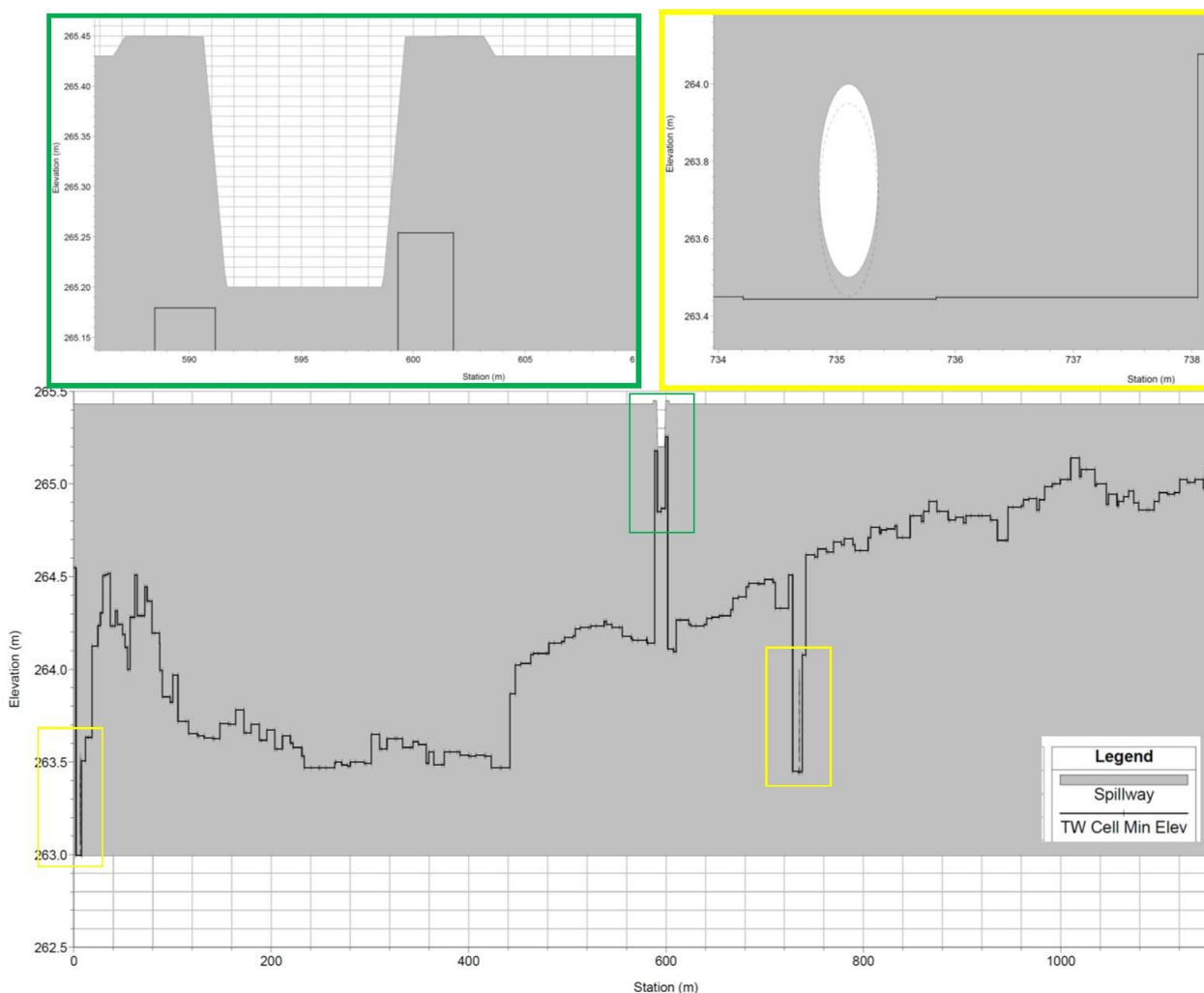
**Figura 39:** geometria del modello idraulico di dam-break per l'Argine Nord

- area di laminazione della Piana dei Pascoli: in maniera analoga al caso precedente, viene rappresentata anche in questo caso come elemento concentrato di tipo "storage area", a cui viene



assegnata la relazione tirante idrico – volume propria dell'area di laminazione, ricavata dal DTM (*Figura 16*). È connessa al corso d'acqua tramite l'elemento descritto al punto successivo;

- Argine Nord: rappresenta la connessione tra l'elemento serbatoio che rappresenta la Piana dei Pascoli e l'area 2D – approssimabile in primo luogo ai terreni della Nuova Poncia – che si trova a valle. Secondo la geometria del programma è un elemento di tipo "Storage Area – 2D Area", del tutto analogo a una "inline structure" nei modelli monodimensionali: come osservabile in *Figura 40*, è costituito da un profilo longitudinale lungo quanto l'intero sviluppo dell'argine (1150 m), con quota di coronamento uniforme e pari a 265.43 m s.l.m., eccezion fatta per lo sfioro superficiale (ingrandito nel riquadro verde), di lunghezza alla base, posta a quota 265.2 m s.l.m. pari a 5 m, che diventano 8 m al raggiungimento del coronamento dell'argine, e il cui coefficiente di efflusso  $C_{weir}$  è stato fissato a 1.8 a seguito di apposito processo di taratura, in modo da garantire una portata in uscita di 1.5 m<sup>3</sup>/s in condizioni di massimo riempimento della Piana. Sono inoltre presenti due scarichi "di fondo", costituiti dalle due tubazioni circolari in calcestruzzo di diametro 500 mm che alimentano i fossi Est e Ovest (riquadro giallo).



**Figura 40:** profilo longitudinale dell'Argine Nord all'interno del modello in Hec-Ras

Entrambe vengono modellate come elementi di tipo "culvert", aventi le seguenti caratteristiche (Tabella 5):

DATI CULVERTS		
Fosso	Est	Ovest
Station [m]	735.1	6.5
D [m]	0.5	0.5
L [m]	8	8
C <sub>en</sub>	0.5	0.5
C <sub>ex</sub>	1	1
n [m <sup>1/3</sup> /s]	0.013	0.013
Z <sub>inv up</sub> [m s.l.m.]	263.5	263.05
Z <sub>inv down</sub> [m s.l.m.]	263.45	263

**Tabella 5:** parametri delle tubazioni interne all'Argine Nord afferenti ai fossi Est e Ovest

- area della proprietà Nuova Poncia e territori limitrofi (Figura 39): costituisce l'intero dominio di indagine e viene modellato come un elemento di tipo "2D flow area". La modellazione è fatta utilizzando una mesh non strutturata da circa 30000 elementi, aventi di base forma quadrata di lato 5 m, ridotta progressivamente a 1-2 m in corrispondenza delle break lines, tracciate per meglio adattare la mesh all'orografia del terreno. Locali modifiche alla mesh sono state effettuate di volta in volta per meglio adattarla alla specifica condizione di collasso analizzata. Relativamente al parametro di scabrezza di Manning, si è assegnato un valore di 0.06 m<sup>1/3</sup>/s per l'intera area, eccezion fatta per la rete di drenaggio (ipotizzata regolarmente mantenuta e funzionante), per cui si è adottato un valore di 0.03 m<sup>1/3</sup>/s. Lasciando il dettaglio al prossimo sottocapitolo, si sottolinea la presenza di tre condizioni al contorno, tutte e tre situate lungo il lato nord dell'area, in corrispondenza degli scollari di drenaggio dell'area, esistenti e in progetto. A seguito di un'analisi per tentativi, si è scelto di modellare le suddette strutture come condizioni al contorno governate da una scala delle portate, piuttosto che come elementi fisici monodimensionali (quali ponti o culverts) per ragioni soprattutto numeriche, in quanto nel secondo caso i tempi computazionali aumentano sensibilmente e si creano problemi di instabilità all'interfaccia 1D/2D.

#### 4.2.3.2. Condizioni al contorno e condizioni iniziali

Partendo dalle condizioni al contorno, come precedentemente anticipato si sono imposte tre condizioni di tipo "rating curve" in corrispondenza di altrettanti intubamenti (presenti e futuri) che consentono il drenaggio dell'area della Nuova Poncia in direzione dell'area del Golf Club di del Comune di Annone Brianza. È una condizione unidirezionale, per cui in corrispondenza di un determinato tirante idrico all'interno delle celle confinanti con la condizione al contorno, dal sistema esce la quantità di portata indicata nella relativa curva. Le curve tirante – portata sono state costruite secondo la procedura seguente:

- per valori di tirante compresi tra 0 (circa) l'80% del massimo riempimento, la scala delle portate segue la classica formulazione di Chezy:

$$Q = \frac{1}{n} \sqrt{i} A(h) R(h)^{2/3}$$

dove  $n$  [ $m^{1/3}/s$ ] è il coefficiente di scabrezza di Manning;  $i$  [ $m/m$ ] è la pendenza di fondo alveo;  $A(h)$  [ $m^2$ ] è l'area bagnata (funzione del tirante idrico  $h$ );  $R$  [ $m$ ] è il raggio idraulico della sezione;

- per valori di tirante superiori al 120% (circa) del valore di intradosso della sezione, si è utilizzata la formula per le condizione sotto battente adottata per gli elementi di tipo "culvert" in Hec-Ras (N.B. tutte le grandezze presenti sono espresse in unità imperiali, e sono state convertite in un secondo momento) e proposta all'interno del testo *Hydraulic Design of Highway Culverts*, precedentemente citato:

$$\frac{h}{H} = c \left[ \frac{Q}{AH^{0.5}} \right]^2 + Y$$

dove  $h$  [ $ft$ ] è il tirante idrico di monte;  $H$  [ $ft$ ] è l'altezza all'intradosso della sezione di monte del canale intubato;  $Q$  [ $ft^3/s$ ] è il valore di portata;  $A$  [ $ft^2$ ] è l'area della sezione del canale intubato;  $c$  e  $Y$  sono parametri adimensionali (ma dipendenti dalle unità di misura adottate) funzione delle caratteristiche geometriche e del materiale di cui è costituito il canale;

- per i valori di tirante intermedi ( $\approx 80-120\%$  del valore dell'altezza dell'intradosso) le due curve sono state collegate per interpolazione lineare.

Le tre scale delle portate sono state valutate per i seguenti casi:

- 1) fosso Est/Canale scolmatore: rappresenta la portata in uscita dalla tubazione in calcestruzzo (*Figura 34*) da realizzarsi con il presente intervento, che raccoglie le acque provenienti dallo sfioratore di emergenza e dal fosso Est;
- 2) fosso originario: rappresenta il più piccolo dei due canali intubati contigui che attualmente drenano l'area della Nuova Poncia (quello avente la sezione a volta in *Figura 33*), che in configurazione di progetto si assume che debba raccogliere le sole acque delle aree immediatamente in prossimità, in quanto il fosso Est confluisce ormai nella condizione 1) e il canale intubato rettangolare contiguo si ipotizza raccogliere la totalità delle acque provenienti dal fosso Ovest (condizione 3));
- 3) fosso Ovest: come anticipato al punto precedente, il fosso Ovest sarebbe molto complesso da modellare rigorosamente nella presente configurazione 2D a causa dell'intubamento e successiva riapertura che subisce in corrispondenza della zona edificata dei territori della Nuova Poncia. Tuttavia, imitando l'approccio utilizzato nel progetto definitivo, si opta per troncare il fosso Ovest all'altezza del primo intubamento (scatolare rettangolare in calcestruzzo di dimensioni 1600x1000 mm, poi ripetuto al secondo intubamento di Via Per la Poncia), considerando l'errore concettuale che ne deriva poco rilevante ai fini quantitativi del problema affrontato, e dunque considerando il solo contributo del canale a volta in corrispondenza dell'attuale attraversamento esistente.

I valori delle grandezze geometriche e dei parametri necessari alla risoluzione delle equazioni sopracitate sono riassunti in *Tabella 6*, mentre le tre scale delle portate vengono espone in *Figura 1*.

# CC	$n$ [ $m^{1/3}/s$ ]	$i$ [ $m/m$ ]	$D$ [ $m$ ]	$B$ [ $m$ ]	$H$ [ $m$ ]	$c$ [/]	$Y$ [/]
1	0.014	0.001	1.5			0.04	0.67
2	0.02	0.001		1	0.8	0.04	0.8
3	0.02	0.001		1.6	1	0.04	0.8

**Tabella 6:** proprietà geometriche e idrauliche degli attraversamenti di Via per la Poncia

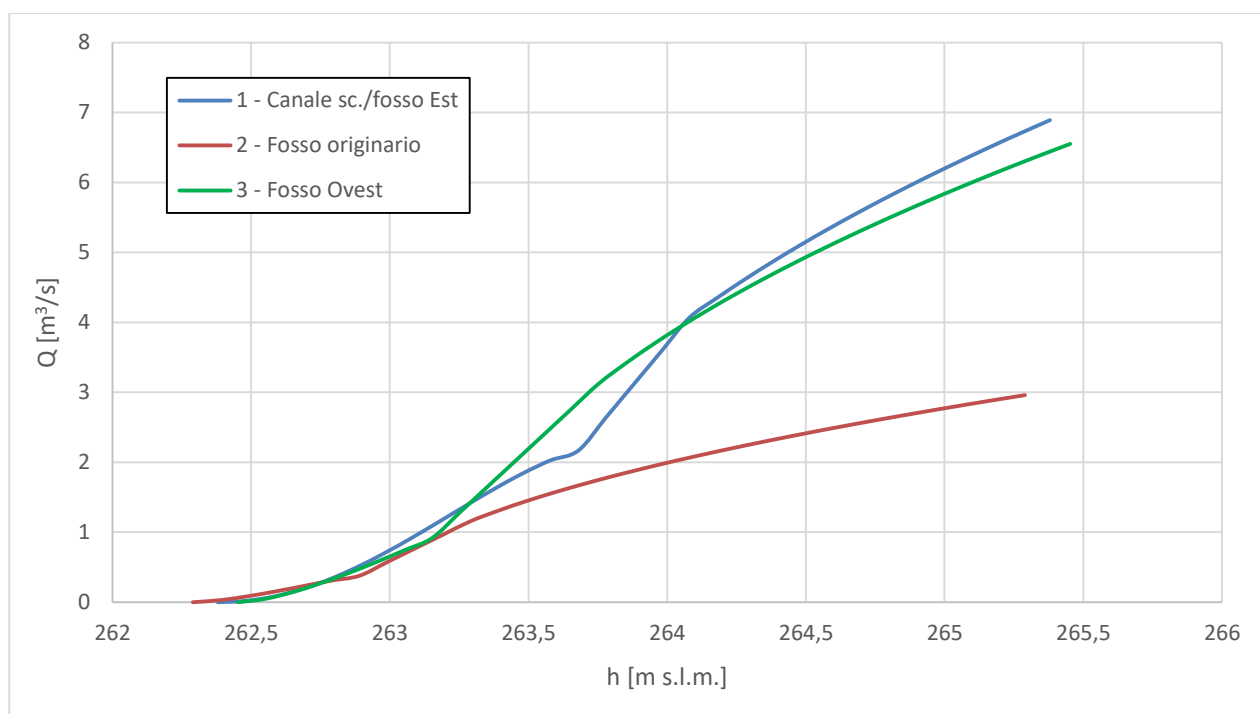


Figura 41: scale delle portate degli attraversamenti di Via Per la Poncia

L'altra condizione al contorno applicata è, come nel caso dell'opera di regolazione, un'idrogramma costante in ingresso all'area di laminazione, di valore pari a  $2.95 \text{ m}^3/\text{s}$  e per la durata dei primi 30 minuti della simulazione, al fine di mantenere costante il tirante idrico della Piana dei Pascoli nella fase precedente l'apertura della breccia.

Relativamente alle condizioni iniziali, l'unica CI da definire è il tirante idrico iniziale all'interno della Piana dei Pascoli, fissato anche in questo caso a 265.43 m s.l.m.

#### 4.2.3.3. Caratteristiche della breccia

Nell'ipotesi di ripetere le modalità di stima della breccia già adottate per il caso dell'opera di regolazione (stima della larghezza media finale raggiunta,  $B_{ave}$  [m], e del relativo tempo di formazione,  $t_F$  [h], sulla base delle medesime tre formule regressive precedentemente utilizzate, rimane da affrontare l'analisi dei potenziali meccanismi di collasso della struttura prima di implementare il dam-break all'interno del programma.

Già in fase introduttiva si era anticipato che l'analisi a collasso maggiormente significativa – almeno dal punto di vista idraulico – sarebbe stata in corrispondenza dell'Argine Nord, e non dell'opera di regolazione, per la maggior differenza di tirante idrico (e dunque di energia potenzialmente rilasciabile) tra monte e valle in caso di rottura. Assumendo infatti che:

- come fatto per il caso precedente, ci si trovi in condizione di tirante idrico massimo all'interno della Piana dei Pascoli (265.43 m s.l.m.), quindi con lo sfioratore di piena già operante attorno al valore di portata di progetto ( $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e così anche i fossi Est e Ovest;
- i terreni interni al dominio d'indagine siano per il resto saturi (nessuna componente di infiltrazione superficiale dunque, ragionevole vista la bassa soggiacenza) ma privi di tirante idrico apprezzabile;

si ritiene che le situazioni da indagare siano 2, ossia (Figura 42):



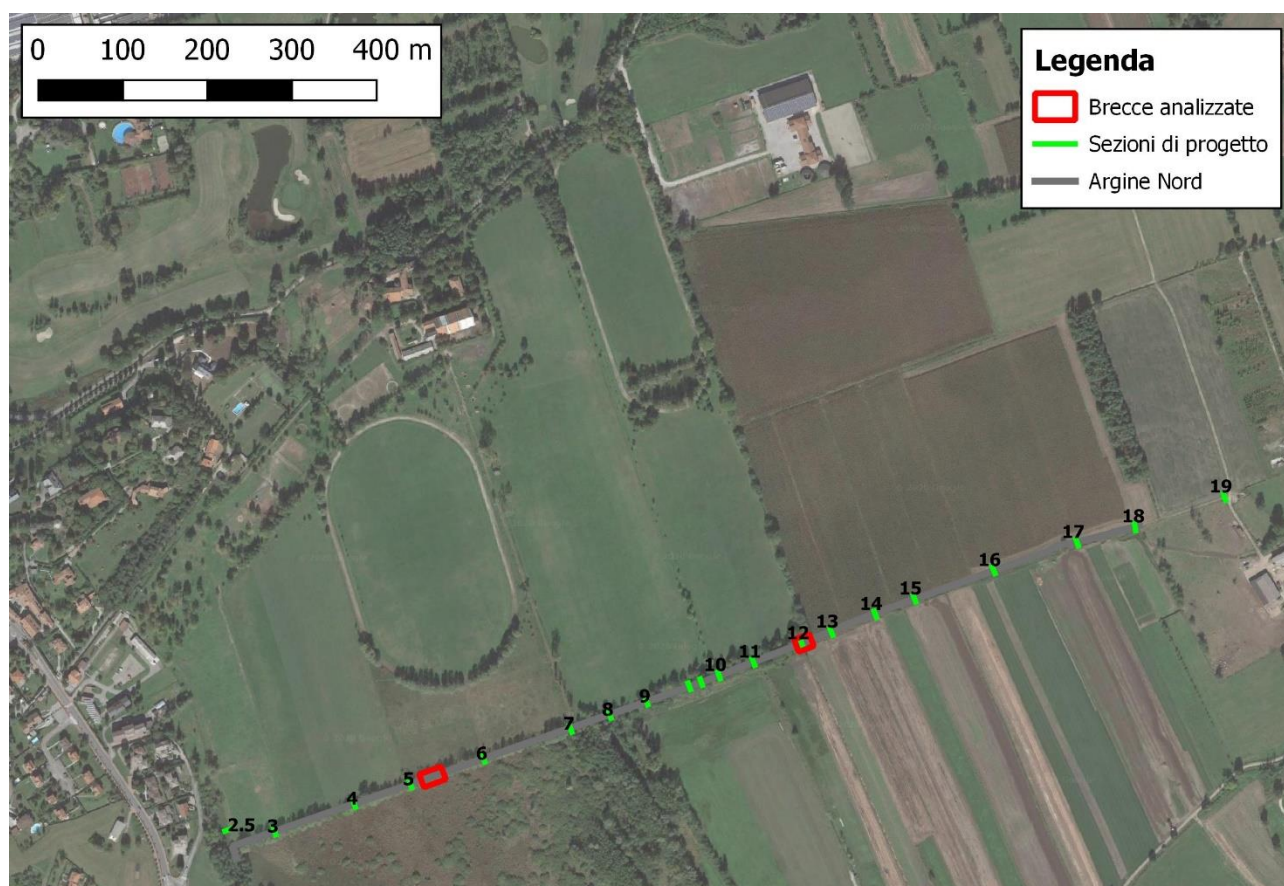


Figura 42: posizionamento delle brecce da modellare lungo l'Argine Nord

- la zona d'interfaccia tra l'argine armato e l'argine sciolto in corrispondenza della sezione di progetto n. 12 (progressiva 730 m dall'inizio dell'argine). Questa sezione costituisce l'unico tratto di discontinuità del rilevato arginale, e quindi un potenziale piano di debolezza che potrebbe divenire un percorso di filtrazione preferenziale per un processo di sifonamento. D'altra parte, anche in caso di collasso, la ridotta altezza dell'argine (80 cm) e il relativamente poco volume scaricabile – trovandosi il piano campagna a una quota abbastanza elevata dell'area di laminazione – uniti alla posizione abbastanza defilata, sono fattori che contribuiranno a contenere gli effetti della rottura;
- il tratto maggiormente elevato dell'argine rispetto al piano campagna, nei pressi della sezione 5 (progressiva 250 m). In questo punto il tirante idrico raggiunge quasi i 2 metri d'altezza, si trova – in linea d'aria – quasi alla minima distanza rispetto alle costruzioni più vicine e un eventuale collasso porterebbe allo svuotamento quasi totale dell'area di laminazione. Si può dunque assumere che l'apertura di una breccia nei pressi di questa sezione causerebbe l'evento di massima gravità ipotizzabile dal punto di vista idraulico, seppur rappresenti uno scenario legittimamente catastrofico, come spiegato in dettaglio nei risultati.

Si riportano di seguito le tabelle (*Tabella 7, Tabella 8*) risultanti dal calcolo delle caratteristiche della breccia per i casi sopra descritti.

SET DI EQUAZIONI	INCOGNITE		PARAMETRI			VARIABILI		
	$B_{ave}$ [m]	$t_F$ [h]	$K_0$ [/]	$C_b$ [/]	$S$ [m/m]	$V_w$ [m <sup>3</sup> ]	$h_{b5}$ [m]	$h_{b12}$ [m]
Von Thun & Gillette	$2.5h_w + C_b$	$B_{ave}/(4h_w)$		6.1	0.4	630'000	1.9	0.8
Froelich (1995)	$0.1803K_0V_w^{0.32}h_b^{0.19}$	$0.00254V_w^{0.53}h_b^{-0.9}$	1		0.9			
Froelich (2008)	$0.27K_0V_w^{0.32}h_b^{0.04}$	$63.2(V_w/(gh_b^2))^{1/2}$	1		0.7			

**Tabella 7:** formule regressive utilizzate per il calcolo dei parametri della breccia

SET DI EQUAZIONI	RISULTATI SEZ.5		RISULTATI SEZ.12	
	$B_{ave}$ [m]	$t_F$ [h]	$B_{ave}$ [m]	$t_F$ [h]
Von Thun & Gillette	10.85	1.43	8.1	2.53
Froelich (1995)	14.61	1.69	12.4	3.68
Froelich (2008)	19.87	2.34	19.2	5.56

**Tabella 8:** valori dei parametri della breccia per l'opera di regolazione ottenuti dalle formule regressive

Visti i valori ottenuti, anche in questo caso si è optato per una standardizzazione del valore di larghezza massima, basato sull'interpolazione dei valori ottenuti, adottando nel modello le casistiche finali contenute in Tabella 9.

SET DI EQUAZIONI	RISULTATI SEZ.5		RISULTATI SEZ.12	
	$B_{ave}$ [m]	$t_F$ [h]	$B_{ave}$ [m]	$t_F$ [h]
Von Thun & Gillette	10	1.29	10	3.04
Froelich (1995)	15	1.81	15	4.41
Froelich (2008)	20	2.32	20	5.78

**Tabella 9:** valori dei parametri della breccia adottati nella modellazione

Per tutti i casi analizzati il valore di pendenza delle sponde  $S$  viene fissato a un valore intermedio di 0.7 m/m, il coefficiente di efflusso a battente  $C_{or}$  a 0.55, che diventa  $C_{weir}$  pari a 1.44 una volta che la breccia si trasforma in una briglia a cielo aperto.

Si è infine ritenuto non necessario analizzare anche il caso di collasso per sormonto dell'argine nei pressi dello scolmatore, reputando:

- eccessivamente conservativa l'ipotesi di scalzamento del rivestimento in massi ciclopici ammorsati nel calcestruzzo da parte dell'azione erosiva della corrente, considerate le massime velocità raggiunte da quest'ultima (circa 2 m/s nelle condizioni peggiori) e soprattutto la frequenza di attivazione di progetto (tempo di ritorno  $T$  superiore ai 50 anni);
- che, vista la collocazione spaziale dello sfioratore, l'analisi produrrebbe verosimilmente un risultato intermedio tra le due condizioni analizzate.

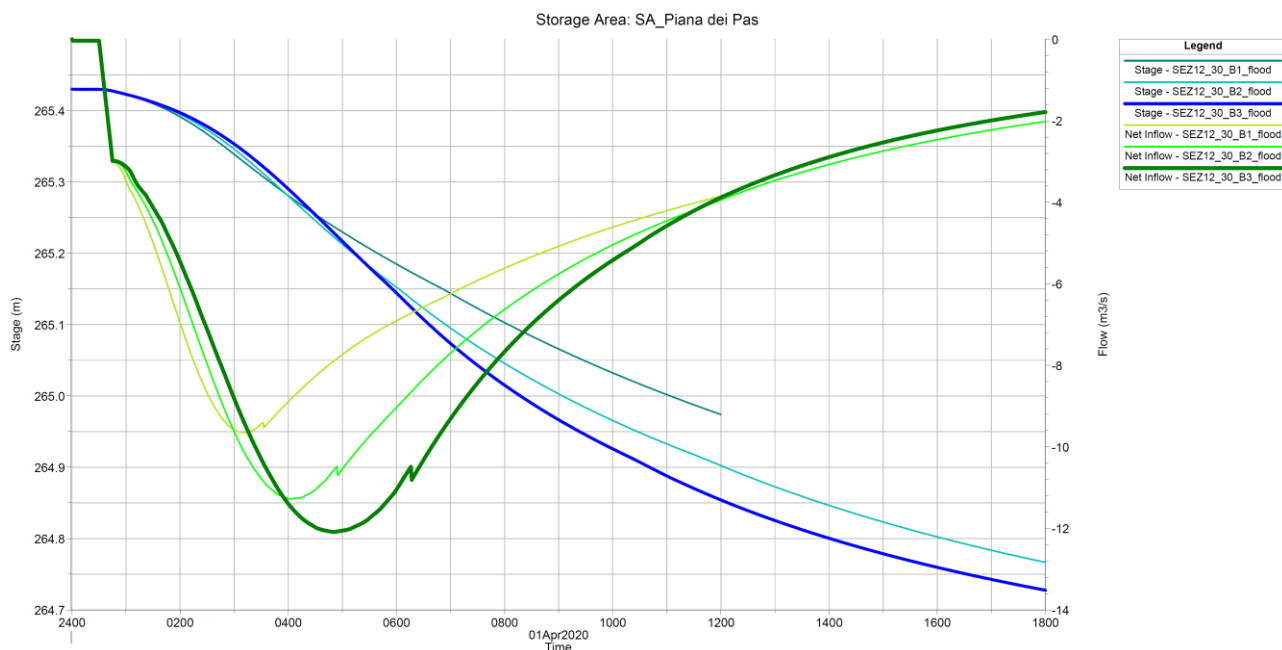
#### 4.2.3.4. Durata della simulazione e passo temporale

Per determinare la durata complessiva delle varie simulazioni effettuate si è proceduto per tentativi, fino a individuare quel valore che garantisse di osservare il decorso della totalità dell'evento, fissato a 18 ore per l'analisi di dam-break della sezione 12 e a 24 ore per quella della sezione 5. In entrambi i casi la breccia si attiva a 30 minuti dall'inizio dell'analisi, per consentire nel frattempo il riempimento della rete di drenaggio.

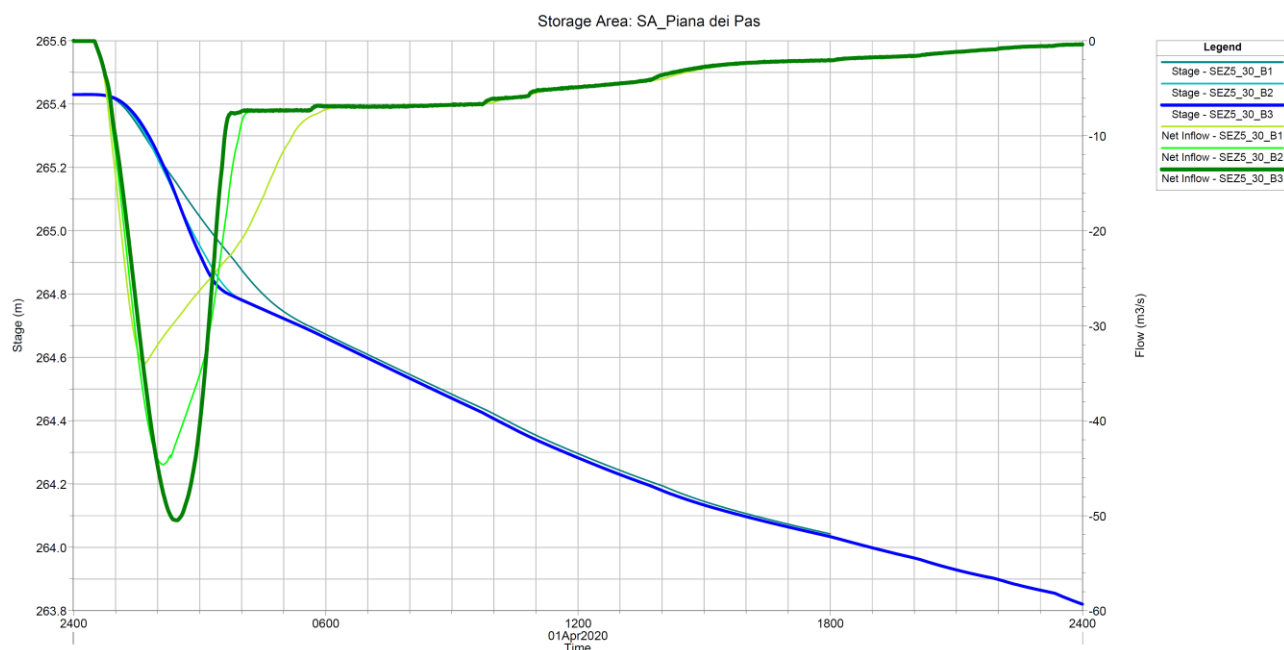
Ancora una volta si è partiti dal numero di Courant, procedendo sempre in trial-and-terror, per determinare il passo temporale  $\Delta t$  maggiormente adatto all'analisi, stabilendo anche in questo caso il valore di definitivo pari a 1 secondo.

#### 4.2.3.1. Risultati ottenuti

L'analisi dei risultati prende avvio con l'individuazione del caso (B1, B2 o B3) maggiormente critico tra quelli proposti, per ciascuna delle brecce indagate. A questo proposito, osservando i grafici relativi alle portate in uscita dall'area di laminazione (Figura 43 e Figura 44), si nota facilmente come il caso B3 (ossia della breccia più larga ma più "lenta" a formarsi) conduca ai valori massimi delle portate di picco dell'idrogramma in uscita dall'Argine Nord.

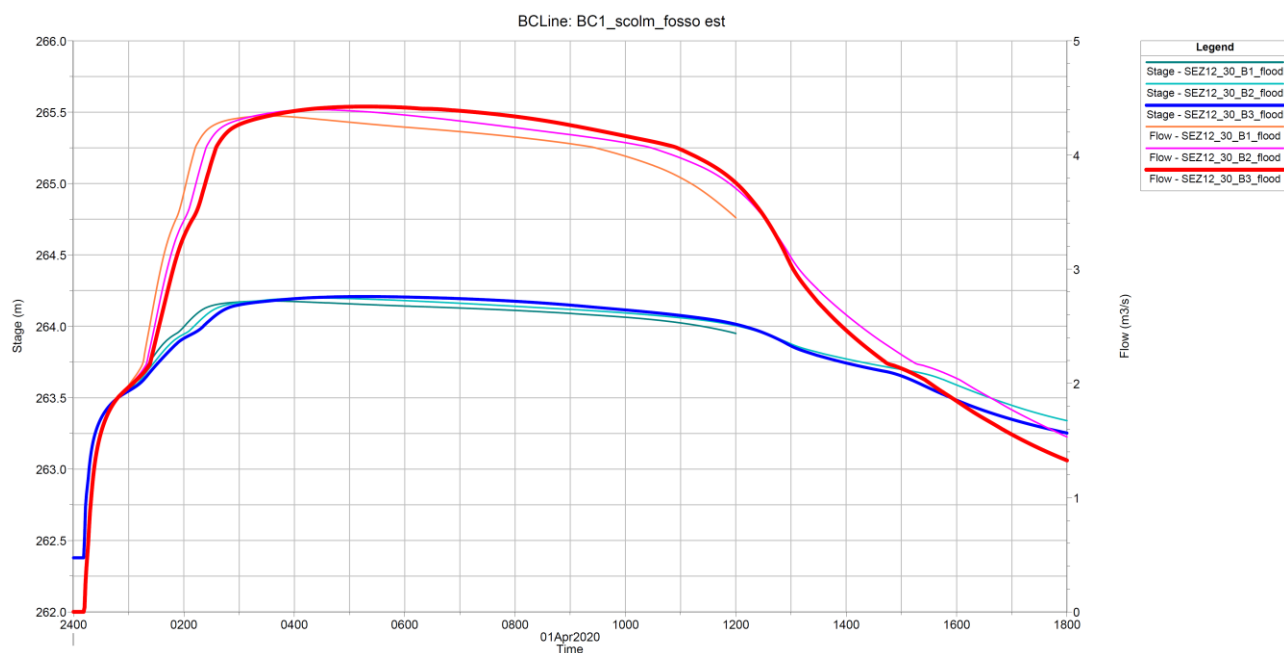


**Figura 43:** idrogramma in uscita e tirante idrico dell'area di laminazione, breccia sez. 12

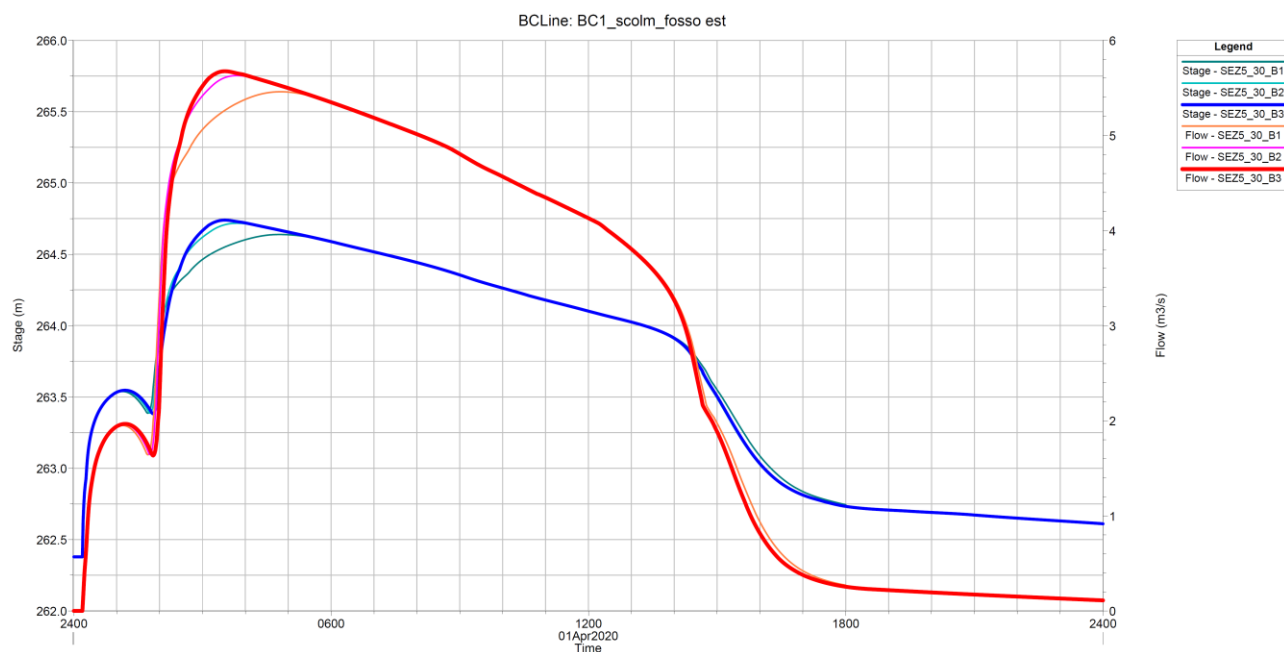


**Figura 44:** idrogramma in uscita e tirante idrico dell'area di laminazione, breccia sez. 5

Nel primo caso (sez. 12) la portata di picco risulta intorno ai  $12 \text{ m}^3/\text{s}$ , con un andamento maggiormente "spanciato" dell'idrogramma, mentre nel secondo caso (sez. 5) la portata di picco raggiunge valori 4 volte superiori (circa  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ ), con una forma dell'idrogramma molto più impulsiva. Le differenze tra le varie casistiche della singola breccia appaiono abbastanza consistenti tra loro, con un incremento del 30-50% in termini di portate di picco tra i casi B1 e B3, tuttavia tali differenze risultano minimali (inferiori al 5% in termini di portata di picco) all'uscita dell'area della Nuova Poncia, come dimostrato dagli idrogrammi associati alle condizioni al contorno, come mostrato in *Figura 45* e *Figura 46* per quello relativo al canale scolmatore/fosso Est.



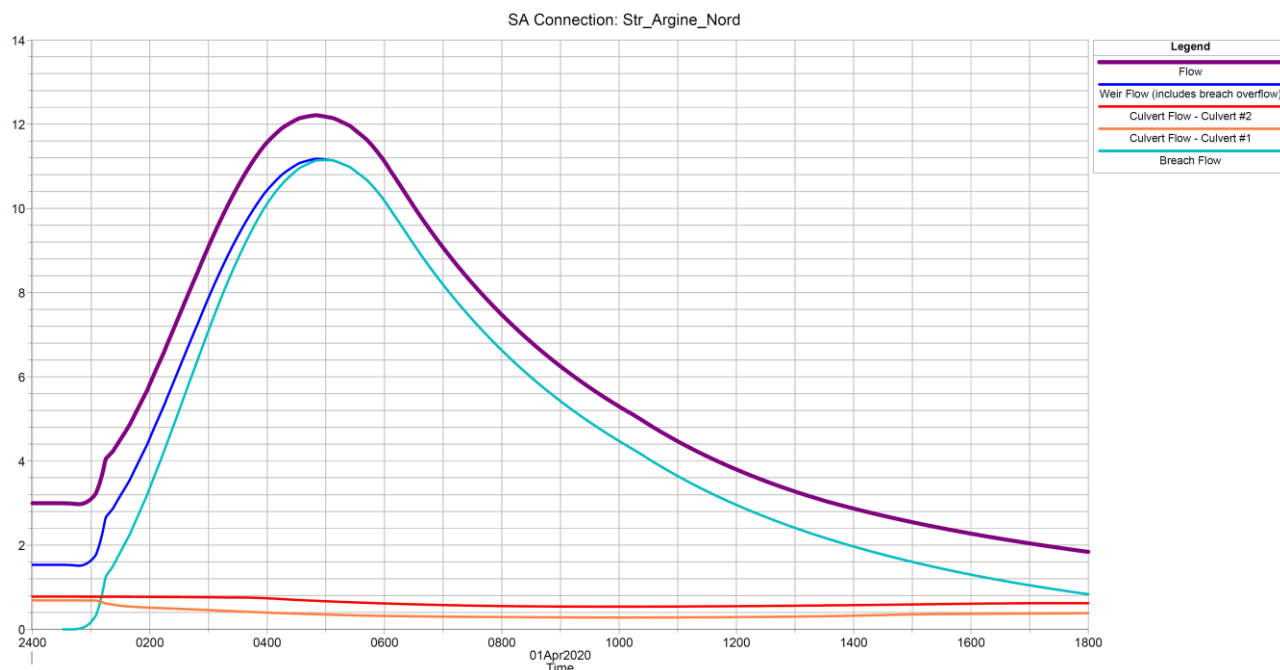
**Figura 45:** idrogrammi in uscita dal nuovo attraversamento di Via per la Poncia (canale scolmatore/fosso Est), breccia sez. 12



**Figura 46:** idrogrammi in uscita dal nuovo attraversamento di Via per la Poncia (canale scolmatore/fosso Est), breccia sez. 5

Questa considerazione, associata all'andamento significativamente più appiattito degli idrogrammi in uscita rispetto a quelli in ingresso, nonché ai valori di picco delle rispettive portate (pari – per il caso peggiore B3 – a 4.5 e 5.5 m<sup>3</sup>/s per la sola condizione al contorno del canale scolmatore/fosso Est, che diventano 8.5 e 13.5 m<sup>3</sup>/s considerando tutte e tre le CC in uscita dal modello), fornisce già una chiara indicazione del comportamento fortemente diffusivo dell'idrogramma di piena, nato dal dam-break, all'interno dei terreni della Nuova Poncia, che di fatto fungono da seconda area di laminazione in caso di parziale collasso dell'arginatura, contenendo al loro interno gran parte del volume di piena per poi rilasciarlo lentamente verso valle. Tale comportamento risulterà ancora più chiaro dall'osservazione della distribuzione 2D di tiranti e portate. Prima tuttavia si mostra un ultimo grafico, relativo al solo caso B3 per la sezione 12, in cui si possono osservare i vari contributi all'idrogramma in uscita dall'Argine Nord (Figura 47).





**Figura 47:** componenti dell'idrogramma in uscita dall'Argine Nord, breccia sez. 12, caso B3

In particolare, è possibile notare che:

- le portate pre-collasso ammontano a circa  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ , equamente suddivise tra canale sfioratore e i due fossi Est/Ovest, con il valore del primo in linea con la indicazione fornita nella progettazione definitiva;
- a rottura avvenuta, la portata transitante dalla breccia prende rapidamente il sopravvento, mentre si esaurisce la portata dello sfioratore a causa dell'abbassamento del tirante;
- nella coda dell'idrogramma, il contributo delle due culvert che alimentano i fossi (specie quella del fosso Ovest) tornano a essere significativo con il progressivo esaurirsi del volume interno alla Piana dei Pascoli e dunque in grado di alimentare la breccia.

Passando ora all'analisi del comportamento idraulico dell'area della Nuova Poncia a seguito dell'apertura della breccia, si mostano di seguito (Figura 48 - Figura 51) le distribuzioni di tiranti idrici e velocità in alcuni istanti particolarmente significativi per il caso più severo – B3 – relativo a entrambe le rotture ipotizzate, in particolare:

- fasi iniziali post-apertura della breccia;
- velocità massima della corrente;
- tiranti massimi tiranti/estensione dell'area di allagamento;
- fine della simulazione.



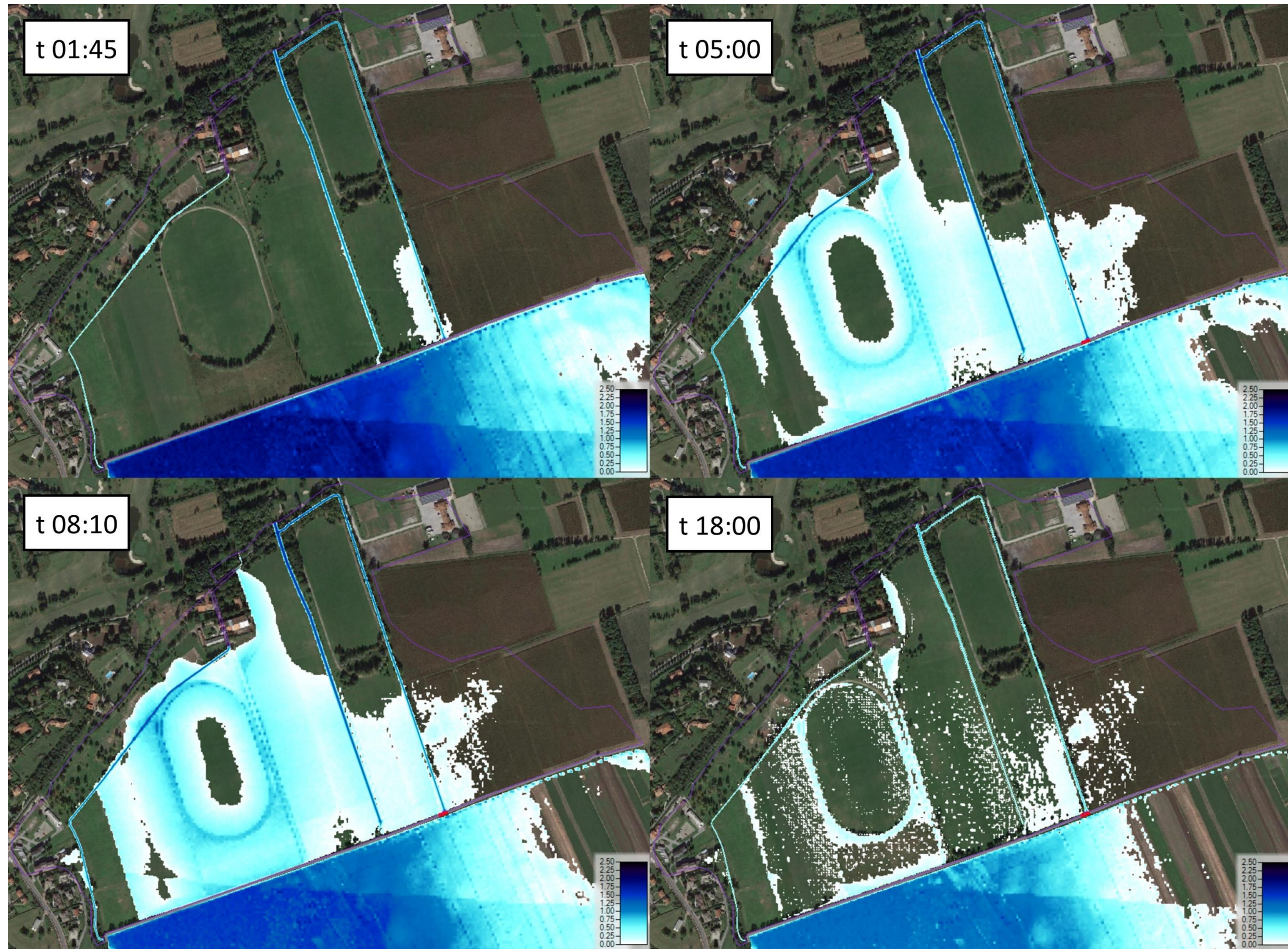


Figura 48: distribuzione planimetrica dei tiranti idrici agli istanti [hhmm] 0145, 0500, 0810, 1800. Breccia sez. 12, caso B3



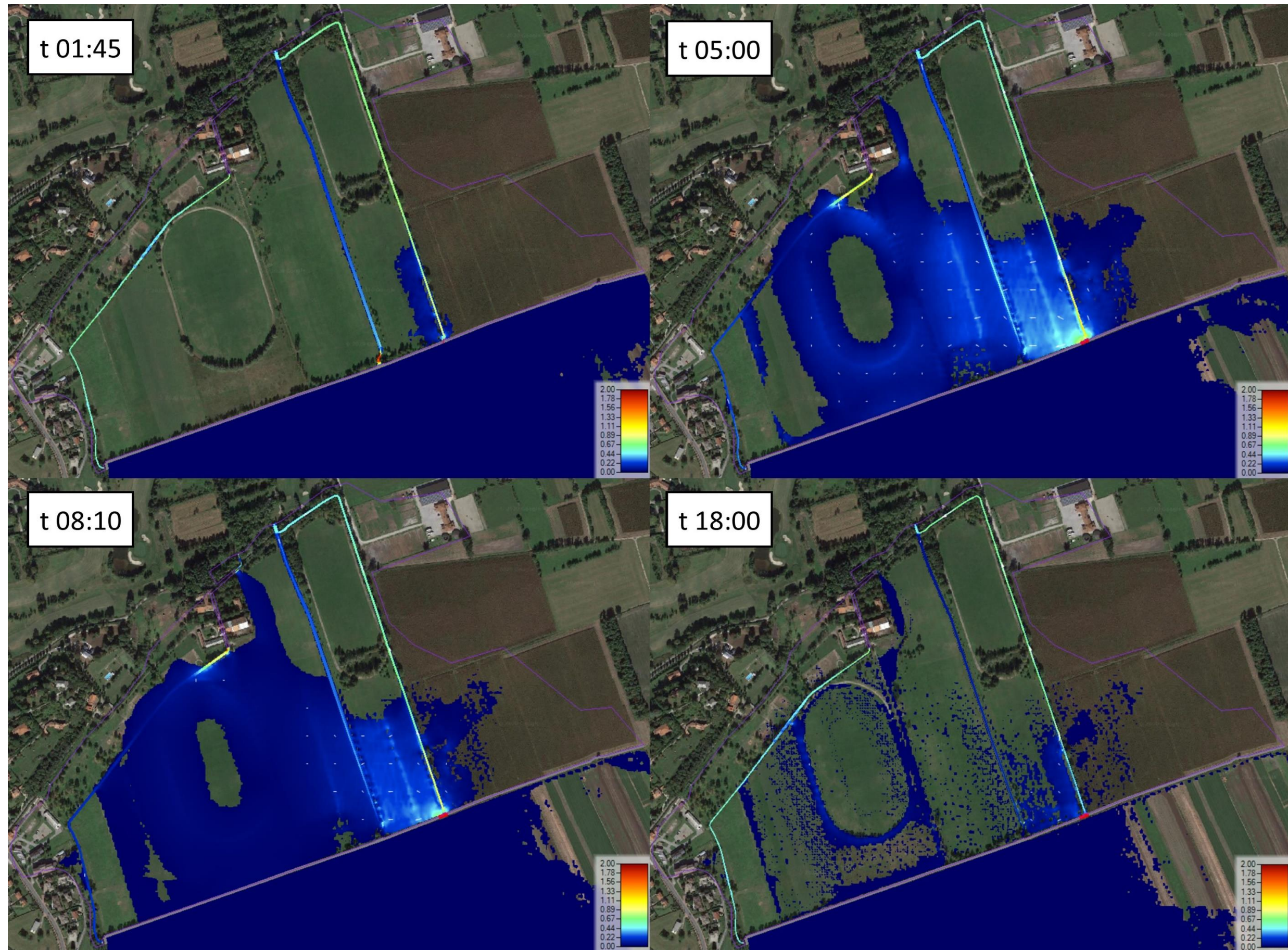


Figura 49: distribuzione planimetrica delle velocità della corrente agli istanti [hhmm] 0145, 0500, 0810, 1800. Breccia sez. 12, caso B3



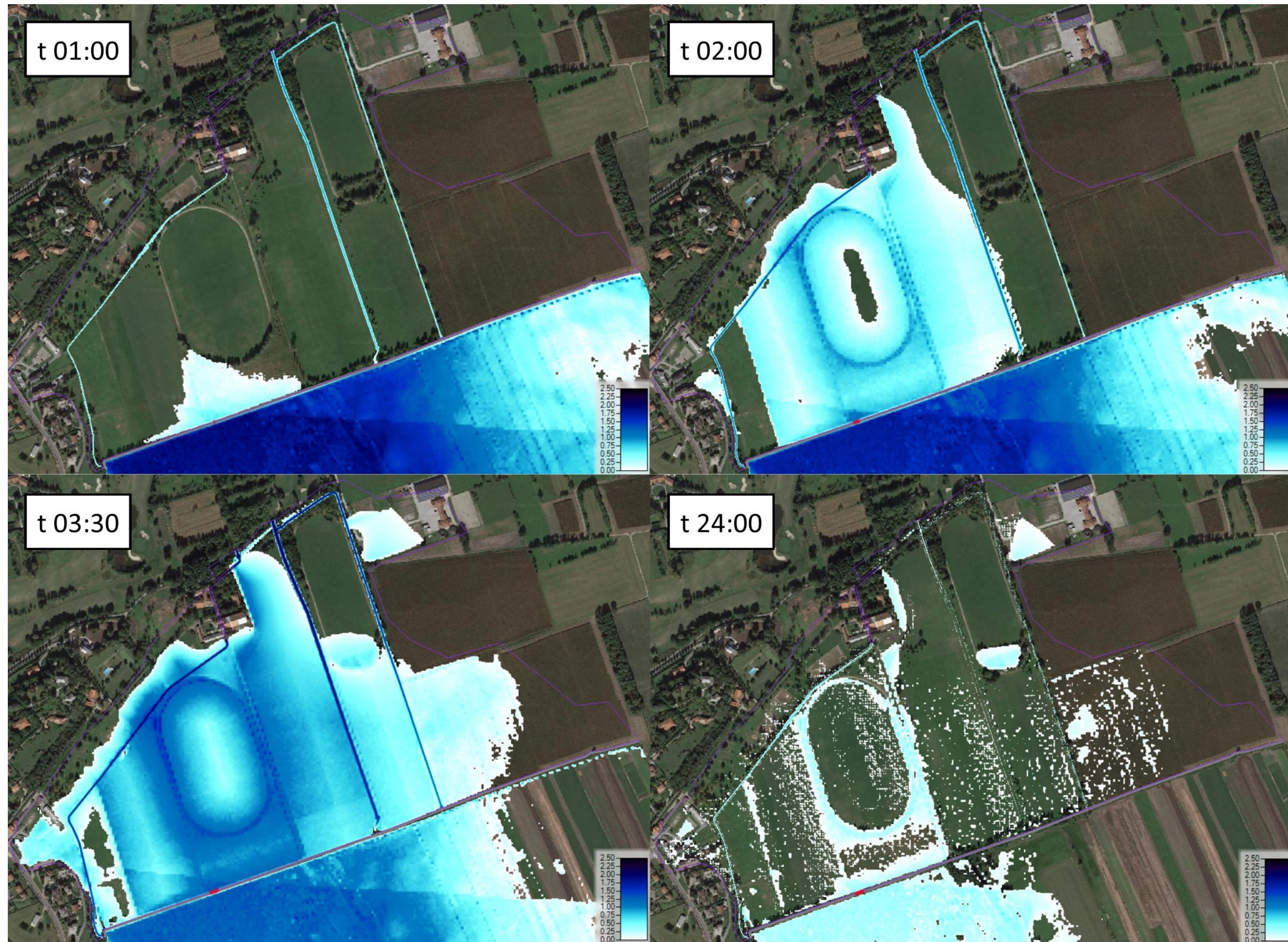


Figura 50: distribuzione planimetrica dei tiranti idrici agli istanti [hhmm] 0100, 0200, 0330, 2400. Breccia sez. 5, caso B3



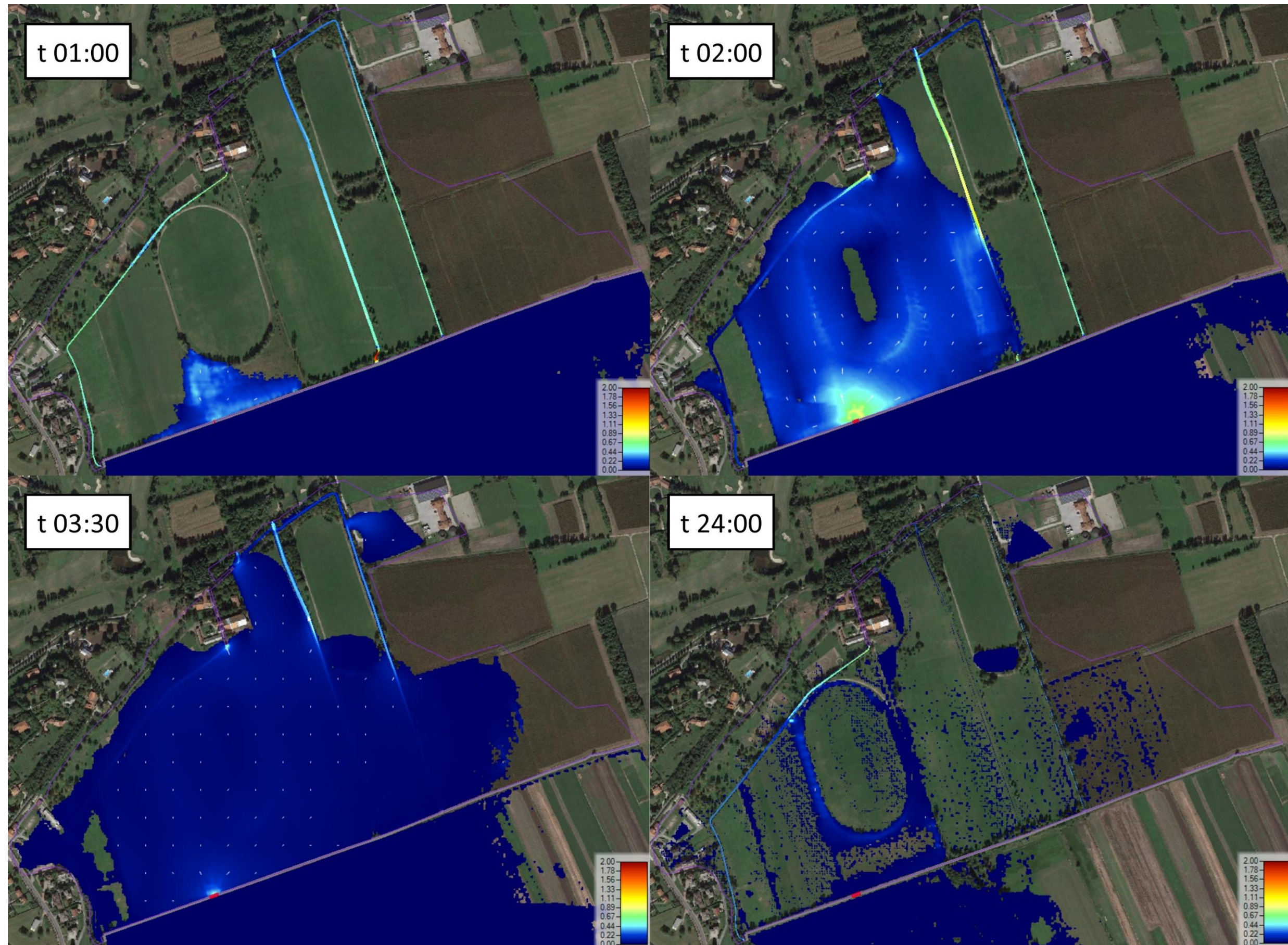


Figura 51: distribuzione planimetrica delle velocità della corrente agli istanti [hhmm] 0100, 0200, 0330, 2400. Breccia sez. 5, caso B3



Dall'analisi delle immagini emergono le seguenti considerazioni:

- il diverso comportamento in termini dinamici delle due rotture emerge fin dai primi stadi. Se infatti per quanto riguarda la breccia presso la sezione 12, a distanza di 1 h e 15' dall'inizio dell'evento l'area allagata al di fuori della rete di drenaggio ha un'estensione molto modesta, con valori dei tiranti idrici ( $< 10$  cm) e velocità ( $< 0.1$  m/s) ancora trascurabili, il comportamento nel caso di rottura della sezione 5 ha carattere più impulsivo, poiché a soli 30' dalla rottura il fronte dell'onda di piena formatasi ha raggiunto i 150 metri dall'argine e possiede già velocità (0.3 m/s) e tiranti (0.5 m a valle della struttura) non indifferenti. A parziale giustificazione della differenza tra i due casi, oltre naturalmente al maggiore tempo di formazione della breccia per la sezione 12, c'è il fatto che buona parte della portata in uscita da quest'ultima viene direttamente incanalata nel fosso Est, che si trova esattamente nei pressi della breccia, e che infatti registra un immediato incremento della velocità di scorrimento a valle (0.9 m/s contro gli 0.5 m/s del caso "indisturbato" visibile per la sezione 5);
- in termini di massimi valori delle distribuzioni di velocità della corrente, anche in questo caso tale situazione viene raggiunta con tempistiche molto diverse (4 h e 30' per la sezione 12 contro 1 ora e 30' per la sezione 5), tuttavia il risultato è abbastanza comparabile e non eccessivamente problematico: in entrambi i casi si sviluppa una distribuzione di velocità abbastanza consistenti (dell'ordine di 0.5-0.8 m/s) all'interno di un'area semicircolare a valle della breccia di raggio circa pari a 50 m, situata tutta a distanza significativa (dell'ordine delle centinaia di metri) da qualsiasi struttura. All'interno del resto della – pur vasta – area allagata, la velocità della corrente assume ovunque valori contenuti (mai superiori a 0.3 m/s, eccezion fatta per la rete di drenaggio), denotando il forte effetto di smorzamento dell'idrogramma in uscita dalla breccia dell'argine grazie alla sua diffusione nei terreni della Nuova Poncia;
- le immagini in basso a sinistra mostrano la condizione di massima estensione dell'allagamento, unitamente ai massimi valori dei tiranti idrici raggiunti (raggiunta a 7 h e 40' dalla rottura per la sezione 12 e a 3 h dalla rottura per la sezione 5). In questo caso, le due rotture danno risultati abbastanza differenti, principalmente in ragione del fatto che la breccia alla sezione 5 possiede – una volta pienamente sviluppata – una quota di fondo sensibilmente inferiore rispetto alla sezione 12 (263.5 m s.l.m. contro 264.6 m s.l.m.), garantendole una coda dell'idrogramma in uscita molto più lunga, che continua fino al pressoché totale svuotamento della Piana dei Pascoli.

Osservando il risultato per la sezione 12, si nota come l'area di allagamento si estende essenzialmente in direzione Ovest verso i terreni della Nuova Poncia, mentre i territori a Est vengono solo minimamente interessati dagli allagamenti, trovandosi a una quota superiore. La Nuova Poncia è sede di allagamenti diffusi ma con valori di tiranti ancora abbastanza modesti (inferiori a 0.5 metri) pressoché ovunque esclusa l'area dell'ippodromo centrale, dove risultano compresi tra 0.5 e 0.9 metri. Si hanno dei rigurgiti contenuti del fosso Est ma non tali da causare allagamenti presso le strutture di Via Aldo Moro. Parimenti, le strutture della Nuova Poncia, situate nella zona Nord della proprietà, non vengono raggiunte dagli allagamenti.

Abbastanza differente risulta la situazione nel caso della sezione 5, dove le condizioni di massimo allagamento sono più severe: pur in una condizione quasi-statica in termini di velocità della corrente ( $< 0.1$  m/s ovunque), si riscontrano allagamenti diffusi all'interno dei terreni della Nuova Poncia, con l'eccezione dell'area degli edificati e della zona Nord - Est, e valori dei tiranti attorno a 1 metro, con punte di 1.2 – 1.3 metri nei pressi dell'ippodromo. Il rigurgito del fosso Est causa allagamenti di ridotta entità ( $< 20$  cm) all'interno del mappale 3667, foglio 3, mentre all'estremità Ovest del dominio

di indagine si generano allagamenti di media entità (circa 50 cm) nelle proprietà prospicienti a Via Aldo Moro (particelle 2577, 4201, 4202, 4203, foglio 9):

- le immagini relative alla fine della simulazione (in basso a destra), mostrano come, in entrambi i casi, nell'arco di circa una giornata (18 – 24 ore) la situazione regredisca fino a una condizione simile a quella pre-evento, con l'area della Nuova Poncia quasi interamente drenata dalla rete di canali in direzione Nord, eccezione fatta per alcuni allagamenti circoscritti di ridotta entità destinati a scomparire per infiltrazione nel sottosuolo e/o evapotraspirazione.

Infine, dai dati delle distribuzioni di tiranti idrici e velocità, precedentemente commentati, si sono sviluppate delle mappe di pericolosità idraulica per il dominio di indagine, seguendo le indicazioni contenute all'interno della D.g.r. 2616/2011 (All.4, *Procedure per la valutazione e la zonazione della pericolosità e del rischio da esondazione*), e in particolare il grafico contenuto in Figura 52.

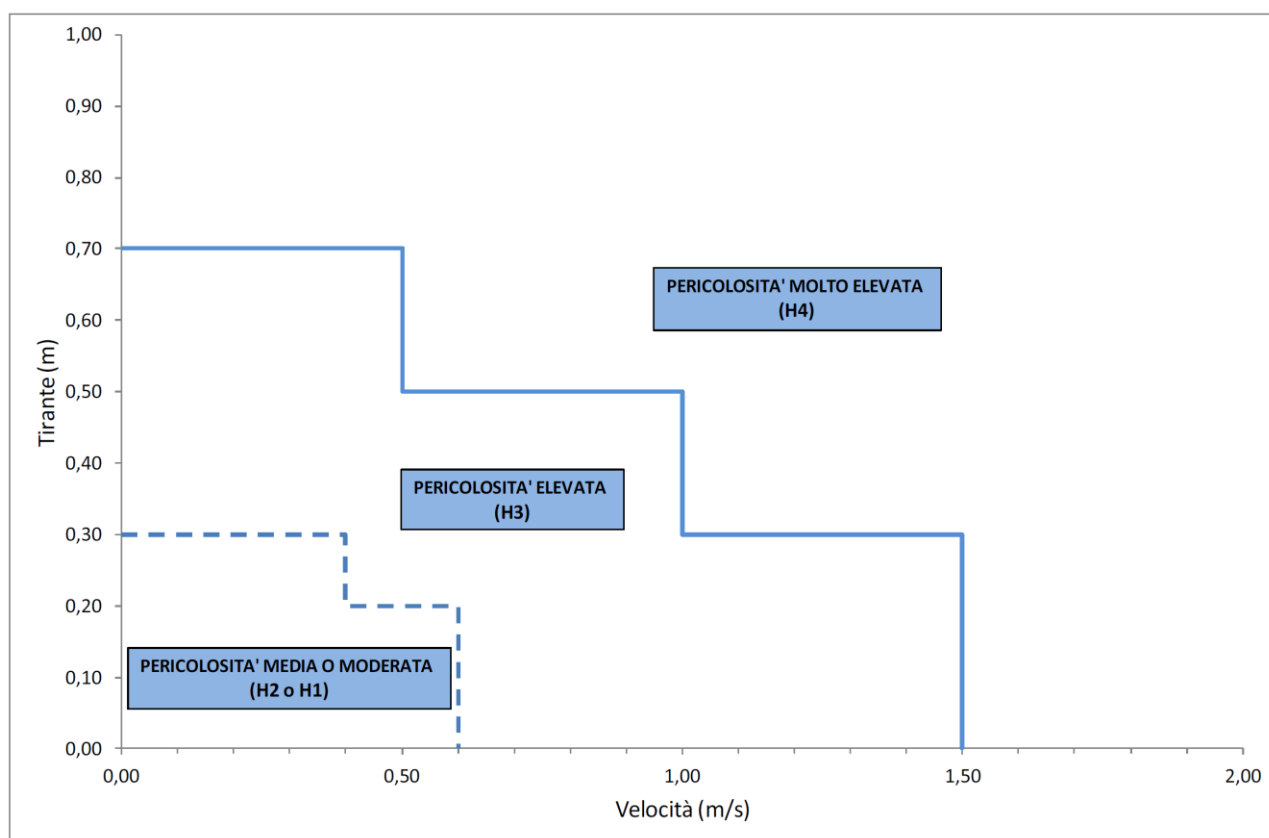


Figura 52: classificazione della pericolosità idraulica ai sensi della D.g.r. 2616/2011

I risultati ottenuti, osservabili in Figura 53 e Figura 54, potranno essere utilizzati come strumento di supporto alla redazione del piano di protezione civile provinciale relativo alla diga. La classificazione in termini di pericolosità dell'area indagata riflette essenzialmente le considerazioni esposte nei paragrafi precedenti, evidenziando estese aree a pericolosità molto elevata (H4) all'interno dei terreni della Nuova Poncia, limitati tuttavia ad aree prive di elementi esposti di valore elevato quali strutture o infrastrutture o luoghi densamente frequentati.



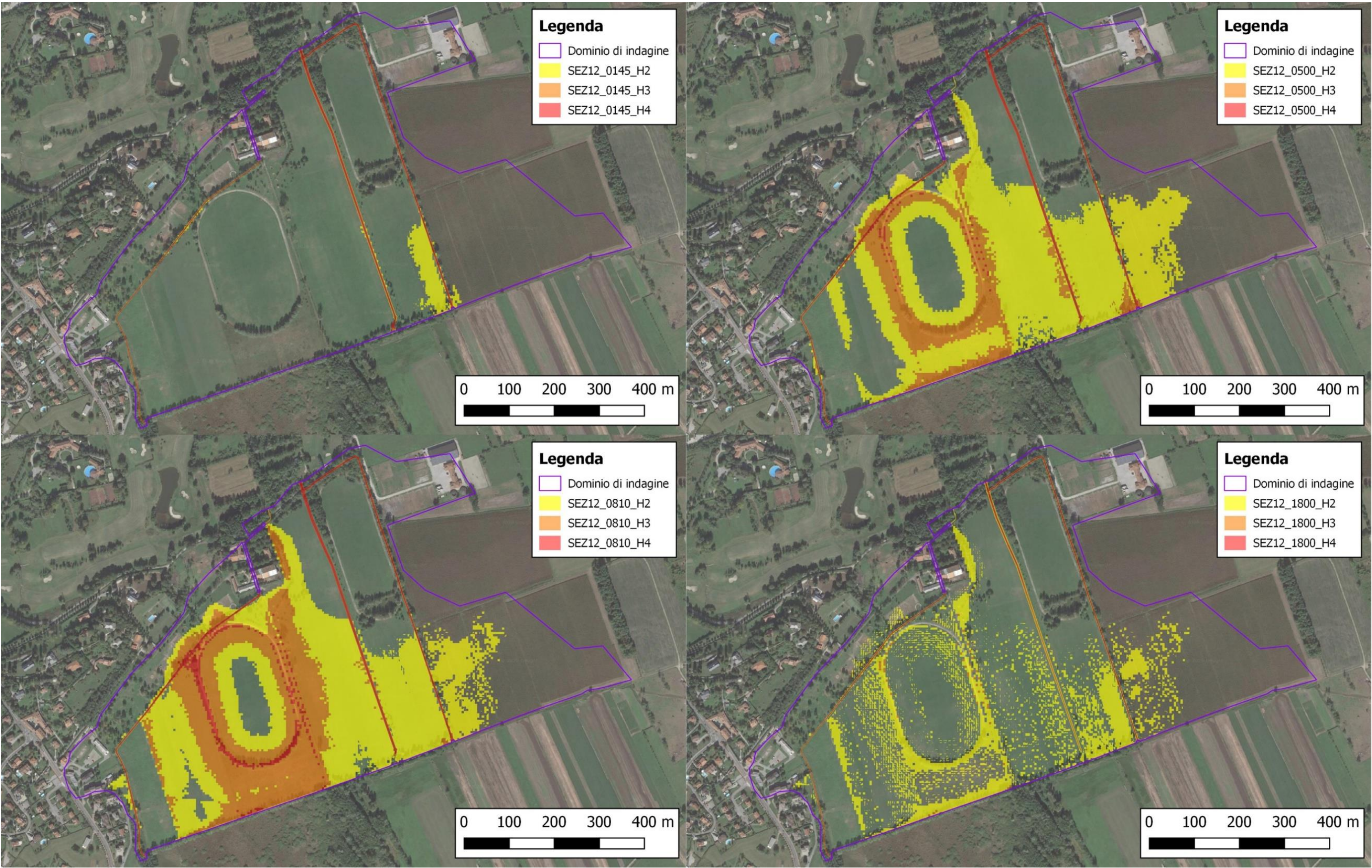


Figura 53: classificazione della pericolosità idraulica per il dominio di indagine, breccia sez. 12, caso B3



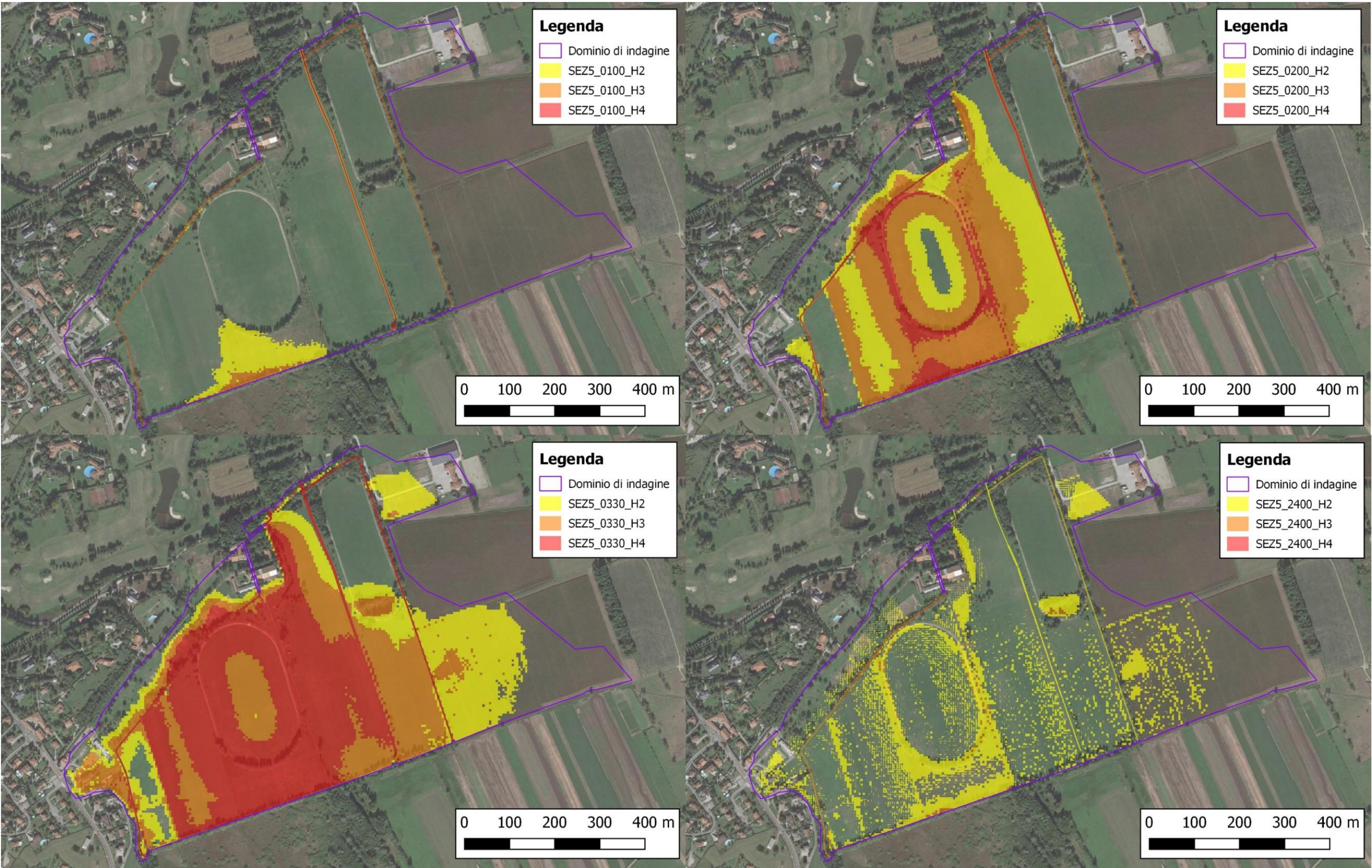


Figura 54: classificazione della pericolosità idraulica per il dominio di indagine, breccia sez. 5, caso B3



## 5. Conclusioni

La presente relazione sintetizza i contenuti della modellazione idrologico-idraulica effettuata durante la progettazione definitiva per il regolare funzionamento dell'area di laminazione denominata Piana dei Pascoli, in cui verranno veicolate in derivazione le portate di piena del torrente Gandaloggio, e aggiunge l'analisi in dettaglio dei potenziali meccanismi di collasso ("dam-break") delle strutture di ritenuta previste dall'intervento, nello specifico del rilevato relativo all'opera di regolazione lungo il Fosso dei Pascoli e del rilevato denominato "Argine Nord", per compiere ai dettami della L.R. 8/1998.

Dalla modellazione idraulica delle condizioni "di esercizio" dell'area di laminazione emerge che la Piana dei Pascoli è in grado di contenere eventi fino a 50 anni di tempo di ritorno per un volume di invaso di circa 500'000 m<sup>3</sup> (volume che aumenta a 630'000 m<sup>3</sup> al raggiungimento del coronamento arginale). Tale valore è più basso del tempo di ritorno minimo previsto dalla normativa (500 anni) ma vincoli di varia natura (in primis l'impossibilità di far confluire ulteriori portate dal Gandaloggio) impediscono un ulteriore incremento del volume di invaso. Anche il processo di svuotamento è legato a vincoli esterni, nello specifico al tirante idrico presente nella Bevera di Molteno, il cui rigurgito in condizioni di piena influisce pesantemente sulle portate in uscita dalla Piana tramite il Fosso dei Pascoli. Soprattutto per questo comportamento "auto-regolante" (oltechè per minimizzare per quanto possibile gli onerie la complessità di gestione dell'intero sistema) si è optato per realizzare un'opera di restituzione costituita da una bocca tarata non regolata, ma avente geometria identica al ponte di Via dell'Industria, in Comune di Sirone, che attualmente costituisce il vincolo idraulico che determina l'entità dei deflussi in uscita dalla Piana dei Pascoli. Lungo l'Argine Nord, invece, gli unici flussi in uscita risultano essere le due tubazioni di collegamento – anch'esse non regolate, a differenza di quanto previsto nel progetto definitivo) ai fossi Est e Ovest che delimitano l'area della proprietà Nuova Poncia, che convogliano verso il lago di Annone una portata complessivamente mai superiore a 1.5 m<sup>3</sup>/s.

L'analisi di dam-break, svolta nel progetto esecutivo, porta alle seguenti evidenze:

- le aree a valle dell'opera di regolazione subirebbero conseguenze poco rilevanti anche a seguito di un potenziale collasso quanto improbabile collasso dell'intera struttura. La minimale differenza di tirante idrico tra monte e valle dell'opera di regolazione (poche decine di centimetri anche ipotizzando condizioni iniziali alquanto conservative), dovuta essenzialmente alle pendenze molto ridotte lungo l'intera asta del Fosso dei Pascoli, impediscono nei fatti lo sviluppo di una vera e propria onda di piena durante l'apertura della breccia, quanto più un lento spandimento dell'area di laminazione fino al ponte di Via dell'Industria, che diventerebbe la "nuova" opera di regolazione dell'intera area (con caratteristiche idrauliche analoghe a quella collassata), senza che sviluppino mai velocità della corrente significative;
- l'Argine Nord è stato verificato per due potenziali collassi:
  - il primo (in prossimità sezione 12 tra quelle indicate nelle tavole di progetto) prefigura un'erosione interna (piping) lungo una possibile superficie di debolezza (discontinuità tra argine rinforzato e non) e genera allagamenti diffusi in buona parte del territorio della Nuova Poncia, seppur con valori dei tiranti idrici (pressocchè ovunque inferiori a 0.5 m e mai superiori a 1 m) e velocità (< 0.5 m/s tranne che nei pressi della breccia) abbastanza modesti. Questi ultimi dati si traducono in una mappa della pericolosità avente estese aree a pericolosità H2 (media) e H3 (elevata), che non coinvolgono però zone dall'elevato valore

esposto, mentre le aree a pericolosità H4 (molto elevata) sono essenzialmente limitate alla rete di drenaggio;

- il secondo (sezione 5), invece, simula un caso di piping nel caso idraulicamente peggiore possibile, ovvero dove la differenza di tirante idrico tra monte e valle è massima. Il risultato ottenuto è essenzialmente uguale al precedente in termini di massima distribuzione di velocità ottenuta, ma i tiranti idrici più elevati (diffusamente intorno a 1 m) portano a una carta della pericolosità più severa, con estese aree in fascia H4 (prive di significativi elementi esposti), ed alcuni edifici coinvolti nei pressi di Via Aldo Moro a Molteno, seppur a gravità moderata (tiranti idrici inferiori a 0.5, velocità della corrente quasi nulle). È tuttavia doveroso ricordare che tale simulazione si basa su ipotesi molto conservative, ovvero:

- simultaneo accadimento di un'evento di piena più che cinquantennale e malfunzionamento della struttura di ritenuta, nel suo punto più grave e in condizioni di incipiente sormonto;
- formazione di una breccia da piping all'interno di un rilevato rinforzato di circa 5 metri di spessore, in terreni a bassa permeabilità, in un tempo inferiore alla residenza dell'acqua all'interno dell'area di laminazione (ordine delle decine di ore);

mettendo insieme le ipotesi sopraelencate, appare chiaro che un evento di questa portata si possa verificare solo in caso di grave e reiterata trascuratezza nella manutenzione del rilevato arginale, fino a portarlo a significativi livelli di deterioramento;

- ad ogni modo, stante le analisi condotte e alcuni dubbi di natura orografica non interamente risolti dai dati a disposizione, si raccomanda di inserire le seguenti misure cautelative all'interno del Piano di Protezione Civile dell'opera, al profilarsi di un potenziale collasso dell'opera di regolazione o dell'Argine Nord:
- divieto di accesso alla Strada consortile del Pozzolo dal lato di Via dell'industria e, se ritenuto necessario, chiusura al traffico anche il tratto della stessa Via dell'industria nei pressi dell'attraversamento del Fosso dei Pascoli;
- evacuazione dei mappali 2577, 4201, 4202, 4203, foglio 9 del Comune di Molteno, corrispondenti alle aree potenzialmente inondabili nei pressi di Via Aldo Moro. Tali aree risultano ad oggi comunque separate dalla proprietà della Nuova Poncia mediante un muro di cinta;
- chiusura al traffico del tratto di Via per la Poncia (Comune di Annone Brianza) che separa le proprietà della Nuova Poncia e del Golf Club, compresa tra lo scatolare esistente e quello in progetto, per circa 100 metri. Lungo quel tratto la strada si abbassa con una forma tipo "corda molle", e sebbene dai dati del DTM (pur abbassato di 30 cm) non risulti sormontata nemmeno nel caso peggiore, i dati del rilievo topografico di dettaglio la pongono a una quota ancora più bassa di 10-40 cm, che comporterebbe un – seppur lieve – allagamento localizzato della stessa;
- evacuazione dell'intera proprietà "Nuova Poncia". Anche in questo caso, sebbene dalle simulazioni la zona Nord – sede della quasi totalità delle strutture interne alla proprietà – non sia soggetta a esondazione, analogamente al punto precedente dai dati del rilievo

topografico effettuato durante la progettazione definitiva emerge una discrepanza in difetto rispetto alle quote del DTM che potrebbe portare a modesti allagamenti anche di tali aree.

- divieto di accesso ai terreni del Golf Club di Annone Brianza: nonostante si sia reputato non necessario estendere l'analisi degli effetti del dam-break anche all'area del Golf Club, considerando che, sebbene le portate di picco in uscita dai territori della nuova Poncia, siano certamente superiori al massimo deflusso transitabile nelle rete di canali che attraversa il Golf in direzione della SS36, ci si può ragionevolmente aspettare allagamenti di ridotta entità in un'area priva di significativi elementi esposti, caratterizzati da velocità di avanzamento molto modeste, è comunque auspicabile, in una situazione di questo tipo, prevedere la chiusura della struttura fino allo svuotamento dell'area di laminazione.



## Allegato A - Descrizione del codice di calcolo di moto vario di Hec-Ras

Il flusso dell'acqua all'interno di un corso d'acqua (caso 1D) o attraverso una superficie bidimensionale (caso 2D) in condizioni di moto vario – ovvero variabile nel tempo e nello spazio – è governato dalle seguenti leggi fisiche:

- principio di conservazione della massa. Il flusso netto di portata attraverso un volume di controllo è pari alla variazione di volume interno dello stesso:

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

dove  $Q_i$  e  $Q_u$  rappresentano i flussi in ingresso e in uscita  $W$  il volume interno e  $Q_l$  il contributo laterale;

- principio di conservazione della quantità di moto. Riformulando la seconda legge di Newton si può dire che la somma delle forze esterne agenti su un volume di controllo e del flusso netto di quantità di moto attraverso tale volume è pari alla variazione di quantità di moto interna allo stesso:

$$\sum \vec{F} = \frac{d\vec{M}}{dt}$$

dove  $\sum \vec{F}$  è la somma delle forze agenti sul sistema e  $\frac{d\vec{M}}{dt}$  la variazione di quantità di moto.

Entrambe queste leggi vengono espresse a livello matematico come equazioni differenziali alle derivate parziali, note come equazioni di De Saint-Venant, sotto le seguenti ipotesi:

- fluido incompressibile (densità costante);
- corrente gradualmente variata (distribuzione della pressione dell'acqua di tipo idrostatico lungo la verticale);
- piccole pendenze, in modo da poter assumere che l'affondamento del fondo alveo misura lungo la verticale coincida con la linea piezometrica, misurata rispetto alla normale al fondo;
- moto assolutamente turbolento per il calcolo delle resistenze.

All'interno del presente allegato se ne mostrerà sinteticamente la formulazione adottata da Hec-Ras e la relativa tecnica di risoluzione numerica delle stesse implementata nel programma, per i casi mono e bidimensionale. Una spiegazione dettagliata dell'impianto teorico alla base di tali formulazioni nonché dell'intero processo di calcolo numerico si trova al capitolo 1 del capitolo 2 del *Hydraulic Reference Manual* (Ver. 5.0) del programma.

### Caso monodimensionale

Per le analisi monodimensionali, le equazioni di De Saint-Venant si declinano nella seguente forma differenziale:

- equazione di continuità (cons. massa):

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0$$

dove:

- $A_T$  è l'area bagnata complessiva (somma dell'area di flusso attiva  $A$  e di quella inattiva  $S$ ) della sezione traversa (di fatto la sezione centrale di un volume di controllo infinitesimo);
- $Q$  è il flusso della corrente in alveo;
- $q_l$  è il flusso in ingresso laterale per unità di lunghezza;
- equazione del moto (cons. quantità di moto):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f\right)$$

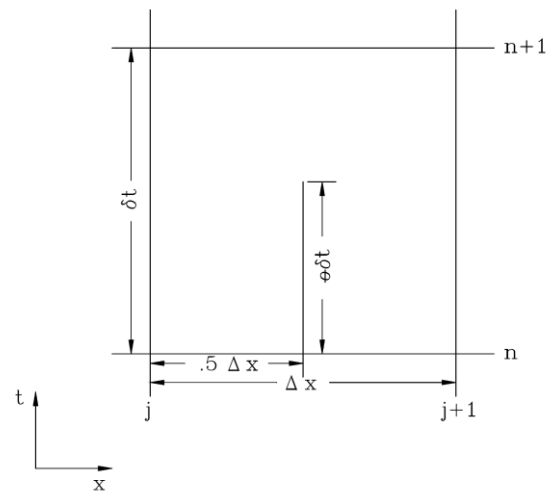
dove il primo termine rappresenta il tasso di accumulo di quantità di moto, il secondo il flusso di quantità di moto, il terzo è la somma delle forze idrostatica e gravitazionale, e il quarto rappresenta la forza d'attrito. Per quanto riguarda le singole variabili non ancora illustrate, si ha che:

- $V$  è la velocità della corrente;
- $g$  è l'accelerazione di gravità;
- $z$  è l'elevazione in termini assoluti del pelo libero della corrente, come somma della quota di fondo  $z_0$  e del tirante idrico  $h$ ;
- $S_f$  è la cadente piezometrica, ottenuta tramite la formula di Chezy del moto uniforme stazionario:

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

dove  $n$  è il parametro di scabrezza di Manning ed  $R$  è il raggio idraulico della sezione.

Per passare ai valori finiti, le equazioni di continuità e di moto devono essere necessariamente risolte per via numerica. Hec-Ras, a questo proposito, adotta il cosiddetto "box scheme", uno dei metodi più utilizzati in assoluto per la risoluzione delle equazioni 1D di moto vario, ossia uno schema implicito alle differenze finite applicato a celle di calcolo a 4 nodi (come quella in *Figura 55*), in cui i valori delle variabili incognite e delle derivate spaziali sono calcolate in un punto interno di coordinate  $[(j+0.5)\Delta x, (n + \theta) \Delta t]$ , dove il parametro  $\theta$  è (teoricamente, secondo le analisi di stabilità di Von Neumann realizzata da Fread (1974) e Ligette e Cunge (1975)) incondizionatamente stabile se compreso tra 0.5 (non incluso) e 1.



**Figura 55:** rappresentazione del "box scheme"

Con questo tipo di schema risolutivo tutte le equazioni relative all'intero tronco del corso d'acqua studiato vengono scritte per la linea temporale passante per  $(n + \theta) \Delta t$ , creando un sistema di equazioni non lineari risolto simultaneamente, ottenendo i valori delle variabili ricercate (flussi e tiranti) per l'istante  $(n + 1) \Delta t$ . Le condizioni al contorno e le condizioni iniziali (di fatto coincidenti con gli assi cartesiani nel "box scheme"), unite naturalmente alla conoscenza delle proprietà geometriche e idrauliche del corso d'acqua, rendono il sistema determinato e dunque risolvibile.

I metodi impliciti sono matematicamente più complessi di quelli espliciti, ma con la potenza degli attuali calcolatori ciò non costituisce ormai più un problema, e vista la loro maggiore stabilità e velocità computazionale tendono ormai ad essere sempre preferiti per essere implementati nei programmi di calcolo.

Hec-Ras, nello specifico, prima di risolvere, il sistema di equazioni sopra descritto, compie un ulteriore passo, ossia la linearizzazione dello stesso mediante una tecnica sviluppata da Preismann e Chen (1973), poiché la versione non lineare obbligava alla sua risoluzione mediante il metodo di Newton-Raphson, uno schema iterativo relativamente lento in termini computazionali e che, soprattutto tende a creare problemi di instabilità in corrispondenza di brusche discontinuità nella geometria dell'alveo.

### Caso bidimensionale

Per le analisi bidimensionali, Hec-Ras dà la possibilità di utilizzare sia la versione completa della formulazione 2D delle equazioni di De Saint-Venant (dette "Shallow water" equations, in quanto a loro volta una riduzione delle equazioni complete di Navier-Stokes della dinamica dei fluidi in 3 dimensioni), oppure una versione ridotta detta Diffusion Wave, in cui vengono semplificati alcuni termini dell'equazione di moto. Vista la tipologia di problema in esame, si è optato per un utilizzare la formulazione completa di DSV, per cui le leggi di conservazione della massa e del moto assumono le seguenti formulazioni differenziali:

- equazione di continuità (cons. massa):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0$$

dove:

- $H$  è la quota del pelo libero dell'acqua in termini assoluti all'istante  $t$ ;
- $h$  è il tirante idrico rispetto al fondo;
- $u$  e  $v$  sono le componenti della velocità della corrente in direzione  $x$  e  $y$ ;
- $q$  è un termine di portata di tipo "sink/source", ovvero non proveniente dalle celle confinanti ma di tipo puntuale quale ad esempio una pompa (equivalente ai contributi laterali nella versione 1D).

Un aspetto importante della modellazione 2D in Hec-Ras è che il programma adotta, per la discretizzazione dell'equazione di continuità, un approccio ai volumi finiti (Casulli, 2008) in cui, al fine di ottimizzare significativamente i tempi di calcolo (aspetto fondamentale nella modellazione bidimensionale), si utilizza una mesh a maglie piuttosto larghe senza perdere i dettagli alla piccola scala (Figura 56), poiché le caratteristiche d'interesse delle singole celle vengono sintetizzate in specifiche in funzione del tirante idriche (ad esempio, la curva d'invaso della cella e la curva area bagnata – altezza di ciascuna faccia, come illustrato nell'esempi in Figura 57).

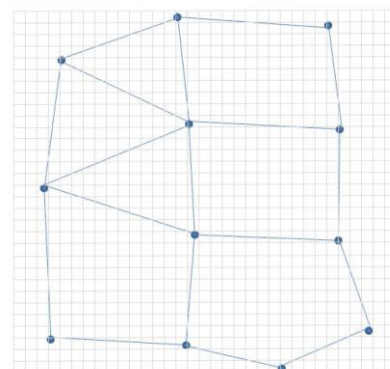


Figura 56: sintetizzazione a diverse scale di una superficie

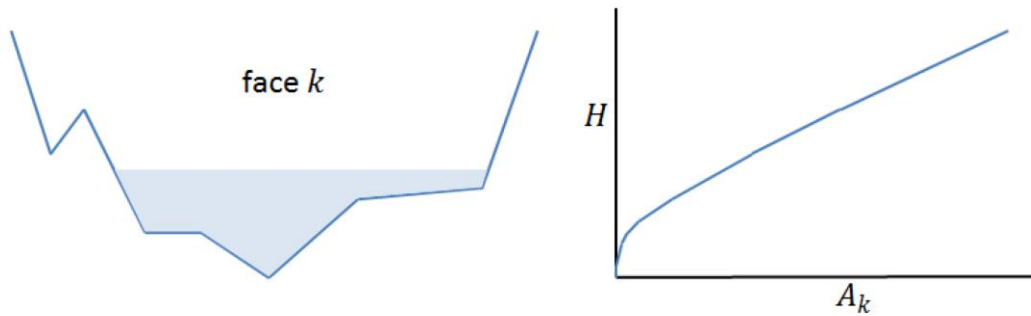


Figura 57: sintetizzazione delle caratteristiche di una cella nell'approccio volumi finiti

- equazioni di moto (cons. quantità di moto):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \nu_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u$$

dove:

- $g$  è l'accelerazione di gravità;
- $\nu_t$  è la viscosità cinematica;
- $c_f$  è il coefficiente di attrito di fondo;
- $f$  è il coefficiente di Coriolis.

Tali espressioni sono derivabili dalla seconda legge di Newton, con i termini al primo membro che rappresentano le accelerazioni e i termini al secondo membro l'azione delle forze esterne. Nello specifico:

- $\frac{\partial u}{\partial t}$  e  $\frac{\partial v}{\partial t}$  sono i termini di accelerazione lineare;
- $u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}$  e  $u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}$  sono i termini di accelerazione convettiva;
- $-g \frac{\partial H}{\partial x}$  e  $-g \frac{\partial H}{\partial y}$  rappresentano l'azione della gravità dovuta a un gradient di pressione tra due aree differenti;
- $\nu_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$  e  $\nu_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$  sono i termini di viscosità cinematica, rappresentano gli effetti dovuti alla turbolenza interna al fluido;
- $-c_f u$  e  $-c_f v$  sono i termini attritivi, in cui il coefficiente  $c_f$  è come di consueto ricavato dalla formula di Chezy;
- $f v$  e  $f u$  sono i termini legati all'effetto di Coriolis, funzione dell'angolo di latitudine e della velocità angolare della terra.

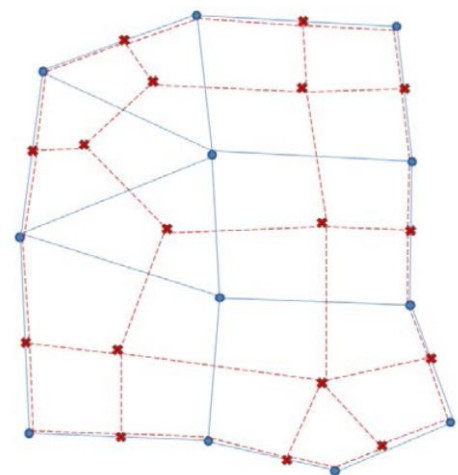


Figura 58: rappresentazione della doppia mesh per la risoluzione numerica dei modelli 2D

Note le equazioni da risolvere, le proprietà di carattere geometrico e idraulico vengono sintetizzate in una serie di celle la cui maglia (mesh) è determinata dall'utente. Il programma



poi realizza una seconda maglia legata alla prima da un rapporto duale nodi – celle (*Figura 58*), necessaria alla risoluzione numerica del problema vista la presenza di derivate del secondo ordine. La corretta determinazione delle proprietà della mesh, in termini di dimensioni, orientazione e geometria delle celle, è di fondamentale importanza in termini della stabilità, accuratezza e onerosità dei tempi computazionali del modello. In generale, l'ortogonalità della mesh è il parametro maggiormente importante, in quanto dove garantita il programma può utilizzare uno schema alle differenze finite per la discretizzazione delle derivate, altrimenti è costretto ad adottare un molto più oneroso approccio ibrido alle differenze e ai volumi finiti.

### Sintesi dei passi della procedura di calcolo

Sia nel caso di modellazione mono che bidimensionale, il programma segue la seguente scaletta nel calcolo della soluzione numerica per un determinato problema:

- 1) Note proprietà geometriche e idrauliche, CC e CI del sistema, il risolutore assegna un valore di tentativo alle incognite (flussi, tiranti, derivate, etc.) per il passo temporale successivo e cerca una prima soluzione applicando lo schema a differenze finite implicito per la modellazione 1D oppure lo schema a volumi finiti/ibrido per la modellazione 2D;
- 2) In ciascun nodo del sistema si valuta per ogni incognita se la differenza tra il valore ottenuto e il precedente è inferiore alla soglia di tolleranza prefissata (modificabile);
- 3) Se il responso è positivo, il programma assume tali valori come corretti per quel determinato passo temporale e procede al calcolo del successivo, utilizzando i dati di quello appena calcolato come nuova condizione iniziale;
- 4) Viceversa, procede con una nuova iterazione, stimando nuovamente le derivate e calcolando dei nuovi valori per le incognite;
- 5) Se durante il processo iterativo i risultati scendono sotto la soglia di tolleranza, li assume come corretti e prosegue all'istante successivo;
- 6) Via via che procede con le iterazioni, il programma salva in memoria la soluzione con l'errore minore, anche se superiore alla soglia di tolleranza, aggiornandola ogni qualvolta ne viene calcolata una migliore;
- 7) Se raggiunge il numero massimo fissato di iterazioni (solitamente 20) senza convergere al di sotto della precisione richiesta, la simulazione emette un messaggio di warning, indicando il nodo caratterizzato dal massimo errore e l'entità dello stesso. Assume comunque la miglior iterazione ottenuta come corretta e passa all'istante di tempo successivo, anche nel caso in cui il calcolo diventi totalmente instabile.