



## Città della Spezia

Medaglia d'oro al Merito Civile  
Medaglia d'argento al Valor Militare

### **Studio idrologico e idraulico per la definizione delle fasce di esondazione dei principali torrenti, fossi e canali ricadenti nel Comune della Spezia**

**Aggiornamento e integrazione con definizione di possibili interventi di mitigazione del rischio idraulico relativi ad alcune specifiche criticità puntuali**



### **Relazione idraulica e di analisi della pericolosità**

**Bacino 01: Pezzogrande**

**Bacino 02: Canalone**



ORDINE DEGLI INGEGNERI  
DELLA PROVINCIA DI GENOVA

**A1721** Dott. Ing. Luca Aldo Remo Dutto

3636	-	0	4	-	0	0	1	0	0	.	DOC		
------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-----	--	--

**Hydrodata S.p.A.**  
via Pomba, 23  
10123 Torino - Italia  
Tel. +39 11 55 92 811  
Fax +39 11 56 20 620  
e-mail: hydrodata@hydrodata.it  
sito web: www.hydrodata.it

<b>00</b>	<b>LUG.21</b>	<b>F. COSTANTINI</b>	<b>L. DUTTO</b>	<b>L. DUTTO</b>	
REV.	DATA	REDAZIONE	VERIFICA	AUTORIZZAZIONE	MODIFICHE



## INDICE

1.	PREMESSA	1
2.	STATO DI RISCHIO DA PIANIFICAZIONE IDRAULICA VIGENTE	4
3.	ALLESTIMENTO DEI MODELLI NUMERICI	5
3.1	Approccio metodologico modellistico	5
3.2	Schema del modello: Fosso Pezzogrande	6
3.2.1	Modello MIKE11	6
3.2.2	Modello MIKE21	8
3.3	Schema del modello: Fosso Canalone	11
3.3.1	Modello MIKE11	11
3.3.2	Modello MIKE21	12
4.	CONDIZIONI AL CONTORNO	14
4.1	Fosso Pezzogrande	17
4.2	Fosso Canalone	17
5.	RISULTATI	18
5.1	Risultati delle simulazioni: Fosso Pezzogrande	19
5.1.1	Scenario TR50 (tempo di ritorno 50 anni)	19
5.1.2	Scenario TR200 (tempo di ritorno 200 anni)	24
5.1.3	Scenario TR500 (tempo di ritorno 500 anni)	28
5.1.4	Analisi dei franchi idraulici sui manufatti interferenti	33
5.2	Risultati delle simulazioni: Fosso Canalone	34
5.2.1	Scenario TR50 (tempo di ritorno 50 anni)	34
5.2.2	Scenario TR200 (tempo di ritorno 200 anni)	37
5.2.3	Scenario TR500 (tempo di ritorno 500 anni)	39
5.2.4	Analisi dei franchi idraulici sui manufatti interferenti	41
6.	ANALISI DEI RISULTATI E PROPOSTA DI MODIFICA DELLE FASCE DI PERICOLOSITÀ	42
6.1	Fosso Pezzogrande	42
6.2	Fosso Canalone	46

ALLEGATO 1 – Descrizione del codice di calcolo MIKE11 - HD

ALLEGATO 2 – Descrizione del codice di calcolo MIKE21 - HD

ALLEGATO 3 – Sezioni trasversali inserite nel modello idraulico, con indicato il livello massimo di piena duecentennale – Fosso Pezzogrande

ALLEGATO 4 – Sezioni trasversali inserite nel modello idraulico, con indicato il livello massimo di piena duecentennale – Fosso Canalone



## 1. PREMESSA

Il Comune della Spezia ha affidato nel maggio 2019 all'Associazione Temporanea di Imprese (nel seguito ATI) tra Hydrodata S.p.A. (capogruppo mandataria) e ART Ambiente Risorse e Territorio S.r.l. (mandante) il servizio di *redazione di uno studio idrologico e idraulico per la definizione delle fasce di esondazione dei principali torrenti, fossi e canali ricadenti nel Comune della Spezia, con particolare riferimento all'area del levante cittadino, a supporto delle attività di protezione civile e del Piano Urbanistico Comunale* (CIG 7515291652 - CUP G44C18000080001).

A seguito della consegna dello studio (dicembre 2019) e del successivo iter di revisione, è emersa l'opportunità di aggiornare l'analisi di stato attuale per alcuni corpi idrici in relazione alla disponibilità di nuove informazioni e rilievi di dettaglio, oltre a predisporre una proposta di nuova perimetrazione delle fasce di pericolosità idraulica sull'area di studio. In relazione al generale ampliamento di queste ultime rispetto a quanto precedentemente perimetrato nel Piano di Bacino vigente, a causa delle analisi condotte su tratti di reticolo idrografico precedentemente non studiati dal punto di vista dell'assetto idraulico, è apparso inoltre opportuno identificare già da subito possibili interventi di mitigazione del rischio idraulico relativi a specifiche criticità puntuali.

È stato dunque conferito incarico dal Comune alla scrivente Hydrodata S.p.A. (CIG ZC92FBBB86 – CUP G44C18000080001) per il presente studio integrativo con le finalità sopra descritte.

Per omogeneità e semplicità di consultazione si è provveduto a una riemissione completa dello studio pregresso, anche nelle parti che non hanno subito modifiche; il presente aggiornamento sostituisce quindi integralmente lo studio pregresso.

Tale studio è strutturato in 4 fasi operative principali:

1. caratterizzazione dell'assetto attuale dei corsi d'acqua;
2. analisi idrologica;
3. analisi idrauliche e definizione delle fasce di esondabilità attuali;
4. sintesi dello studio e indicazione di possibili interventi per la mitigazione del rischio.

Il presente documento, relativo alla fase 3, descrive l'assetto idraulico di stato attuale e l'estensione delle aree di possibile esondazione delle portate di piena di riferimento per i seguenti bacini (cfr. relazione 3636-02-00100, *Caratterizzazione dell'assetto attuale dei corsi d'acqua*, per l'inquadramento dei corpi idrici in studio e la relativa numerazione):

- 01: Fosso Pezzogrande;
- 02: Fosso Canalone.

Nei capitoli che seguono si descrivono le attività svolte e i risultati ottenuti per la rappresentazione delle dinamiche di propagazione degli eventi di piena nei bacini considerati, mediante allestimento di modellistica numerica con schema bidimensionale.

In funzione delle aree di esondazione risultanti dall'analisi idraulica è stata tracciata una proposta di ripermimetrazione delle fasce di pericolosità idraulica A, B e C (rispettivamente pericolosità molto elevata, media e bassa) come definite all'art.12, comma 2 delle Norme di Attuazione (NTA) del vigente Piano di Bacino.

Contestualmente sono stati anche definiti gli ambiti normativi di fascia B, con riferimento alle *aree individuate a minor pericolosità in relazione a modesti tiranti idrici e a ridotte velocità di scorrimento* di cui all'art.15 delle NTA, delimitando in particolare gli ambiti "B0" e "BB" ai sensi della DGR 91/2013, aggiornamento normativo della precedente DGR 250/2005.

Le fasce così definite sono restituite su base cartografica in scala 1:2.500 nell'elaborato grafico annesso 3636-04-01100.

Si evidenzia come nel presente studio le analisi idrodinamiche per la definizione delle aree potenzialmente esondabili siano state condotte a scala di intero ambito idrografico (ambito 20 – Golfo della Spezia).

Pertanto, nonostante l'approccio scrupoloso, l'elevato dettaglio spaziale della modellistica e l'attenzione posta nella corretta ricostruzione della geometria dei corsi d'acqua, particolarmente per gli elementi individuati come maggiormente critici nell'ambito dei sopralluoghi eseguiti, per l'allestimento dei modelli idraulici si è necessariamente fatto riferimento a basi topografiche estese sull'intero territorio, prevalentemente il DTM da rilievo LiDAR del MATTM per la descrizione delle aree esterne all'alveo inciso, e a documentazione pregressa (studi precedenti, disegni di progetto anche "storici") per la ricostruzione dei tratti di accesso difficoltoso o non possibile (prevalentemente tombinature, ma anche alcuni tratti ubicati in aree industriali, portuali, ferroviarie, ecc.). Si rimanda all'elaborato 3636-02-00100 per la descrizione della documentazione acquisita e utilizzata per ciascun corso d'acqua.

Il DTM LiDAR in particolare è riferibile all'assetto del territorio degli anni 2007-2008; esso è stato aggiornato nella batimetria dei modelli per alcune aree direttamente interferenti o limitrofe agli alvei dei corpi idrici in esame, sulla base di disegni di progetto e/o rilievi in campo, ma nelle spesso ampie aree di propagazione delle esondazioni potrebbero sussistere delle (limitate) discrepanze tra il modello del terreno e lo stato effettivo attuale dei luoghi.

Sulla base della Carta Tecnica Regionale in scala 1:5.000 e della Carta Tecnica Comunale in scala 1:2.000 sono state inserite nel modello le sagome degli edifici o fabbricati esistenti, con alcuni aggiornamenti conseguenti ai sopralluoghi o all'esame di foto aeree recenti. Non si può escludere tuttavia la presenza di eventuali elementi sul territorio non descritti correttamente dal LiDAR (muri, locali variazioni delle quote del piano campagna) che potrebbero parzialmente influenzare le modalità di propagazione dell'esondazione, soprattutto nelle aree in cui le altezze d'acqua si riducono a valori modesti (dell'ordine della decina di cm), peraltro meno significativi dal punto di vista dell'effettiva pericolosità idraulica.

Si precisa tuttavia come la normativa vigente richieda di evitare, per quanto possibile, riperimetrazioni delle aree esondabili che dipendano esclusivamente da fattori urbanistico-edilizi, ossia da opere (quali muretti, recinzioni, manufatti edilizi, ecc.) la cui eventuale modifica non sia direttamente vincolata da espressione di parere idraulici.

Per maggior chiarezza si riporta quanto indicato a tal proposito dalla DGR 16/2007.

*"In particolare quando il moto ed il deflusso risulti condizionato da situazioni non rappresentate da opere idrauliche (quali ad esempio allagamento tramite sottopassi, aperture o discontinuità nelle opere esistenti, ovvero presenza di "muretti" o recinzioni, etc.), e pertanto legato a situazioni che possono rivelarsi contingenti, in quanto derivanti da motivi e condizioni di tipo urbanistico-edilizio, deve essere garantito che le ipotesi poste a base dello studio non abbiano a venir meno né*

*siano influenzate e modificate da eventuali interventi antropici, in quanto questi interventi non risultano soggetti a pareri ed autorizzazioni da parte delle autorità idrauliche competenti.*

*In assenza delle garanzie suddette devono essere assunte perimetrazioni che prendano contemporaneamente in considerazione le diverse ipotesi di dinamica dell'evento di esondazione, attraverso l'inviluppo dei diversi possibili scenari di pericolosità idraulica o una loro opportuna combinazione sulla base della loro probabilità di evenienza.*

*In tal senso vanno evitate, di norma, ripermetrazioni che dipendono esclusivamente da fattori urbanistico-edilizi.*

*Le fasce di inondabilità sono infatti delle zone a valenza normativa derivanti dalle aree inondabili e non possono presentare morfologie a "isola" in corrispondenza di manufatti edilizi o blocchi di manufatti o interi isolati. A meno che tale morfologia non risulti suffragata da particolari conformazioni topografiche, evidenziate dalla planimetria e dai transetti, tale morfologia non è consentita anche qualora la tipologia e conformazione degli edifici, dei blocchi o degli isolati li renda protetti da barriere impermeabili.*

*Le eventuali protezioni edilizie corrispondono, infatti, non ad una "messa in sicurezza" areale della zone, ma piuttosto ad accorgimenti tecnico-costruttivi, attivabili nelle zone a rischio, al fine di proteggere passivamente gli insediamenti dagli allagamenti e di non aumentare il rischio attuale. Proprio perché tali interventi non rappresentano opere idrauliche con obbligo di controllo e manutenzione, né sono soggetti a polizia idraulica né sono di proprietà demaniale, essi non sono soggetti ad alcuna autorizzazione di tipo idraulico in occasione di modifiche degli elementi edilizi in questione. Di conseguenza, le aree protette da strumenti di difesa passiva a scala locale non possono essere tenuti in considerazione ai fini della perimetrazione delle aree a pericolosità idraulica di cui si tratta".*

Nel presente studio, visto l'elevato grado di antropizzazione delle aree esterne ai corsi d'acqua e dei corsi d'acqua stessi, per la rappresentazione delle aree allagabili si è ritenuto opportuno tenere in considerazione alcuni elementi fisici di particolare rilevanza, quali ad esempio muri di cinta continui in calcestruzzo o in pietra di rilevante altezza, talora costituenti per lunghi tratti la sponda di un corpo idrico, considerando però alla stregua di "varchi" completamente aperti eventuali cancellate o vie di accesso, per quanto chiusi da portoni o pannelli amovibili. Sono invece stati generalmente trascurati gli elementi di rilevanza secondaria (muretti, marciapiedi, recinzioni, ecc.).

In conclusione, i risultati del presente studio, esposti nel seguito del documento, costituiscono un aggiornamento e affinamento di maggior dettaglio delle valutazioni di pericolosità idraulica contenute nel vigente Piano di Bacino, e potranno fungere da base per la ridefinizione delle stesse alla scala territoriale d'ambito, a supporto delle attività di protezione civile e del Piano Urbanistico Comunale.

Per quanto sopra osservato, non si può tuttavia escludere la possibilità di ulteriori affinamenti/aggiustamenti a scala locale a seguito di studi di maggiore dettaglio, congruentemente con quanto previsto dalle Norme di Piano all'art.15, comma 7bis. Tali studi dovranno ottemperare a quanto indicato dalla DGR n.16/2007 (allegato 2); per il caso specifico si evidenzia come essi dovranno soddisfare i seguenti requisiti minimi:

- basarsi su un rilievo topografico celerimetrico (piano quotato) in grado di descrivere in dettaglio l'effettiva morfologia del territorio, che come detto potrebbe differire localmente dal DTM LiDAR adottato nel presente studio;
- adottare una schematizzazione idraulica di tipo bidimensionale per la valutazione della propagazione delle portate di esondazione sulle aree esterne all'alveo inciso;
- fare riferimento a valori di portata congruenti con l'analisi idrologica presentata nel presente studio, o svilupparne un ulteriore aggiornamento sulla base di nuovi dati.

Approfondimenti potenzialmente meritevoli di nuove analisi idrauliche per verificare l'eventuale necessità di un affinamento della perimetrazione possono essere costituiti dal rilievo, videoispezione o comunque dalla definizione su base certa della geometria di tratti di corso d'acqua risultati inaccessibili per il presente studio, e ricostruiti per le finalità di quest'ultimo sulla base del DTM LiDAR o di documentazione pregressa. L'eventuale

diversa definizione del tracciato di tratti tombati potrebbe modificare anche la ripartizione di aree di bacino contribuente tra diversi rami di uno stesso corso d'acqua.

In virtù delle analisi svolte tuttavia si ritiene che gli eventuali studi di cui sopra non possano apportare modifiche macroscopiche alla caratterizzazione dell'assetto di vulnerabilità idraulica derivante dal presente studio, da ritenersi affidabile per l'impostazione della pianificazione territoriale a livello comunale.

## 2. STATO DI RISCHIO DA PIANIFICAZIONE IDRAULICA VIGENTE

Il vigente Piano di Bacino identifica sul solo Fosso Canalone due limitate aree di pericolosità idraulica media (fascia B), come rappresentato in Figura 1 (estratto dalla cartografia di Piano: *Carta delle fasce di inondabilità, tavola 5 di 6*).

Sono individuati due attraversamenti nel tratto di monte, indicati come non adeguati al deflusso della piena duecentennale ma adeguati per la piena cinquantennale, che a oggi non sono più esistenti, a causa della sistemazione morfologica realizzata nella porzione di testata del bacino (cfr. elaborato 3636-02-00100).

Per quanto riguarda il Fosso Pezzogrande e l'affluente fosso Muggiano sono state effettuate nel PdB solo alcune verifiche puntuali di attraversamenti. Sul Pezzogrande in particolare due ponti all'estremità di monte del tratto in studio sono risultati idraulicamente adeguati, mentre su un affluente di destra (in prossimità dell'imbocco della tombinatura) e in testa al Fosso Muggiano vi sono due attraversamenti individuati come inadeguati anche al deflusso della piena cinquantennale.

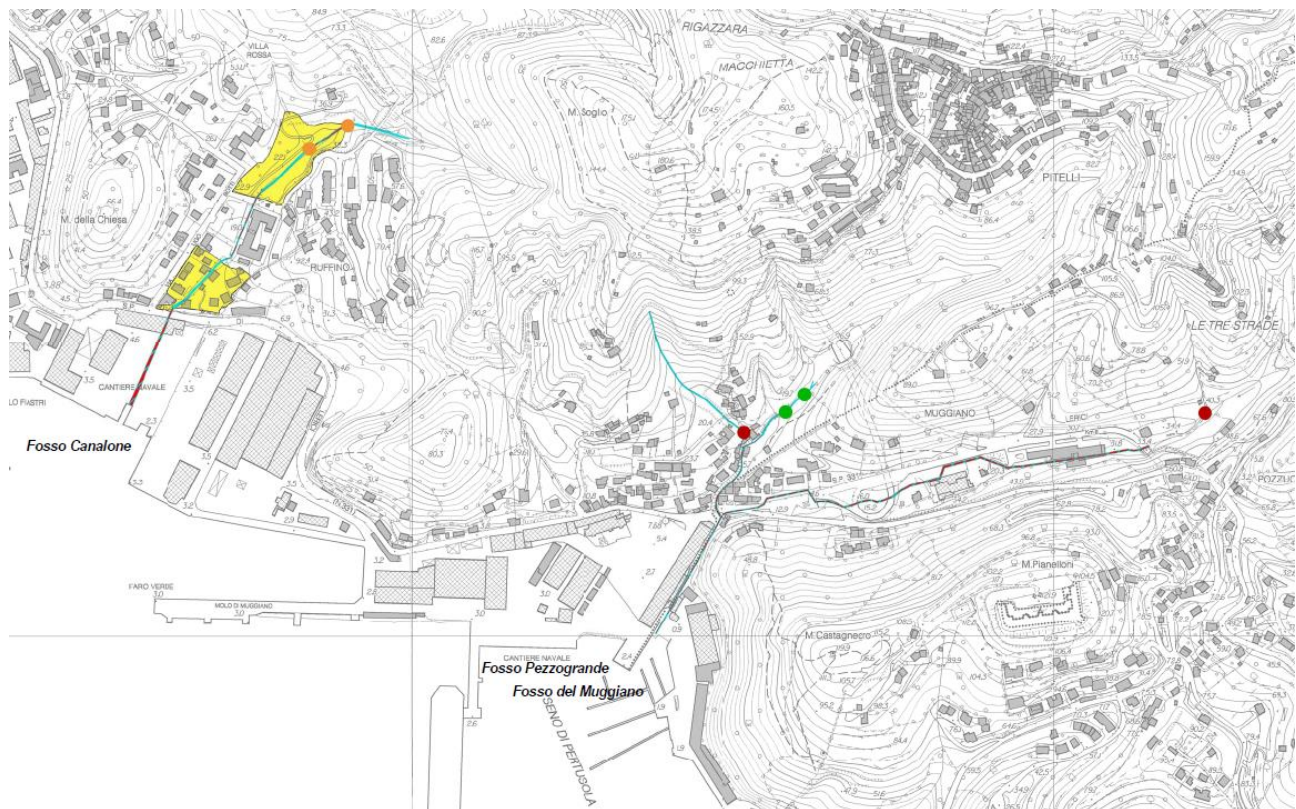




Figura 1 – Aree di pericolosità idraulica da Piano di Bacino vigente.

### 3. ALLESTIMENTO DEI MODELLI NUMERICI

Le analisi idrauliche per la caratterizzazione dell'idrodinamica di piena dei corsi d'acqua in esame (Pezzogrande, Canalone) sono state condotte mediante la messa a punto e applicazione di modelli numerici idrodinamici bidimensionali in moto vario, dinamicamente accoppiati a modelli monodimensionali descrittivi del deflusso all'interno dell'alveo inciso.

Per descrivere la morfologia del terreno nelle aree di esondazione e propagazione dell'onda di piena è stato utilizzato il modello digitale del terreno (DTM) da volo LiDAR acquisito dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.

Al fine della caratterizzazione geometrica dell'alveo inciso e delle opere di attraversamento presenti si è fatto riferimento, unitamente alle informazioni geometriche derivanti dal DTM citato, anche ai rilievi in campo eseguiti per il presente studio e alle indicazioni geometriche riportate nel vigente Piano di Bacino per gli attraversamenti oggetto di verifica puntuale.

Per maggiori dettagli in merito all'assetto attuale dei corsi d'acqua e alle informazioni disponibili si rimanda allo specifico elaborato 3636-02-00100.

#### 3.1 Approccio metodologico modellistico

A partire dalle informazioni topografiche precedentemente citate è stato allestito un modello numerico idraulico utilizzato per l'analisi di stato attuale delle dinamiche di propagazione della piena nell'area oggetto di studio.

In particolare è stato utilizzato il codice di calcolo MIKE Flood del DHI, che combina l'approccio monodimensionale e quello bidimensionale, eseguendo simulazioni condotte per diversi tempi di ritorno (50, 200 e 500 anni), con riferimento agli idrogrammi di piena di progetto definiti nell'ambito dell'analisi idrologica (v. elaborato 3636-03-00100).

MIKE Flood è uno strumento modellistico integrato che permette di accoppiare in maniera dinamica, attraverso un'interfaccia utente grafica, il codice monodimensionale MIKE11 e quello bidimensionale MIKE21 (per una descrizione sintetica dei codici si vedano rispettivamente ALLEGATO 1 e ALLEGATO 2). Esso consente di sfruttare al massimo le potenzialità di MIKE11 e di MIKE21, facendo intervenire nell'ambito di uno stesso modello l'uno o l'altro codice in funzione delle specifiche esigenze di rappresentazione geometrica e di simulazione necessarie: MIKE11 per la simulazione monodimensionale di tratti di alveo incisi e per il deflusso idrodinamico attraverso ponti, tombini, salti di fondo, ecc; MIKE21 per il deflusso nelle aree golenali o di esondazione e di invaso coperte dal DTM (modello digitale del terreno).

MIKE Flood è caratterizzato dal fatto che MIKE11 e MIKE21 rimangono singoli codici indipendenti l'un l'altro nella messa a punto e nell'input-output, mentre una specifica interfaccia grafica consente di definire i collegamenti reciproci e biunivoci per gli interscambi di portata e di quantità di moto e per la congruenza dei livelli idrici di calcolo.

Il modello MIKE Flood è stato messo a punto nel modo seguente:

- modello MIKE21 bidimensionale per la rappresentazione delle aree allagabili esterne alle aree fluviali;
- modello MIKE11 monodimensionale dell'alveo inciso dei corsi d'acqua;
- connessione dinamica dei modelli MIKE21 e MIKE11.

Le restituzioni dei risultati ottenuti con i diversi modelli allestiti, presentate nei capitoli che seguono, sono esposte:

- per le parti di modello monodimensionale sotto forma di profili longitudinali di livello e tabelle contenenti i principali parametri idraulici sezione per sezione, riferiti al valore massimo registrato nel corso dell'evento simulato;
- per le parti di modello bidimensionale (aree allagate), sotto forma di mappe dei tiranti idrici e velocità di scorrimento massime rilevate in ciascuna cella nel corso dell'evento simulato.

In allegato si fornisce rappresentazione di tutte le sezioni implementate nel modello monodimensionale, con indicazione del massimo livello di piena risultante per l'evento di piena associato a TR=200 anni.

## **3.2 Schema del modello: Fosso Pezzogrande**

### **3.2.1 Modello MIKE11**

Il modello monodimensionale schematizzato nel codice MIKE11 HD (modulo idrodinamico) è costituito da 52 sezioni trasversali, che rappresentano la geometria del fosso Pezzogrande nella sua parte incisa, a partire da valle dell'attraversamento del tratto scoperto tra le gallerie di Saturnia e Muggiano dell'autostrada A15 (SEZ\_1) fino allo sbocco a mare nel Golfo di La Spezia (SEZ\_11) per un'estensione di circa 550 m.

Il modello è esteso significativamente più a monte e valle dell'area di diretto interesse (e del dominio di calcolo del modello 2D) per evitare che le modalità di assegnazione delle condizioni al contorno possano influenzare i risultati ottenuti.

Le sezioni trasversali che rappresentano i corsi d'acqua sono distribuite in 4 rami:

- PG\_CA\_1: ramo principale del Pezzogrande con sezioni a cielo aperto, dalla SEZ\_1 alla SEZ\_5. Delle 27 sezioni che lo rappresentano, 7 sono le sezioni direttamente estratte da LiDAR o da rilievo e 20 quelle interpolate dalle prime per rappresentare con maggior dettaglio le possibili esondazioni della porzione di corso d'acqua;
- PG\_TOMB\_1: proseguimento del ramo principale con 9 sezioni chiuse rappresentanti il tratto tombinato dalla SEZ\_6 alla SEZ\_14. Le tre sezioni finali (localizzate oltre la linea costiera verso mare) sono state aggiunte per meglio rappresentare, all'interno del modello numerico, la condizione al contorno di valle fornita dal livello idrico del mare;
- PG\_TOMB\_2: rappresentazione della biforcazione del tratto finale con doppio sbocco a mare;
- AFF\_DX\_CA: ramo dell'affluente in destra del corso d'acqua principale, descritto con 10 sezioni a cielo aperto, dalla SEZ\_AFF1 alla SEZ\_AFF4, di cui 6 interpolate dalle sezioni note;
- AFF\_DX\_TOMB: seguito del tratto precedente, composto da 4 sezioni chiuse, che descrive la geometria della parte coperta dell'affluente includendo l'immissione dello stesso nel ramo principale.

In Figura 2 e Tabella 1 si riporta l'estensione del modello (traccia dell'asse e delle sezioni utilizzate) su base ortofoto digitale a colori Google, in coordinate UTM 32 WGS84, e l'anagrafica delle sezioni trasversali (nel

caso delle sezioni chiuse proprie delle tombinature la quota di sommità spondale è unica e rappresenta l'intradosso dell'attraversamento).

Per ragioni di carattere computazionale e di corretta assegnazione delle condizioni di valle tra modello 1D e 2D, sono state aggiunte 3 sezioni (SEZ\_12, SEZ\_13 e SEZ\_14) a valle di quella di sbocco a mare (SEZ\_11), arrivando complessivamente a un'estensione della rappresentazione del Pezzogrande di circa 990 m.

Nel modello numerico non è stato rappresentato geometricamente il fosso Muggiano, affluente sinistro del fosso Pezzogrande, ma sono state tenute in conto le portate drenate dal suo bacino afferente inserendo puntualmente (in sezione SEZ\_9) l'idrogramma di piena corrispondente all'apporto dell'intero bacino (nonostante dall'analisi dell'assetto attuale dei luoghi -rif. elaborato 3636-02-00100- ci siano da attendersi fenomeni di esondazione nel tratto di monte della tombinatura, con verosimile effetto di riduzione delle portate al colmo effettive in grado di giungere alla sezione di confluenza).

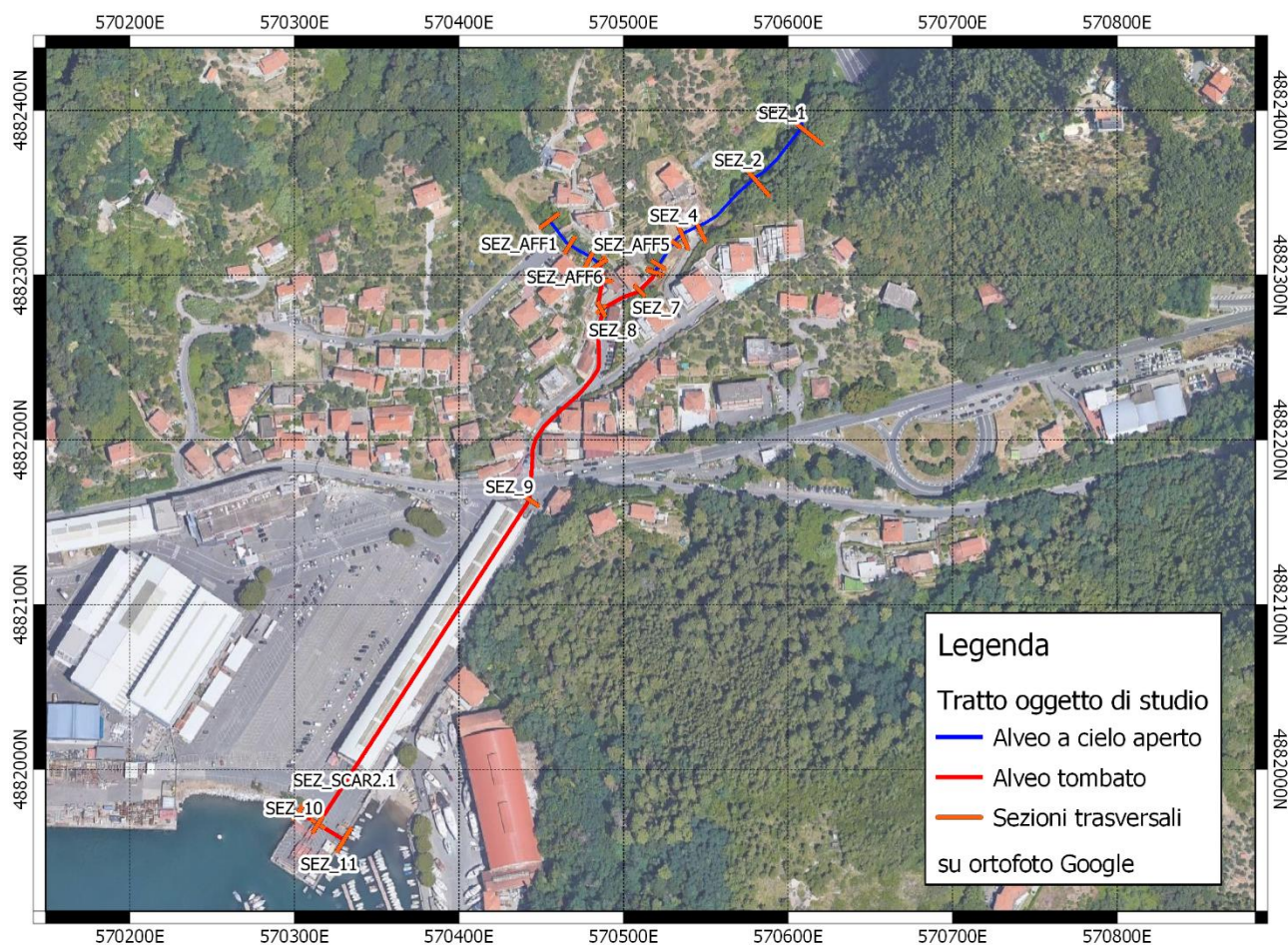


Figura 2 – Network del modello MIKE11 allestito per il Fosso Pezzogrande.

Le sezioni trasversali inserite nel modello sono frutto del confronto e dell'integrazione delle geometrie rilevate durante i sopralluoghi e dalla base dati fornita dal DTM ministeriale (LiDAR), al fine di rappresentare in maniera più realistica possibile lo stato attuale dell'alveo e delle aree circostanti.

In corrispondenza dei tombini e dei salti di fondo sono state inserite nel modello specifiche strutture di tipo "culvert" e "weir" che riproducono le reali condizioni di deflusso di tali manufatti in condizioni di moto a pelo libero, a pressione e di sormonto dell'impalcato, calcolando correttamente le perdite di carico che si manifestano. Per la localizzazione e descrizione delle caratteristiche dei manufatti riprodotti nel modello numerico si rimanda alla relazione descrittiva d'insieme (cfr. elaborato 3636-02-00100).

ID Sezioni	ID Ramo	Progressiva [m]	Quota Fondo [m s.m.]	Quota Sponda/ Intradosso		Descrizione
				DX [m s.m.]	SX [m s.m.]	
SEZ_AFF1	AFF_DX_CA	0,00	15,34	16,46	17,12	
SEZ_AFF2	AFF_DX_CA	19,28	13,38	14,58	14,97	
SEZ_AFF3	AFF_DX_CA	33,88	11,89	13,17	13,23	A monte vi sono 3 salti in successione
SEZ_AFF4	AFF_DX_CA	40,59	10,22	11,64	12,53	
SEZ_AFF5	AFF_DX_TOMB	0,00	10,22	11,75	11,67	Inizio tratto tombato affluente (PZ_C2)
SEZ_AFF6	AFF_DX_TOMB	10,27	8,79	9,49	9,49	
SEZ_AFF6.5	AFF_DX_TOMB	20,00	7,43	8,13	8,13	
SEZ_AFF7	AFF_DX_TOMB	28,82	6,02	6,72	6,72	Immissione nel ramo principale
SEZ_1	PG_CA_1	0,00	15,19	17,02	17,64	
SEZ_2	PG_CA_1	39,92	12,79	14,17	15,70	
SEZ_3	PG_CA_1	85,07	10,95	12,29	12,72	Monte ponte PZ_P1
SEZ_4	PG_CA_1	96,09	10,88	11,42	12,58	Valle ponte PZ_P1
SEZ_4.2	PG_CA_1	103,14	10,58	11,39	11,36	
SEZ_4.5	PG_CA_1	119,69	9,97	10,77	10,98	
SEZ_5	PG_CA_1	124,83	9,44	11,34	11,42	Monte salto
SEZ_6	PG_TOMB_1	0,00	9,44	11,34	11,42	
SEZ_7	PG_TOMB_1	14,53	7,35	9,15	9,15	Inizio tratto tombato Pezzogrande (PZ_C1)
SEZ_8	PG_TOMB_1	40,50	6,02	8,22	8,22	Immissione affluente dx e cambio sezione tombinatura (PZ_C3)
SEZ_9	PG_TOMB_1	171,81	4,08	6,28	6,28	Immissione fosso Muggiano
SEZ_10	PG_TOMB_1	406,77	0,29	2,89	2,89	Biforcazione sbocco e cambio sezione tombinatura (PZ_C4)
SEZ_11	PG_TOMB_1	425,20	0,00	2,60	2,60	Sbocco a mare
SEZ_SCAR2.1	PG_TOMB_2	0,00	0,29	2,89	2,89	Inizio secondo sbocco a mare
SEZ_SCAR2.2	PG_TOMB_2	13,86	0,00	2,60	2,60	Secondo sbocco a mare

**Tabella 1 – Anagrafica delle sezioni inserite nel modello numerico (escludendo quelle interpolate o fittizie per imporre correttamente la condizione al contorno di valle).**

### 3.2.2 Modello MIKE21

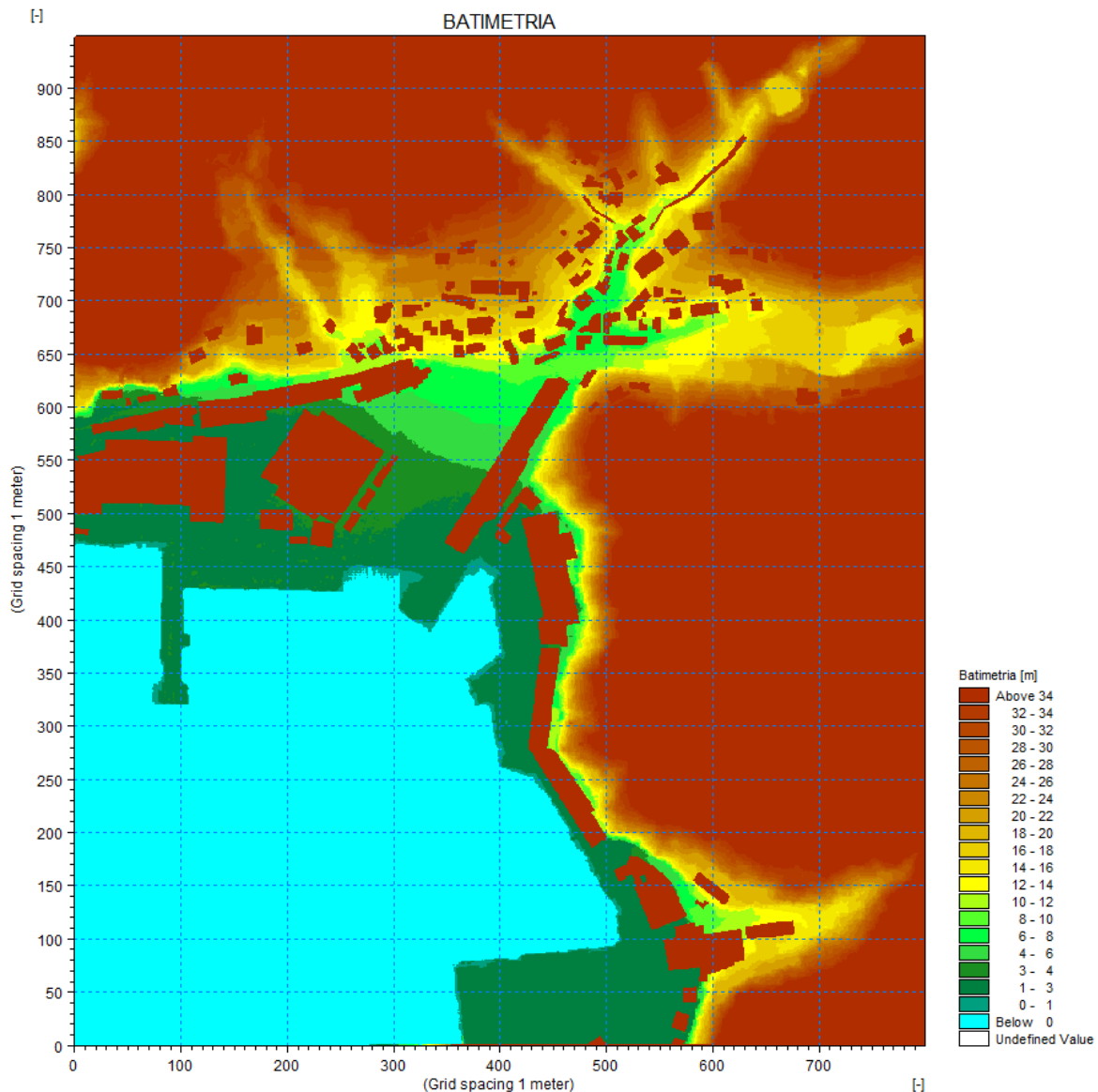
Come già anticipato, per l'analisi della propagazione della piena dei corsi d'acqua esaminati è stato allestito un modello MIKE Flood che accoppia dinamicamente il modello monodimensionale MIKE11 (descritto nel paragrafo precedente) utilizzato per rappresentare la geometria dell'alveo con il modello bidimensionale MIKE21 rappresentante le aree esterne di esondazione.

Nel modello bidimensionale alle differenze finite MIKE21 la descrizione geometrica del terreno è rappresentata definendo la quota media del terreno in ogni cella di calcolo. Tale valore è usualmente calcolato mediante

tecniche di interpolazione stabilendo una dimensione di cella a partire dalle basi topografiche disponibili. Nel caso in esame non è stata necessaria nessuna ulteriore elaborazione dei dati topografici, approntando il modello con la stessa risoluzione spaziale del LiDAR (circa 1,0 x 1,0 m).

La definizione della dimensione del passo spaziale della griglia rettangolare, da utilizzare per la messa a punto del modello, è un passaggio fondamentale nella sua realizzazione ed influenza direttamente i tempi di calcolo e l'accuratezza spaziale della soluzione. Aumentando le dimensioni del passo della griglia diminuiscono i tempi di calcolo, ma diminuisce anche l'accuratezza dei risultati. La scelta deve quindi essere un compromesso tra le due esigenze.

Nel caso in esame la scelta è condizionata dalla necessità di rappresentare con sufficiente dettaglio la geometria delle aree allagabili, delle strade e delle possibili vie di deflusso conseguenti a fenomeni di esondazione. Si è deciso pertanto (come già anticipato) di adottare una griglia di calcolo piuttosto fitta, a maglia 1,0 x 1,0 m, composta da 949 righe e 799 colonne (758.251 punti di calcolo).



**Figura 3 – Batimetria del modello 2D del fosso Pezzogrande a maglia 1,0x1,0 m (dominio di calcolo complessivo).**

Nella Figura 3 è riportata la batimetria (o geometria di input) complessiva del modello. In marrone sono evidenziate le zone escluse dal calcolo (celle inattive) perché considerate sicuramente non allagabili (aree con quote superiori ai 34 m s.m.) o perché ricadenti all'interno dell'alveo inciso del fosso Pezzogrande o dell'affluente in destra e il cui contributo al deflusso della piena di riferimento è già simulato e considerato tramite il modello monodimensionale MIKE11.

Inoltre, è stata inserita la geometria delle aree edificate presenti all'esterno all'alveo modificando la quota delle celle della batimetria che ricadono all'interno dell'impronta degli edifici (imposta a 34 m s.m.).

### 3.3 Schema del modello: Fosso Canalone

#### 3.3.1 Modello MIKE11

Il modello monodimensionale descrittivo della geometria dell'alveo inciso del fosso Canalone è costituito da 25 sezioni trasversali, estese da poco a valle dello sbocco della tombinatura al di sotto della sistemazione morfologica di monte (SEZ\_1) fino alla foce in mare (sezione "MARE\_1"), per un'estensione di circa 850 m.

Il modello è stato in realtà esteso più a valle con 3 ulteriori sezioni "fittizie" (MARE\_2, MARE\_3 e MARE\_4), di larghezza e profondità progressivamente maggiori, utili a una migliore definizione della condizione al contorno di valle e a raggiungere il limite del dominio di calcolo del modello bidimensionale.

Il network del modello è rappresentato nello stralcio planimetrico di Figura 4, mentre in Tabella 2 è fornito un elenco delle sezioni inserite con alcuni dati geometrici salienti.

Nel tratto modellato sono presenti due tombinature, rappresentate con specifiche strutture denominate "culvert", le cui sezioni di deflusso corrispondono a quelle esposte nella relazione descrittiva dell'assetto attuale (elaborato 3636-02-00100) a cui si rimanda. Per poter rappresentare il cambio di sezione interno alla prima tombinatura, insieme di CL\_C1 e CL\_C2 (da sezione TOMB\_1A a TOMB\_1C), sono state inserite complessivamente tre strutture "culvert" consecutive che consentono di riprodurre correttamente le perdite di carico che si generano nel manufatto percorrendolo da monte verso valle.

Il salto presente subito a monte della seconda tombinatura (CL\_C3), che colletta le acque direttamente a mare, è stato rappresentato con una struttura di tipo "weir" per rappresentare correttamente le condizioni di deflusso che si instaurano in esso.

ID Sezioni	Progressiva [m]	Quota Fondo [m s.l.m.]	Quota Sponda SX [m s.l.m.]	Quota Sponda DX [m s.l.m.]	Descrizione
SEZ_1	0,00	24,76	27,189	26,9	Sbocco dal tombino circolare
SEZ_2	29,35	23,68	26,42	25,23	
SEZ_3	83,27	21,69	26,37	23,96	
SEZ_4	127,83	20,05	24,47	22,30	
SEZ_5	167,47	18,49	24,86	21,68	
SEZ_6	221,89	16,58	23,70	22,68	
SEZ_7	225,78	16,44	23,44	22,64	
TOMB_1A	299,39	13,69	16,13	16,13	Tombinatura. CL_C1
TOMB_A	373,00	10,94	13,38	13,38	
TOMB_1B	380,00	10,68	13,12	13,12	Tombinatura. CL_C2
TOMB_B	387,00	10,41	12,86	12,86	
TOMB_1C	393,32	10,18	12,62	12,62	Tombinatura. CL_C1
SEZ_8	399,32	9,95	15,16	13,06	
SEZ_9	411,37	9,51	14,40	12,50	
SEZ_10	427,48	8,80	11,47	12,00	
SEZ_11	459,32	7,73	10,20	12,12	
SEZ_12	485,78	7,37	9,40	12,00	

ID Sezioni	Progressiva [m]	Quota Fondo [m s.l.m.]	Quota Sponda SX [m s.l.m.]	Quota Sponda DX [m s.l.m.]	Descrizione
SEZ_13	504,41	7,11	9,15	8,70	
SEZ_14	510,35	5,06	8,32	8,60	Monte salto di fondo
SEZ_15	515,35	4,88	8,17	8,50	
TOMB_2	682,68	2,59	5,04	5,04	Tombinatura CL_C3
MARE_1	850,50	0,30	3,00	3,00	Sbocco a mare

Tabella 2 – Anagrafica delle sezioni inserite nel modello numerico del fosso Canalone.

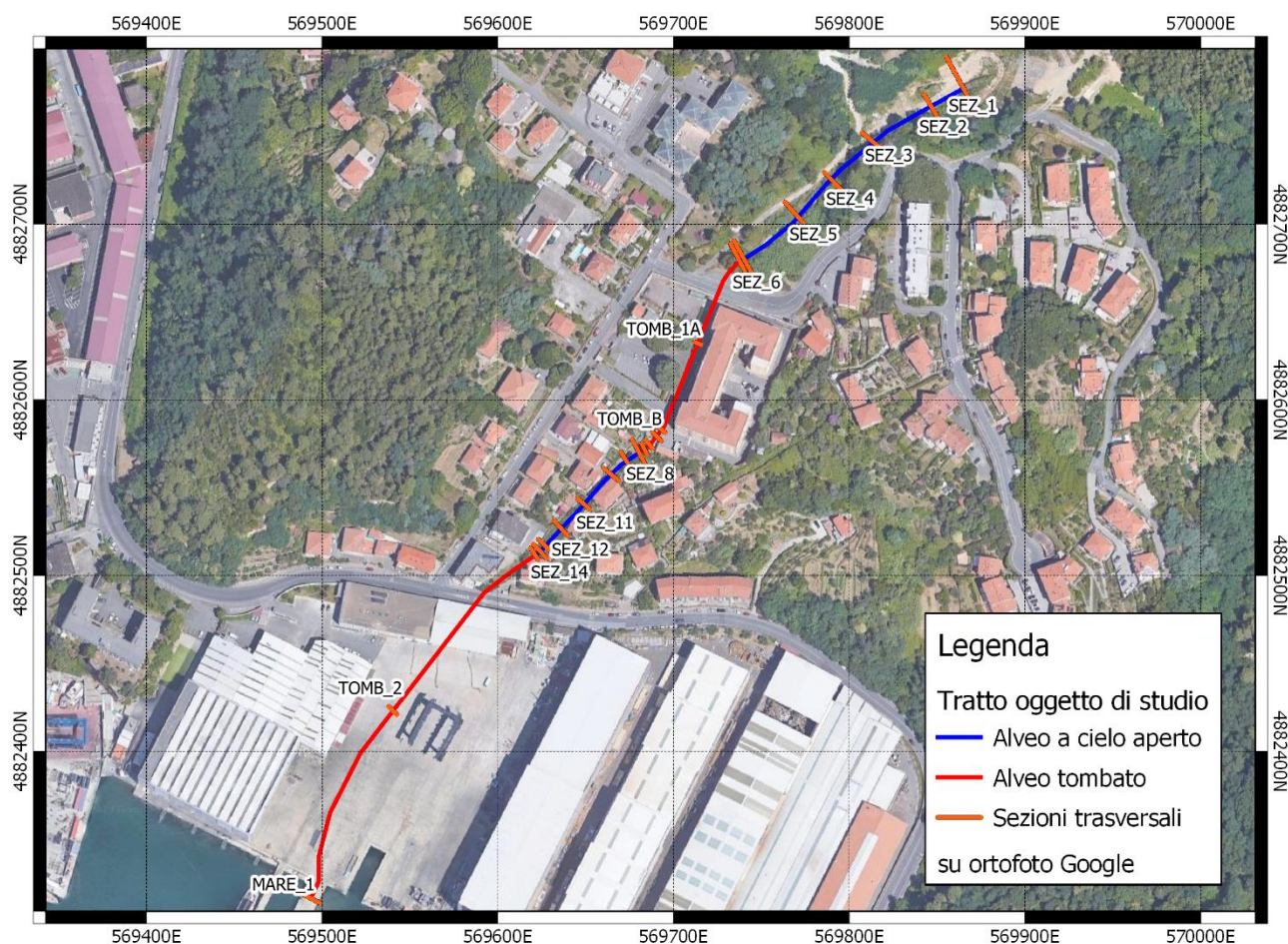


Figura 4 – Network del modello MIKE11 allestito per il Fosso Canalone.

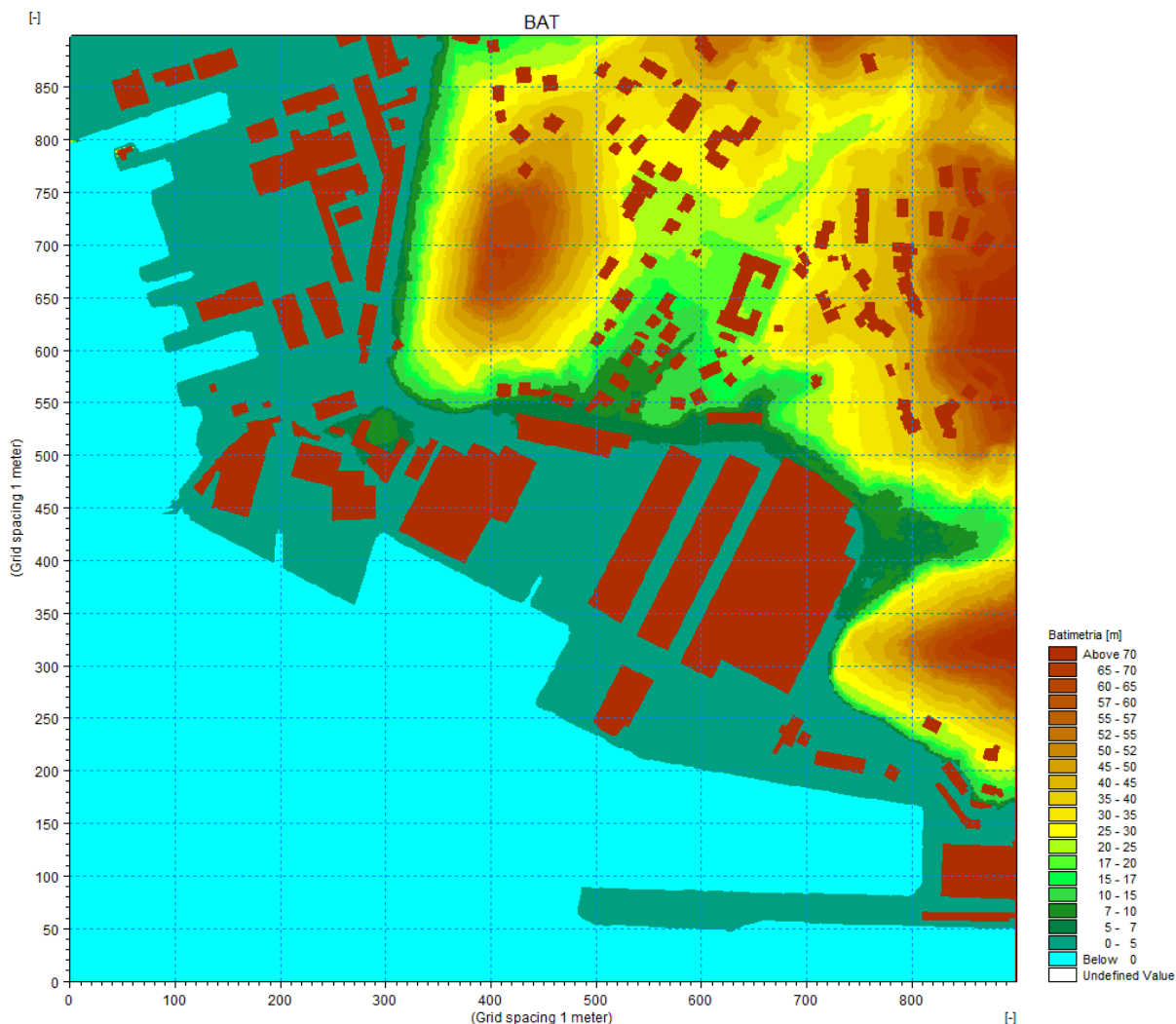
### 3.3.2 Modello MIKE21

La descrizione geometrica del terreno è realizzata definendo la quota media di ogni cella di calcolo; tale valore è usualmente ottenuto mediante tecniche di interpolazione, stabilendo una dimensione di cella a partire dalle basi topografiche disponibili.

La definizione della dimensione del passo della griglia rettangolare da utilizzare per la messa a punto del modello è un passaggio fondamentale nella sua realizzazione ed influenza direttamente i tempi di calcolo e l'accuratezza spaziale della soluzione. Aumentando le dimensioni del passo della griglia diminuiscono i tempi



di calcolo, ma diminuisce anche l'accuratezza dei risultati. La scelta deve quindi essere un compromesso tra le due esigenze.



**Figura 5 – Batimetria del modello 2D a maglia 1,0x1,0 m (dominio di calcolo complessivo) del fosso Canalone.**

Nel modello bidimensionale del fosso Canalone la scelta è condizionata dalla necessità di rappresentare con sufficiente dettaglio la geometria delle aree allagabili, delle strade e delle possibili vie di deflusso nel tessuto urbano conseguenti a fenomeni di esondazione al passaggio dell'onda di piena. Si è deciso pertanto di adottare una griglia di calcolo piuttosto fitta, a maglia 1,0 x 1,0 m (dimensione congruente con quella del DTM LiDAR), formata da 899 righe e 899 colonne (808.201 punti di calcolo).

Nella Figura 5 è riportata la "batimetria" (o geometria di input) complessiva del modello. In marrone sono evidenziate le zone escluse dal calcolo (celle inattive) perché considerate sicuramente non allagabili (aree con quote superiori a 75 m s.m.).

#### 4. CONDIZIONI AL CONTORNO

I modelli di simulazione, oltre alla descrizione geometrica, necessitano della definizione delle condizioni al contorno idrodinamiche e di una serie di parametri quali: passo temporale di integrazione del sistema, coefficiente di resistenza distribuita (scabrezza) e coefficiente di viscosità turbolenta ("eddy viscosity").

La scabrezza rappresenta, all'interno delle equazioni di moto, il parametro che regola le perdite di energia distribuite, in primo luogo quelle per attrito sul fondo di scorrimento e sulle sponde dei canali di deflusso.

In particolare, la scabrezza applicata ai modelli è stata differenziata tra alveo inciso (e quindi modellazione monodimensionale) e aree golenali (modellazione bidimensionale).

I sopralluoghi effettuati ripercorrendo l'asta dei corsi d'acqua e la documentazione fotografica a disposizione hanno fornito gli elementi necessari per la definizione dei valori di scabrezza da associare al tratto oggetto di studio. Tali valori sono stati definiti considerando in primis le Norme di Attuazione (NTA) del vigente Piano di Bacino (Tabella 4), e successivamente i valori di riferimento indicati in letteratura tecnica (Tabella 3).

In accordo con i valori prescritti dalle NTA (allegato 3) si è adottato per i modelli monodimensionali un valore del coefficiente di scabrezza  $K_s$  di Gauckler-Strickler pari a  $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  lungo i tratti di alveo naturale e di  $45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  lungo i tratti coperti rivestiti.

Per quanto riguarda l'area esterna all'alveo, modellata con schema bidimensionale, si è provveduto alla differenziazione su due classi di scabrezza in modo da tenere in considerazione la presenza dei principali elementi che possono influenzare la propagazione della piena: linee di deflusso principali (strade), aree urbane pavimentate e aree vegetate. In particolare alle aree vegetate è stato applicato un coefficiente di scabrezza di Gauckler-Strickler di  $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ , mentre a quelle pavimentate un coefficiente di  $50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ .

Si precisa a tal proposito come in un modello bidimensionale i coefficienti di scabrezza da considerare risultino normalmente maggiori di circa un 20÷30% di quelli comunemente impiegati nei modelli monodimensionali, per tenere conto del fatto che in un modello 2D sono già in tutto, o almeno in gran parte, direttamente considerati nelle equazioni del moto gli effetti di resistenza secondari indotti dalle condizioni di moto non-monodimensionali (moti trasversali e vorticosi, sinuosità dell'alveo), che nel modello 1D sono invece da includere forfettariamente nel coefficiente di scabrezza.

Natura della superficie	Scabrezza omogenea equivalente $\epsilon$ (mm) [mm]	Bazin $\gamma$ [m <sup>1/2</sup> ]	Kutter $m$ [m <sup>1/2</sup> ]	Manning $n$ [m <sup>-1/3</sup> *s]	Gauckler Strickler $K_s$ [m <sup>1/3</sup> *s <sup>-1</sup> ]
Pareti di cemento perfettamente lisciate. Pareti di legno piallato. Pareti metalliche, senza risalti nei giunti	0,15 ÷ 0,2	0,06	0,12	0,011	100 ÷ 90
Idem, ma con curve	0,2 ÷ 0,4	0,1	0,18	0,012	90 ÷ 85
Pareti di cemento non perfettamente lisciate. Muratura di mattoni molto regolare. Pareti metalliche con chiodatura ordinaria	0,4 ÷ 1,0	0,16	0,20 ÷ 0,25	0,013	85 ÷ 75

Natura della superficie	Scabrezza omogenea equivalente $\epsilon$ (mm) [mm]	Bazin $\gamma$ [m <sup>1/2</sup> ]	Kutter $m$ [m <sup>1/2</sup> ]	Manning $n$ [m <sup>-1/3</sup> *s]	Gauckler Strickler $K_s$ [m <sup>1/3</sup> *s <sup>-1</sup> ]
Pareti di cemento in non perfette condizioni. Muratura ordinaria più o meno accurata. Pareti di legno grezzo, eventualmente con fessure.	2 ÷ 5	0,23 ÷ 0,36	0,35 ÷ 0,55	0,014 ÷ 0,015	70 ÷ 65
Pareti di cemento solo in parte intonacate; qualche deposito sul fondo. Muratura irregolare (o di pietrame). Terra regolarissima senza vegetazione.	8	0,46	0,55 ÷ 0,75	0,018	60
Terra abbastanza regolare. Muratura vecchia, in condizione non buone, con depositi di limo al fondo.	15 ÷ 30	0,60 ÷ 0,85	0,75 ÷ 1,25	0,020 ÷ 0,022	50
Terra con erba sul fondo. Corsi d'acqua naturali regolari.	70	1,30	1,50	0,025	40
Terra in cattive condizioni. Corsi d'acqua naturale con ciottoli e ghiaia.	120 ÷ 200	1,75	2,00	0,030	35
Canali in abbandono con grande vegetazione. Corsi d'acqua con alveo in ghiaia e movimento di materiale sul fondo, oppure scavati in roccia con sporgenze.	300 ÷ 400	2,0 ÷ 2,3	3,00	0,035	30

**Tabella 3 – Valori tipici di riferimento da letteratura tecnica dei coefficienti di scabrezza per l'alveo inciso.**

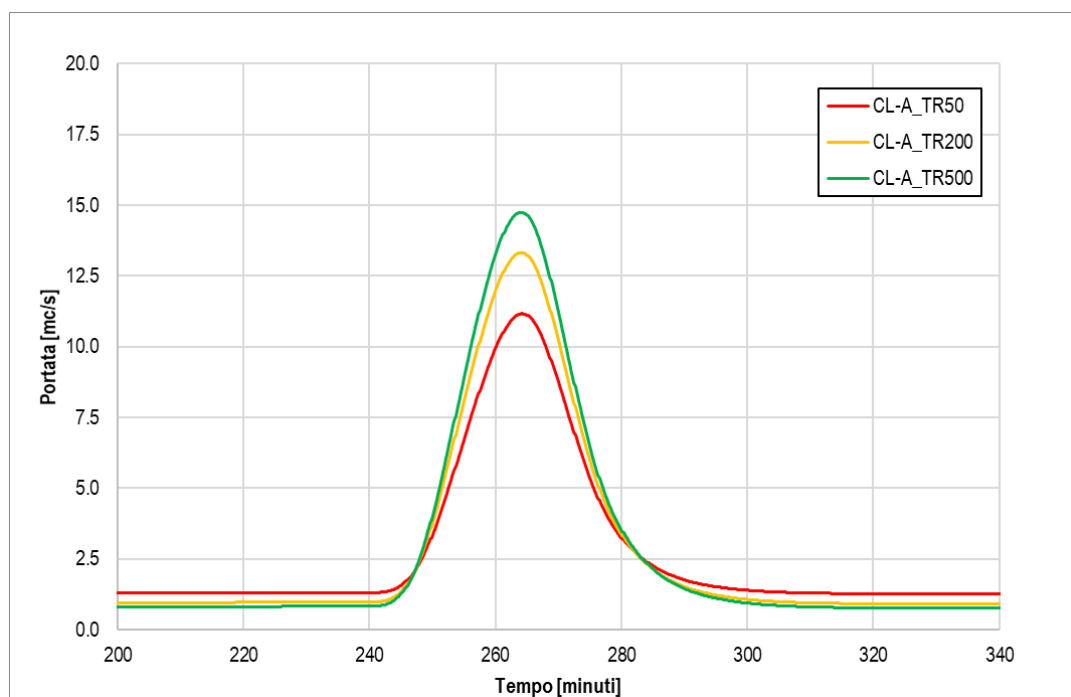
Descrizione corso d'acqua	Coeff. di scabrezza di Gauckler Strickler $K_s$ [m <sup>1/3</sup> *s <sup>-1</sup> ]
Tratti di corso d'acqua naturali con salti, rocce o vegetazione anche arbustiva-arborea in alveo	25 ÷ 30
Corsi d'acqua naturali con vegetazione e movimento di materiale sul fondo	30 ÷ 35
Tratti urbanizzati di corso d'acqua naturali con argini cementati (e/o platee) in buono stato	35 ÷ 40
Corsi d'acqua con fondo ed argini totalmente cementati in ottimo stato ed assenza di manufatti (tubi, cavi, ecc.) o discontinuità interferenti con le acque	40 ÷ 45

**Tabella 4 – Coefficienti di scabrezza per l'alveo inciso indicati nelle NTA del vigente Piano di Bacino.**

Come passo temporale di integrazione è stato necessario utilizzare, per ragioni di stabilità numerica legate al numero di Courant della corrente, un valore pari a 1 secondo per le simulazioni di entrambi i corsi d'acqua. La viscosità turbolenta è legata alla non uniforme distribuzione del campo delle velocità e viene simulata nel modello tramite il coefficiente di eddy viscosity. Nei casi in esame al coefficiente è stato assegnato un valore costante pari a 0,5 m<sup>2</sup>/s sull'intera estensione del modello; tale parametro risulta comunque di minore rilevanza in quanto simulando deflussi di esondazione con scorrimento superficiale gli aspetti legati alla formazione di vortici sono senza dubbio trascurabili rispetto ai prevalenti termini di resistenza idraulica al moto per attrito sul fondo e presenza di ostacoli.

Le condizioni al contorno imposte sono costituite da input di portata a monte e internamente al modello, e da una condizione di valle rappresentata dal livello di mare.

L'analisi idraulica è stata svolta in funzione di tre scenari idrologici caratterizzati da tempo di ritorno di 50, 200 e 500 anni. Per le sezioni di interesse (sezioni di chiusura di bacini e sottobacini contribuenti significativi in relazione all'estensione dei tratti di corso d'acqua simulati) sono stati definiti nell'ambito dell'analisi idrologica (v. elaborato 3535-03-00100) i relativi idrogrammi di piena. Si riportano a titolo di esempio in Figura 6 gli idrogrammi definiti per il bacino chiuso alla foce del fosso Canalone (sezione CL-A) per i tre tempi di ritorno.



**Figura 6 – Idrogrammi dei 3 scenari simulati (TR50, TR200 e TR500) concentrati nella prima sezione (SEZ\_1) del fosso Canalone come condizione al contorno di monte.**

La condizione idrodinamica di valle dei modelli è costituita dal livello idrico massimo di mare riferibile a un evento di mareggiata con determinato tempo di ritorno (generalmente inferiore a quello di verifica idraulica del corso d'acqua, trattandosi di eventi non correlati, così da non sovrapporre eventi a bassa probabilità di accadimento).

L'effetto di sovrizzo del livello di medio mare all'occorrere di un evento meteomarinico intenso è generalmente dato dalla somma dei seguenti fenomeni:

- la marea astronomica;
- la variazione del livello di medio mare dovuto alle condizioni di tempesta (storm surge), eventualmente suddivisibile tra la componente attribuibile al vento (wind set-up) e quella relativa alle variazioni di pressione atmosferica (barometro inverso);
- il sovrizzo dovuto al frangimento (wave set-up).

I corsi d'acqua considerati nel presente studio presentano tutti sbocco a mare all'interno del Golfo di La Spezia, protetto all'imbocco da una diga foranea e con morfologia tale da modificare localmente (attutendolo) l'effetto di sovrzalzo.

Nella quasi totalità degli studi pregressi acquisiti per le finalità del presente studio, e particolarmente in quelli predisposti per l'Autorità Portuale, è definito un medesimo valore di riferimento per il livello idrico massimo da assumere all'interno del Golfo, che risulta pari a **0,50 m s.m.** Tale valore (assunto costante per tutti i tempi di ritorno indagati) è stato anche adottato, per coerenza, nell'ambito del presente studio.

#### 4.1 Fosso Pezzogrande

Per tutti gli scenari simulati con il modello accoppiato 1D+2D sono state assegnate le seguenti condizioni al contorno.

- Condizione al contorno di monte del fosso Pezzogrande (nel modello MIKE11): portate in ingresso nella sezione di monte (SEZ\_1) secondo l'idrogramma di riferimento specifico di ogni scenario simulato (differente per ogni tempo di ritorno TR50, TR200 e TR500) del bacino afferente a monte (PZ\_B). Le portate al colmo per i diversi tempi di ritorno valgono rispettivamente 9,24 m<sup>3</sup>/s, 10,94 m<sup>3</sup>/s, 12,05 m<sup>3</sup>/s.
- Condizione al contorno di monte dell'affluente destro del fosso Pezzogrande (nel modello MIKE11): portate in ingresso nella sezione iniziale di monte (SEZ\_AFF1) secondo l'idrogramma di riferimento specifico di ogni scenario simulato (tempi di ritorno TR50, TR200 e TR500) del bacino afferente (PZ\_C). Le portate al colmo per i diversi tempi di ritorno valgono rispettivamente 1,49 m<sup>3</sup>/s, 1,74 m<sup>3</sup>/s, 1,91 m<sup>3</sup>/s.
- Condizione al contorno interna al ramo tombinato del fosso Pezzogrande (nel modello MIKE11): immissione concentrata nella sezione SEZ\_9 di confluenza del fosso Muggiano nel fosso Pezzogrande al di sotto di Viale S. Bartolomeo (SP331) definita dall'idrogramma di riferimento specifico di ogni scenario simulato per il bacino PZ\_MU\_A. Le portate al colmo per i diversi tempi di ritorno valgono rispettivamente 10,49 m<sup>3</sup>/s, 12,55 m<sup>3</sup>/s, 13,90 m<sup>3</sup>/s
- Condizione al contorno di valle del fosso Pezzogrande (nel modello MIKE11): livello idrico di valle (mare) pari a 0,50 m s.m.
- Condizione al contorno di valle di uscita lungo parte dei lati Est e Sud del modello MIKE21: livello idrico del mare pari a 0,50 m s.m.
- Condizioni al contorno "interne" di collegamento tra i due modelli MIKE11 e MIKE21: in corrispondenza di tutte le celle lungo la sponda destra e sinistra dei tratti scoperti del fosso Pezzogrande e del suo affluente in destra vengono applicate le equazioni tipiche dello stramazzo a larga soglia, con le quote di sfioro pari ai valori maggiori tra quelli delle celle del modello bidimensionale e quelli corrispondenti delle quote di sponda delle sezioni dell'alveo del modello monodimensionale opportunamente interpolate.

#### 4.2 Fosso Canalone

Per tutti gli scenari simulati con il modello accoppiato 1D+2D sono state assegnate le seguenti condizioni al contorno.

- Condizione al contorno di monte del fosso Canalone (nel modello MIKE11): portate in ingresso nella sezione di monte (SEZ\_1) secondo l'idrogramma di riferimento specifico di ogni scenario simulato (differente per ogni tempo di ritorno TR50, TR200 e TR500) del bacino afferente a monte (CL\_A); Le

portate al colmo per i diversi tempi di ritorno valgono rispettivamente 11,17 m<sup>3</sup>/s, 13,33 m<sup>3</sup>/s, 14,75 m<sup>3</sup>/s.

- Condizione al contorno di valle del fosso Canalone (nel modello MIKE11): livello idrico costante (mare) pari a 0,50 m s.m.
- Condizione al contorno di valle di uscita lungo parte dei lati Est e Sud del modello MIKE21: livello idrico del mare pari a 0,50 m s.m.
- Condizioni al contorno "interne" di collegamento tra i due modelli MIKE11 e MIKE21: in corrispondenza di tutte le celle lungo la sponda destra e sinistra dei tratti scoperti del fosso Canalone vengono applicate le equazioni tipiche dello stramazzo a larga soglia con le quote di sfioro pari ai valori maggiori tra quelli delle celle del modello bidimensionale e quelli corrispondenti delle quote di sponda delle sezioni dell'alveo del modello monodimensionale opportunamente interpolate.

## 5. RISULTATI

I risultati delle simulazioni effettuate con i modelli integrati mono-bidimensionali sono illustrati nei capitoli seguenti mediante l'ausilio di rappresentazioni grafiche esplicative quali:

- mappe delle aree di esondazione (se presenti) con rappresentazione delle altezze idriche massime sul piano campagna e dei vettori delle velocità;
- profili longitudinali di inviluppo dei massimi livelli idrici lungo l'alveo inciso dei fossi.

I valori numerici dei principali parametri idrodinamici caratterizzanti i valori massimi di inviluppo del profilo di piena sono indicati di seguito e riportati in specifiche tabelle:

- ID Sez. = identificativo sezione;
- Progr. = progressiva metrica lungo l'asta (m);
- Q = portata massima (m<sup>3</sup>/s) – indicazione omessa per le simulazioni in moto permanente;
- P.L. = quota di pelo libero (m s.m.);
- h = altezza d'acqua sul fondo (m);
- v = velocità media della corrente (m/s);
- Fr = numero di Froude della corrente (-);
- H = carico idraulico totale (m s.m.).

Non sono restituiti i risultati sulle sezioni interpolate e sulle sezioni "fittizie" finali delle aste dei corsi d'acqua essendo queste ultime inserite nei modelli unicamente per poter rappresentare correttamente la condizione al contorno di valle dettata dalla presenza del mare.

I parametri idraulici non sono definiti in corrispondenza delle strutture inserite all'interno dei modelli numerici (ad esempio i tombini o i salti di fondo), per queste si fa riferimento alla sezione immediatamente a monte (ad esempio per la valutazione del franco idraulico).

Per ogni corso d'acqua studiato sono stati eseguiti 3 scenari di simulazione:

- TR50 : evento di piena con tempo di ritorno pari a 50 anni;
- TR200 : evento di piena con tempo di ritorno pari a 200 anni;
- TR500 : evento di piena con tempo di ritorno pari a 500 anni.

## 5.1 Risultati delle simulazioni: Fosso Pezzogrande

### 5.1.1 Scenario TR50 (tempo di ritorno 50 anni)

Nella Tabella 5 sono elencati i principali parametri idrodinamici relativi all'alveo inciso del fosso Pezzogrande (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 50 anni, intesi come involucro dei valori massimi. In Figura 7 e Figura 8 sono rappresentati graficamente i profili di corrente del medesimo scenario.

ID Sezione	Progr. (m)	Fondo (m s.m.)	Q (m <sup>3</sup> /s)	P.L. (m s.m.)	h (m)	v (m/s)	Fr (-)	H (m s.m.)
SEZ_AFF1	0,00	15,34	1,7	15,8	0,41	3,50	2,45	16,38
SEZ_AFF2	19,28	13,38	1,7	13,6	0,25	3,26	2,09	14,17
SEZ_AFF3	33,88	11,89	1,7	12,1	0,20	4,03	2,87	12,92
SEZ_AFF4	40,59	10,22	1,7	11,3	1,10	0,73	0,22	11,35
SEZ_AFF5	0,00	10,22	1,7	11,3	1,10	0,73	0,22	11,35
SEZ_AFF6	10,27	8,79	1,7	9,0	0,19	4,80	3,57	10,15
SEZ_AFF6.5	20,00	7,43	1,7	7,6	0,22	4,05	2,76	8,48
SEZ_AFF7	28,82	6,02	1,7	7,1	1,05	0,59	0,18	7,09
SEZ_1	0,00	15,19	9,2	16,1	0,93	4,66	2,32	17,23
SEZ_2	39,92	12,79	9,2	13,5	0,67	4,27	1,91	14,39
SEZ_3	85,07	10,95	9,2	12,0	1,00	2,05	0,65	12,17
SEZ_4	96,09	10,88	9,2	11,7	0,82	2,61	0,92	12,05
SEZ_4.2	103,14	10,58	9,1	11,6	1,01	3,77	1,33	12,32
SEZ_4.5	119,69	9,97	9,0	11,4	1,38	2,03	0,60	11,56
SEZ_5	124,83	9,44	8,9	10,6	1,15	2,92	0,88	11,02
SEZ_6	0,00	9,44	9,0	10,6	1,15	2,90	0,86	11,02
SEZ_7	14,53	7,35	9,0	8,0	0,67	5,00	1,96	9,29
SEZ_8	40,50	6,02	9,0	7,1	1,05	3,15	0,98	7,58
SEZ_9	171,81	4,08	13,0	5,5	1,42	3,40	0,91	6,09
SEZ_10	406,77	0,29	16,7	1,9	1,63	3,92	1,07	2,70
SEZ_11	425,20	0,00	7,7	1,9	1,86	1,82	0,50	2,03
SEZ_SCAR2.1	0,00	0,29	8,9	1,9	1,63	2,10	0,57	2,14
SEZ_SCAR2.2	13,86	0,00	8,9	1,9	1,86	2,10	0,57	2,09

Tabella 5 – Risultati di sintesi per lo scenario TR50.

Dall'analisi dei risultati ottenuti dal modello monodimensionale si evince quanto segue:

- il livello idrico massimo in alveo supera le sommità spondali nel tratto a cielo aperto compreso tra il ponte PZ\_P1 e l'imbocco della tombinatura PZ\_C1;
- il restringimento realizzato dalla sezione (SEZ\_AFF5) di imbocco della tombinatura PZ\_C2 genera un innalzamento dei livelli a monte, che resta però contenuto all'interno delle sponde non provocando esondazioni;
- il tratto terminale dalla tombinatura del fosso Pezzogrande (PZ\_C3 e PZ\_C4) manifesta un deflusso in pressione al transito del colmo di piena, le cui altezze piezometriche risultano inferiori alla quota del piano calpestabile della banchina soprastante (a circa 2,5 m s.m.).

In Figura 9 sono rappresentati gli idrogrammi di portata di alcune sezioni significative del modello monodimensionale. Dalla loro analisi si può osservare l'aumento delle portate da monte verso valle conseguente all'immissione delle portate dall'affluente di destra e dal fosso Muggiano.

Risulta piuttosto limitato l'effetto di laminazione conseguente all'esondazione a imbocco tombinata: la differenza di portata al colmo tra le sezioni SEZ\_1 e SEZ\_6 è pari a circa 250 l/s.

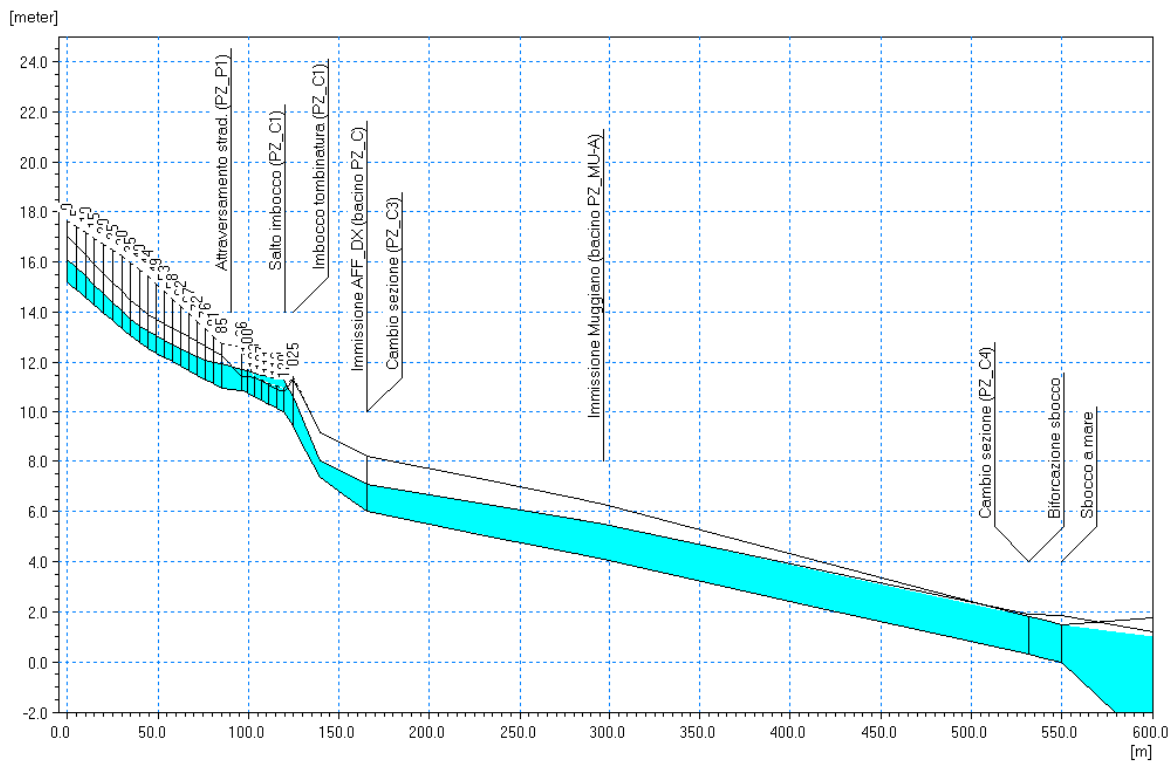


Figura 7 – Profilo longitudinale di corrente del fosso Pezzogrande, scenario TR50.



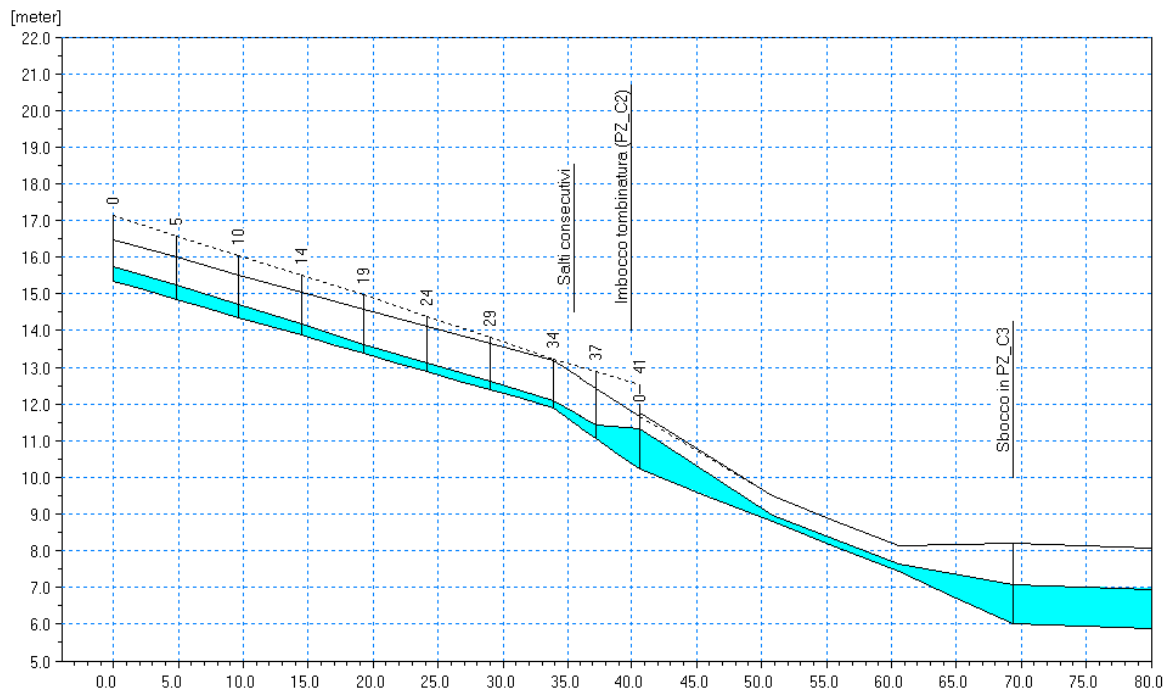


Figura 8 – Profilo longitudinale di corrente dell'affluente in destra del fosso Pezzogrande, scenario TR50.

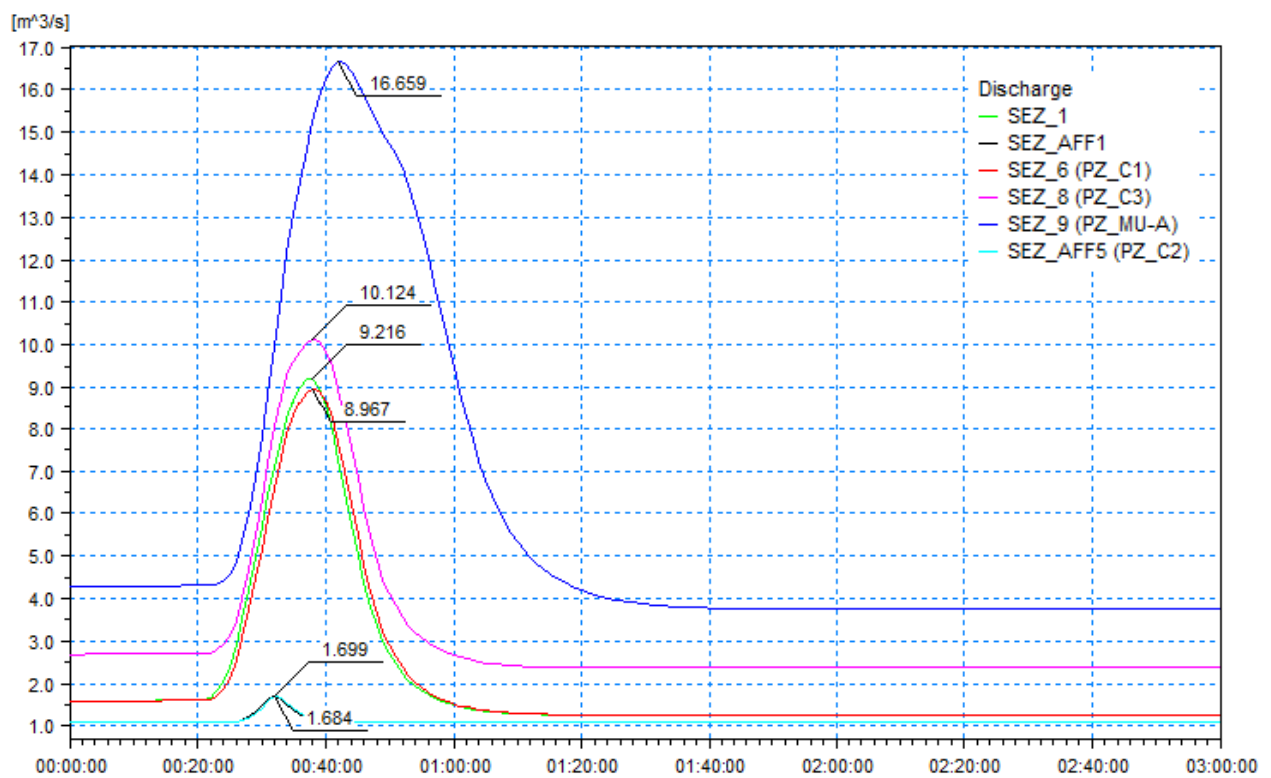


Figura 9 – Idrogrammi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 50 anni in alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale.

In Figura 10 e Figura 11 sono riportate le distribuzioni (output del modello MIKE21) delle massime altezze d'acqua (o tiranti idrici) rispetto al piano campagna e delle massime velocità verificatesi nel corso della simulazione dell'evento con tempo di ritorno cinquantennale.

In Figura 10 le sfumature di colorazione blu evidenziano le aree di esondazione con minori tiranti idrici, quelle rosse con i maggiori. In Figura 11 la colorazione blu indica le velocità minori mentre quella rossa le maggiori. Le aree interne all'alveo inciso non sono rappresentate perché, come già detto, il loro contributo al deflusso viene considerato nell'ambito del modello MIKE11.

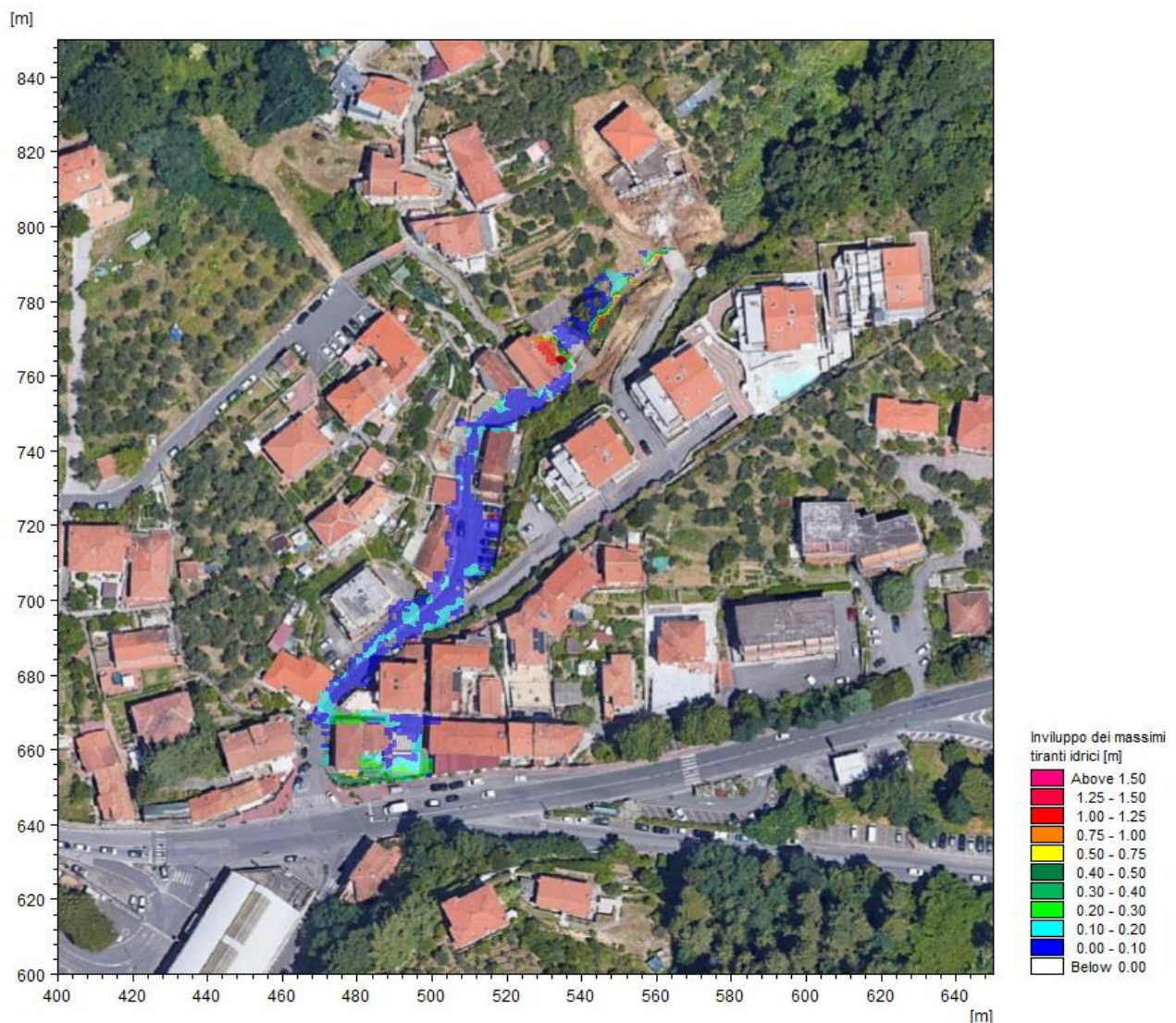


Figura 10 – Distribuzione inviluppo delle massime altezze idriche rispetto al piano campagna. TR=50 anni.

Il passaggio dell'onda di piena cinquantennale provoca l'esondazione dal tratto di fosso Pezzogrande a cielo aperto compreso tra il ponte carrabile PZ\_P1 e la tombinatura PZ\_C1, per effetto di rigurgito ad opera di quest'ultima.

La portata esondata si propaga per ruscellamento superficiale secondo la pendenza del terreno, invadendo la sede stradale di via Pio Ferro e andandosi ad invasare in un'area depressa a ridosso del rilevato stradale del viale S. Bartolomeo (SP331), allagando anche via Modena.

Le altezze idriche massime sono generalmente contenute, con valori medi pari a circa 0,2 m. I valori massimi sono localizzati in corrispondenza di aree depresse:

- nella zona più settentrionale, poco a valle del settore di tracimazione del fosso, dove occupano il cortile di un edificio privato realizzando tiranti idrici fino a 1,50 m;
- nella zona più meridionale, compresa tra via Modena e viale S. Bartolomeo (SP331) lambendo completamente un edificio privato con tiranti idrici fino a 0,40 m.

Le velocità massime sono generalmente inferiori a 1 m/s; dove sono superiori, le corrispondenti altezze d'acqua sono molto ridotte, non evidenziando particolari punti critici.

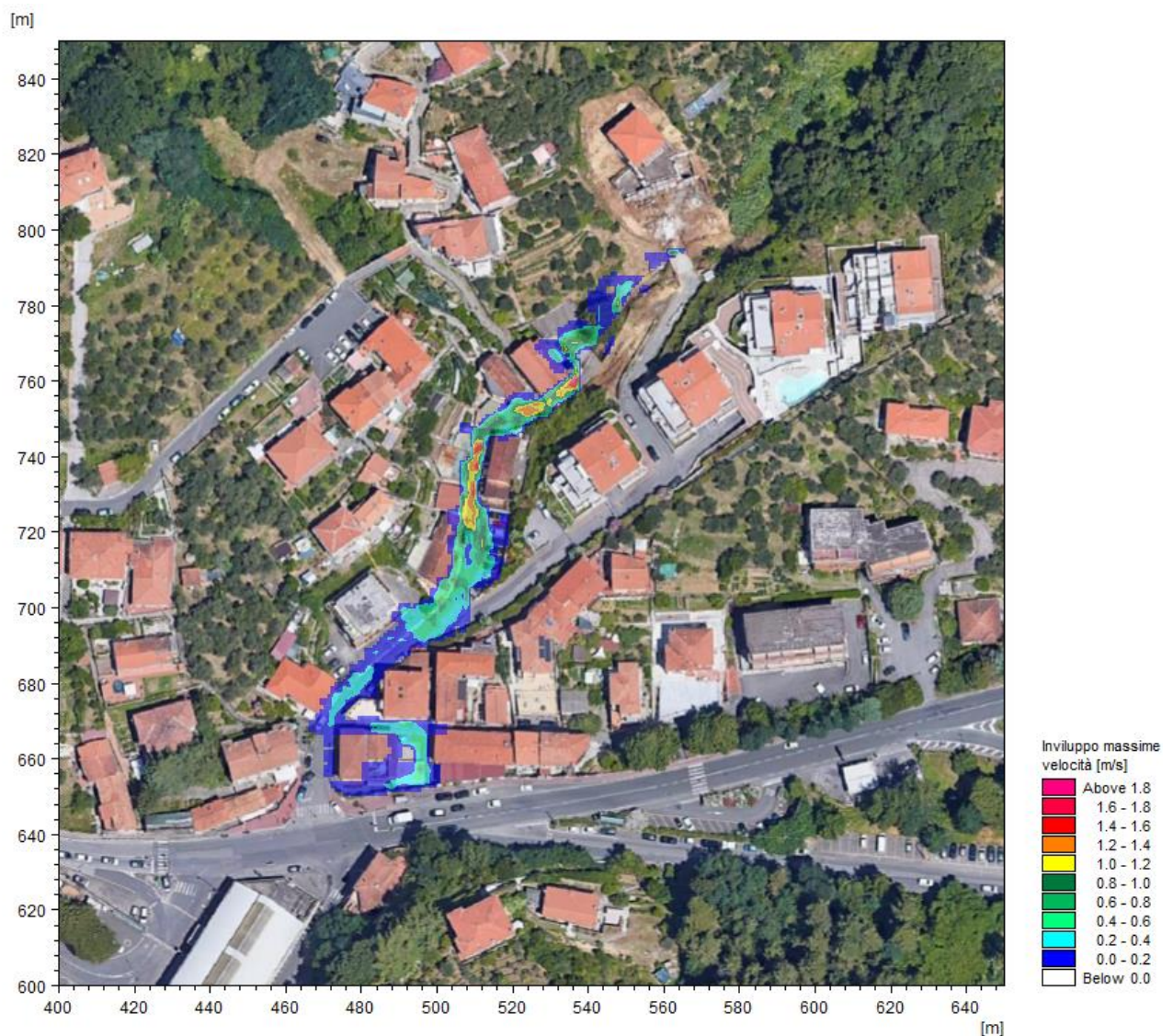


Figura 11 – Distribuzione inviluppo delle massime velocità di flusso. TR=50 anni.

### 5.1.2 Scenario TR200 (tempo di ritorno 200 anni)

Nella Tabella 6 sono elencati i principali parametri idrodinamici relativi all'alveo inciso del fosso Pezzogrande (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 200 anni, intesi come involucro dei valori massimi. In Figura 12 e Figura 13 sono rappresentati graficamente i profili di corrente del medesimo scenario.

ID Sezione	Progr. (m)	Fondo (m s.m.)	Q (m <sup>3</sup> /s)	P.L. (m s.m.)	h (m)	v (m/s)	Fr (-)	H (m s.m.)
SEZ_AFF1	0,00	15,34	2,0	15,8	0,44	3,62	2,43	16,45
SEZ_AFF2	19,28	13,38	2,0	13,7	0,27	3,43	2,10	14,25
SEZ_AFF3	33,88	11,89	2,0	12,1	0,24	3,92	2,57	12,91
SEZ_AFF4	40,59	10,22	1,9	11,6	1,35	0,69	0,19	11,59
SEZ_AFF5	0,00	10,22	1,9	11,6	1,35	0,68	0,19	11,59
SEZ_AFF6	10,27	8,79	1,9	9,0	0,20	5,03	3,57	10,28
SEZ_AFF6,5	20,00	7,43	1,9	7,7	0,24	4,31	2,83	8,61
SEZ_AFF7	28,82	6,02	1,9	7,2	1,20	0,60	0,17	7,24
SEZ_1	0,00	15,19	10,9	16,2	0,98	4,85	2,33	17,37
SEZ_2	39,92	12,79	10,9	13,5	0,73	4,52	1,91	14,56
SEZ_3	85,07	10,95	10,9	12,1	1,12	2,17	0,65	12,31
SEZ_4	96,09	10,88	10,9	11,8	0,91	2,78	0,93	12,19
SEZ_4,2	103,14	10,58	10,8	11,7	1,10	4,02	1,35	12,50
SEZ_4,5	119,69	9,97	10,4	11,5	1,48	2,15	0,61	11,69
SEZ_5	124,83	9,44	10,2	10,7	1,26	3,04	0,87	11,17
SEZ_6	0,00	9,44	10,3	10,7	1,26	3,04	0,87	11,17
SEZ_7	14,53	7,35	10,3	8,1	0,75	5,11	1,89	9,43
SEZ_8	40,50	6,02	10,3	7,2	1,20	3,18	0,93	7,74
SEZ_9	171,81	4,08	15,6	5,8	1,75	3,31	0,80	6,39
SEZ_10	406,77	0,29	20,6	2,7	2,37	4,84	1,32	3,85
SEZ_11	425,20	0,00	9,5	2,6	2,58	2,25	0,61	2,83
SEZ_SCAR2,1	0,00	0,29	11,0	2,7	2,37	2,59	0,71	3,00
SEZ_SCAR2,2	13,86	0,00	11,0	2,6	2,58	2,59	0,71	2,92

Tabella 6 – Risultati di sintesi per lo scenario TR200.

I risultati in termini di dinamiche di deflusso in alveo sono analoghi a quelli commentati per lo scenario TR50, a meno di un incremento delle altezze d'acqua conseguente alle maggiori portate.

Nella porzione di tombinatura nel tratto terminale che manifesta un deflusso in pressione si riscontra come le altezze piezometriche si attestino circa alla quota del piano calpestabile della banchina soprastante.

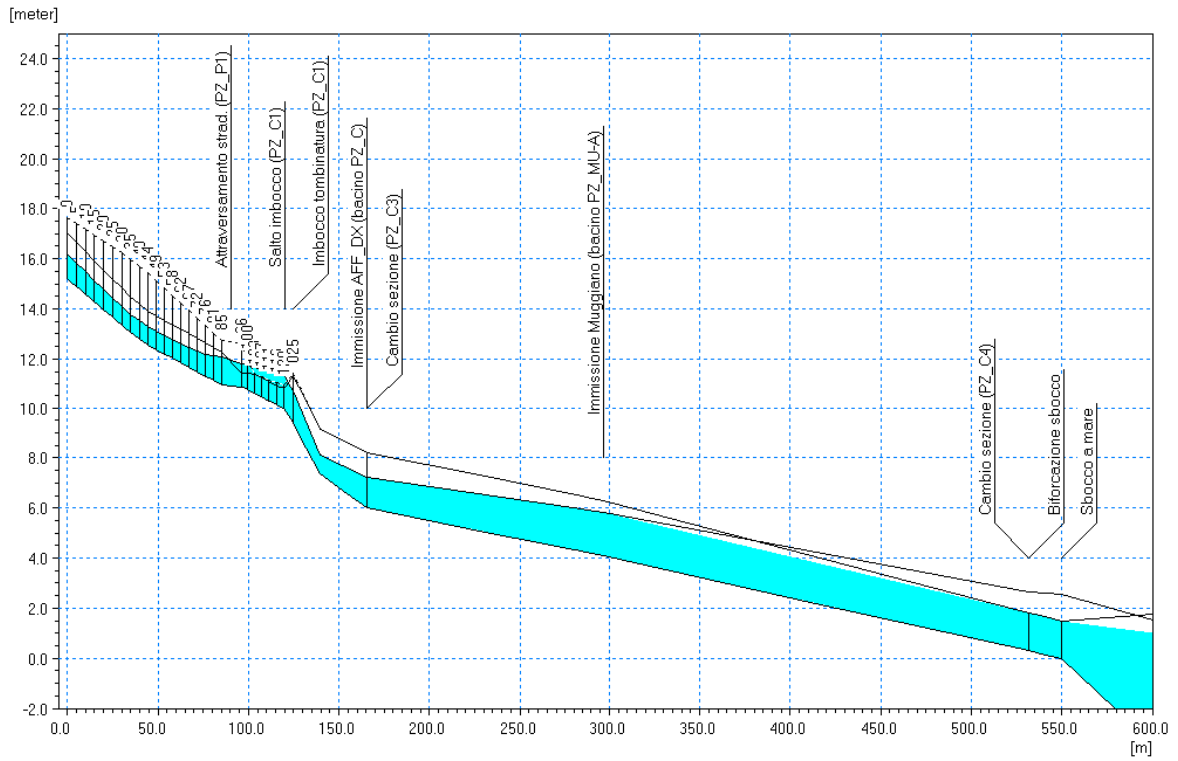


Figura 12 – Profilo longitudinale di corrente del fosso Pezzogrande, scenario TR200.

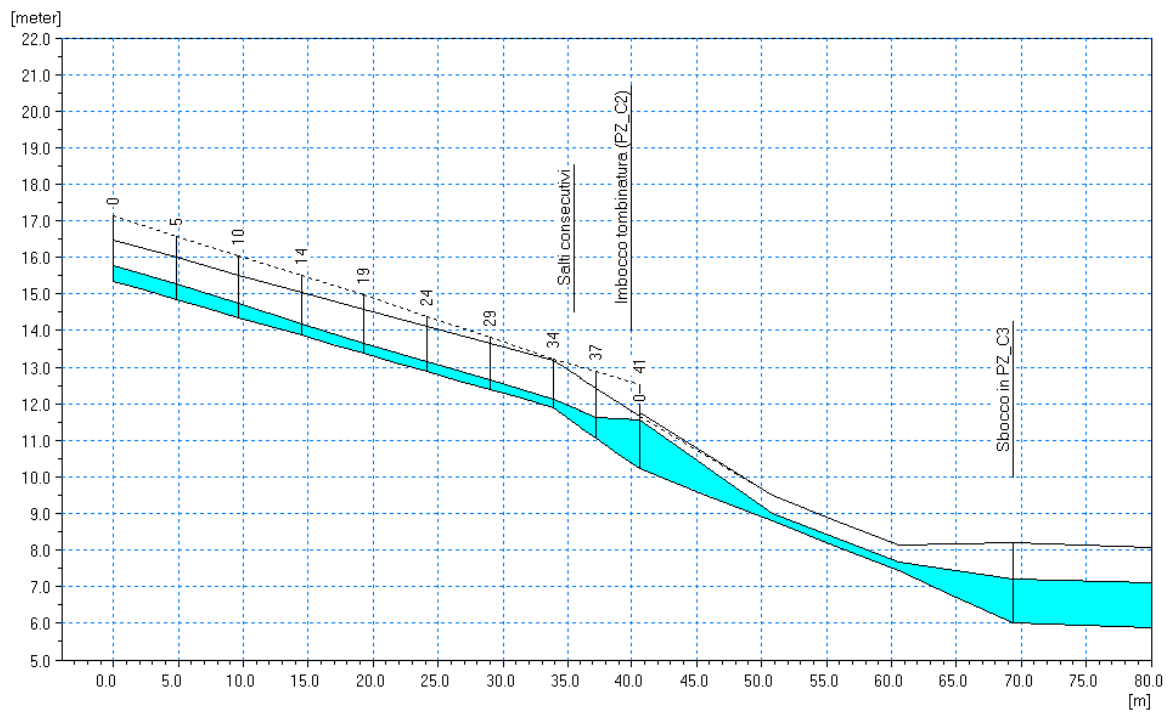


Figura 13 – Profilo longitudinale di corrente dell'affluente in destra del fosso Pezzogrande, scenario TR200.

In Figura 14 sono rappresentati gli idrogrammi di portata di alcune sezioni significative del modello monodimensionale, che mostrano l'incremento delle portate da monte verso valle conseguente all'immissione delle portate dall'affluente di destra e dal fosso Muggiano. Risulta maggiore rispetto allo scenario precedente l'effetto di laminazione conseguente all'esondazione a imbocco tombinatura (differenza tra le sezioni SEZ\_1 e SEZ\_6 di circa 600 l/s); in termini di portate recapitate alla foce in ogni caso risulta preponderante il contributo del fosso Muggiano.

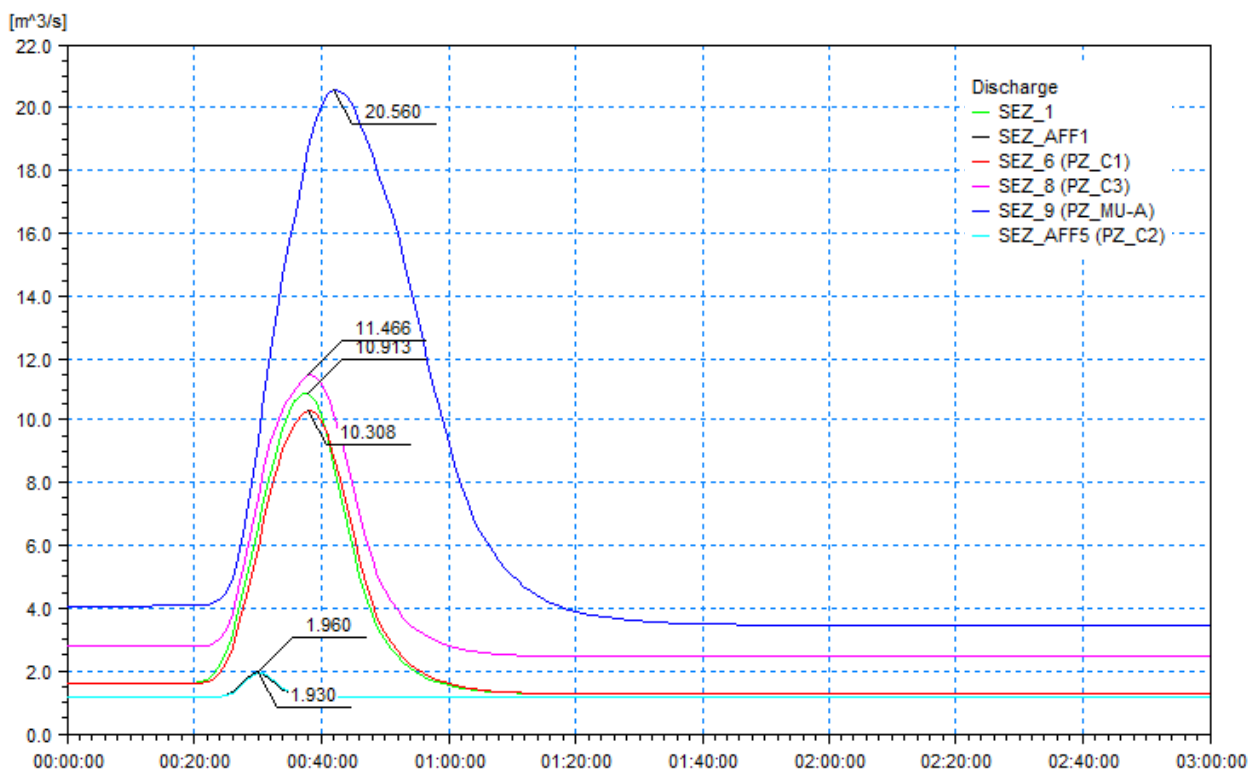


Figura 14 – Idrogrammi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 200 anni in alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale.

In Figura 15 e Figura 16 sono riportate le distribuzioni (output del modello MIKE21) delle massime altezze d'acqua (o tiranti idrici) rispetto al piano campagna e delle massime velocità verificatesi nel corso della simulazione dell'evento con tempo di ritorno duecentennale.

L'estensione superficiale dell'esondazione provocata dal passaggio dell'onda di piena duecentennale risulta pressoché equivalente a quella della simulazione precedente (TR50), pur con maggiori valori di altezze d'acqua e velocità, a meno dell'aumento degli allagamenti lungo via Mantova che si estendono verso levante per ulteriori 20 m. Anche per l'evento duecentennale la portata fuoriesce sul piano campagna unicamente dal tratto immediatamente a monte dell'imbocco della tombinatura.

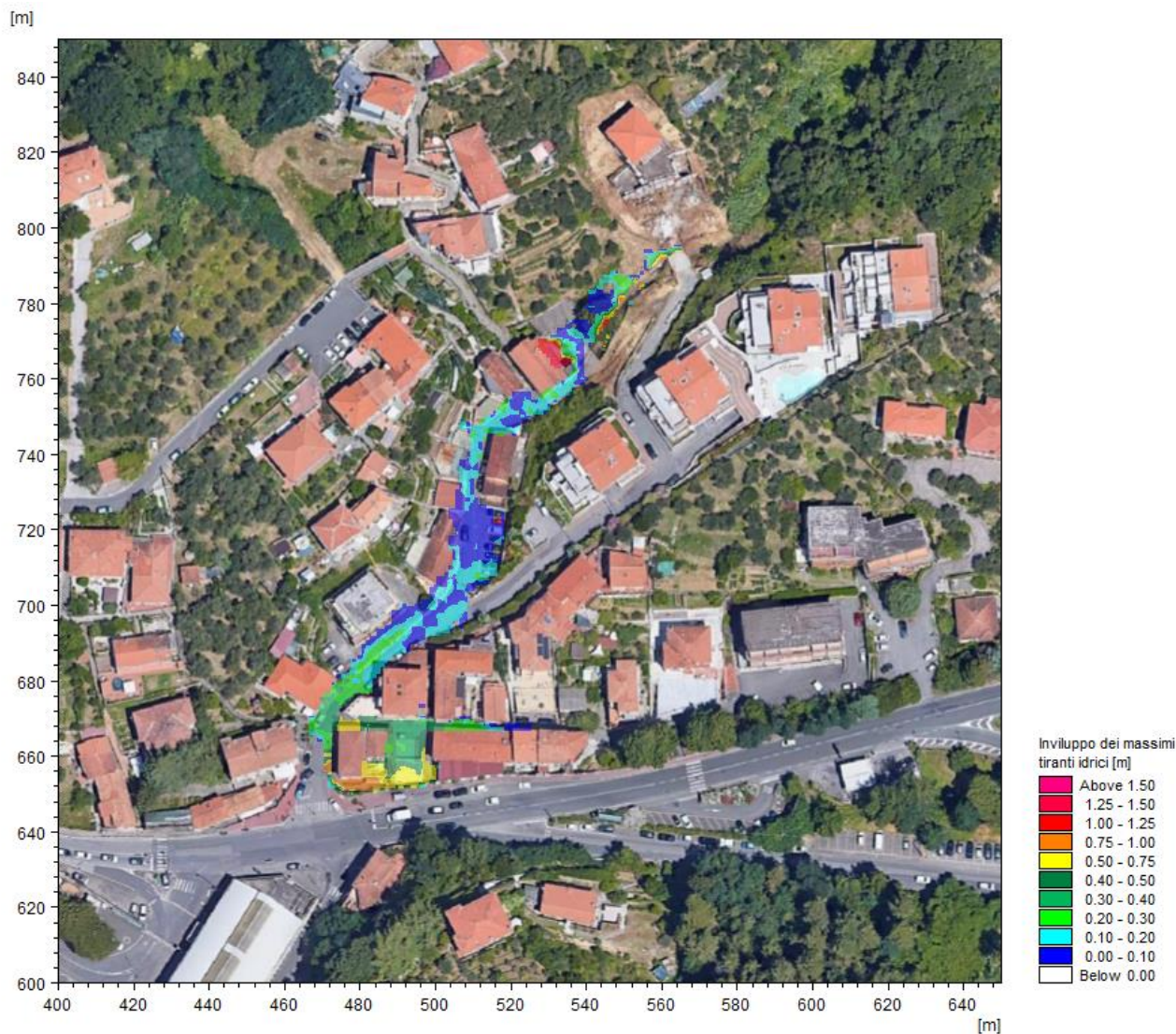


Figura 15 – Distribuzione involucro delle massime altezze idriche rispetto al piano campagna. TR=200 anni.

Nello specifico le altezze d'acqua massime che si vengono a realizzare sono:

- nell'area settentrionale, localizzate subito a valle del punto di tracimazione delle sponde del fosso, di circa 1,50 m;
- nella porzione meridionale di via Pio Ferro generalmente pari a circa 0,4 m;
- nella zona più meridionale e depressa tra via Mantova e viale S. Bartolomeo pari a circa 1 m.

Le velocità massime sono generalmente inferiori a 1 m/s. Dove sono superiori, i corrispondenti tiranti risultano piuttosto limitati, non evidenziando particolari punti critici.

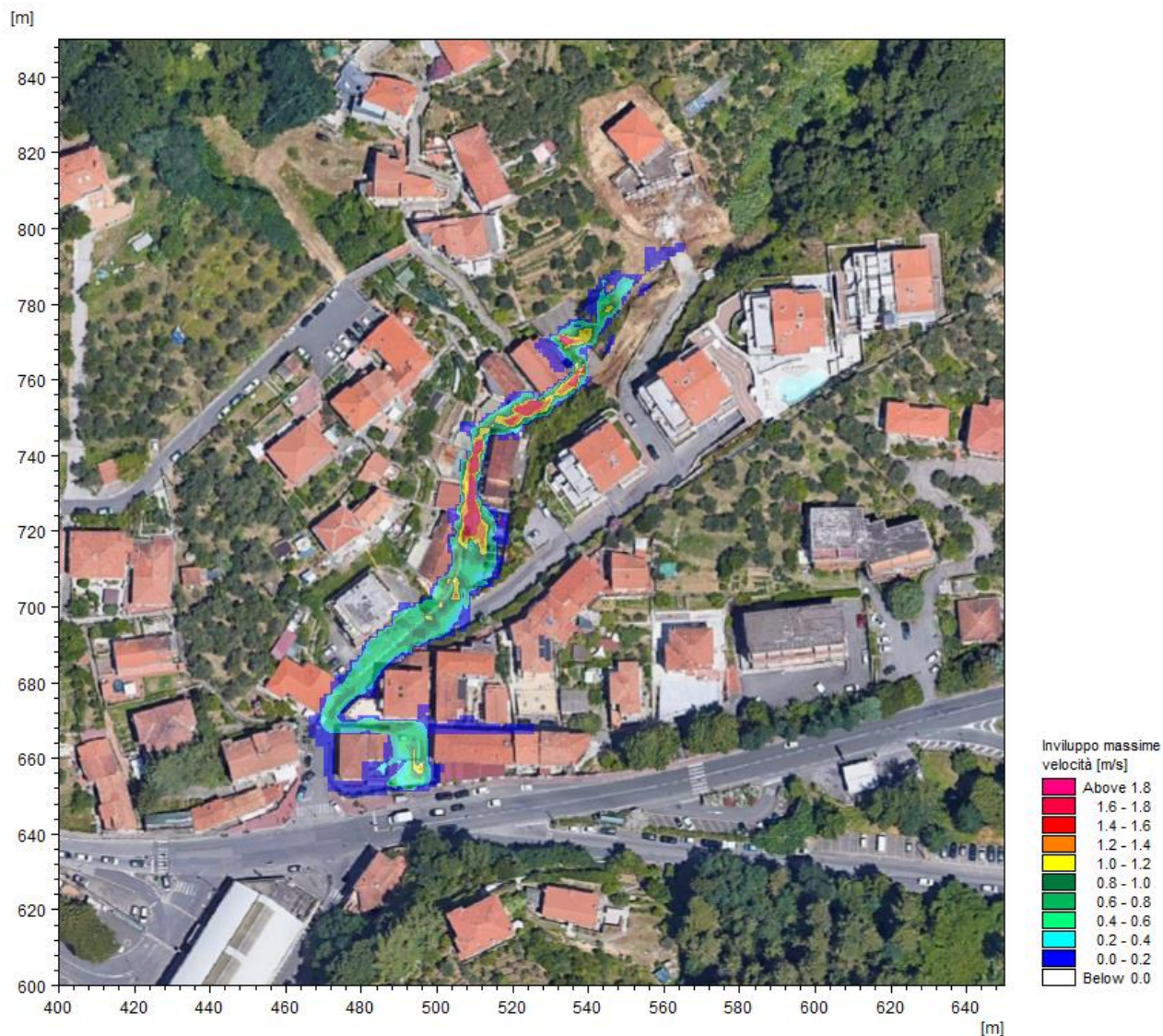


Figura 16 – Distribuzione involucro delle massime velocità. TR=200 anni.

### 5.1.3 Scenario TR500 (tempo di ritorno 500 anni)

Nella Tabella 7 sono elencati i principali parametri idrodinamici relativi all'alveo inciso del fosso Pezzogrande (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 500 anni, intesi come involucro dei valori massimi. In Figura 18 e Figura 19 sono rappresentati graficamente i profili di corrente del medesimo scenario.



ID Sezione	Progr. (m)	Fondo (m s.m.)	Q (m <sup>3</sup> /s)	P.L. (m s.m.)	h (m)	v (m/s)	Fr (-)	H (m s.m.)
SEZ_AFF1	0,00	15,34	2,1	15,8	0,45	3,71	2,42	16,49
SEZ_AFF2	19,28	13,38	2,1	13,7	0,29	3,53	2,10	14,30
SEZ_AFF3	33,88	11,89	2,1	12,2	0,27	3,75	2,31	12,88
SEZ_AFF4	40,59	10,22	2,1	11,7	1,52	0,65	0,19	11,76
SEZ_AFF5	0,00	10,22	2,1	11,7	1,52	0,64	0,21	11,76
SEZ_AFF6	10,27	8,79	2,1	9,0	0,21	5,16	3,58	10,36
SEZ_AFF6.5	20,00	7,43	2,1	7,7	0,25	4,33	2,75	8,64
SEZ_AFF7	28,82	6,02	2,1	7,3	1,28	0,60	0,17	7,32
SEZ_1	0,00	15,19	12,0	16,2	1,02	4,96	2,31	17,46
SEZ_2	39,92	12,79	12,0	13,6	0,77	4,66	1,92	14,66
SEZ_3	85,07	10,95	12,0	12,2	1,20	2,23	0,65	12,41
SEZ_4	96,09	10,88	12,0	11,8	0,97	2,89	0,94	12,27
SEZ_4.2	103,14	10,58	11,8	11,7	1,15	4,17	1,36	12,61
SEZ_4.5	119,69	9,97	11,2	11,5	1,54	2,21	0,61	11,76
SEZ_5	124,83	9,44	10,9	10,8	1,32	3,12	0,88	11,26
SEZ_6	0,00	9,44	11,1	10,8	1,32	3,12	0,87	11,26
SEZ_7	14,53	7,35	11,1	8,1	0,80	5,16	1,84	9,50
SEZ_8	40,50	6,02	11,1	7,3	1,28	3,21	0,90	7,83
SEZ_9	171,81	4,08	16,9	6,0	1,92	3,25	0,75	6,54
SEZ_10	406,77	0,29	22,4	3,1	2,77	5,27	1,44	4,47
SEZ_11	425,20	0,00	10,4	3,0	2,96	2,45	0,67	3,26
SEZ_12	525,21	-6,79	22,4	0,5	7,29	0,06	0,01	0,50
SEZ_13	670,64	-8,52	22,6	0,5	9,02	0,02	0,00	0,50
SEZ_14	866,87	-9,68	22,8	0,5	10,18	0,01	0,00	0,50
SEZ_SCAR2.1	0,00	0,29	12,0	3,1	2,77	2,82	0,77	3,46
SEZ_SCAR2.2	13,86	0,00	12,0	3,0	2,96	2,82	0,77	3,36

**Tabella 7 – Risultati di sintesi della simulazione TR500.**

A differenza dei risultati degli scenari precedenti, all'esondazione dal tratto a cielo aperto del Pezzogrande a monte tombinatura si aggiunge, anche se di minima entità, l'esondazione dell'affluente di destra, localizzata nelle sezioni precedenti l'imbocco del tratto tombato a monte della confluenza nel Pezzogrande.

Il deflusso dell'ultima parte della tombinatura del fosso principale (PZ\_C3 e PZ\_C4) avviene in pressione con altezze piezometriche in rete che si attestano a una quota pari a circa 3,0 m s.m. (superiore di circa 0,50 m al piano della banchina).

In Figura 17 sono rappresentati gli idrogrammi di portata di alcune sezioni significative del modello monodimensionale. Dalla loro analisi si riscontra l'aumento delle portate da monte verso valle conseguente all'immissione delle portate dall'affluente di destra e dal fosso Muggiano. L'effetto di laminazione del colmo dovuto alle esondazioni risulta maggiore rispetto agli scenari precedenti (differenza tra le sezioni SEZ\_1 e SEZ\_6 di circa 1 m<sup>3</sup>/s) ma si mantiene trascurabile rispetto all'immissione del Fosso Muggiano.

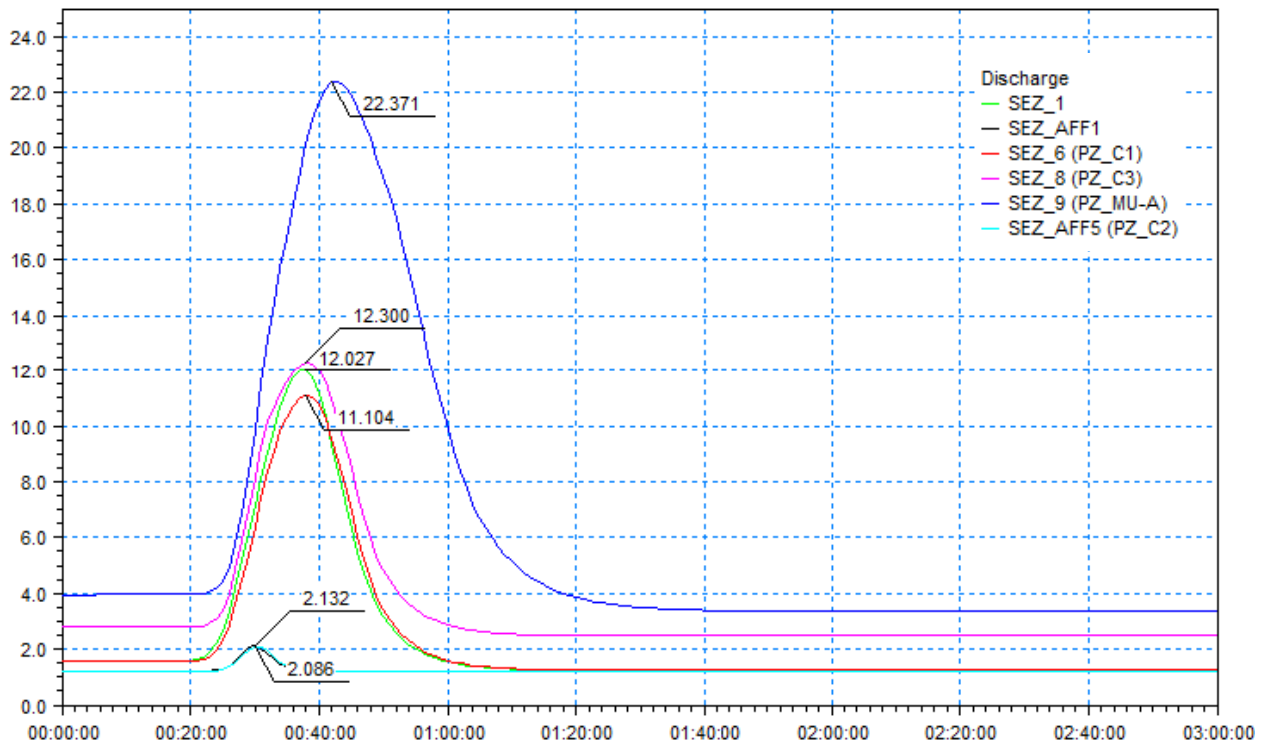


Figura 17 – Idrografi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 500 anni in alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale.

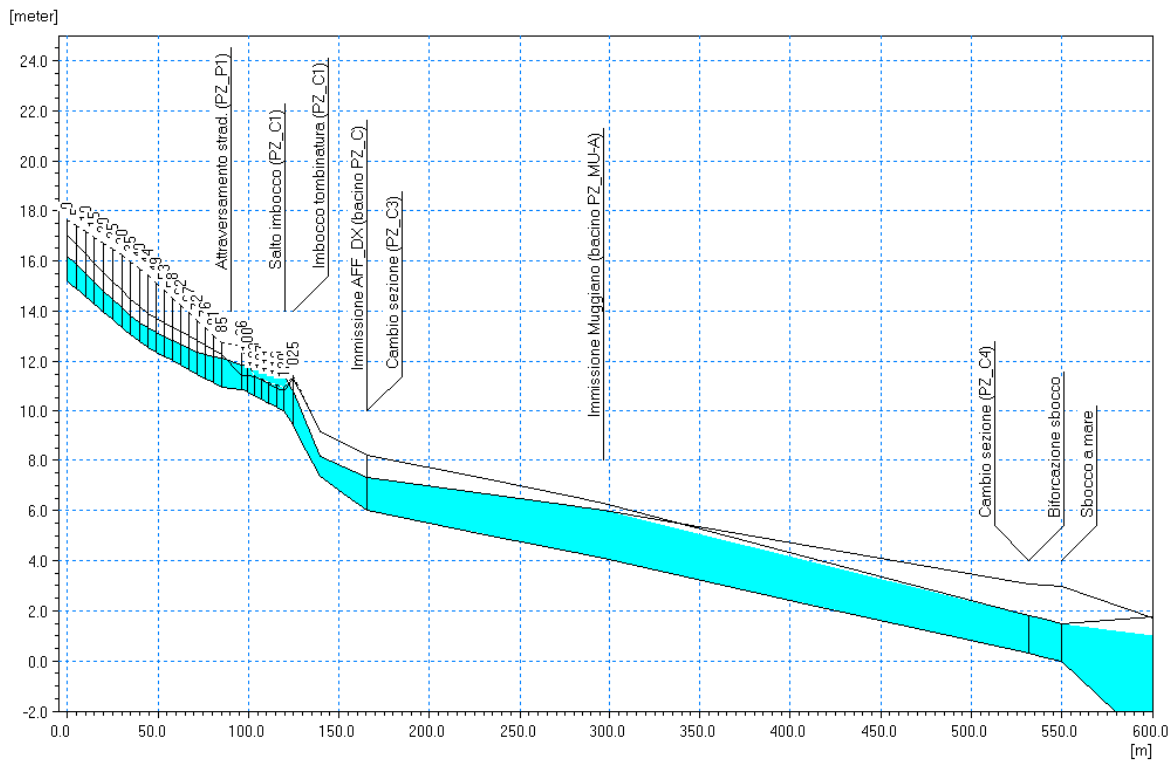
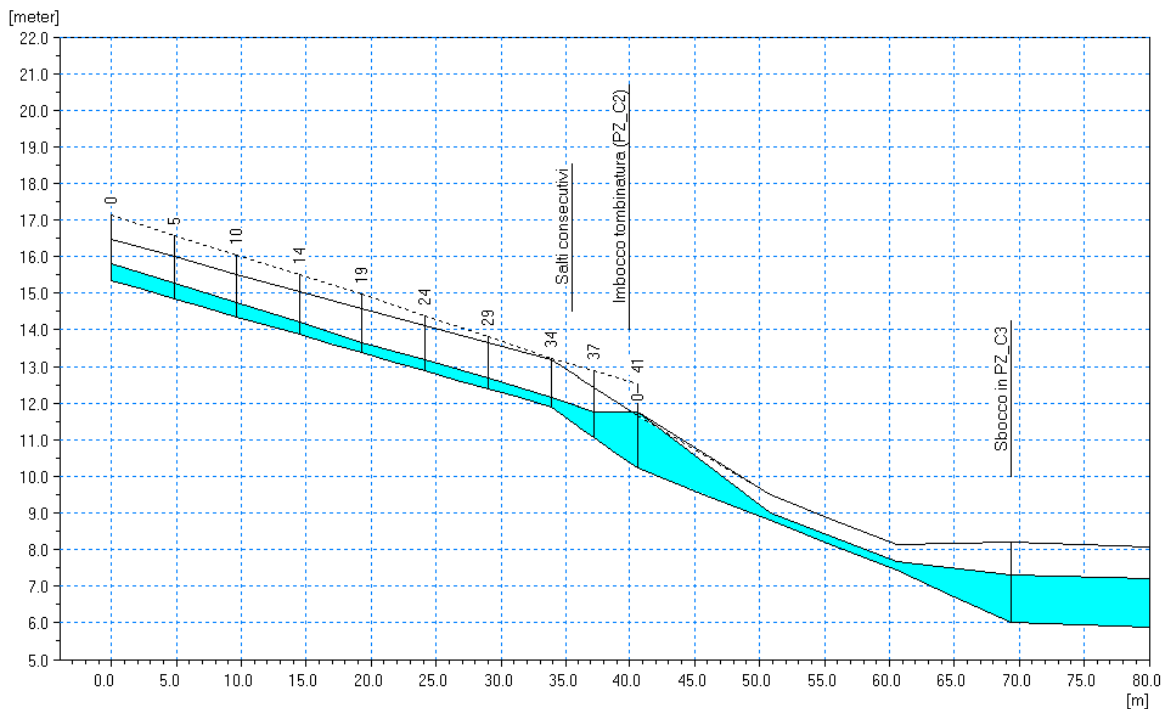


Figura 18 – Profilo longitudinale di corrente del fosso Pezzogrande, scenario TR500.



**Figura 19 – Profilo longitudinale di corrente dell'affluente in destra del fosso Pezzogrande, scenario TR500.**

In Figura 20 e Figura 21 sono riportate le distribuzioni (output del modello MIKE21) delle massime altezze d'acqua (o tiranti idrici) rispetto al piano campagna e delle massime velocità verificatesi nel corso della simulazione dell'evento con tempo di ritorno cinquecentennale.

Anche la simulazione dell'evento cinquecentennale mostra una sostanziale sovrapposibilità con i risultati delle simulazioni precedenti ad eccezione della maggiore entità in termini di valori dei tiranti idrici e dell'aumento delle aree bagnate sia lungo via Mantova (che si estendono verso levante per ulteriori 20 m rispetto ai risultati della TR200) sia in una superficie limitata nell'intorno dell'imbocco della tombinatura PZ\_C3 dell'affluente destro del fosso Pezzogrande.

Nello specifico le altezze d'acqua massime che si vengono a realizzare sono:

- nell'area settentrionale, localizzate subito a valle del punto di tracimazione delle sponde del fosso, di circa 1,50 m;
- nella porzione meridionale di via Pio Ferro generalmente pari a circa 0,75 m;
- nella zona più meridionale e depressa tra via Mantova e viale S. Bartolomeo pari a circa 1,50 m.

Le velocità massime sono generalmente inferiori a 1 m/s. Dove sono superiori, i corrispondenti tiranti risultano piuttosto limitati, non evidenziando particolari punti critici.

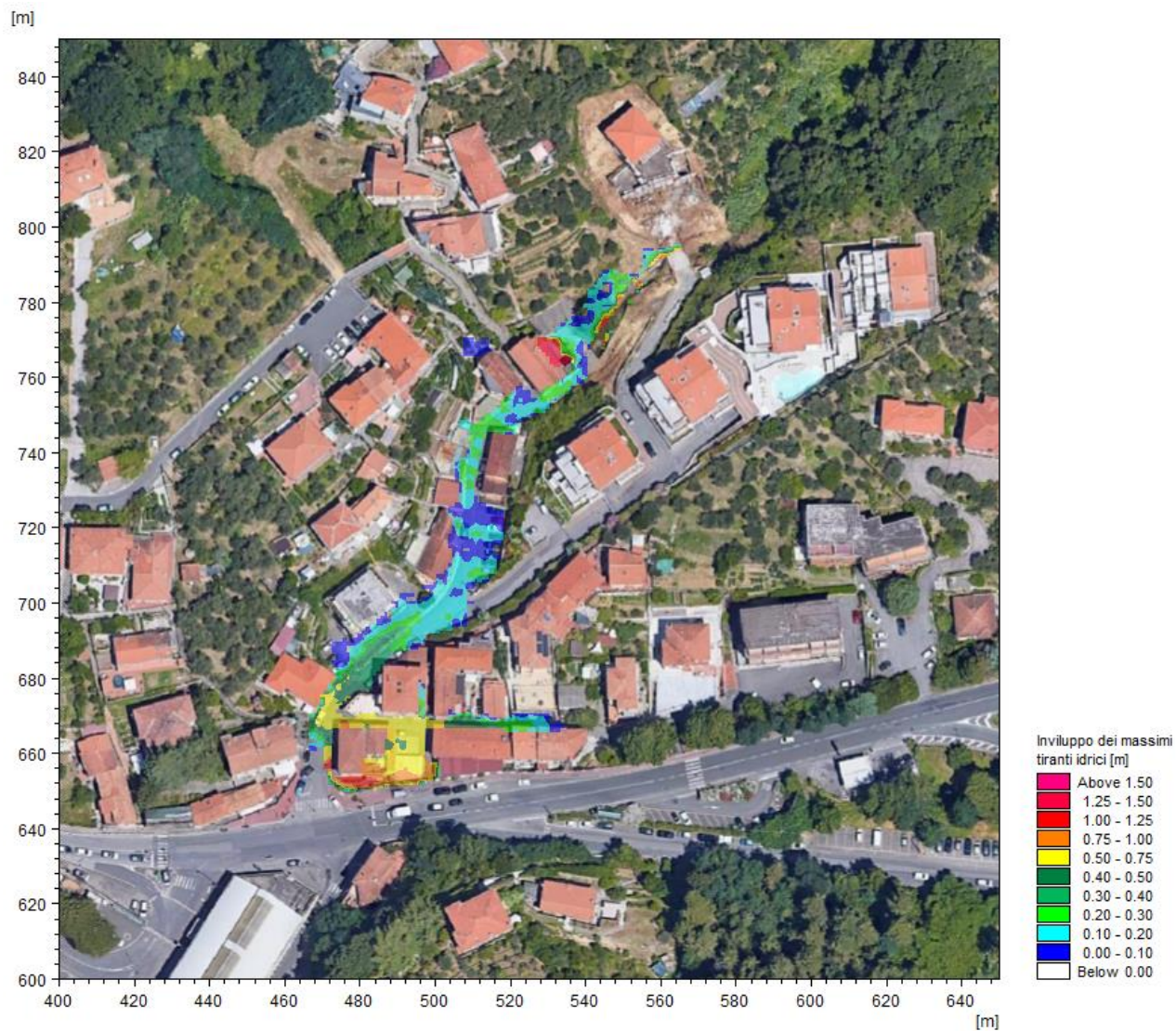


Figura 20 – Distribuzione involucro dei massimi tiranti idrici rispetto al piano campagna. TR=500 anni.

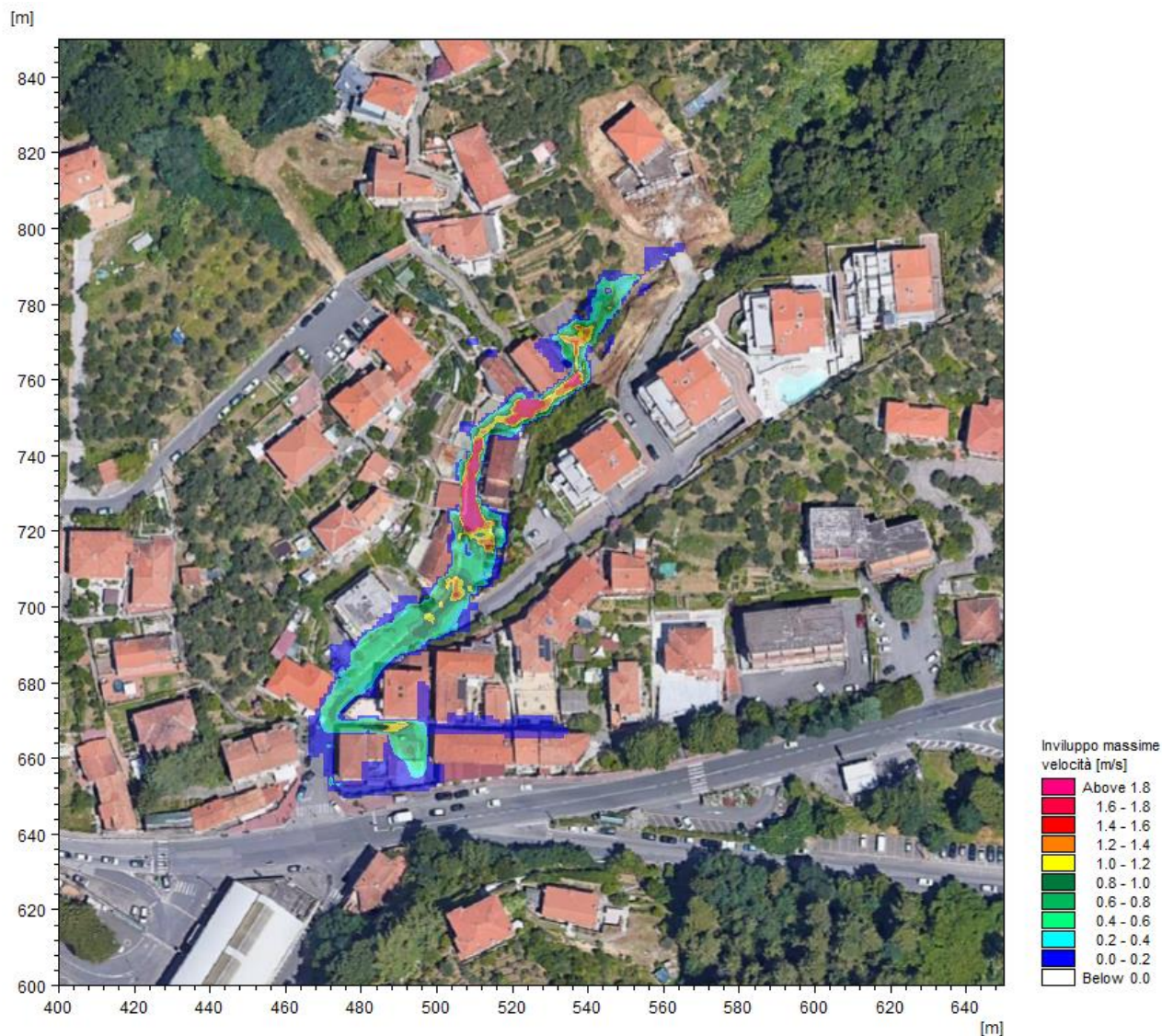


Figura 21 – Distribuzione involucro delle massime velocità. TR=500 anni.

#### 5.1.4 Analisi dei franchi idraulici sui manufatti interferenti

In Tabella 8 sono sintetizzati i franchi minimi di sicurezza rispetto alle quote di intradosso degli attraversamenti, estratti dai risultati dei tre scenari simulati.

Essi sono indicati con valore negativo nel caso in cui il moto sia in pressione (caso proprio delle tombinature) ed identificano la differenza tra le altezze del cielo della tombinatura e le altezze piezometriche del tratto.

I franchi idraulici di sicurezza non sono definiti in corrispondenza delle strutture inserite all'interno dei modelli numerici; per queste si è fatto riferimento alla sezione posta immediatamente a monte.

Si osserva come l'affluente di destra presenti franchi sostanzialmente adeguati (circa 0,5 m), a meno dell'imbocco della tombinatura, il quale funziona in pressione.

Per quanto riguarda il Pezzogrande, nonostante l'imbocco della tombinatura, con presenza di salto di fondo subito a monte, provochi un effetto di rigurgito, all'interno della copertura nel primo tratto di monte i franchi risultano pari o superiori a 1 m per TR=200 anni; il raggiungimento di condizioni di deflusso in pressione si ha a seguito dell'immissione delle portate del Fosso Muggiano.

ID Sezione	ID Struttura	TR50	TR200	TR500
		FR_INTR [m]	FR_INTR [m]	FR_INTR [m]
SEZ_AFF6	PZ_C2	0,51	0,50	0,49
SEZ_AFF6.5	PZ_C2	0,48	0,46	0,45
SEZ_AFF7	PZ_C2	-0,35	-0,50	-0,58
SEZ_7	PZ_C1	1,14	1,05	1,00
SEZ_8	PZ_C3	1,15	1,00	0,92
SEZ_9	PZ_C3	0,78	0,45	0,28
SEZ_10	PZ_C4	-0,13	-0,87	-1,27
SEZ_11	PZ_C4	-0,36	-1,08	-1,46
SEZ_SCAR2.1	PZ_C4	-0,13	-0,87	-1,27
SEZ_SCAR2.2	PZ_C4	-0,36	-1,08	-1,46

Tabella 8 – Franco disponibile dalla quota del pelo libero simulato (per gli scenari TR50, TR200 e TR500) alla quota di intradosso delle tombinature del fosso Pezzogrande.

## 5.2 Risultati delle simulazioni: Fosso Canalone

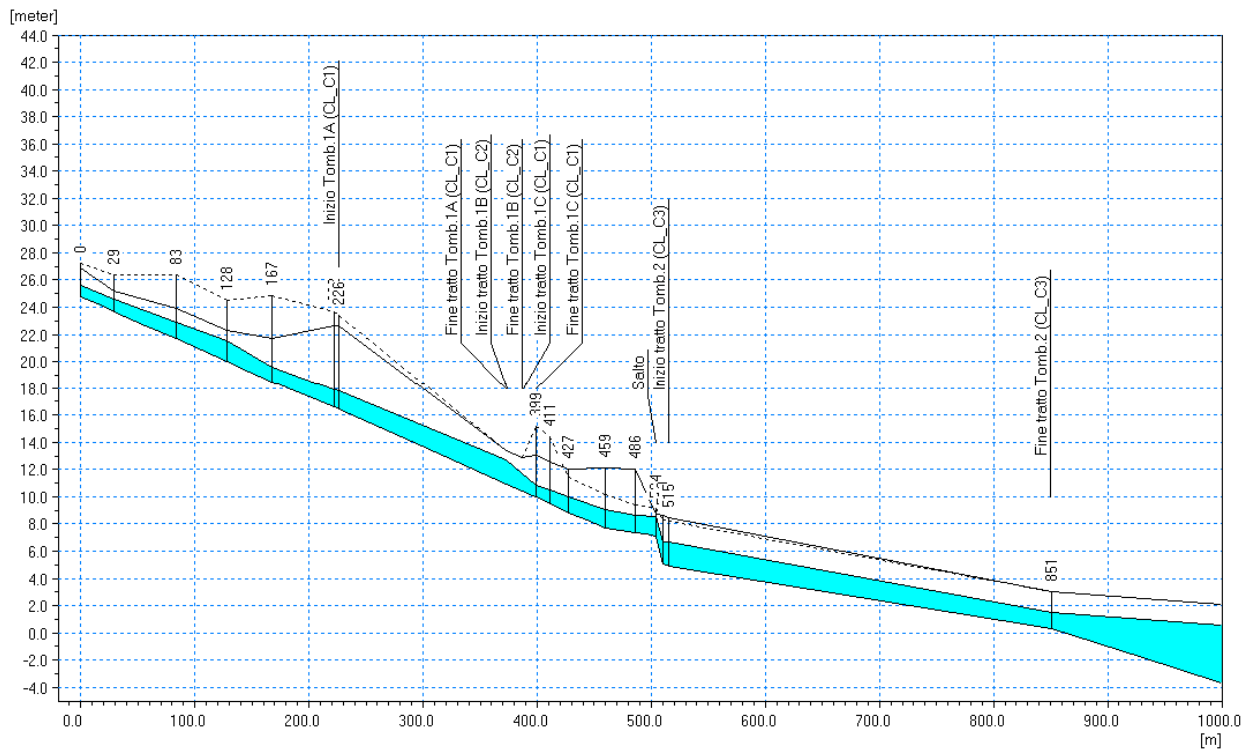
### 5.2.1 Scenario TR50 (tempo di ritorno 50 anni)

Nella Tabella 9 sono elencati i principali parametri idrodinamici relativi all'alveo inciso del fosso Canalone (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 50 anni, intesi come inviluppo dei valori massimi. In Figura 22 è rappresentato graficamente il profilo di corrente del medesimo scenario.

Dall'analisi dei risultati del modello monodimensionale si evince che il livello idrico massimo interno all'alveo non supera mai le sommità spondali non presentando nessun fenomeno di esondazione laterale. Di conseguenza non sono riportate mappe dei risultati del modello bidimensionale, in quanto esso non entra in funzione.

ID Sezione	Progr. (m)	Fondo (m s.l.m.)	Q (m <sup>3</sup> /s)	P.L. (m s.l.m.)	h (m)	v (m/s)	Fr (-)	H (m s.l.m.)
SEZ_1	0,00	24,76	11,2	25,7	0,90	3,98	1,40	26,46
SEZ_2	29,35	23,68	11,2	24,6	0,94	3,63	1,39	25,29
SEZ_3	83,27	21,69	11,2	22,9	1,25	3,79	1,27	23,67
SEZ_4	127,83	20,05	11,2	21,5	1,49	4,49	1,43	22,56
SEZ_5	167,47	18,49	11,2	19,6	1,12	3,77	1,41	20,33
SEZ_6	221,89	16,58	11,1	17,9	1,29	1,98	0,67	18,07
SEZ_7	225,78	16,44	11,1	17,8	1,38	2,18	0,63	18,06
TOMB_1A	299,39	13,69						
TOMB_A	373,00	10,94	11,1	12,7	1,79	1,87	0,49	12,90
TOMB_1B	380,00	10,68						
TOMB_B	387,00	10,41	11,1	11,7	1,31	2,56	0,78	12,06
TOMB_1C	393,32	10,18						
SEZ_8	399,32	9,95	11,1	10,9	0,92	3,38	1,42	11,45
SEZ_9	411,37	9,51	11,1	10,5	1,00	3,40	1,44	11,10
SEZ_10	427,48	8,80	11,1	10,0	1,16	3,29	1,27	10,51
SEZ_11	459,32	7,73	11,1	9,0	1,30	2,54	0,94	9,36
SEZ_12	485,78	7,37	11,1	8,6	1,27	1,97	0,72	8,83
SEZ_13	504,41	7,11	11,1	8,5	1,41	1,71	0,59	8,67
SEZ_14	510,35	5,06	11,1	6,7	1,62	1,34	0,35	6,77
SEZ_15	515,35	4,88	11,0	6,7	1,77	1,49	0,37	6,77
TOMB_2	682,68	2,59						
MARE_1	850,50	0,30	10,9	1,5	1,23	2,05	0,59	1,75

**Tabella 9 – Risultati di sintesi della simulazione TR50.**



**Figura 22 – Profilo longitudinale di corrente del fosso Canalone, scenario TR50.**

In Figura 23 sono rappresentati gli idrogrammi di portata in alcune sezioni significative del modello monodimensionale. Si riscontra una sostanziale propagazione verso valle dell'onda di piena, senza significative modificazioni di forma o del valore al colmo.



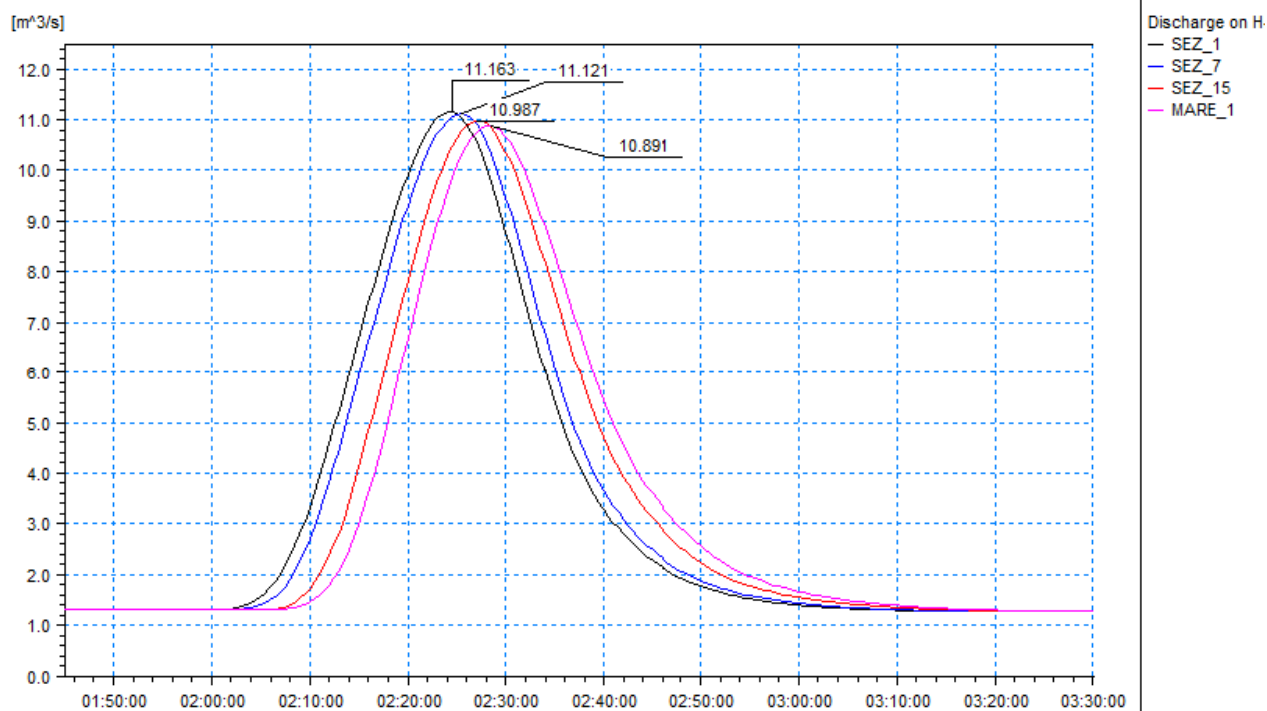


Figura 23 – Idrogrammi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 50 anni su alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale

### 5.2.2 Scenario TR200 (tempo di ritorno 200 anni)

Nella Tabella 10 sono elencati i principali parametri idrodinamici relativi all'alveo inciso del fosso Canalone (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 200 anni, intesi come involucro dei valori massimi. In Figura 24 è rappresentato graficamente il profilo di corrente del medesimo scenario.

Analogamente alla simulazione precedente non si osserva nessun sormonto spondale, con deflusso dell'onda di piena duecentennale contenuto all'interno dell'alveo inciso. Per tale motivo non vi sono risultati del modello MIKE21.

ID Sezione	Progr. (m)	Fondo (m s.l.m.)	Q (m³/s)	P.L. (m s.l.m.)	h (m)	v (m/s)	Fr (-)	H (m s.l.m.)
SEZ_1	0,00	24,76	13,3	25,8	1,00	4,21	1,40	26,66
SEZ_2	29,35	23,68	13,3	24,7	1,04	3,81	1,39	25,45
SEZ_3	83,27	21,69	13,3	23,1	1,37	3,95	1,27	23,86
SEZ_4	127,83	20,05	13,3	21,7	1,64	4,61	1,47	22,77

ID Sezione	Progr. (m)	Fondo (m s.l.m.)	Q (m <sup>3</sup> /s)	P.L. (m s.l.m.)	h (m)	v (m/s)	Fr (-)	H (m s.l.m.)
SEZ_5	167,47	18,49	13,3	19,7	1,23	3,86	1,40	20,48
SEZ_6	221,89	16,58	13,3	18,0	1,47	1,96	0,62	18,24
SEZ_7	225,78	16,44	13,2	18,0	1,56	2,14	0,59	18,23
TOMB_1A	299,39	13,69						
TOMB_A	373,00	10,94	13,2	12,9	1,98	2,04	0,51	13,13
TOMB_1B	380,00	10,68						
TOMB_B	387,00	10,41	13,2	11,9	1,45	2,74	0,79	12,25
TOMB_1C	393,32	10,18						
SEZ_8	399,32	9,95	13,2	11,0	1,00	3,47	1,45	11,57
SEZ_9	411,37	9,51	13,2	10,6	1,08	3,59	1,44	11,24
SEZ_10	427,48	8,80	13,2	10,0	1,25	3,48	1,27	10,66
SEZ_11	459,32	7,73	13,2	9,1	1,39	2,70	0,94	9,49
SEZ_12	485,78	7,37	13,2	8,7	1,36	2,10	0,73	8,95
SEZ_13	504,41	7,11	13,2	8,6	1,50	1,84	0,60	8,79
SEZ_14	510,35	5,06	13,2	6,9	1,84	1,37	0,36	7,00
SEZ_15	515,35	4,88	13,1	6,9	1,99	1,57	0,37	7,00
TOMB_2	682,68	2,59						
MARE_1	850,50	0,30	13,0	1,6	1,35	2,25	0,62	1,91

Tabella 10 – Risultati della simulazione TR200: moto vario della piena duecentennale.

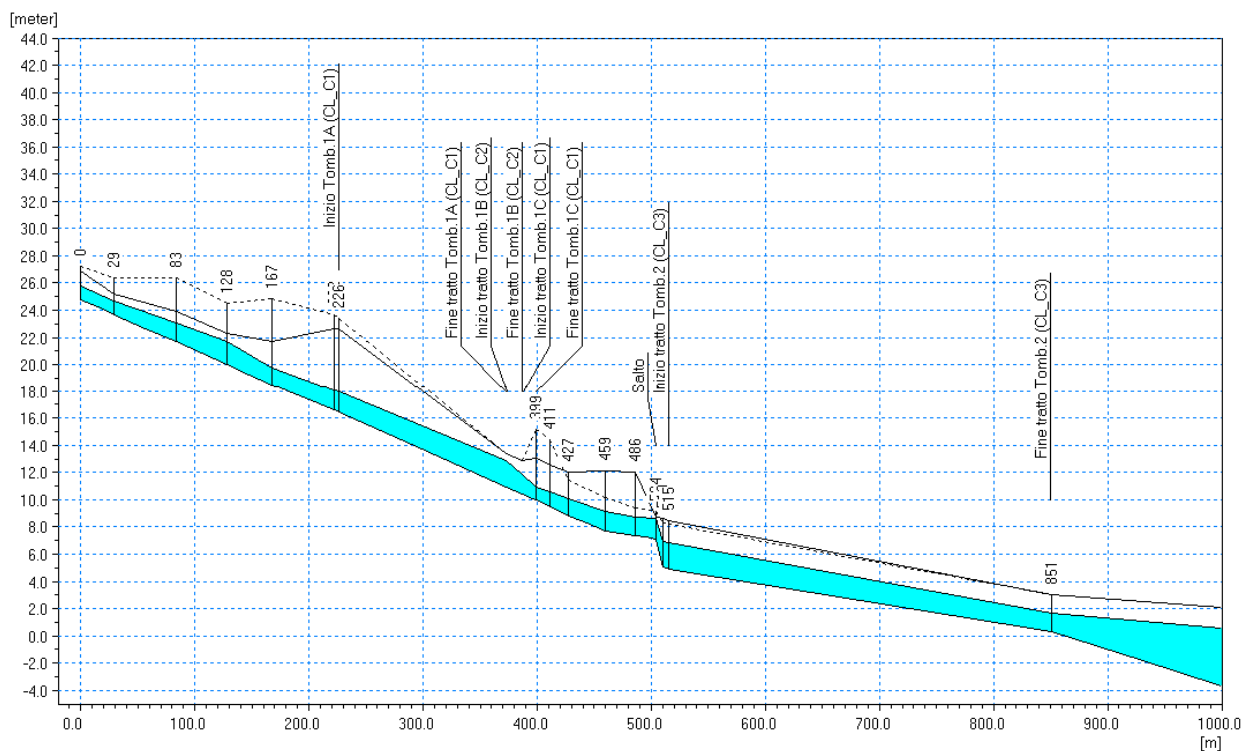


Figura 24 – Profilo longitudinale di corrente del fosso Canalone scenario TR200: moto vario, piena 200 anni.

In Figura 25 sono rappresentati gli idrogrammi di portata in alcune sezioni significative del modello monodimensionale. Si riscontra una sostanziale propagazione verso valle dell'onda di piena, senza significative modificazioni di forma o del valore al colmo.

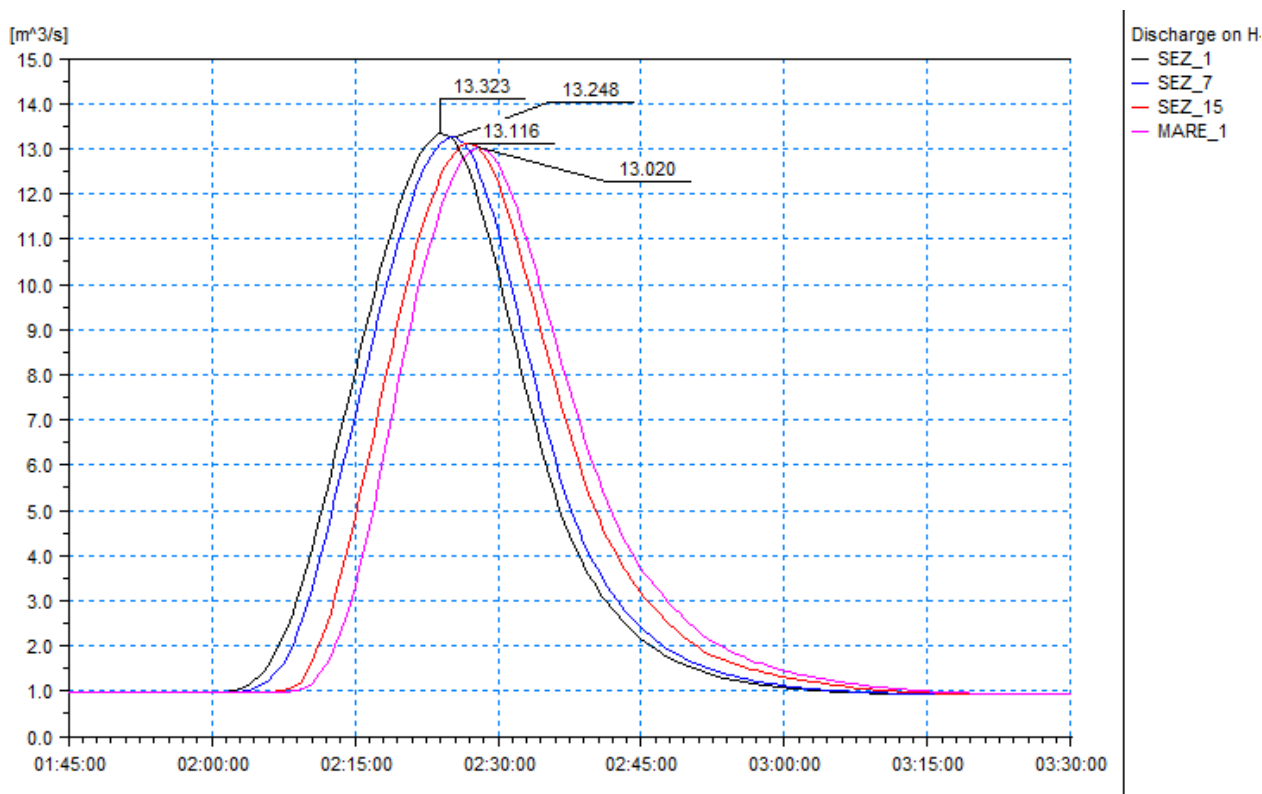


Figura 25 – Idrogrammi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 200 anni in alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale.

### 5.2.3 Scenario TR500 (tempo di ritorno 500 anni)

Nella Tabella 11 sono elencati i principali parametri idrodinamici relativi all'alveo inciso del fosso Canalone (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 500 anni, intesi come involucro dei valori massimi. In Figura 26 è rappresentato graficamente il profilo di corrente del medesimo scenario.

Analogamente alla simulazione precedente non si osserva nessun sormonto spondale, con deflusso dell'onda di piena duecentennale contenuto all'interno dell'alveo inciso. Per tale motivo non vi sono risultati del modello MIKE21.

ID Sezione	Progr. (m)	Fondo (m s.m.)	Q (m³/s)	P.L. (m s.m.)	h (m)	v (m/s)	Fr (-)	H (m s.m.)
SEZ_1	0,00	24,76	14,7	25,9	1,11	4,13	1,45	26,74
SEZ_2	29,35	23,68	14,7	24,8	1,09	3,92	1,38	25,55

ID Sezione	Progr. (m)	Fondo (m s.m.)	Q (m <sup>3</sup> /s)	P.L. (m s.m.)	h (m)	v (m/s)	Fr (-)	H (m s.m.)
SEZ_3	83,27	21,69	14,7	23,1	1,45	4,05	1,27	23,98
SEZ_4	127,83	20,05	14,7	21,8	1,72	4,72	1,48	22,90
SEZ_5	167,47	18,49	14,7	19,8	1,31	3,87	1,38	20,56
SEZ_6	221,89	16,58	14,7	18,2	1,60	1,91	0,57	18,37
SEZ_7	225,78	16,44	14,6	18,1	1,69	2,15	0,57	18,36
TOMB_1A	299,39	13,69						
TOMB_A	373,00	10,94	14,6	13,0	2,10	2,15	0,52	13,27
TOMB_1B	380,00	10,68						
TOMB_B	387,00	10,41	14,6	11,9	1,53	2,87	0,81	12,36
TOMB_1C	393,32	10,18						
SEZ_8	399,32	9,95	14,6	11,0	1,07	3,45	1,47	11,63
SEZ_9	411,37	9,51	14,6	10,6	1,12	3,69	1,44	11,33
SEZ_10	427,48	8,80	14,6	10,1	1,30	3,59	1,28	10,76
SEZ_11	459,32	7,73	14,6	9,2	1,45	2,79	0,94	9,57
SEZ_12	485,78	7,37	14,6	8,8	1,42	2,17	0,73	9,03
SEZ_13	504,41	7,11	14,6	8,7	1,56	1,92	0,61	8,86
SEZ_14	510,35	5,06	14,6	7,0	1,98	1,38	0,37	7,14
SEZ_15	515,35	4,88	14,5	7,0	2,13	1,61	0,37	7,14
TOMB_2	682,68	2,59						
MARE_1	850,50	0,30	14,4	1,7	1,42	2,36	0,63	2,00

Tabella 11 – Risultati di sintesi della simulazione TR500.

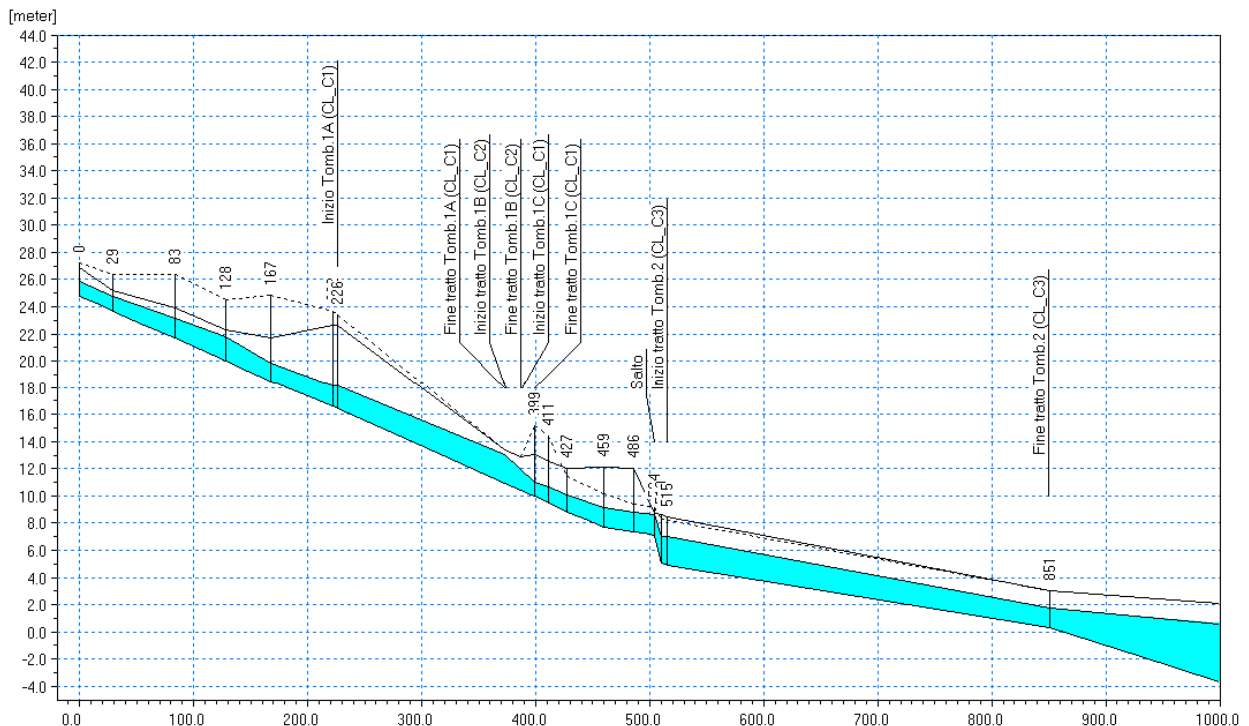


Figura 26 – Profilo longitudinale di corrente del fosso Canalone scenario TR500: moto vario, piena 500 anni.

In Figura 27 sono rappresentati gli idrogrammi di alcune sezioni significative del modello monodimensionale. Si riscontra una sostanziale propagazione verso valle dell'onda di piena, senza significative modificazioni di forma o del valore al colmo.

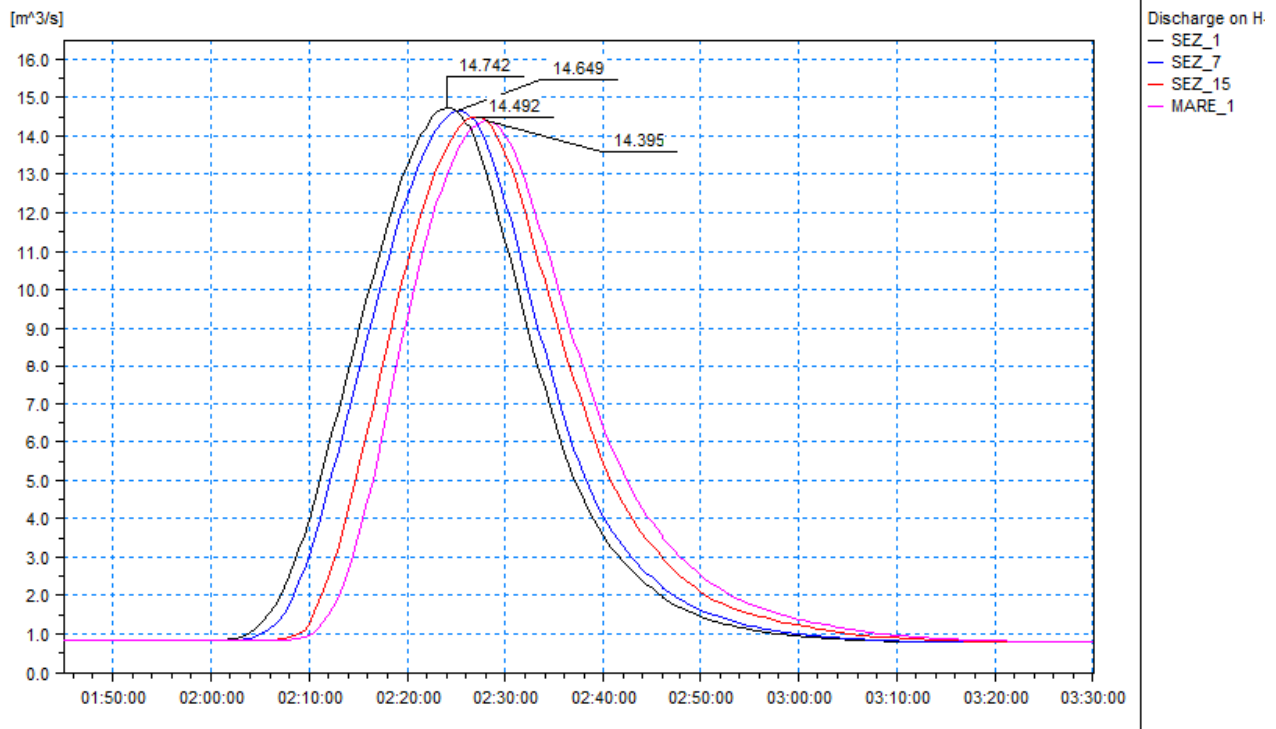


Figura 27 – Idrogrammi estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 500 anni in alcune sezioni trasversali significative del modello monodimensionale

#### 5.2.4 Analisi dei franchi idraulici sui manufatti interferenti

In Tabella 8 sono indicati i franchi idraulici minimi, rispetto alle quote di ritenuta spondale ( $F_{DX}$  per la sponda destra e  $F_{SX}$  per la sponda sinistra), estratti dai risultati dei tre scenari simulati con il modello monodimensionale.

Poiché non si verificano esondazioni, l'analisi dei franchi per il fosso Canalone è estesa anche alle sezioni d'alveo a cielo aperto. Si precisa tuttavia come le quote di sponda dipendano dall'estensione di sezione considerata all'interno del modello MIKE11; nei tratti di sezione "naturale" anche un eventuale sormonto potrebbe tradursi in assenza di allagamenti significativi in caso di piano campagna esterno acclive (versante; prosecuzione dell'effettiva sezione di deflusso).

I valori indicati in tabella sono negativi nel caso in cui il moto sia in pressione (ad esempio nelle tombinature) o si verificano dei sormonti delle sponde con conseguente allagamento delle aree limitrofe, ed identificano la differenza tra le quote di intradosso della copertura e le altezze piezometriche della corrente. Si precisa che nei tratti in cui il fosso risulta coperto il valore del franco è calcolato rispetto all'intradosso della tombinatura, ed è quindi il medesimo per le due sponde.

ID Sezione	ID Strutture	TR50		TR200		TR500	
		F SX [m]	F DX [m]	F SX [m]	F DX [m]	F SX [m]	F DX [m]
SEZ_1		1,53	1,24	1,43	1,14	1,32	1,03
SEZ_2		1,80	0,61	1,71	0,52	1,65	0,46
SEZ_3		3,43	1,02	3,31	0,90	3,23	0,82
SEZ_4		2,93	0,76	2,78	0,61	2,70	0,53
SEZ_5		5,25	2,07	5,14	1,96	5,06	1,88
SEZ_6		5,83	4,81	5,65	4,63	5,52	4,50
SEZ_7	CL_C1	1,07		0,89		0,76	
TOMB_A	CL_C1	0,66		0,47		0,35	
TOMB_B	CL_C2	1,14		1,00		0,92	
SEZ_8	CL_C2	1,53		1,45		1,38	
SEZ_9		3,89	1,99	3,82	1,92	3,77	1,87
SEZ_10		1,51	2,04	1,43	1,96	1,37	1,90
SEZ_11		1,17	3,09	1,08	3,00	1,02	2,94
SEZ_12		0,77	3,37	0,67	3,27	0,62	3,22
SEZ_13		0,63	0,18	0,54	0,09	0,48	0,03
SEZ_14		1,64	1,92	1,42	1,70	1,28	1,55
SEZ_15	CL_C3	0,68		0,46		0,33	
MARE_1	CL_C3	1,22		1,10		1,03	

Tabella 12 – Franco disponibile dalla quota del pelo libero simulato (per gli scenari TR50, TR200 e TR500) alla quota di sommità spondale o intradosso delle tombinature del fosso Canalone.

## 6. ANALISI DEI RISULTATI E PROPOSTA DI MODIFICA DELLE FASCE DI PERICOLOSITÀ

Lo studio idraulico di dettaglio descritto nel presente documento ha consentito di ricostruire con accuratezza l'effettiva estensione degli allagamenti attesi in relazione al deflusso delle piene associate a un tempo di ritorno di 50, 200 e 500 anni dei corsi d'acqua esaminati.

In relazione ai risultati ottenuti è stata effettuata una proposta di nuova perimetrazione delle fasce di pericolosità idraulica definite nel vigente Piano di Bacino (cfr. capitolo 2).

### 6.1 Fosso Pezzogrande

La pianificazione vigente per il fosso Pezzogrande (v. Figura 1) non definisce aree di pericolosità, bensì fornisce delle indicazioni puntuali di criticità relative agli attraversamenti e tombinature presenti, ove essi da una verifica in moto uniforme non mostrino adeguata capacità di smaltimento delle portate al colmo di piena per tempo di ritorno di 50, 200 e 500 anni. Tali indicazioni risultano confermate dai risultati ottenuti dal modello numerico.

Le dinamiche di esondazione negli scenari indagati sono sostanzialmente identiche, con sormonto delle sponde nel tratto subito a monte dell'imbocco della tombinatura (Figura 29), in corrispondenza del salto di fondo, e propagazione della portata fuoriuscita secondo la pendenza del terreno, lungo via Pio Ferro, via Mantova e le aree complanari limitrofe, attestandosi contro il rilevato di viale S. Bartolomeo.

Di conseguenza anche le fasce A, B e C (corrispondenti all'estensione delle aree allagate nei tre scenari simulati) risultano piuttosto sovrapponibili (Figura 28).

La fascia A (condizioni di pericolosità elevata) nella nuova perimetrazione proposta si estende lungo la viabilità, includendo anche gli edifici su essa affacciati, fino a viale S. Bartolomeo. Le fasce B e C (condizioni di pericolosità moderata e bassa) mostrano ampiezze leggermente maggiori, dovute a una maggiore propagazione degli allagamenti in relazione ai maggiori volumi esondati.

Per la fascia C è stata aggiunta un'area di modesta estensione in corrispondenza dell'imbocco della tombinatura dell'affluente in destra del fosso Pezzogrande (PZ\_C2), che per la piena cinquecentennale mostra un locale sormonto delle sponde.

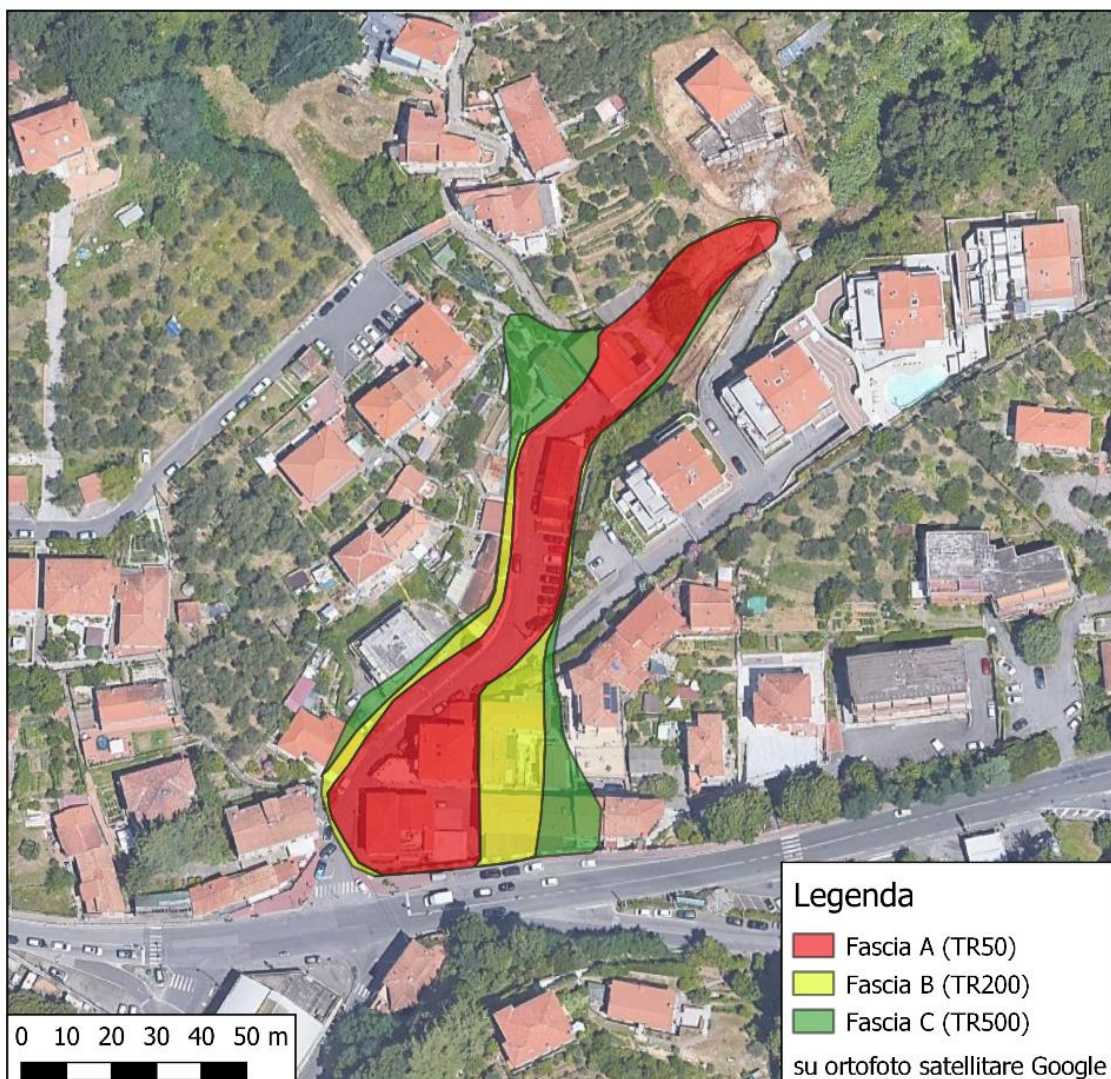


Figura 28 – Estensione delle fasce A, B e C proposte per il fosso Pezzogrande.



Figura 29 – Tratto di fosso Pezzogrande a monte della tombinatura (PZ\_C1), dove si verificano le esondazioni che vanno a interessare le aree a valle.

Tutti gli attraversamenti del tratto di Fosso Pezzogrande studiato presentano dei franchi di sicurezza inferiori a 1,50 m rispetto ai livelli massimi dell'evento di piena duecentennale (cfr. capitolo 5.1.4), risultando quindi non verificati ai sensi delle NTC2018.

La tombinatura principale mostra condizioni di deflusso in pressione dovute soprattutto al contributo di portata del Muggiano, che quasi raddoppia il valore al colmo del bacino proprio di monte. Tuttavia i massimi carichi idraulici per un tempo di ritorno duecentennale si attestano su quote sostanzialmente pari a quella della banchina al di sopra della copertura, nell'area dei cantieri navali, per cui non sono attesi in questo tratto fenomeni di esondazione (a meno di ostruzioni del tratto trasversale di sbocco ad opera di depositi di sedimento, che possono ostacolare lo smaltimento a mare delle portate in arrivo.

Sono state infine determinate le *aree individuate a minor pericolosità* degli ambiti normativi di fascia B, facendo riferimento a quanto previsto dalla DGR 91/2013, evoluzione della precedente DGR 250/2005 con la quale erano *“stati approvati dalla giunta regionale, nella sua qualità di organo dell'autorità di bacino regionale, i criteri per la definizione dei cosiddetti “ambiti normativi delle fasce di inondabilità in funzione di tiranti idrici e velocità di scorrimento”, finalizzati in particolare ad individuare, nell'ambito delle fasce di inondabilità ad assegnati tempi di ritorno (fasce a e b) aree a “minor pericolosità relativa” tali da consentire diverse possibilità edificatorie”*.

L'aggiornamento normativo effettuato con la DGR 91/2013 riporta che: *“A seguito degli eventi alluvionali dell'autunno 2010 e 2011, per alcuni aspetti più intensi e frequenti degli eventi precedentemente occorsi, si è resa opportuna una valutazione dell'adeguatezza e dell'attualità dei criteri ex DGR 250/2005, con analisi di eventuali modifiche od integrazioni da apportare agli stessi. In particolare, è stato ritenuto necessario che per*



la fascia A, corrispondente alle aree a più alta pericolosità idraulica in quanto inondabili a TR=50 anni, debba essere sempre applicata la normativa ordinaria di fascia A, di cui al testo integrato dei criteri ex DGR 265/2011. È stata pertanto prevista l'eliminazione della possibilità di individuazione di aree a minor pericolosità nella fascia A, tali da consentire una riclassificazione della stessa a fascia B, come previsto dalla DGR 250/2005.

Si è ritenuto inoltre necessario aggiornare il criterio tecnico di "minor pericolosità" da applicarsi in fascia B, sulla base dei criteri vigenti dal 2001, nell'obiettivo di privilegiare gli studi di dettaglio a scala di bacino o riguardanti tratti significativi di corso d'acqua, in quanto maggiormente affidabili rispetto a studi locali finalizzati alle singole edificazioni. Il presente documento rappresenta l'aggiornamento dei criteri ex DGR 250/2005, che si intendono pertanto superati".

In continuità con quanto previsto nei criteri ex DGR 250/2005, le aree B0 (a minor pericolosità relativa) e BB sono individuate con il criterio di cui alla Figura 30.

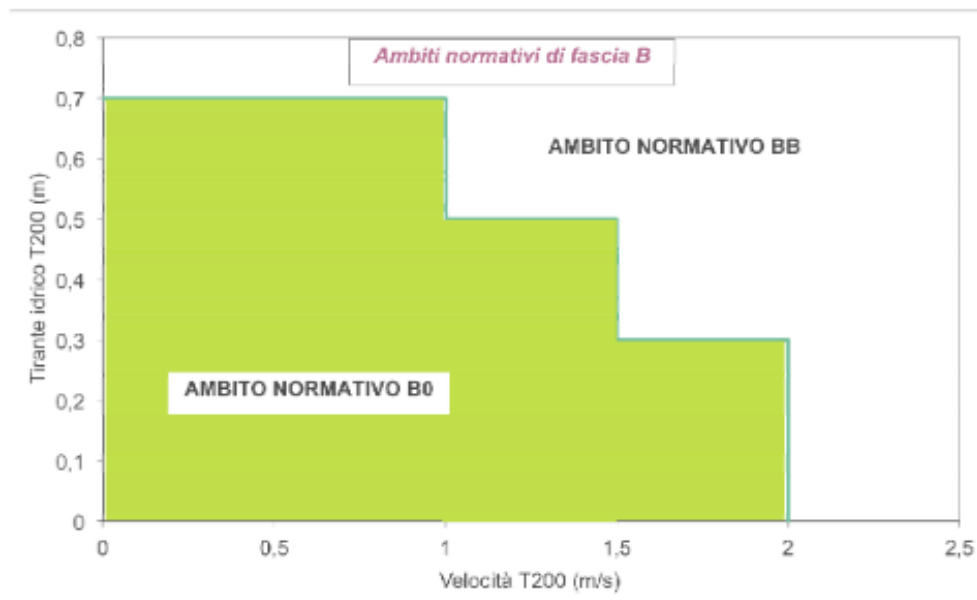


Figura 30 – Definizione delle fasce fluviali BB e B0 ai sensi della DGR 91/2013.

Gli ambiti "B0" e "BB" per il tratto di studio del fosso Pezzogrande sono rappresentati in Figura 31; le aree perimetrate in fascia B risultano prevalentemente associabili a un ambito B0.



Figura 31 – Definizione delle aree B0 e BB all'interno della fascia B per il fosso Pezzogrande.

## 6.2 Fosso Canalone

Per quanto riguarda il fosso Canalone, confrontando i risultati ottenuti con le aree di pericolosità definite dalla normativa vigente (v. Figura 1), si riscontra nel complesso una minore estensione delle aree esondabili rispetto alle fasce tracciate nel Piano di Bacino.

Nell'area depressa a monte della prima tombinatura (CL\_C1) non si osserva nei risultati delle simulazioni eseguite nessuna esondazione, essendo il deflusso contenuto nella parte incisa dell'alveo per tutti gli scenari.

Nel tratto di alveo a cielo aperto a valle della tombinatura al di sotto dell'area della Marina Militare, nonostante il deflusso continui permanga confinato all'interno dell'alveo inciso è stata proposta una perimetrazione di pericolosità che include le aree limitrofe sia in sponda destra sia in sinistra per considerare la presenza di finestre, porte e muretti facilmente tracimabili.

Nello specifico, in sponda sinistra sono presenti due edifici residenziali le cui pareti costituiscono sostanzialmente la sponda del corso d'acqua, e affacciano verso l'alveo delle aperture (finestre e porte) con soglia poco sopraelevata dal fondo della sezione di deflusso (Figura 32).

In destra invece, poco a monte del salto di fondo antecedente il tratto tombato CL\_C3, il muro di sponda nella parte sommitale, realizzato in blocchetti di calcestruzzo prefabbricati e con segni di deterioramento lato valle (Figura 33), non appare avere le caratteristiche idonee a fungere da elemento "arginale" in grado di garantire la ritenuta dei livelli di piena.



**Figura 32 – Fabbricati a uso residenziale con affacci diretti sull'alveo, allagabili in condizioni di piena.**



**Figura 33 – Muro di sponda destra in blocchetti di calcestruzzo prefabbricati.**

In quest'area (tra questo tratto di muro e viale S. Bartolomeo più a valle) si è pertanto deciso di non deperimetrare le aree attualmente individuate in fascia B, nonostante da modello si riscontri l'assenza di sormonto da parte dei livelli di piena.

I fabbricati in sponda sinistra a ridosso dell'alveo sono invece stati inclusi entro una fascia A, in quanto evidentemente allagabili anche per eventi di piena di gravosità inferiore a TR = 50 anni, vista la presenza di aperture a poca distanza dal fondo alveo.

La fascia C è definita in sovrapposizione alle fasce di maggiore gravosità.

In Figura 28 si riporta la rappresentazione su foto aerea dell'estensione delle fasce di pericolosità proposte.

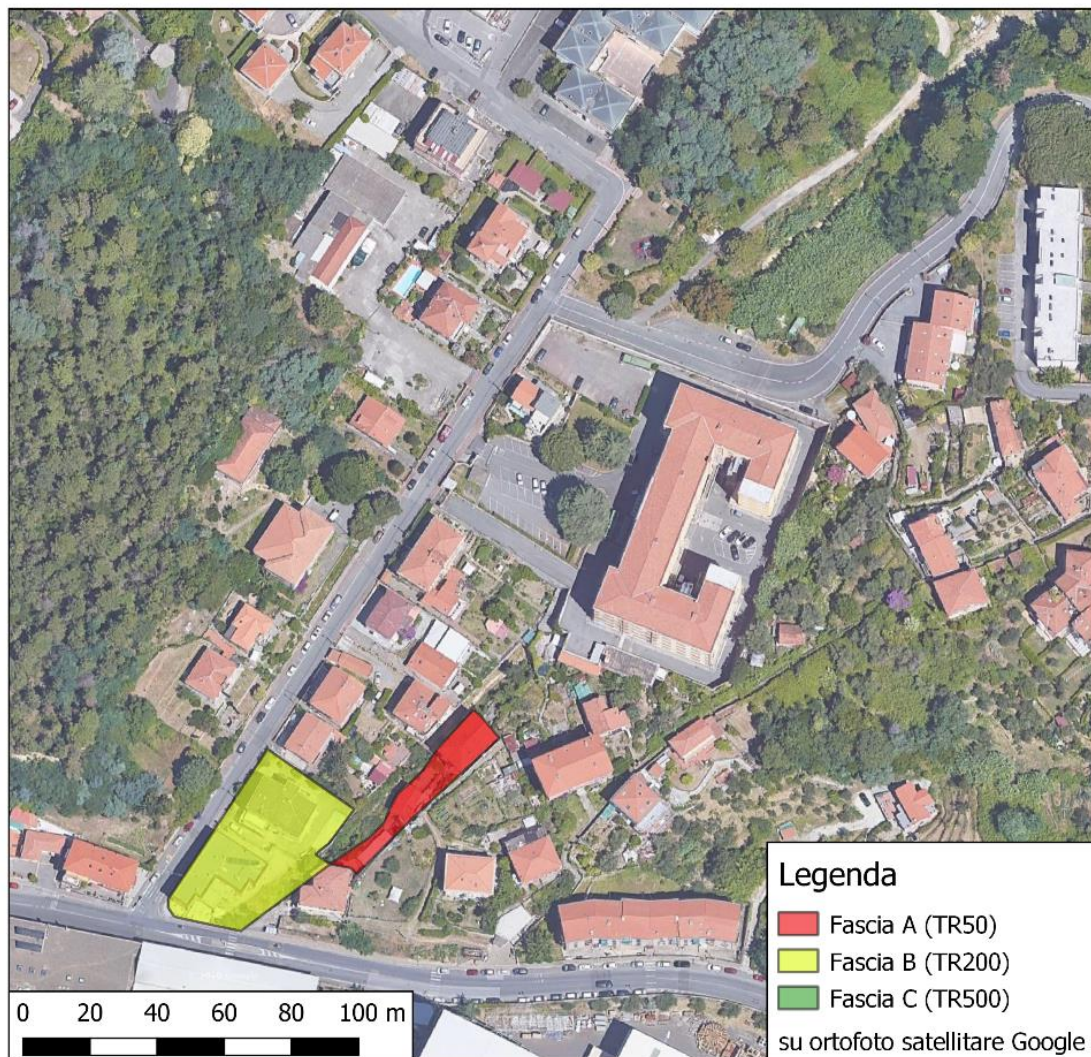


Figura 34 – Estensione delle fasce A, B e C proposte per il fosso Canalone.

La tombinatura al di sotto dell'area della Marina Militare presenta un franco minimo inferiore a 50 cm in corrispondenza della piena duecentennale (v. capitolo 5.1.4), risultando non adeguata ai sensi delle NTC2018 (riempimento superiore ai 2/3 della sezione) e delle NTA del vigente Piano di Bacino.

Tuttavia l'opera è in grado di smaltire la portata di progetto con ragionevole margine rispetto a condizioni di funzionamento in pressione, per cui non si è individuata una criticità specifica in questo tratto.

Il tratto terminale in area portuale mostra invece adeguati franchi idraulici (circa 1,0 m e circa il 50% di riempimento).



**ALLEGATO 1 – Descrizione del codice di calcolo MIKE11 - HD**





## PREMESSA

Il programma MIKE 11 è stato realizzato dal DHI (Danish Hydraulic Institute) a partire dal programma SYSTEM 11 che dal 1972, anno della sua messa a punto, ad oggi, è stato usato in un grande numero di applicazioni in tutto il mondo con ottimi risultati e riconoscimenti.

MIKE 11 è un programma generale per la simulazione del flusso idrico a pelo libero in estuari, fiumi, sistemi di irrigazione e simili corpi idrici. MIKE 11 simula il flusso monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. E' possibile tenere conto di:

- portate laterali;
- condizioni di corrente veloce o lenta;
- flusso libero o rigurgitato in corrispondenza di sfioratori;
- differenti regole operative di funzionamento di serbatoi o invasi;
- resistenze localizzate e perdite di carico concentrate;
- casse d'espansione;
- condizioni di flusso bidimensionale sulle pianure alluvionali;
- azione del vento;
- nodi idraulici (biforcazioni e convergenti).

L'adozione del programma di simulazione DHI\MIKE 11, consente la soluzione del problema idrodinamico di moto vario con uno schema di soluzione numerica molto efficiente che limita i tempi di calcolo consentendo una adeguata rappresentazione dell'evolversi temporale dei transitori idraulici legati al passaggio dell'onda di piena.

## 2. DESCRIZIONE DELLE CONDIZIONI DI MOTO SIMULATE

Il modello consente di attivare tre diverse descrizioni del moto, mediante tre differenti formulazioni matematiche:

Approccio dell'"onda cinematica". Le condizioni di moto sono calcolate imponendo il bilancio tra le forze di gravità e di attrito. Questa semplificazione non permette di simulare gli effetti di rigurgito.

Approccio dell'"onda diffusiva". Oltre alle forze di gravità ed attrito viene tenuto conto del gradiente idrostatico in modo tale da poter valutare anche gli effetti a monte delle condizioni al contorno di valle, cioè simulare i fenomeni di rigurgito.

Approccio dell'"onda dinamica". Utilizzando le equazioni complete del moto, comprese le forze di accelerazione, è possibile simulare con questa formulazione transitori veloci, flussi di marea ecc.

In funzione del tipo di problema da risolvere è possibile scegliere la descrizione del moto più appropriata. Ognuna delle tre formulazioni consente di simulare sia sistemi idrici ramificati sia reti idrauliche con maglie chiuse.

## 3. EQUAZIONI GENERALI DI DE SAINT VENANT

MIKE 11 mediante il terzo tipo di formulazione risolve le equazioni di conservazione del volume e della quantità di moto (equazioni di De Saint Venant) che sono derivate sulla base delle seguenti assunzioni:

- a) Il fluido (acqua) è incomprimibile ed omogeneo, cioè senza significativa variazione di densità.
- b) La pendenza del fondo è piccola.

c) Le lunghezze d'onda sono grandi se paragonate all'altezza d'acqua, in modo da poter considerare in ogni punto parallela al fondo la direzione della corrente: è cioè trascurabile la componente verticale dell'accelerazione e su ogni sezione trasversale alla corrente si può assumere una variazione idrostatica della pressione.

Integrando le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto si ottiene:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

ed introducendo la resistenza idraulica (attrito) e le portate laterali addotte:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0$$

dove:

A = area della sezione bagnata (m<sup>2</sup>);

C = coefficiente di attrito di Chezy (m<sup>1/2</sup>s<sup>-1</sup>);

g = accelerazione di gravità (m s<sup>-2</sup>);

h = altezza del pelo libero rispetto ad un livello di riferimento orizzontale (m);

Q = portata (m<sup>3</sup>/s);

R = raggio idraulico (m);

α = coefficiente di distribuzione della quantità di moto;

q = portata laterale addotta (m<sup>2</sup>/s).

#### 4. SIMULAZIONE DELLE CORRENTI VELOCI CON L'APPROCCIO DELL'ONDA DINAMICA

Per le correnti veloci viene applicata una equazione "ridotta" del moto, ottenuta trascurando il termine non lineare:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0$$

La descrizione del moto è tanto più accurata quanto meno rapidamente variabile è la velocità della corrente.

Il vantaggio di questa schematizzazione è rappresentato dal fatto che è possibile ottenere una soluzione stabile con la stessa metodologia usata per le correnti lente. Nella transizione tra corrente lenta e veloce viene applicata una riduzione graduale del termine non lineare.

## 5. APPROSSIMAZIONE DELL'ONDA DIFFUSIVA

L'approssimazione dell'"onda diffusiva" consiste nel trascurare tutti i termini legati alla quantità di moto nelle equazioni generali di De Saint Venant:

$$gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0$$

Questa formulazione assicura ancora la descrizione dell'effetto di rigurgito attraverso il termine  $\partial h / \partial x$ . Per ragioni di stabilità questo termine nella soluzione viene smorzato; ciò significa che vengono risolti soltanto fenomeni di rigurgito relativamente stazionari (confrontati con lo step di tempo utilizzato).

## 6. DESCRIZIONE IN CORRISPONDENZA DI STRUTTURE

Dal punto di vista matematico la descrizione della corrente attraverso stramazzi o soglie e sezioni trasversali strette è abbastanza simile. In MIKE 11 la descrizione di ogni struttura viene effettuata in un segmento di corso d'acqua.

### Tipi di strutture simulate

#### Tipo 1. Stramazzo a larga soglia

Il programma automaticamente determina le caratteristiche di funzionamento standard dello stramazzo sulla base della geometria e dei coefficienti di perdita di carico specificati dall'utente. Viene assunta una distribuzione idrostatica delle pressioni sulla soglia e vengono utilizzati diversi algoritmi per la simulazione del deflusso libero e di quello rigurgitato.

#### Tipo 2. Relazione Q-h

Nel caso in cui le condizioni standard di funzionamento (tipo 1) dello stramazzo non risultino adeguate (ad esempio quando è evidente una significativa curvatura delle linee di corrente) è possibile specificare le relazioni Q-h (portate-livelli) valide per la data struttura. La relazione Q-h viene utilizzata per il deflusso libero in condizioni critiche, mentre per il deflusso rigurgitato (o sommerso) vengono utilizzati gli stessi algoritmi della struttura "tipo 1".

#### Tipo 3. Tombino

Un tombino può essere descritto mediante diversi algoritmi validi per condizioni di deflusso critico, rigurgitato o a "tubo pieno". il funzionamento a "tubo pieno" è a sua volta suddiviso in deflusso libero a valle, flusso rigurgitato e flusso sommerso. Deve essere inserita una relazione Q-h che contempli tutti i casi di deflusso critico allo sbocco del tombino. La portata critica è determinata da una formulazione di stramazzo a larga soglia quando l'imbocco è libero e da una formulazione di luce sotto battente quando l'imbocco è sommerso.

#### Tipo 4. Relazione Q-t

E' possibile inserire una qualsiasi relazione Q-t esterna per descrivere ad esempio il deflusso da una diga o un pompaggio. Questa relazione sostituisce localmente l'equazione di conservazione della quantità di moto.

### Tipo 5. Relazione $Q = A(Z_{j1}) \cdot Z_{j2}$

Il deflusso nell'ambito di una struttura può essere posto in relazione, in modo dinamico, a due qualsiasi variabili indipendenti del sistema consentendo di simulare regole operative particolari. Il deflusso da un invaso può per esempio essere correlato alla portata in ingresso e al livello nell'invaso (o al livello a valle di esso).

### Tipo 6. Strutture mobili

E' possibile simulare la presenza di strutture mobili con condizioni di deflusso di tipo sfioro o luce sotto battente. Viene assegnata la geometria fissa della struttura (larghezza, quota del fondo per sistemi a sfioro tipo ventola, quota del livello massimo della paratoia per sistemi con luce sotto battente) ed una regola operativa che determina la quota della parte mobile della struttura in funzione di una delle seguenti condizioni idrodinamiche calcolate dal modello: un livello, una differenza di livelli, una portata, una differenza di portate, il tempo. Il modulo simula dinamicamente la variazione della geometria della struttura ed il flusso che ne consegue.

## **7. RESISTENZA D'ATTRITO**

MIKE 11 consente di utilizzare due diverse formulazioni della resistenza d'attrito: l'espressione di Chezy e quella di Strickler.

Secondo la formula di Chezy, nell'equazione del moto il termine di resistenza risulta pari a:

$$\tau_r = \frac{gQ|Q|}{C^2 AR}$$

dove C è il coefficiente di attrito di Chezy.

Secondo la formula di Strickler, lo stesso termine diventa:

$$\tau_r = \frac{gQ|Q|}{M^2 AR^{4/3}}$$

dove M è il coefficiente di Strickler, pari a  $1/n$ , essendo n il coefficiente di Manning.

## **8. CONDIZIONI INIZIALI**

Le condizioni iniziali possono essere specificate dall'utente oppure essere calcolate automaticamente. Nel secondo caso viene usata la formula di Chezy per determinare i livelli idrici e le portate da considerare all'inizio della simulazione su tutta la rete o schema idraulico. In alternativa a queste due opzioni è possibile anche assumere come condizioni iniziali i risultati di una precedente simulazione effettuata sullo stesso schema idraulico.

## **9. METODO DI SOLUZIONE**

La soluzione del sistema di equazioni è indipendente dall'approccio modellistico seguito (cinematico, diffusivo, dinamico). Le equazioni generali di De Saint Venant sono trasformate in un sistema di equazioni implicite alle differenze finite secondo una griglia di calcolo con punti Q e h alternati tra loro, nei quali la portata Q e il livello idrico h, rispettivamente, sono determinati ad ogni passo temporale (schema di Abbott a 6 punti).

La griglia di calcolo viene generata dal modello in base alle richieste dell'utente:

- i punti Q sono posizionati sempre a metà tra due punti h vicini;
- la distanza tra due punti h può essere variabile;
- ad ogni sezione trasversale d'alveo viene assegnato un punto h;
- ad ogni struttura viene assegnato un punto Q.

## 10. CONDIZIONI AL CONTORNO

In MIKE 11 le condizioni al contorno sono distinte in esterne ed interne. Le condizioni al contorno interne sono: legami tra punti nodali, strutture, portate interne, attrito indotto dal vento. Le condizioni al contorno esterne sono: valori costanti di h e Q, valori di h e Q variabili nel tempo, relazioni tra h e Q (ad es. scala di deflusso per una sezione d'alveo).

## 11. DEFINIZIONE DEI PASSI DI CALCOLO

La scelta ottimale dei passi di calcolo Dx (spazio) e Dt (tempo) da utilizzare nell'ambito di una simulazione è molto importante perché questi parametri possono condizionare pesantemente la stabilità del calcolo numerico e quindi i risultati stessi della simulazione.

Esistono due differenti criteri per determinare correttamente i passi di calcolo Dx e Dt. Essi sono descritti nel seguito.

### 1) Criterio di Courant

$$Cr = \frac{\sqrt{g \cdot d + V}}{Dx} \cdot Dt$$

dove:

- Cr = numero di Courant;
- d = altezza d'acqua media;
- V = velocità media della corrente;
- g = accelerazione di gravità;
- Dt, Dx = passi di calcolo.

Il numero di Courant esprime quanti Dx vengono percorsi da un'onda, causata da una piccola perturbazione, che si muove in un intervallo di tempo Dt unitario.

Per correnti lente ( $Fr < 1$ ), il valore massimo del numero di Courant deve essere inferiore a 20.

### 2) Criterio della velocità.

Il criterio della velocità stabilisce che i passi Dx e Dt di calcolo siano definiti in modo tale che la corrente si muova di uno spazio Dx in un tempo maggiore di Dt, e cioè:

$$V *Dt < Dx$$

dove V è velocità media della corrente.

In definitiva entrambi i criteri esprimono il concetto che, per un dato passo di tempo Dt, Dx deve essere maggiore di un valore definito; contemporaneamente sia Dt che Dx devono essere inferiori a valori prestabiliti, in modo da descrivere correttamente il fenomeno in esame.

Il modello DHI/MIKE 11 genera automaticamente una griglia di calcolo sulla quale i nodi che rappresentano le altezze d'acqua sono localizzati in corrispondenza delle sezioni trasversali di rilievo. Nel caso in cui la distanza tra due sezioni sia maggiore di Dx, vengono inseriti ulteriori nodi intermedi di calcolo, distanti fra loro Dx o meno.

In osservanza ai sovraccitati criteri è possibile definire unicamente intervalli di valori per Dx e Dt e non valori univoci per ogni simulazione.

**ALLEGATO 2 – Descrizione del codice di calcolo MIKE21 - HD**





Il codice di calcolo MIKE 21 è un programma modulare contenente diversi codici per la simulazione di corpi idrici per i quali sia possibile approssimare il comportamento con l'approssimazione idrodinamica bidimensionale, piana, per fluidi verticalmente omogenei: il numero "21" che contraddistingue il codice sta proprio ad indicare la bidimensionalità nel piano ("2") e la monodimensionalità lungo la verticale ("1").

Il modulo idrodinamico risolve le equazioni complete del moto di de St.Venant in un caso bidimensionale piano (la terza dimensione - asse z - è implicitamente integrata nelle equazioni considerando un mezzo verticalmente omogeneo), non stazionario. Il sistema di de St.Venant è costituito dalle seguenti equazioni.

Equazione di conservazione della massa:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo x:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2h^2} \\ & - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) \right] - \Omega q - fV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} p_a \\ & + \frac{1}{\rho_w} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) = 0 \end{aligned}$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2h^2} \\ & - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega p - fV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} p_a \\ & + \frac{1}{\rho_w} \left( \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \right) = 0 \end{aligned}$$

nelle quali:

- $h(x,y,t)$  = profondità dell'acqua;
- $\zeta(x,y,t)$  = quota del pelo libero;
- $p,q(x,y,t)$  = portate unitarie nelle direzioni x e y;
- $C(x,y)$  = coefficiente di scabrezza di Chezy;
- $g$  = accelerazione di gravità;
- $f(V)$  = fattore d'attrito del vento;
- $V,V_x,V_y(x,y,t)$  = velocità del vento e componenti lungo le direzioni x e y;
- $\Omega(x,y)$  = parametro di Coriolis;
- $p_a(x,y,t)$  = pressione atmosferica;

$\rho_w$	= densità dell'acqua;
$x, y$	= coordinate spaziali;
$t$	= tempo;
$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$	= componenti dello sforzo di taglio che tengono conto della turbolenza e del profilo verticale delle velocità;
$S_{xx}, S_{xy}, S_{yy}$	= componenti del radiation stress (nel caso la forzante idrodinamica derivi dall'interazione tra il moto ondoso ed il fondo).

Il termine di turbolenza è rappresentato dagli sforzi di taglio  $\tau$  che compaiono nelle equazioni di conservazione della quantità di moto lungo le direzioni  $x$  e  $y$ . La formulazione utilizzata prende in considerazione il parametro  $E$  "eddy viscosity" che è implementato secondo due modalità:

1. dipendente dal flusso locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( E \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( E \frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (\text{nella direzione } x);$$

2. oppure dipendente dalla velocità locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( hE \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( hE \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (\text{nella direzione } x);$$

tali due equazioni rappresentano il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto. Il coefficiente  $E$  può essere specificato come costante su tutta la griglia, variabile da punto a punto, o come funzione del campo di velocità locale secondo la formulazione di Smagorinski:

$$E = c_s^2 \Delta^2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]$$

nella quale  $u$  e  $v$  sono le componenti della velocità locale,  $\Delta$  è la dimensione spaziale della griglia e  $c_s$  è una costante compresa tra 0,25 e 1.

In questo caso il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto (asse  $x$ ) è dato da:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( hE \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{2} hE \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)$$

La portata entrante nell'area di calcolo viene assegnata come portata unitaria ( $m^3/s/m$ ) lungo la frontiera libera dalla quale entra il flusso: viene assegnata al modello la portata complessiva ( $m^3/s$ ) che viene poi ripartita automaticamente sui punti di calcolo della griglia.

La condizioni iniziale è rappresentata da una situazione di "quiete", nel senso che tutte le componenti delle forzanti sono nulle (portate, velocità, livelli) e variano poi linearmente nel tempo fino a raggiungere il valore

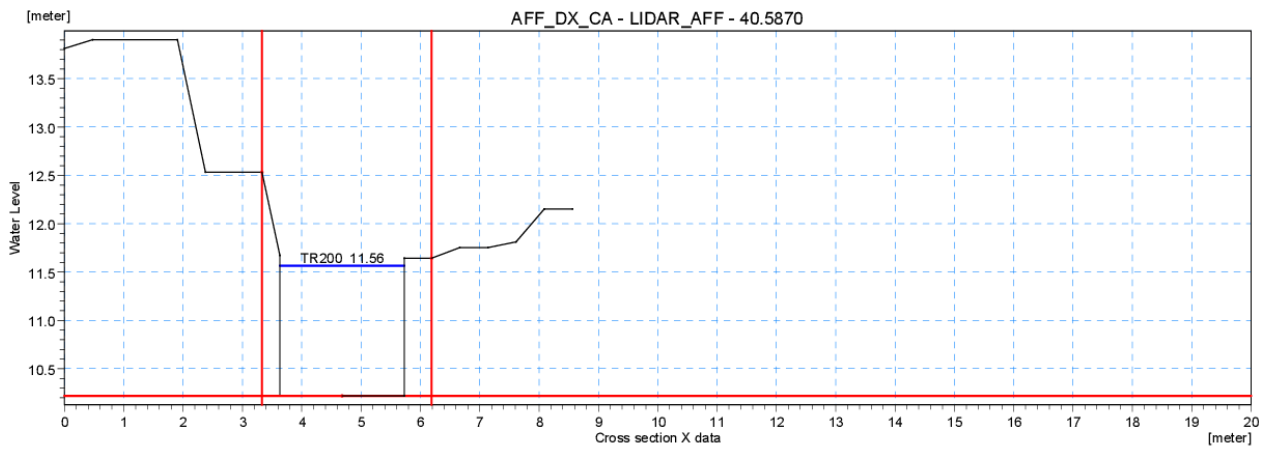
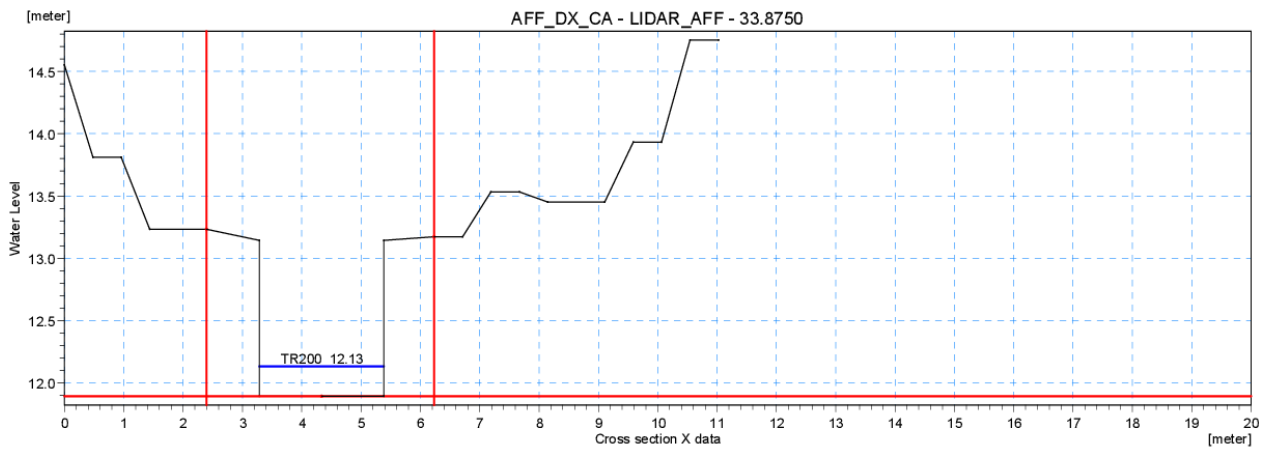
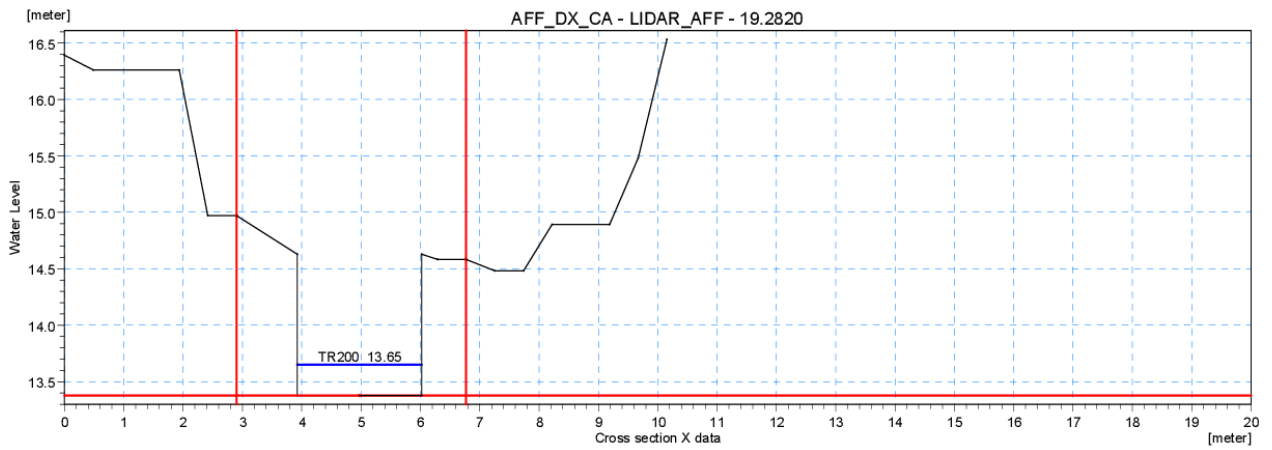
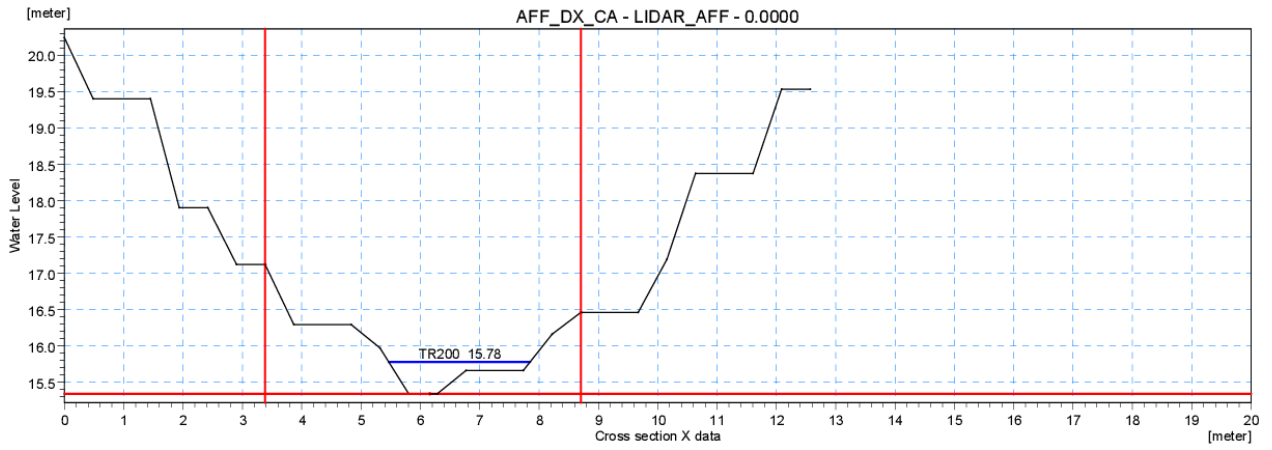
assegnato in un tempo prefissato. Questa tecnica, detta del "soft start" consente di eliminare eventuali brusche oscillazioni iniziali della soluzione che potrebbero presentarsi per problemi di stabilità numerica. Al termine del "soft start" si verifica che la situazione ottenuta sia di effettiva stazionarietà.

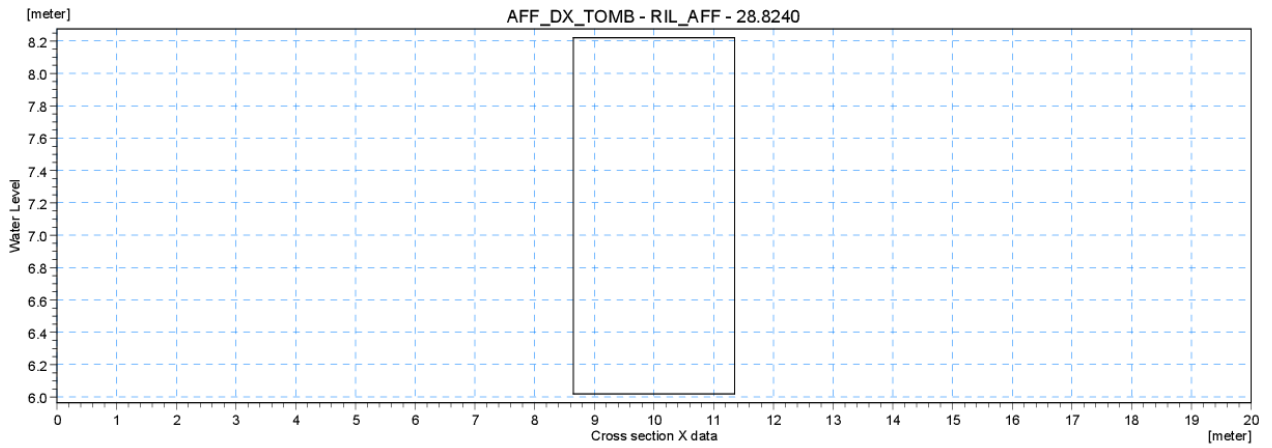
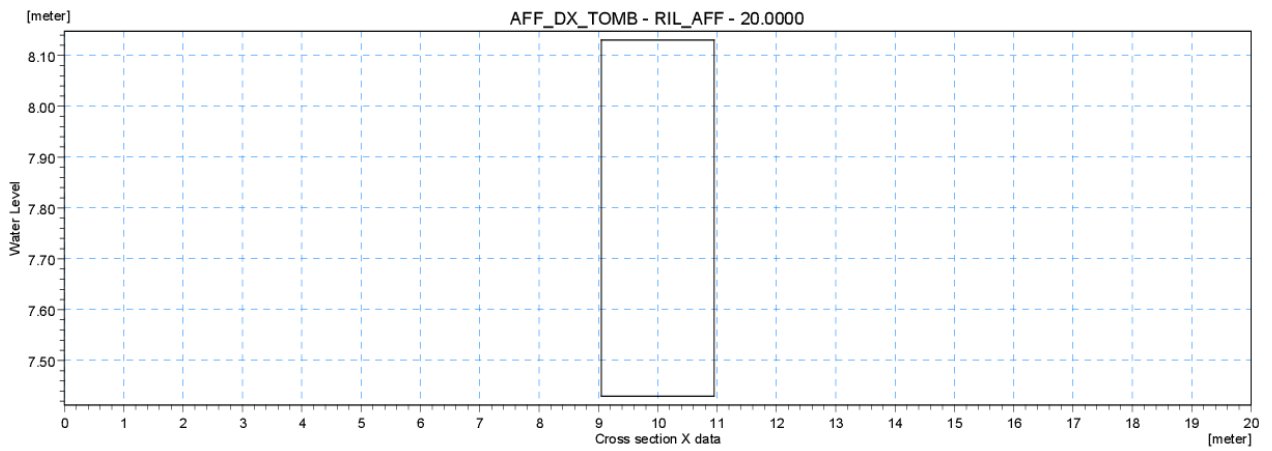
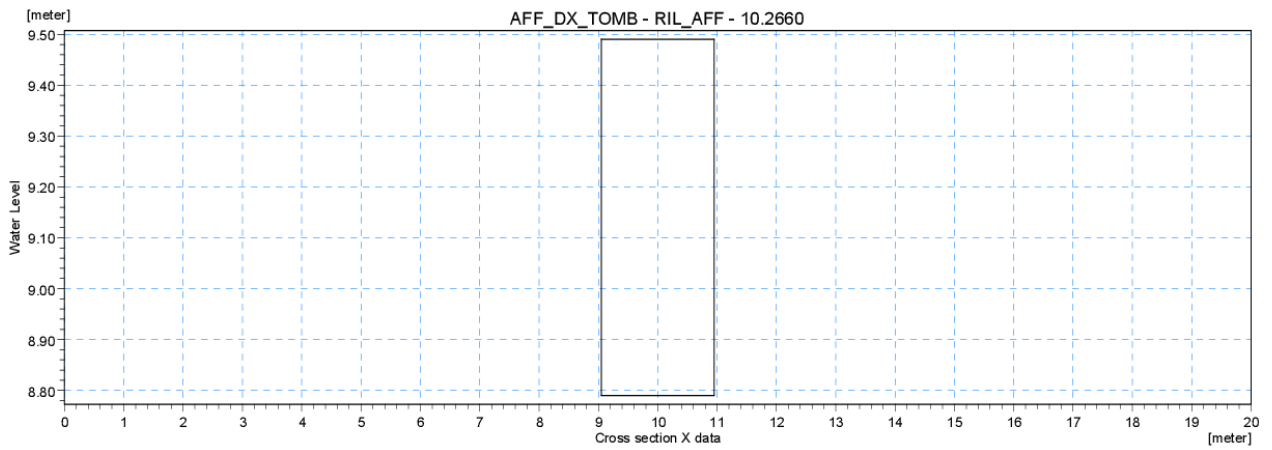
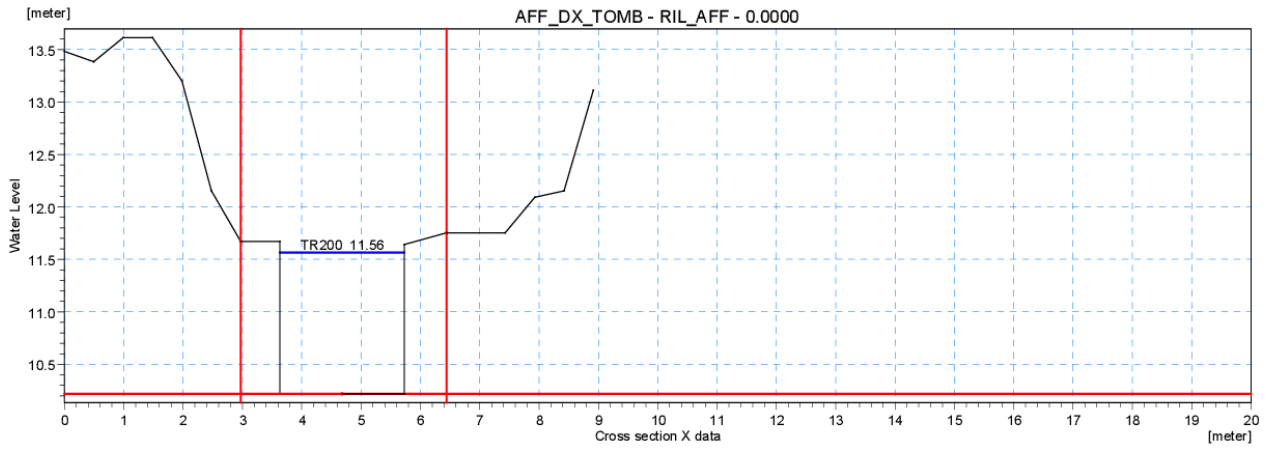
Le equazioni del modello sono risolte alle differenze finite utilizzando il metodo ADI (Alternating Direction Implicit). Il sistema di equazioni linearizzate che scaturisce dall'algorithm è risolto con il metodo DS (Double Sweep, Abbott, 1979).



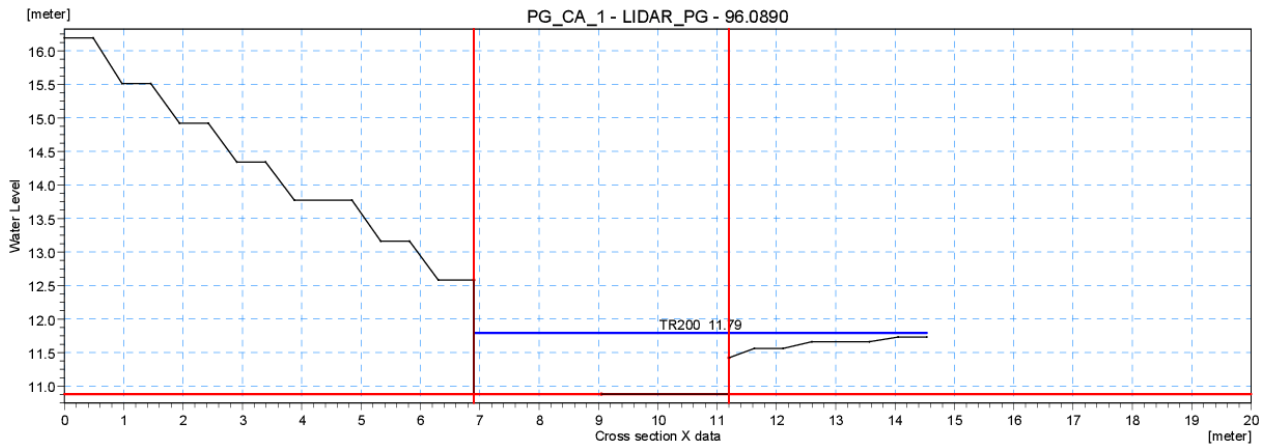
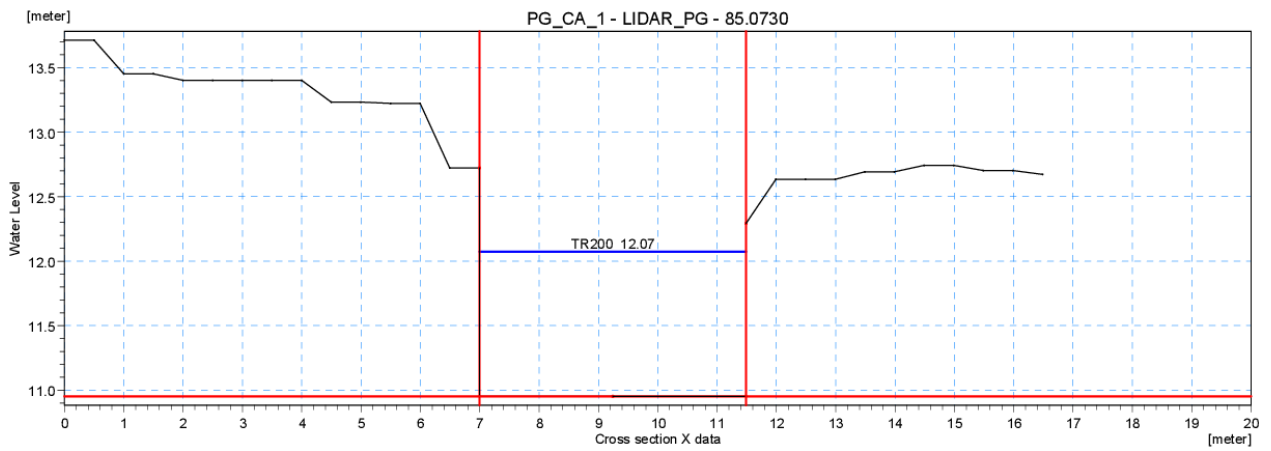
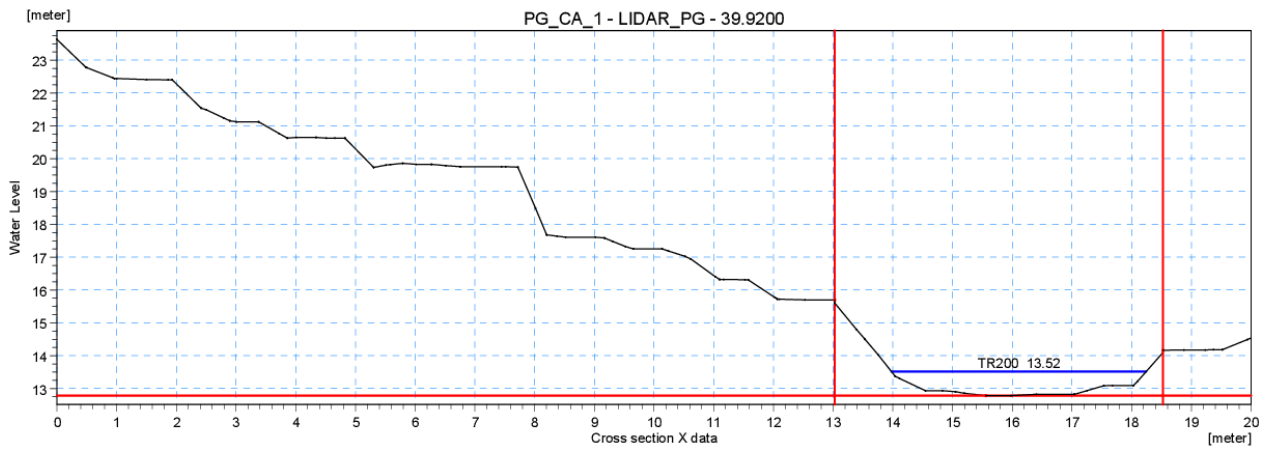
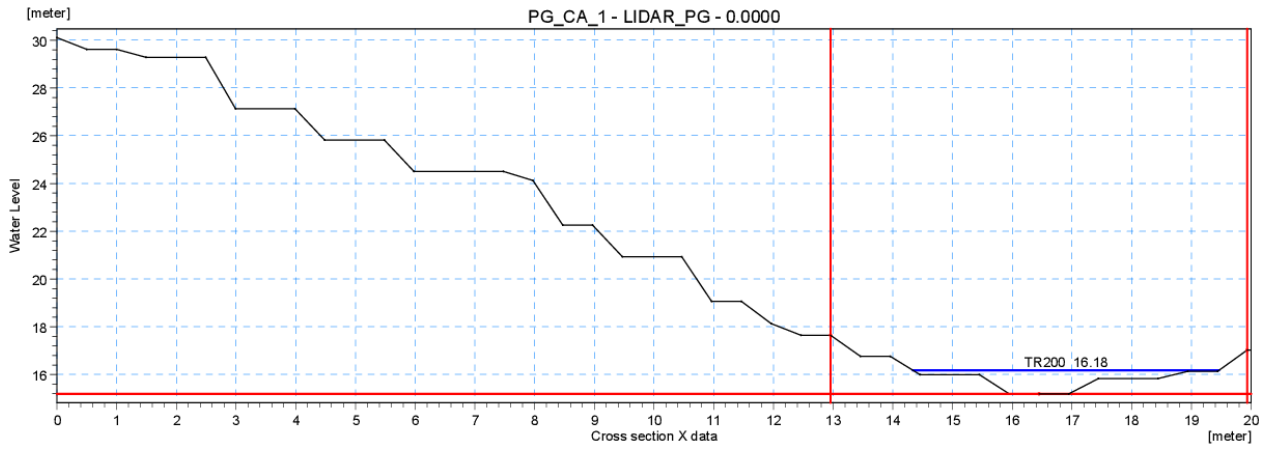
**ALLEGATO 3 – Sezioni trasversali inserite nel modello idraulico, con indicato il livello massimo di piena duecentennale - Fosso Pezzogrande**

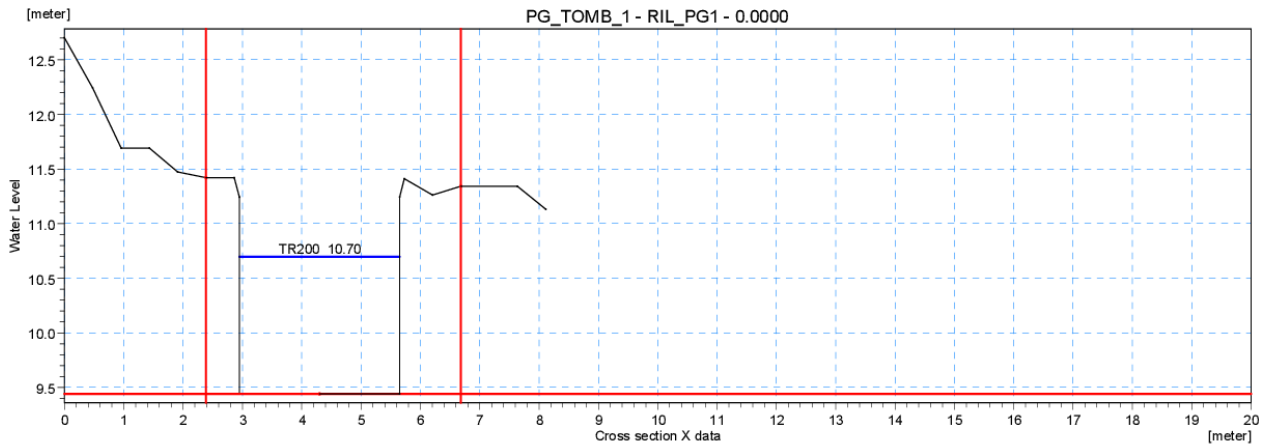
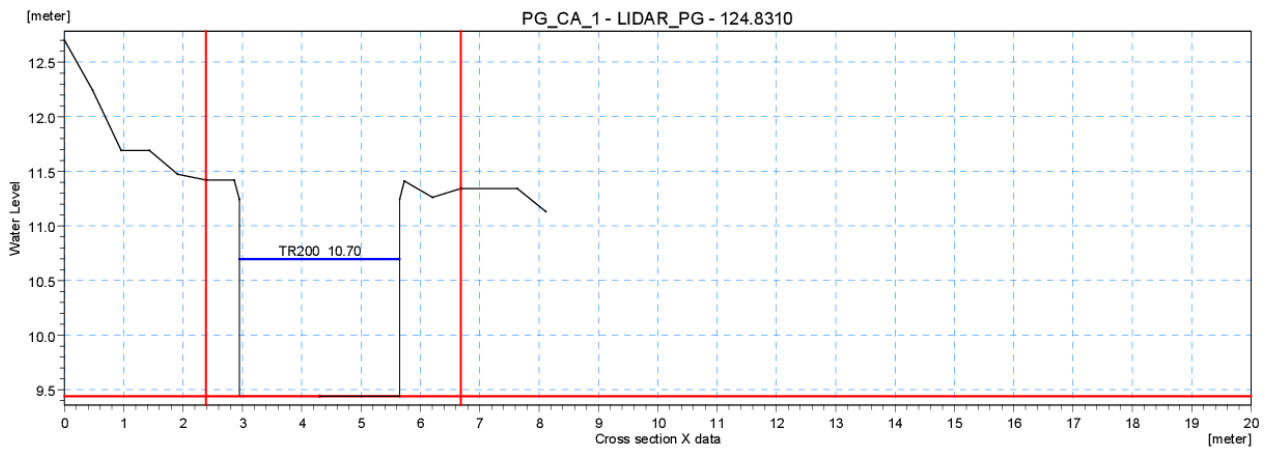
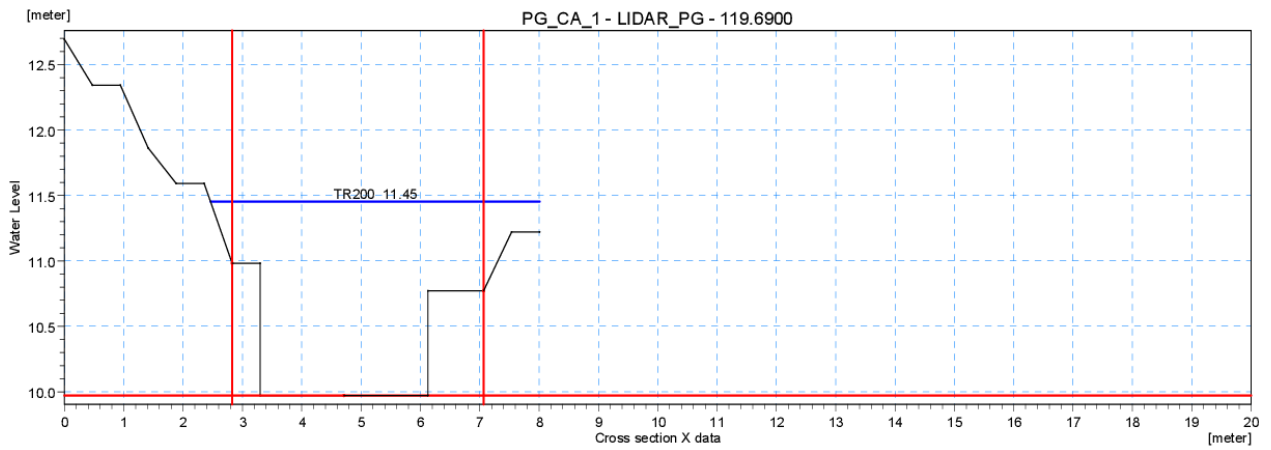
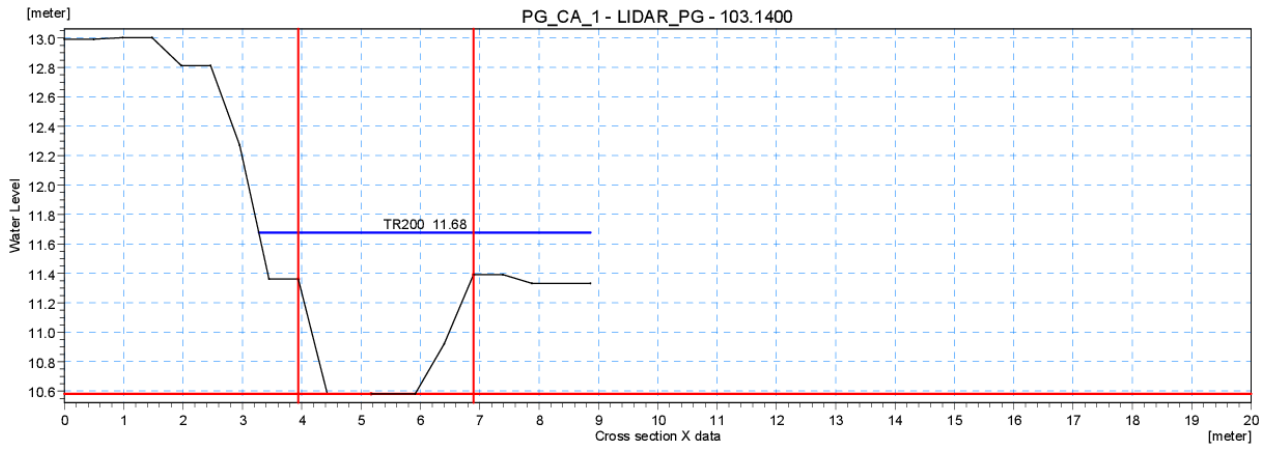


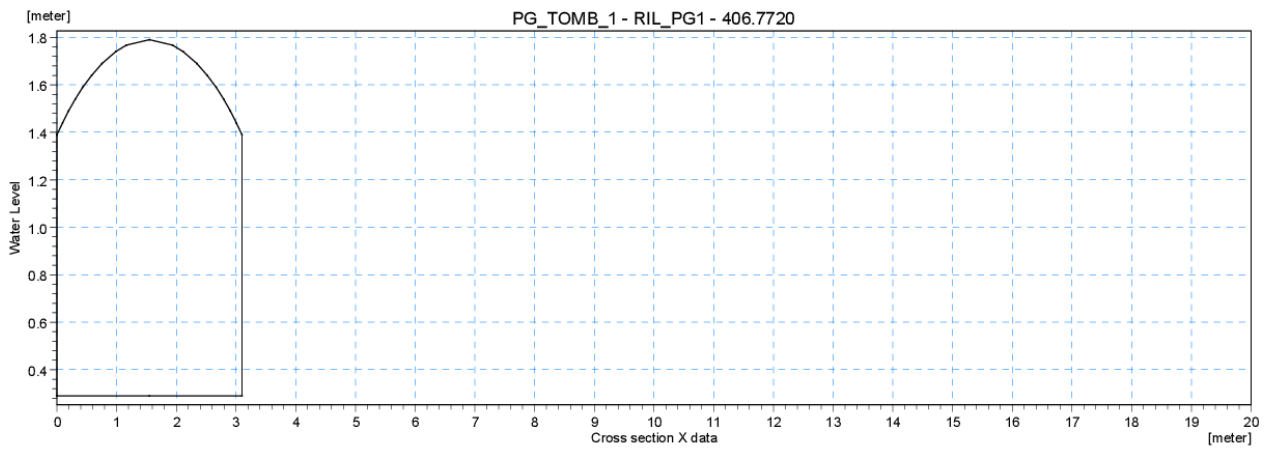
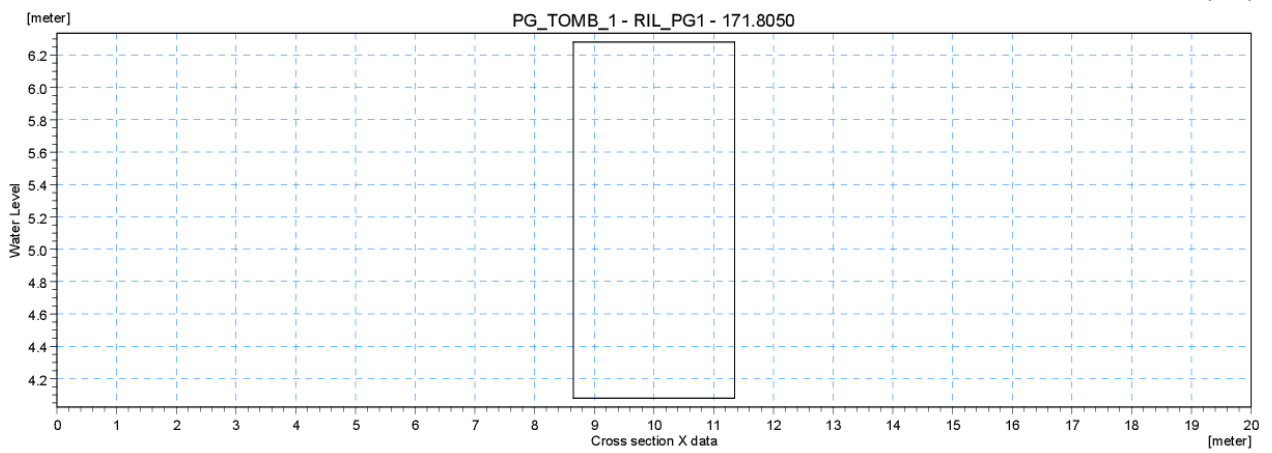
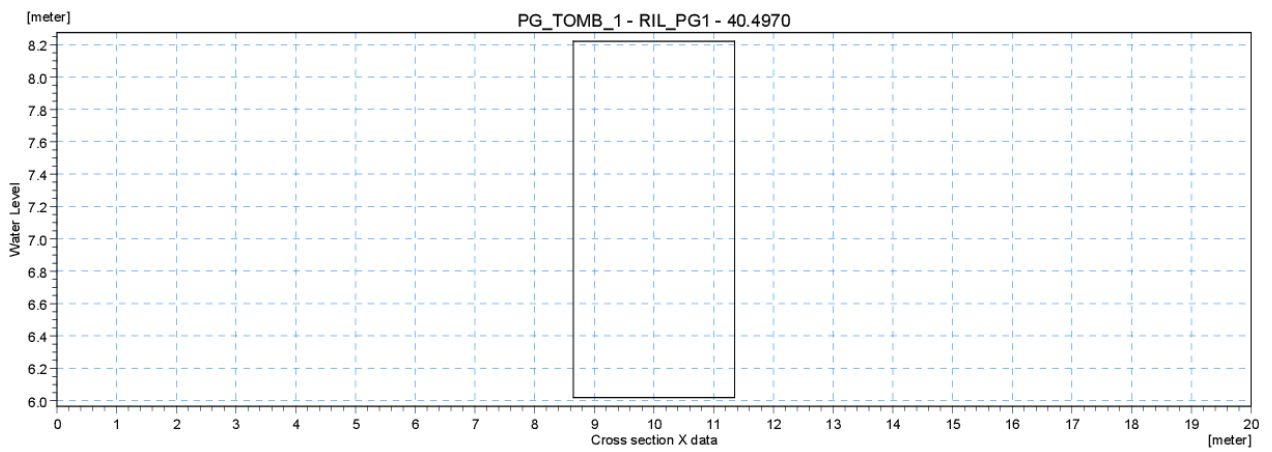
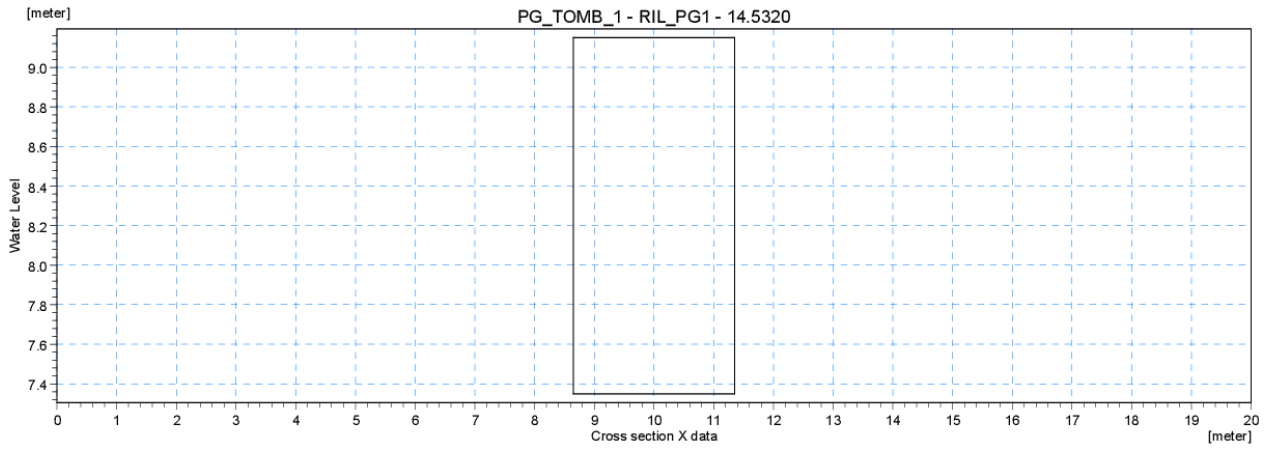


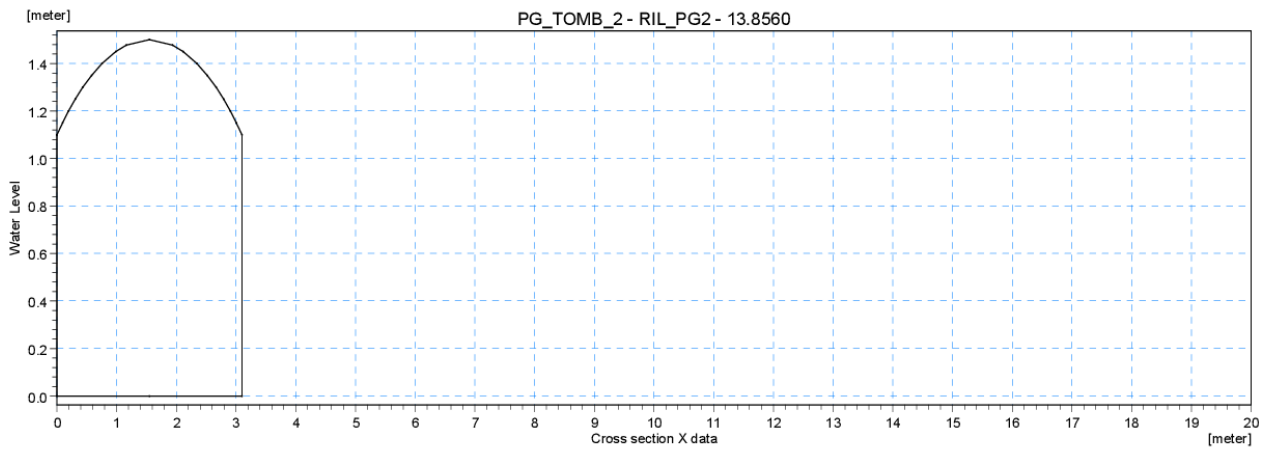
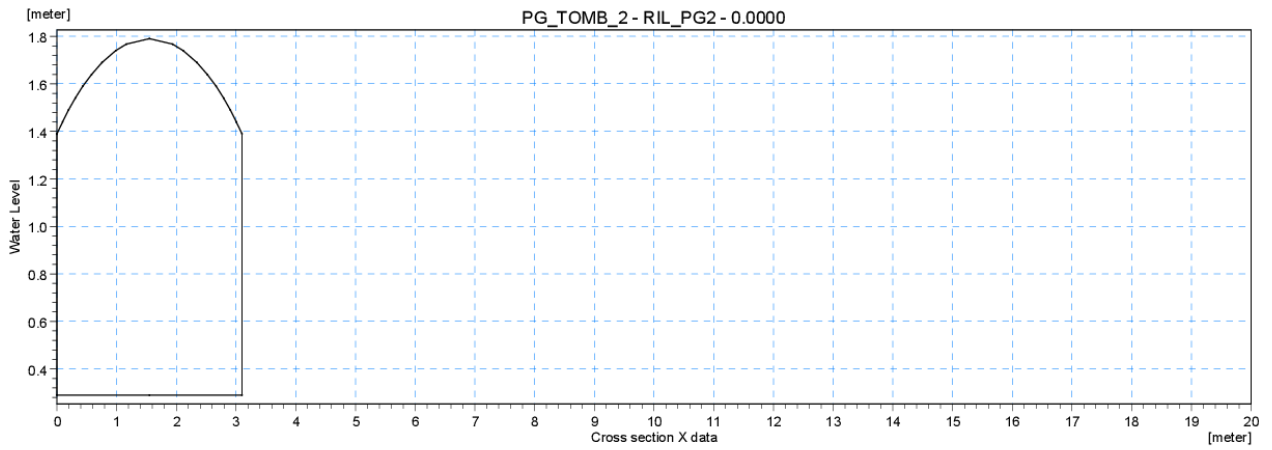
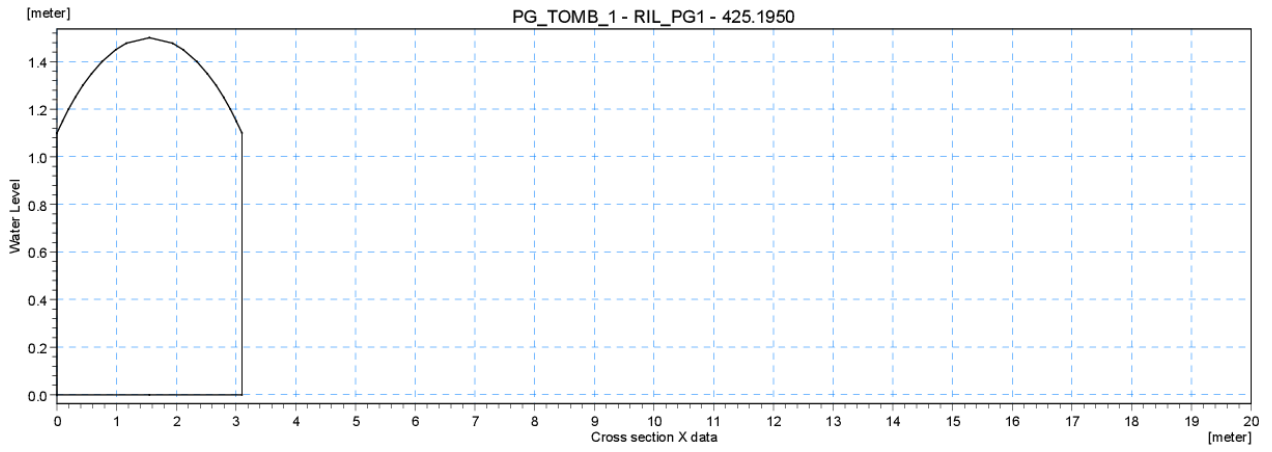












**ALLEGATO 4 – Sezioni trasversali inserite nel modello idraulico, con indicato il livello massimo di piena duecentennale – Fosso Canalone**



