HYDRODATA
INGEGNERIA DELLE RISORSE IDRICHE

OFFICINE FONDERIE PATRONE S.p.A.



Città di La Spezia - Area ex ENEL in loc. Pianazze

Studio idraulico

a supporto del Progetto Definitivo
di interventi di mitigazione del rischio idraulico

ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI CUNEO
A1721 Dott. Ing. Luca Aldo Remo Dutto

3718 - 0 1 - 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

00	**DIC.21**	**M. CERRINA**	**L. DUTTO**	**L. DUTTO**	
REV.	DATA	REDAZIONE	VERIFICA	AUTORIZZAZIONE	MODIFICHE

INDICE

1. PREMESSA 1

2. STATO DI RISCHIO DA PIANIFICAZIONE IDRAULICA VIGENTE 2

3. CARATTERIZZAZIONE DELL'ASSETTO ATTUALE DEI LUOGHI 3
   3.1 Fosso Tombone 3
   3.2 Area ex ENEL oggetto di studio 11

4. DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE IN PROGETTO 12

5. ANALISI IDROLOGICA 14

6. ALLESTIMENTO DEL MODELLO NUMERICO 19
   6.1 Approccio metodologico modellistico 19
   6.2 Schema del modello di stato attuale 20
      6.2.1 Modello MIKE11 20
      6.2.2 Modello MIKE21 22
   6.3 Schema del modello di progetto 24
      6.3.1 Modello MIKE11 24
      6.3.2 Modello MIKE21 24

7. CONDIZIONI AL CONTORNO 27

8. RISULTATI – STATO ATTUALE 30
   8.1 Scenario TR50 (tempo di ritorno 50 anni) 30
   8.2 Scenario TR200 (tempo di ritorno 200 anni) 38
   8.3 Scenario TR500 (tempo di ritorno 500 anni) 45

9. RISULTATI – CONFIGURAZIONE DI PROGETTO 52
   9.1 Scenario TR50 (tempo di ritorno 50 anni) 53
   9.2 Scenario TR200 (tempo di ritorno 200 anni) 62
   9.3 Scenario TR500 (tempo di ritorno 500 anni) 71

10. CONCLUSIONI E PROPOSTA DI PERIMETRAZIONE DI PROGETTO DELLE FASCE DI PERICOLOSITÀ 80

ALLEGATI
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.

1. PREMESSA

Il presente studio idraulico ha come oggetto l'area ex ENEL ubicata in località Pianazze in Comune di La Spezia (individuata in Figura 1).

A seguito di manifestazione di interesse da parte dell'Immobiliare Patrone S.r.l. all'acquisto di tale compendio immobiliare, Fi.l.s.e. S.p.A., intenzionata ad avviare una procedura pubblica per la vendita dello stesso, nel 2020 ha conferito incarico alla scrivente Hydrodata S.p.A. per l'esecuzione di uno studio[1] per l'analisi dell'assetto di pericolosità idraulica di stato attuale dell'area e l'identificazione preliminare di possibili interventi per la risoluzione di eventuali criticità.

Tale studio si è configurato come un'integrazione delle analoghe analisi svolte dalla scrivente nell'anno 2019 su incarico della Città di La Spezia nell'ambito del 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*.

In virtù di specifico accordo tra F.i.l.s.e. S.p.A. e il Comune, i dati di base raccolti, gli strumenti modellistici allestiti e le risultanze di tale Servizio sono stati utilizzati come base di partenza per lo studio citato, dal quale a sua volta si sviluppa il presente studio.



Figura 1 – Identificazione dell'area oggetto di studio.

L'area in esame è risultata soggetta a potenziali esondazioni da parte del Fosso Tombone, affluente del Fosso Calcinara, a sua volta tributario di destra del Canale Fossamastra.

[1] Fi.l.s.e. S.p.A. – Città di La Spezia - Analisi delle condizioni di pericolosità idraulica dell'area ex ENEL in località Pianazze. Elab. 3636-01-00100. HYDRODATA S.p.A., dicembre 2020.

In funzione delle aree di esondazione risultanti dall'analisi idraulica è stata tracciata una proposta di perimetrazione 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. Tale proposta, trasmessa ai competenti Uffici regionali, ha avuto come esito l'adozione di una Variante al Piano di Bacino – Ambito 20 La Spezia, recante una nuova perimetrazione delle aree di pericolosità idraulica del Fosso Tombone.

L'area di interesse in particolare è risultata inclusa in una perimetrazione di fascia A, sottoposta quindi alla normativa di cui all'art.15 comma 2 delle NTA del PAI, che vieta la nuova edificazione. Tuttavia, tale vincolo è superabile attraverso idonea procedura di riperimetrazione previa realizzazione di specifiche opere di mitigazione del rischio. Tali opere sono state preliminarmente individuate nel citato studio del 2020 e consistono nell'adeguamento della tombinatura al di sotto di via delle Pianazze e della sezione a cielo aperto nel tratto immediatamente a monte.

Viene pertanto richiesto da F.i.l.s.e. S.p.A.ai soggetti interessati all'acquisizione dell'area in oggetto di farsi carico degli adempimenti tecnici necessari ai fini del Procedimento di Svincolo Idraulico, ed in particolare la predisposizione di un "*Progetto Definitivo delle opere di mitigazione corredato da uno studio idraulico conforme ai criteri e alle direttive regionali in materia - da parte del Comune della Spezia al Settore Regionale Assetto del Territorio – al fine di procedere alle attività istruttorie finalizzate alla c.d. "riperimetrazione preventiva" che definisce lo stato di inondabilità delle aree a seguito della realizzazione delle opere di mitigazione di cui sopra da parte della competente Autorità di Bacino dell'Appennino Settentrionale e successivamente al Settore Regionale Difesa del Suolo di La Spezia al fine di acquisire l'autorizzazione idraulica ex R.D.523/1904*".

La presente relazione costituisce tale studio idraulico a supporto del Progetto Definitivo delle opere di mitigazione.

2. STATO DI RISCHIO DA PIANIFICAZIONE IDRAULICA VIGENTE

Il Piano di Bacino (PdB) vigente ha recepito, con variante adottata mediante Decreto del Segretario Generale dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale n.46 del 23/06/2021, la nuova perimetrazione del Fosso Tombone derivante dallo studio F.i.l.s.e. del 2020 precedentemente citato, come rappresentato in Figura 2.

Precedentemente erano definite aree di pericolosità idraulica (elevata – fascia A – e moderata – fascia B) sulla sola asta del canale Fossamastra nel tratto terminale (da valle della confluenza del Fosso Calcinara alla foce in mare). Si noti come in figura, stralciata dalle tavole di Piano, le aree a pericolosità idraulica elevata del Fossamastra siano rappresentate unitamente a quelle relative all'adiacente fosso Melara.

Per le aree più a monte, nel PdB sono state eseguite (con analisi in moto uniforme delle condizioni di deflusso nella sezione) verifiche di adeguatezza idraulica di una serie di attraversamenti, prevalentemente sul Fosso Calcinara, che risultano tutti inadeguati al deflusso della piena cinquantennale (colore rosso). La sezione di imbocco della tombinatura terminale del Calcinara è stata anche verificata con la stessa metodologia ed è risultata inadeguata al deflusso della piena duecentennale (colore arancione).

Gli alvei della tombinatura del Fossamastra e dei tratti tombati del Calcinara in adiacenza alla centrale ENEL sono perimetrati come fascia A per l'inadeguatezza allo smaltimento della portata cinquantennale.

Le aree di specifico interesse per il presente studio sono identificate da un ovale nero nella Figura 2.

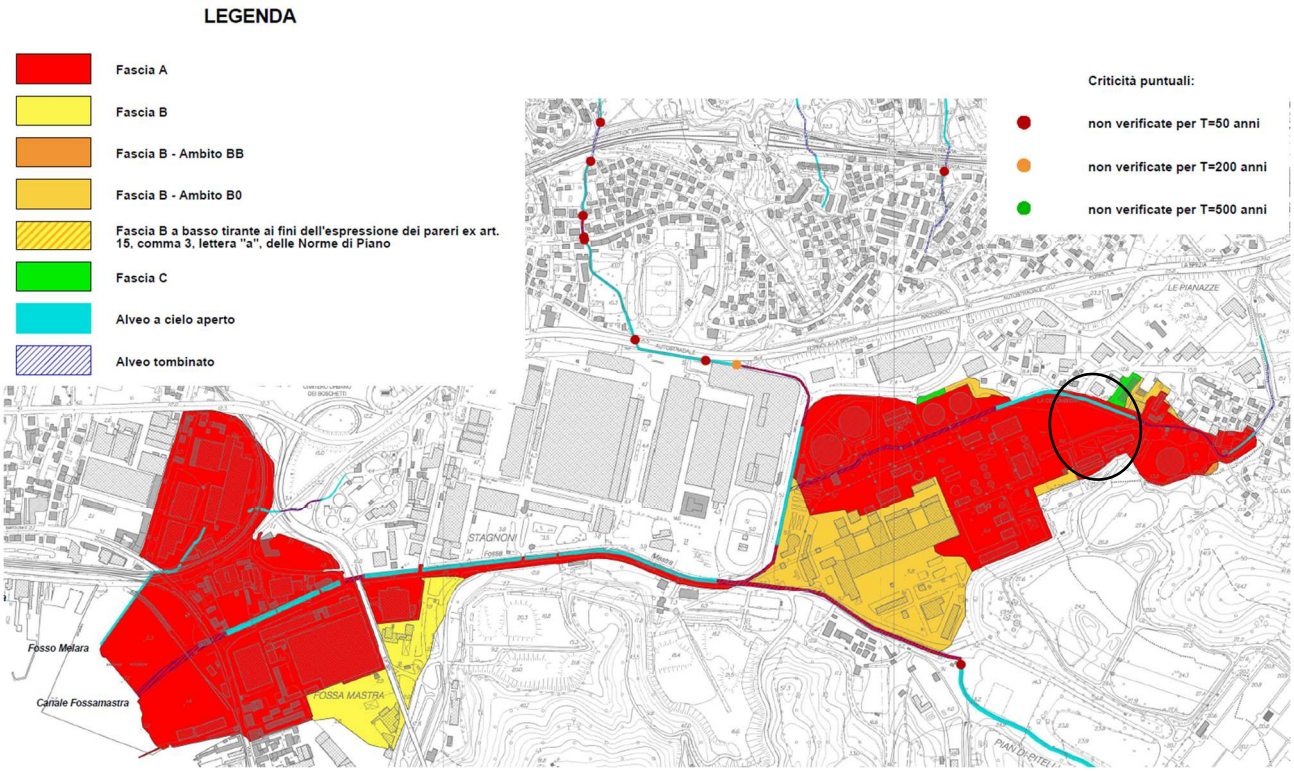


Figura 2 – Aree di pericolosità idraulica (fasce fluviali) da Piano di Bacino vigente.

3. CARATTERIZZAZIONE DELL'ASSETTO ATTUALE DEI LUOGHI

3.1 Fosso Tombone

Il tratto di studio del Fosso Tombone ha inizio in prossimità dell'incrocio tra via delle Pianazze e via Soggiano (Figura 1), dove esso presenta un tratto a cielo aperto, alimentato dall'immissione di due tubazioni in calcestruzzo:

- una tubazione di diametro nominale 1000 mm (DN1000), proveniente dal tratto d'alveo principale di monte;
- una tubazione di diametro nominale 800 mm (DN800), che si immette dalla sponda sinistra, la quale drena la porzione di versante a monte della strada (cfr. Figura 4).

La tubazione DN1000 si sviluppa verso monte per circa 170 m, dopodiché si ha un tratto a cielo aperto di circa 140 m costituito da un fosso a lato della strada (Figura 3), con sezione rettangolare rivestita in calcestruzzo di dimensioni b x h = 1,30 m x 1,20 m. Questo tratto è alimentato a monte da un ulteriore tombinatura che sbocca con tubazione in calcestruzzo DN800.



Figura 3 – Tratto di Fosso Tombone a monte di quello di studio: alveo a lato di via delle Pianazze (sx); imbocco della tombinatura DN1000 che recapita nel tratto in studio (dx).

Il tratto in esame ha origine con lo sbocco della tubazione DN1000 all'interno di una sezione chiusa con geometria a volta, per una lunghezza di circa 5 m (Figura 4).



Figura 4 – Inizio del tratto di studio del Fosso Tombone: sbocco tombinatura DN1000 (sx); immissione tombinatura DN800 (dx, vista da valle).

La sezione d'alveo è rivestita in calcestruzzo, con sponde a leggera inclinazione rispetto alla verticale. Il tratto è caratterizzato da due livellette di pendenza, con variazione in corrispondenza del ponticello intermedio per l'accesso dalla strada alla proprietà in sponda destra:

- la prima porzione di monte (lunghezza circa 25 m) con pendenza del 3% circa; la larghezza alla base è di 1,30 m e quella in testa al muro di destra è di 1,55 m;
- la seconda porzione più a valle (lunghezza circa 48 m) con pendenza del 1% circa; la larghezza alla base è di 1,05 m e quella in testa al muro di destra è di 1,35 m.

La sponda destra ha quota inferiore, raccordata con il piano campagna a tergo (altezza rispetto al fondo di circa 1,10 m nella prima porzione e 1,40 m nella seconda); la sponda sinistra raggiunge la quota della strada asfaltata (variabile tra 2,0 m e 1,8 m dal fondo alveo) ed è sormontata da un muretto di altezza pari a circa 0,40 m (Figura 5). Il muretto presenta due varchi alle estremità di monte e di valle.



Figura 5 – Alveo del Fosso Tombone nel tratto di monte (sx); ponticello intermedio (dx, vista da monte).

All'estremità di valle del tratto coperto la sezione si allarga fino a 2,30 m in una lunghezza di circa 4 m, dopodiché ha inizio un primo tratto di tombinatura a sezione rettangolare con geometria variabile (da b x h = 2,10 x 0,80 m all'imbocco a 2,30 x 1,30 m all'estremità di valle), a valle del quale hanno origine due tubazioni parallele DN1000 (Figura 6).



Figura 6 – Imbocco della tombinatura costituita dai due tubi DN1000, preceduta da un tratto coperto con geometria rettangolare con larghezza e altezza variabili.

Le due tubazioni si sviluppano al di sotto di via delle Pianazze per circa 320 m, fino allo sbocco a cielo aperto (protetto da griglie, Figura 9), in prossimità dell'incrocio con via Valdilocchi.

Il tracciato delle due tubazioni parallele è risultato – da specifico rilievo condotto nell'ambito del Progetto Definitivo – più accidentato rispetto a quanto ipotizzato nello studio preliminare del 2020, in cui si era ipotizzato un percorso che seguisse lo sviluppo della strada (significativamente più breve, circa 230 m). L'andamento effettivo (rappresentato nello stralcio di Figura 7) mostra invece bruschi cambi di direzione, con angoli anche superiori a 90°. Tale discrepanza non influenza in ogni caso le analisi del presente studio, in quanto il progetto definitivo prevede la demolizione e completo rifacimento della tombinatura esistente.

Si evidenzia la presenza di alcune caditoie sul piano stradale con collegamento diretto all'attuale tombinatura, battute nella planimetria di rilievo compresa negli elaborati di progetto.

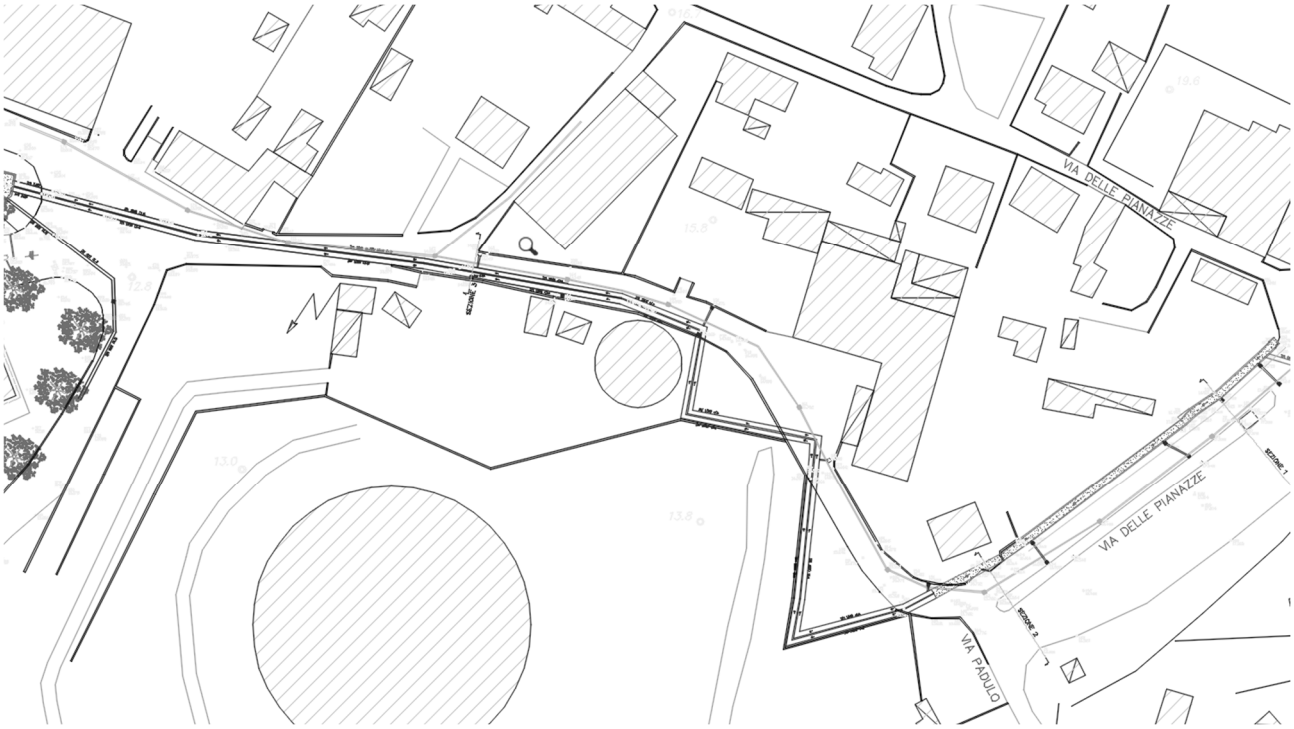


Figura 7 – Stralcio planimetrico con identificazione del tracciato delle due tubazioni DN1000.

A valle dello sbocco della tombinatura il corso d'acqua si sviluppa a cielo aperto per circa 330 m, costeggiando dapprima l'area ex ENEL oggetto del presente studio, e successivamente l'attuale centrale. La sezione è artificializzata, di forma rettangolare con larghezza di 3,0 m e altezza dei muri di sponda di 1,55 m (con ulteriore ribassamento centrale di 15 cm per creare un fondo canaletta a tramoggia).

In sponda destra il muro mantiene questa altezza rispetto al fondo alveo, seguendo la pendenza longitudinale del Fosso, e si raccorda con il muro di sostegno della strada soprastante mediante una scarpata in terra. In sponda sinistra invece la quota di testa muro si mantiene pressoché costante, per cui l'altezza del muro cresce significativamente fino a circa 4,0 m dopo circa 210 m (Figura 10).

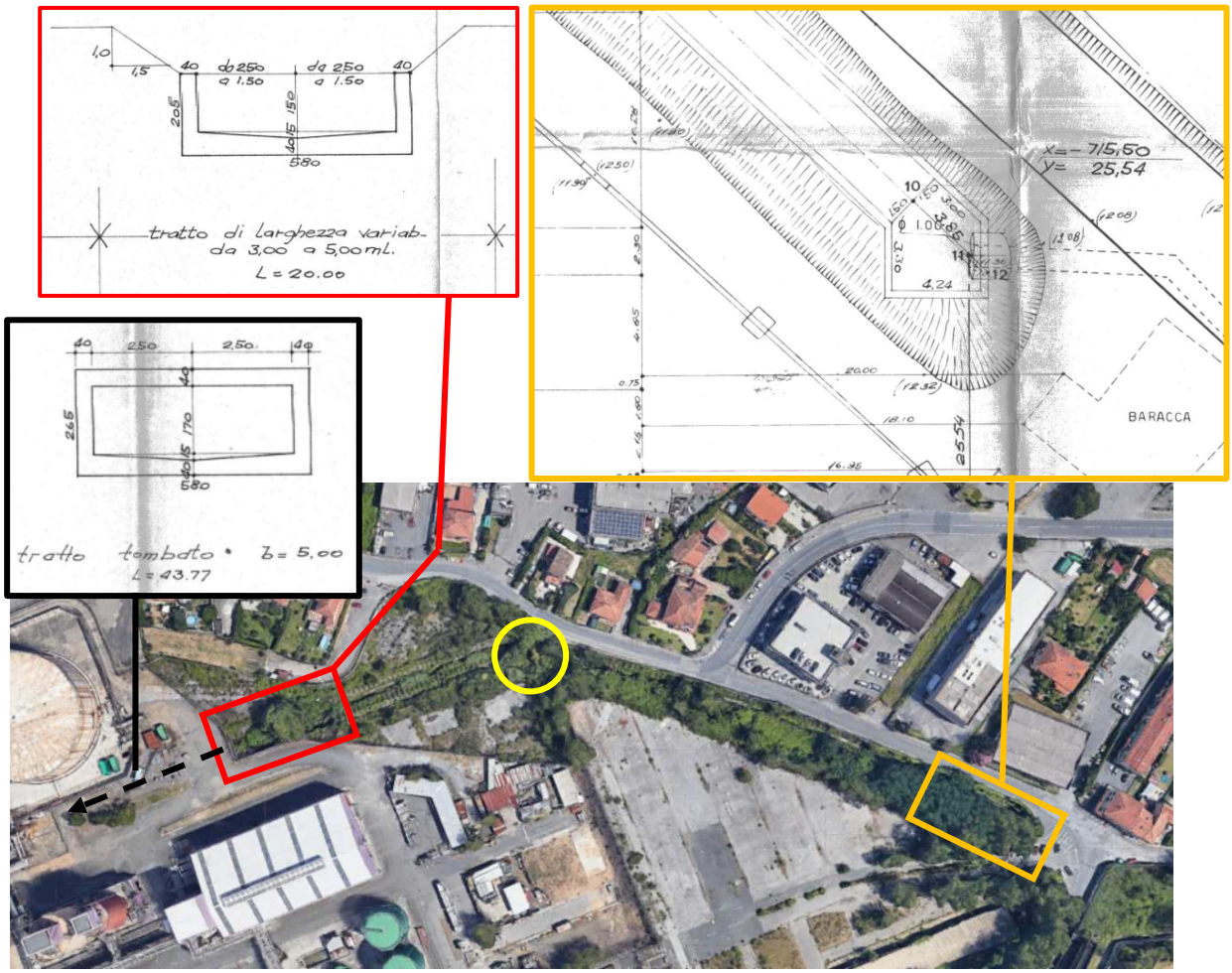


Figura 8 – Tratto a cielo aperto del Fosso Tombone in adiacenza all'area ENEL e successivo tombamento. Il cerchio giallo individua l'ubicazione del ponticello di Figura 11.



Figura 9 – Tratto del Fosso Tombone in adiacenza all'area ex ENEL in esame(sx); sbocco dei due tubi DN1000 all'incile di tale tratto (dx).

In tale sezione è presente un ponticello di attraversamento, interno all'area recintata contigua all'area ENEL, avente sezione di deflusso rettangolare di dimensioni 3,00 x 1,55 m, con notevole distanza tra intradosso e estradosso (Figura 11). Poco a monte vi sono le rimanenze di una griglia metallica di recinzione divelta, che ingombra parzialmente l'alveo (Figura 10).

A valle del ponte la quota del muro di sponda sinistra torna circa pari a quella destra (1,55 m dal fondo); l'alveo è parzialmente invaso da materiale vegetale stabile che occupa una larghezza di 1,0-1,2 m prevalentemente in sponda sinistra (ma per un breve tratto esso è invece presente in destra, v. Figura 12), per un'altezza media dell'ordine di 1,20 m.



Figura 10 – Fosso Tombone in adiacenza all'area della centrale ENEL (sx, vista da valle); recinzione divelta (dx, vista da monte).



Figura 11 – Ponticello di attraversamento visto da monte (sx) e da valle (dx).

Subito a monte dell'imbocco della tombinatura terminale che si sviluppa al di sotto dell'area della centrale ENEL è presente una vasca di calma/sedimentazione lunga circa 40 m, realizzata da un allargamento del canale fino a 5 m. Il fondo di tale vasca è attualmente riempito da materiale a prevalenza limosa, con presenza di fitta vegetazione che ne impedisce l'ispezionabilità.

Per la definizione della geometria della tombinatura terminale si è dunque fatto riferimento ai disegni di consistenza "storici" (progetto della sistemazione del Fosso) recuperati presso gli archivi della Regione nell'ambito dello studio pregresso citato in premessa (Figura 8, Figura 14).

Da tali disegni risulta che nel precedente tratto a cielo aperto l'alveo riceva contributi laterali di drenaggio da destra (via delle Pianazze) per mezzo di alcune tubazioni DN400 che recapitano in piccole vaschette laterali di sedimentazione, collegate con l'alveo del canale da setti di sfioro alti 0,70 m.



Figura 12 – Tratto a valle del ponticello (sx, vista da monte) e imbocco della vasca di sedimentazione (dx).

Il tratto tombato ha sezione scatolare di larghezza pari a 5,0 m e altezza di 1,7 m (con abbassamento centrale del fondo di 15 cm per costituire una savanella di scorrimento dei deflussi minimi) che cresce nel tratto finale a 2,05 m. Esso si sviluppa sotto l'area della centrale per circa 500 m, fino a confluire nel Fosso di Calcinara in corrispondenza del limite di proprietà ENEL. La sezione di sbocco presenta una luce ribassata, alta 1,55 m, a causa del passaggio di condotti tecnici; per migliorare l'idrodinamica della confluenza il tratto è stato allargato, con raccordo sagomato, fino a circa 16 m (Figura 14).

Nel tratto in cui avviene la confluenza il Fosso di Calcinara presenta un alveo a cielo aperto lungo circa 265 m tra due tombinature, e si sviluppa in affiancamento al lato Ovest della centrale ENEL. La sezione è rettangolare, con sponde alte circa 4,3 m dal fondo alveo (inferiori in sponda sinistra di circa 20 cm). La sezione è rivestita in calcestruzzo ma sul fondo è comunque interessata da rilevante presenza di vegetazione, anche arborea, cresciuta sui depositi di sedimento (Figura 13). Al termine di questo tratto ha inizio la tombinatura terminale che confluisce nel Canale di Fossamastra.



Figura 13 – Fosso di Calcinara alla confluenza del Fosso Tombone, visto da monte (sx); Fosso di Calcinara visto da valle (dx, da imbocco tombinatura).

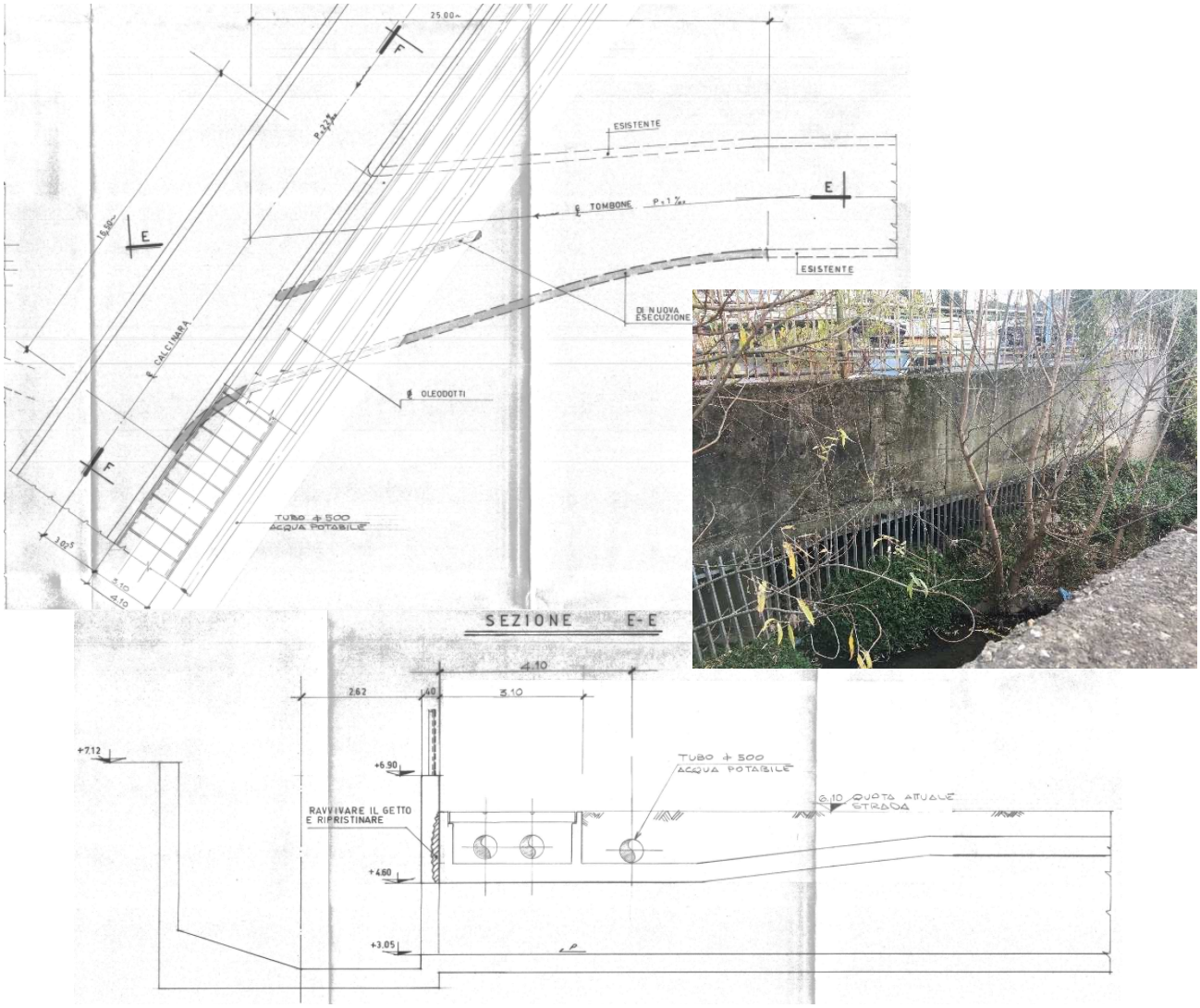


Figura 14 – Geometria della confluenza del Fosso Tombone nel Fosso di Calcinara.

3.2 Area ex ENEL oggetto di studio

L'area oggetto di analisi, individuata in Figura 1, è accessibile da via delle Pianazze mediante un cancello che interrompe la recinzione perimetrale, la quale poggia su un cordolo in calcestruzzo di altezza pari a circa 40 cm, e una rampa asfaltata che supera il dislivello di circa 3,3 m rispetto alle viabilità circostanti (da circa 12,3 m s.m. a circa 9,0 m s.m.).

L'area è sostanzialmente pianeggiante, maggiormente depressa nella porzione meridionale (dove sono presenti dei capannoni industriali in disuso) ed ha una pavimentazione di tipo stradale localmente ammalorata e interessata da crescita vegetale.



Figura 15 – Accesso da via delle Pianazze dell'area ex ENEL (sx); rampa di accesso vista dal basso (dx).



Figura 16 – Area ex ENEL: vista verso la centrale esistente (sx) e verso l'alveo del Fosso Tombone (dx).



Figura 17 – Recinzione tra l'area in esame e la centrale ENEL; è visibile la scarpata che supera la differenza di quota (sx).

L'area in esame, di geometria all'incirca triangolare, è delimitata a Nord dall'alveo del Fosso Tombone, che la separa da via delle Pianazze. Il fondo alveo è posto a una quota inferiore di circa 2 m rispetto al piano suborizzontale pavimentato; lungo il perimetro è presente un rilevato in terra continuo.

Verso Ovest l'area confina con la centrale ENEL, impostata su un piano a quota inferiore di circa 2,8 m (mediamente circa 6,2 m s.m.); il raccordo altimetrico è realizzato da una scarpata in terra. Il confine è delimitato da una recinzione metallica installata su un cordolo di base in calcestruzzo di altezza pari a 40 cm. La recinzione si interrompe in prossimità del vertice Nord-Ovest dell'area, con un varco di circa 30 m raccordata con una scarpata ad un'area pianeggiante sottostante interclusa tra la centrale e il Fosso.

Quest'ultimo in questo tratto ha quote di fondo alveo approfondite di circa 2,3 m rispetto al piano pavimentato soprastante (centrale ENEL e area limitrofa), e oltre 4,5 m rispetto al piano viabile di via delle Pianazze (8,4-8,5 m s.m.).

4. DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE IN PROGETTO

Il Progetto Definitivo sviluppa con maggiore dettaglio tecnico gli interventi di mitigazione ipotizzati preliminarmente nel citato studio Fi.I.s.e. del 2020, consistenti nell'adeguamento della sezione d'alveo nel tratto di monte a cielo aperto e soprattutto nella sostituzione delle due tubazioni DN1000 con una nuova tombinatura a sezione scatolare in grado di garantire una maggiore capacità di deflusso.

La Figura 18 sintetizza lo schema di intervento.

In maggior dettaglio, nel tratto a cielo aperto di monte sarà ampliata la sezione d'alveo realizzando una geometria rettangolare di dimensioni b x h = 2,5 m x 2,0 m per uno sviluppo di circa 69 m; l'ampliamento avverrà con un allargamento in sinistra, sfruttando la possibilità di poter traslare la carreggiata stradale verso Sud-Est a scapito di una porzione dell'ampia area sterrata ivi presente. La sezione sarà realizzata con elementi prefabbricati, come da schema di Figura 19, con unico raccordo gettato in opera in corrispondenza di un lieve cambio di direzione dopo circa 20 m dall'estremità di monte.

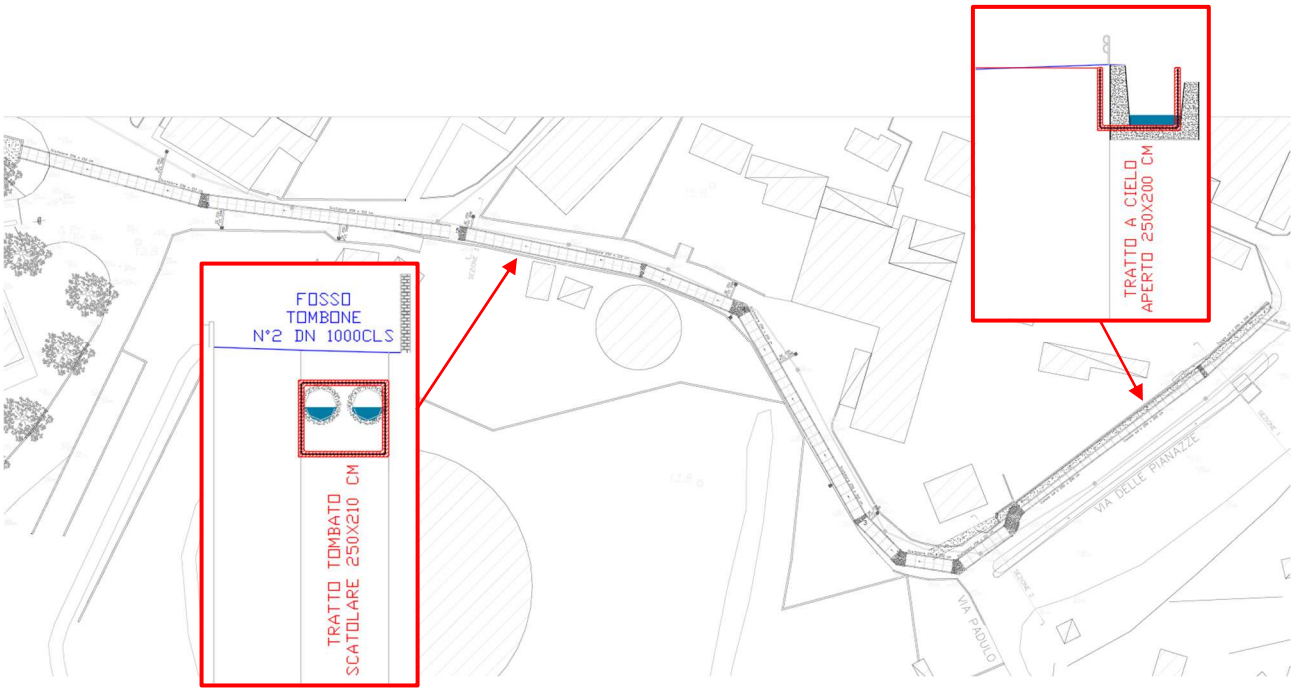


Figura 18 – Stralcio planimetrico con identificazione del tracciato della tombinatura in progetto e delle sezioni tipologiche di intervento.

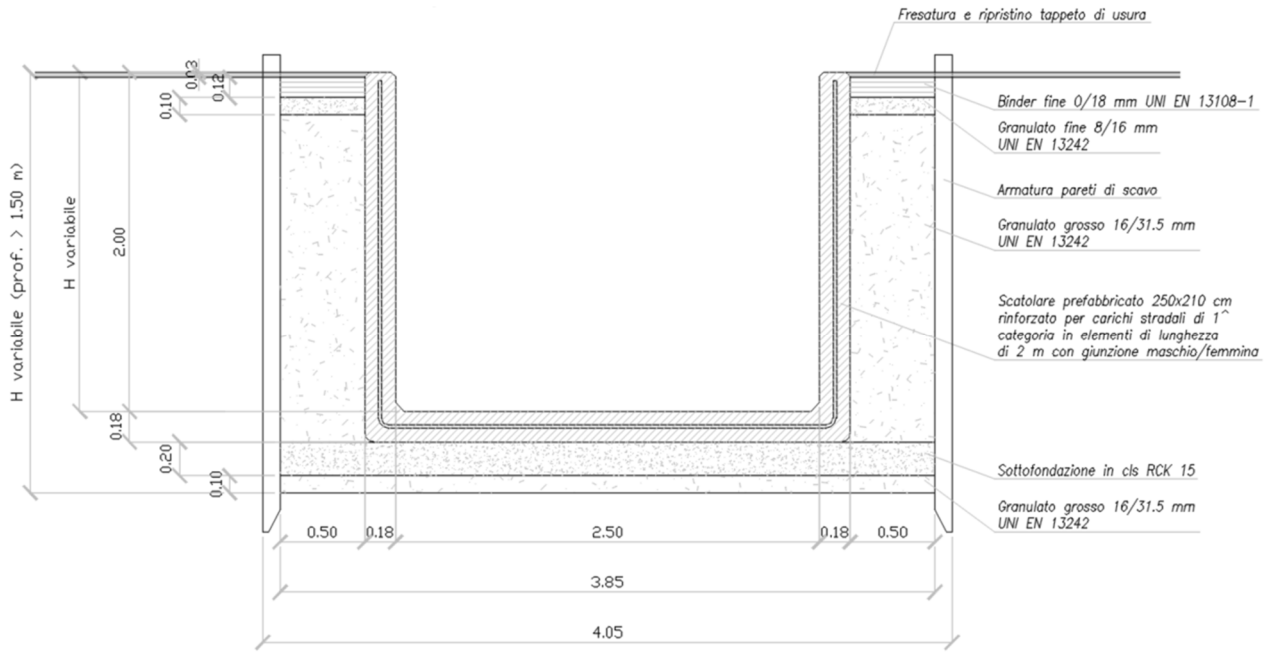


Figura 19 – Sezione tipologica di progetto per il tratto di monte a cielo aperto.

Poco a monte dell'attuale imbocco della tombinatura avrà inizio il nuovo tratto tombato, con un breve tratto (circa 6 m) di raccordo gettato in opera, funzionale a una deviazione verso sinistra dal tracciato attuale per portare l'opera al di sotto del sedime stradale. In questo modo è possibile evitare l'interferenza con la proprietà privata al di sotto della quale si sviluppa il primo tratto delle due tubazioni DN1000 esistenti e la camera di imbocco delle stesse (Figura 6).

Successivamente il nuovo alveo si sviluppa tombato, con sezione scatolare prefabbricata di dimensioni leggermente maggiori rispetto a quelle previste nello studio Fi.l.s.e. del 2020 (b x h = 2,5 m x 2,1 m – v. Figura 20), seguendo un tracciato interamente al di sotto del sedime stradale di via delle Pianazze. Tale tracciato è previsto con andamento assai più regolare dell'attuale, evitando gli impedimenti idraulici dovuti ai bruschi cambi di direzione e riducendone significativamente lo sviluppo (a circa 254 m complessivi) guadagnando così una maggiore pendenza longitudinale.

I tratti in conci prefabbricati sono alternati da alcuni raccordi gettati in opera in corrispondenza dei cambi di direzione. Per maggiori dettagli in merito alle caratteristiche tecniche delle opere previste si rimanda agli specifici elaborati di progetto.

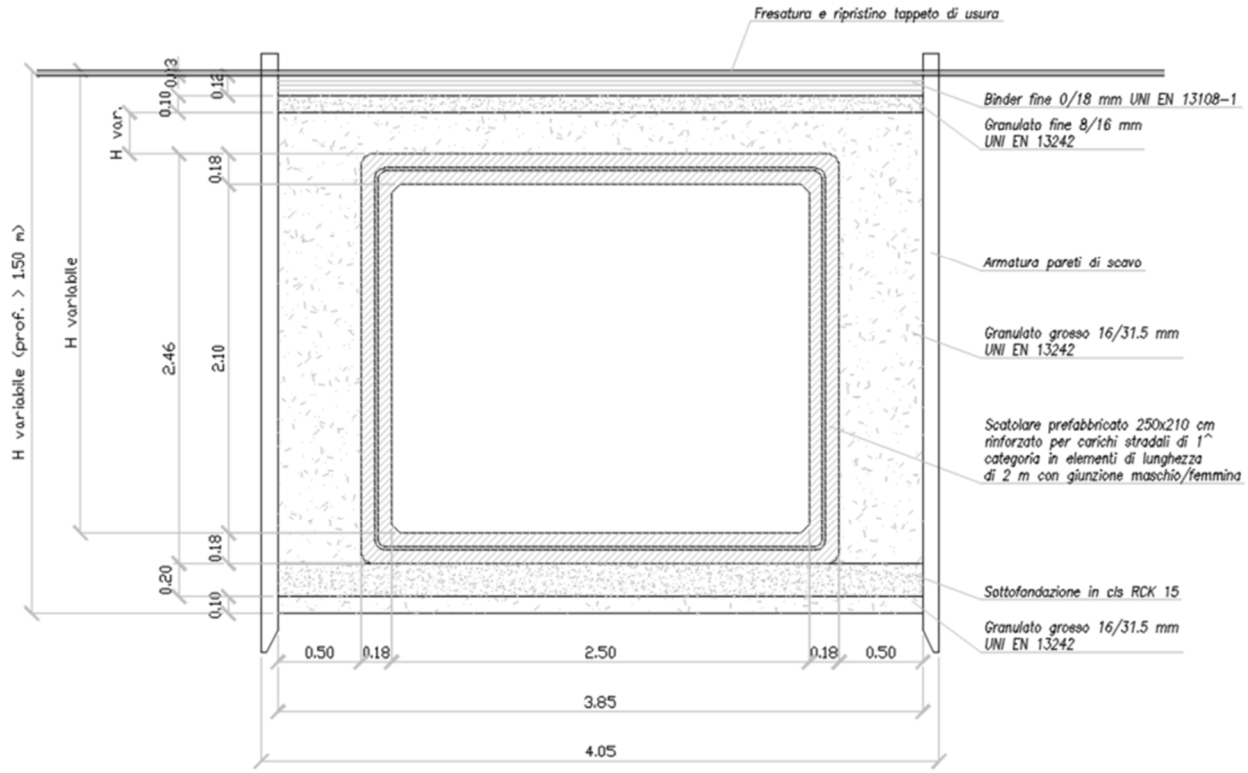


Figura 20 – Sezione tipologica di progetto per il tratto tombato.

5. ANALISI IDROLOGICA

Nel citato studio pregresso del 2019 svolto su incarico del Comune di La Spezia (cfr. capitolo 1) è stato effettuato un aggiornamento dell'idrologia di piena per tutti i corsi d'acqua significativi identificati sul territorio comunale, finalizzato alla determinazione degli idrogrammi di piena caratteristici dei bacini e sottobacini di interesse per diversi tempi di ritorno.

Tale analisi è basata su una regolarizzazione statistica dei dati di pioggia intensa osservati alla stazione pluviometrica di La Spezia del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (e dell'Arpa Liguria per gli anni recenti), con aggiornamento all'anno 2018 (61 anni di osservazioni).

I dati disponibili hanno permesso di ricavare direttamente curve di possibilità pluviometrica per durate superiori e inferiori all'ora, associate a diversi tempi di ritorno. Il punto di cambio di pendenza, per tutti i tempi di ritorno, presenta una durata mediamente pari a 40 minuti. Nella Tabella 1 sono riportate le espressioni delle curve di possibilità pluviometrica di progetto di assegnato tempo di ritorno così determinate.

	Curve valide per durate > 40 minuti	Curve valide per durate ≤ 40 minuti
TR10	$h = 55{,}61 \cdot t^{.291}$	$h = 65{,}40 \cdot t^{.711}$
TR20	$h = 63{,}75 \cdot t^{.285}$	$h = 76{,}07 \cdot t^{.737}$
TR50	$h = 74{,}55 \cdot t^{.279}$	$h = 89{,}94 \cdot t^{.763}$
TR100	$h = 82{,}56 \cdot t^{.275}$	$h = 100{,}39 \cdot t^{.778}$
TR200	$h = 90{,}55 \cdot t^{.272}$	$h = 110{,}82 \cdot t^{.791}$
TR500	$h = 101{,}10 \cdot t^{.269}$	$h = 124{,}59 \cdot t^{.805}$

Tabella 1 - Stazione di La Spezia – Curve di possibilità pluviometrica di progetto di assegnato tempo di ritorno.

Per ciascun corso d'acqua sono stati tracciati, sulla base della Carta Tecnica Regionale e con supporto del modello digitale del terreno (DTM) da volo LiDAR prodotto dal MATTM, i bacini imbriferi sottesi da sezioni idrologiche significative in relazione all'estensione dei tratti oggetto di indagine, e sono stati definiti i principali parametri idrologici tra cui il parametro CN del metodo SCS e il coefficiente di deflusso, sulla base di valutazioni in merito alla classe di appartenenza del suolo e al tipo di copertura e destinazione d'uso del terreno.

La Figura 21 individua il bacino del Fosso Tombone (in giallo) nel complesso del bacino idrografico del Canale Fossamastra; la sua area contribuente, circa 1,1 km^2, è equivalente a quella del Fosso di Calcinara all'imbocco del tratto di confluenza. Quest'ultimo, oltre al Tombone, riceve nel medesimo tratto anche il contributo di due affluenti minori. Le caratteristiche fisiografiche salienti dei bacini descritti sono sintetizzate in Tabella 2.

Corso d'Acqua	Sezione	Area bacino	Quota massima	Quota media	Lunghezza asta	Pendenza asta	Pendenza versanti	Curve Number
	[-]	A [km^2]	H_{max} [m s.m.]	H_{med} [m s.m.]	L [km]	i_a [m/m]	i_v [%]	CN [-]
Tombone	FM_TO-A	1,09	160	61	2,11	0,07	27	80
Colombiera	FM_CO-A	0,52	110	38	1,48	0,07	21	80
Affluente	FM_A2-A	0,52	150	53	1,92	0,07	32	80
Fosso di Calcinara	FM_CA-A	1,11	220	65	2,12	0,10	36	80

Tabella 2 - Caratteri fisiografici di sintesi dei bacini prossimi all'area di studio.

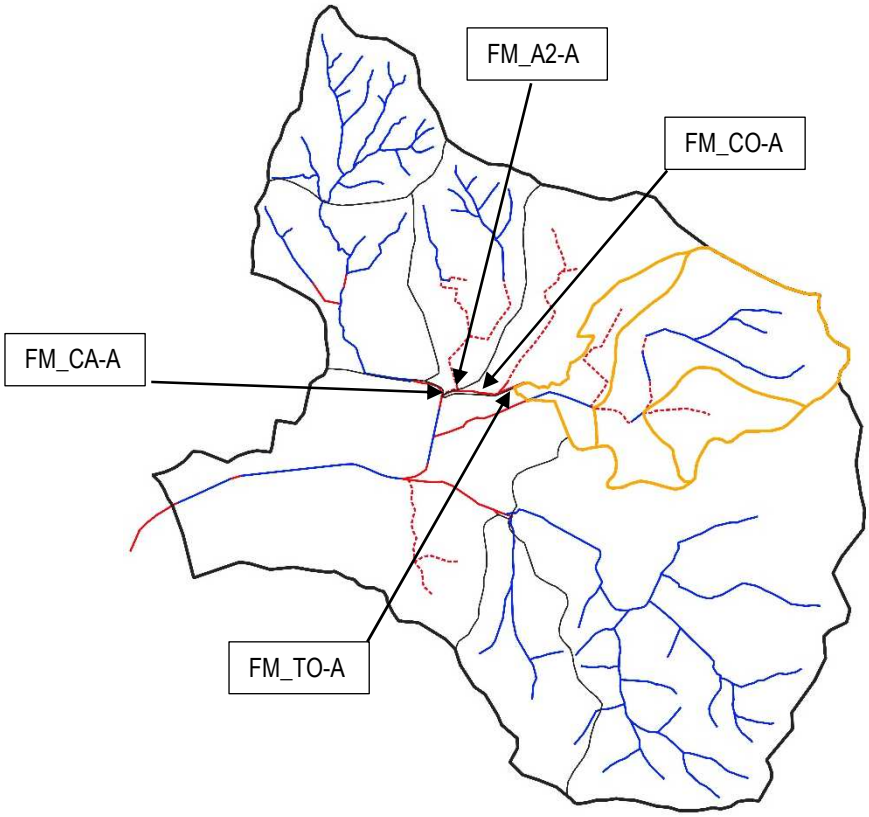


Figura 21 – Bacino del Canale Fossamastra con individuazione in giallo del bacino del Fosso Tombone chiuso all'imbocco della tombinatura al di sotto dell'area della centrale ENEL (FM_TO-A).

La stima delle portate di piena di progetto per il bacino in esame è stata effettuata mediante applicazione di un modello di trasformazione afflussi-deflussi di tipo concettuale (metodo razionale) al set di parametri di pioggia critica di progetto, nell'assunzione che ad eventi di precipitazione associati a determinati tempi di ritorno corrispondano eventi di piena caratterizzati dalla medesima probabilità di occorrenza.

Tale approccio è coerente con l'impostazione data nel vigente Piano di Bacino[2] (PdB), nel quale -data la modesta estensione dei bacini che interessano il territorio comunale- è stato condotto un confronto tra i valori di portata al colmo risultanti dall'applicazione del metodo razionale e la procedura di regionalizzazione contenuta nello studio *Caratterizzazione delle precipitazioni intense e delle portate di piena dei bacini liguri*, redatto dal Centro di Ricerca in Monitoraggio Ambientale (CIMA) dell'Università di Genova per conto della Regione Liguria.

Sulla base delle risultanze degli studi a supporto del PdB, in quest'ultimo si fa riferimento a una versione modificata del metodo CIMA, per adattarlo alla specifica situazione locale (l'intero Ambito 20 è costituito da un golfo in cui lo sviluppo degli eventi pluviometrici intensi ha generalmente caratteristiche differenti rispetto alle aree contigue del territorio ligure, per cui la regionalizzazione a scala ampia può fornire risultati non pienamente rappresentativi). In particolare è stato utilizzato come valore di pioggia indice non quello derivante dalla regionalizzazione ma quello determinato dall'analisi della serie storica della stazione pluviometrica di La Spezia.

[2] Provincia della Spezia – Piano di Bacino Ambito 20 – Golfo della Spezia.

Il confronto effettuato ha portato nel PdB ad assumere per quasi tutti i bacini la portata di riferimento derivante dal metodo razionale, in quanto generalmente (ma non sempre) più gravosa, con l'eccezione di alcuni bacini di superficie superiore a 2 km^2.

Nel già citato studio del Comune del 2019 si è proceduto a una rivalutazione delle portate di piena di riferimento, mantenendo per congruenza la stessa impostazione di confronto tra il modello razionale e la regionalizzazione CIMA adottata nel PdB, in funzione:

- dell'aggiornamento dell'input pluviometrico di precipitazione intensa come precedentemente descritto;
- di variazioni introdotte nella definizione delle aree contribuenti e dello sviluppo delle aste principali per alcuni dei corpi idrici in esame;
- della rivalutazione dei tempi di corrivazione dei bacini facendo riferimento a una serie di formulazioni differenti, anziché all'unica formula di Viparelli.

Poiché per le analisi in oggetto risulta opportuno il riferimento a uno schema di moto vario, nello studio citato sono stati inoltre definiti gli idrogrammi di piena di riferimento da associare alle portate al colmo precedentemente definite.

Affinché tali idrogrammi avessero una forma e pertanto un volume sufficientemente gravoso e realistico, per la loro determinazione è stato messo a punto un modello idrologico afflussi-deflussi che implementa il metodo dell'idrogramma unitario, mediante il codice di calcolo MIKE 11 – UHM del DHI.

Si evidenzia come la procedura seguita per la determinazione dell'idrogramma sia congruente con quanto indicato dalla D.G.R. 359/2008. In particolare, l'approccio utilizzato è quello dell'idrogramma istantaneo unitario con definizione dei parametri sulla base del metodo CN-SCS, considerata una condizione di umidità del suolo AMC III.

L'evento critico per il singolo bacino in esame è quello che comporta una precipitazione di massima intensità (scroscio) di durata pari al tempo di corrivazione, che per il bacino complessivo del Fosso Tombone risulta pari a circa 36 minuti.

Per le finalità del presente studio sono stati considerati due sottobacini, A e B (incluso in A), rappresentativi rispettivamente dell'area sottesa allo sbocco dell'attuale tombinatura costituita dai due DN1000 e allo sbocco del tombino DN800 laterale (Figura 22). Le aree sottese sono rispettivamente pari a circa 0,89 km^2 e 0,20 km^2, ovvero circa l'81% e il 18% del bacino totale.

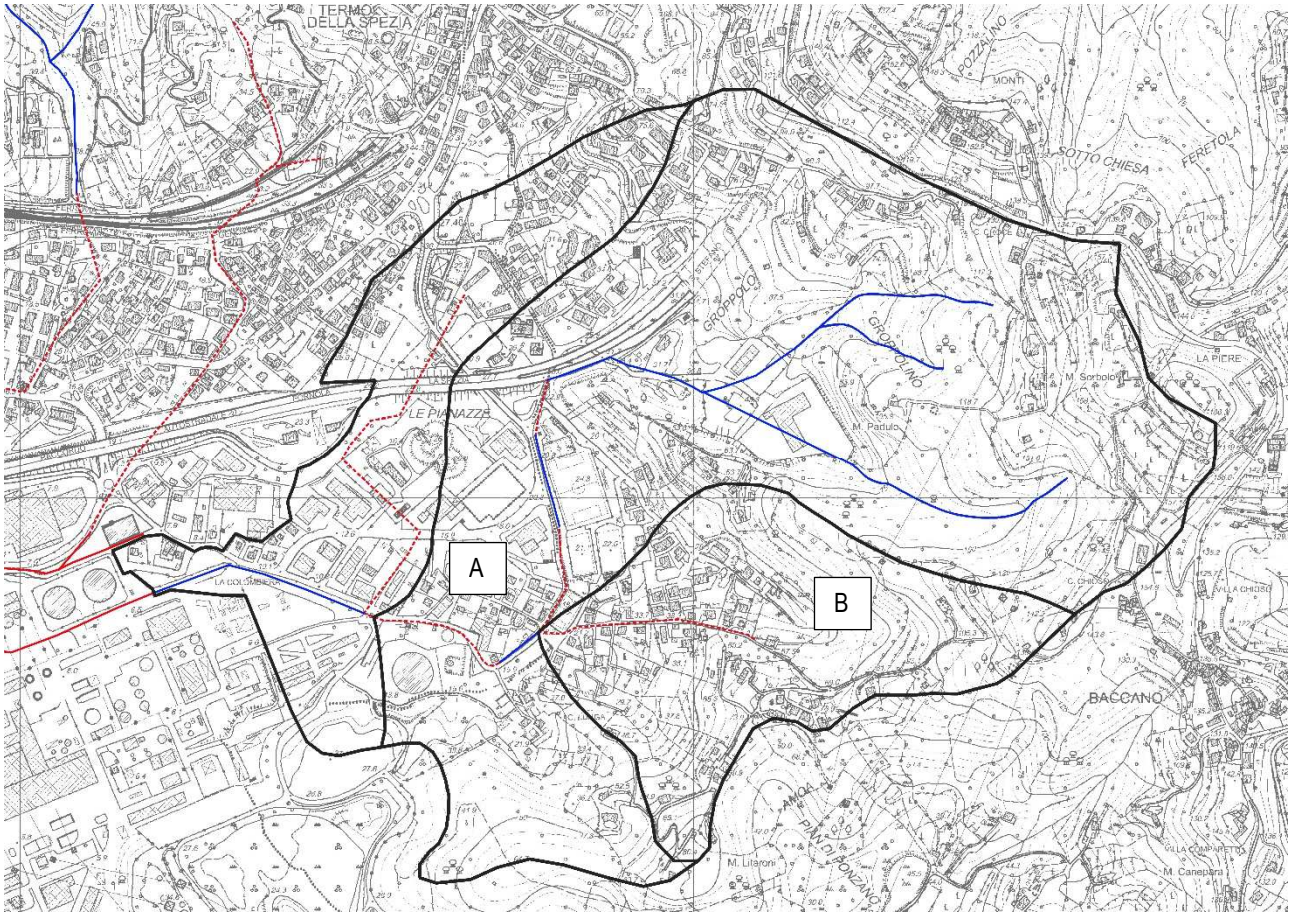


Figura 22 – Suddivisione in sottobacini del bacino del Fosso Tombone chiuso all'imbocco della tombinatura al di sotto dell'area della centrale ENEL (FM_TO-A).

Nello studio citato del 2019 sono state ottenute le portate massime di riferimento per il bacino del Fosso Tombone riportate in Tabella 3. Vista la modesta differenza di area sottesa, per la sezione di chiusura del sottobacino "A" le corrispondenti portate di piena e i relativi idrogrammi sono stati ricavati assumendo il medesimo contributo specifico per unità di superficie (si riportano a titolo di esempio in Figura 23 gli idrogrammi relativi a TR=50 anni).

Le portate relative al sottobacino "A" sono state cautelativamente considerate nel presente studio come input nel tratto di monte del modello allestito; la differenza rispetto al bacino complessivo è stata introdotta come input integrativo alla sezione di sbocco della tombinatura costituita dai due DN1000.

Corso d'acqua	Area Bacino	Portate di riferimento		
		TR50	TR200	TR500
	S [km²]	Q [m³/s]	Q [m³/s]	Q [m³/s]
Tombone (FM_TO-A)	1,09	21,61	26,25	29,30
Sottobacino "A"	0,89	17,56	21,34	23,82

Tabella 3 - Portate di piena di riferimento.

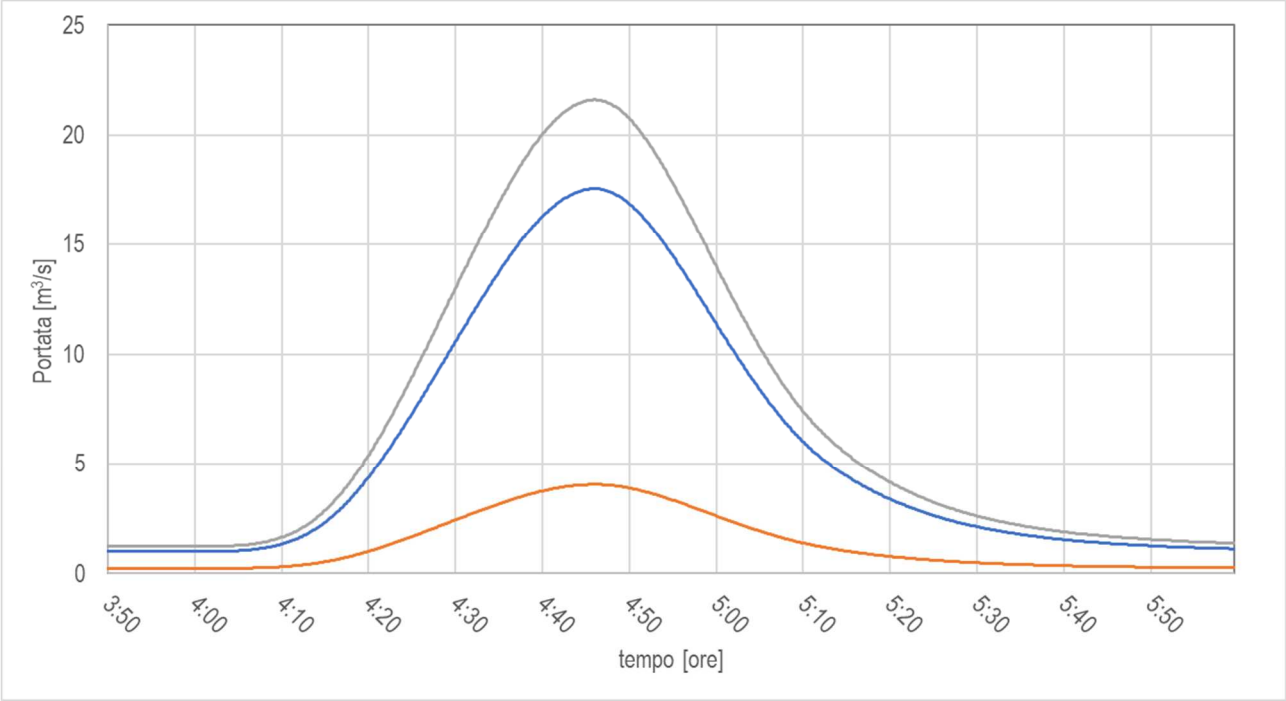


Figura 23 – Idrogrammi di piena per TR = 50 anni per l'intero bacino del Fosso Tombone (FM_TO-A, riga grigia), per il sottobacino "A" (riga blu) e idrogramma residuo ottenuto come differenza tra i due.

6. ALLESTIMENTO DEL MODELLO NUMERICO

Le analisi idrauliche per la caratterizzazione dell'idrodinamica di piena del Fosso Tombone sono state condotte mediante la messa a punto e applicazione di un modello numerico idrodinamico bidimensionale in moto vario, dinamicamente accoppiato a un modello monodimensionale descrittivo 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 (MATTM).

Al fine della caratterizzazione geometrica dell'alveo inciso e delle opere di attraversamento presenti sono state integrate le informazioni geometriche derivanti dal DTM citato, dai rilievi in campo eseguiti per il presente progetto e per gli studi pregressi citati (2019 e 2020) e dalla documentazione "storica" (1971) relativa al progetto di sistemazione del corso d'acqua in esame in corrispondenza dell'area ENEL.

6.1 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 in precedenza.

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 relative all'inviluppo dei massimi valori raggiunti.

In allegato si fornisce rappresentazione di tutte le sezioni implementate nel modello monodimensionale (sia per la configurazione di stato attuale che di progetto), con indicazione del massimo livello di piena risultante per l'evento di piena associato a TR=200 anni.

6.2 Schema del modello di stato attuale

6.2.1 Modello MIKE11

Il modello monodimensionale schematizzato nel codice MIKE11 HD (modulo idrodinamico) è costituito da 40 sezioni trasversali, che rappresentano la geometria degli alvei incisi del Fosso Tombone (circa 1,13 km) e del Fosso di Calcinara nel tratto di confluenza (circa 0,56 km). Quest'ultimo è stato inserito per assegnare più correttamente le condizioni al contorno di valle all'alveo del Tombone, in quanto le dinamiche di deflusso in quest'ultimo sono influenzate dai rilevanti livelli idrici che si instaurano nei tratti più a valle al deflusso delle portate di piena di riferimento.

In Figura 24 e Figura 25 si riporta l'estensione del modello (traccia dell'asse e delle sezioni utilizzate) su base foto aerea recente (2018, Google), in coordinate UTM 32 WGS84.

Le sezioni trasversali inserite nel modello sono frutto del confronto e dell'integrazione delle geometrie rilevate durante i sopralluoghi, dalla base dati fornita dal DTM LiDAR e dagli elaborati dei progetti pregressi precedentemente citati, al fine di rappresentare accuratamente lo stato attuale dell'alveo e delle aree circostanti.

Il modello di stato attuale non è stato variato rispetto a quello dello studio Fi.l.s.e. del 2020, sulla base del quale sono state riperimetrate le fasce di pericolosità per l'area di studio ottenendo la configurazione attualmente vigente (v. capitolo 2).

Tale scelta deriva da una motivazione di coerenza con l'iter pregresso che ha portato a identificare la necessità degli interventi di mitigazione del rischio idraulico oggetto del progetto definitivo in esame. Dagli approfondimenti di rilievo eseguiti nella presente fase progettuale si è in realtà riscontrato un tracciato del tratto tombato attuale (costituito dalle due tubazioni DN1000) diverso da quello precedentemente ipotizzato e maggiormente sfavorevole dal punto di vista idraulico, quindi potenzialmente in grado di produrre un ulteriore aggravio delle esondazioni nel tratto di monte. Tuttavia, tale eventuale aggravio è irrilevante per le finalità del presente progetto, in quanto l'intervento prevede la completa demolizione del tratto difforme e il rifacimento con nuova geometria, per cui le esondazioni imputabili alla scarsa capacità di deflusso di questo tratto saranno comunque annullate.

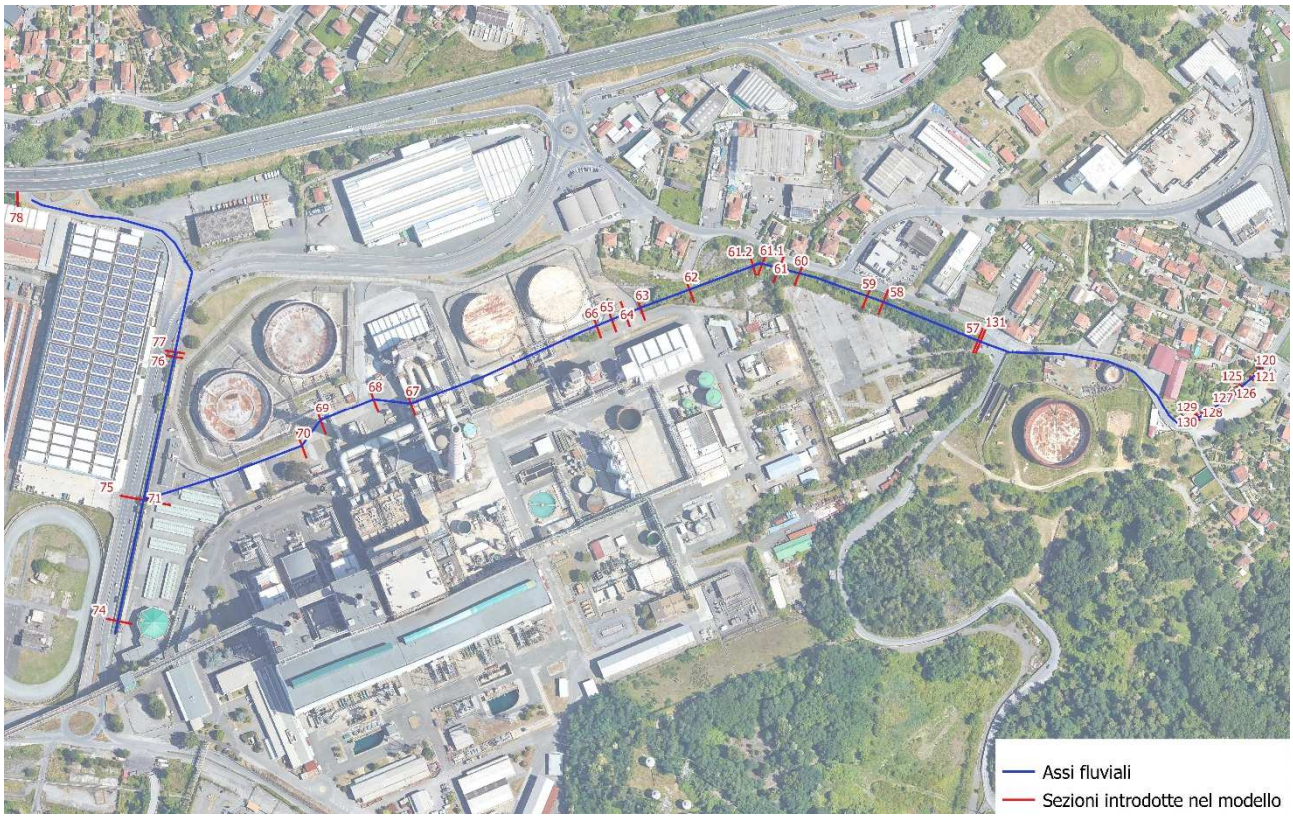


Figura 24 – Network del modello MIKE11 allestito per la descrizione del Fosso Tombone.



Figura 25 – Network del modello MIKE11 allestito per la descrizione del Fosso Tombone (zoom del tratto di monte).

In corrispondenza di attraversamenti e tombinature 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, in pressione e di eventuale sormonto dell'impalcato, calcolando opportunamente le perdite di carico che si manifestano. Per i salti di fondo (soglie e briglie) si sono inserite analogamente strutture di tipo "weir".

6.2.2 Modello MIKE21

Come già descritto, per l'analisi della propagazione della piena del corso d'acqua in esame è stato allestito un modello MIKE Flood che accoppia dinamicamente il modello monodimensionale MIKE11 (descritto nel capitolo 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 si è utilizzata come base topografica di partenza il modello digitale del terreno da volo LiDAR acquisito dal MATTM, ad una risoluzione spaziale di 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, delle strutture interferenti e delle possibili vie di deflusso

conseguenti a fenomeni di esondazione. Si è deciso pertanto di adottare una griglia di calcolo piuttosto fitta, a maglia 2,0 x 2,0 m, composta da 540 righe e 400 colonne (216.000 punti di calcolo).

Nella Figura 26 è riportata la batimetria (o geometria di input) complessiva del modello.

In colore fucsia sono evidenziate le zone escluse dal calcolo (celle inattive) perché considerate sicuramente non allagabili (aree con quote superiori ai 119 m s.m.) o perché ricadenti all'interno dei rami di alveo inciso appartenenti al dominio del modello monodimensionale MIKE11 (il contributo di tali celle al deflusso della piena infatti viene già descritto da quest'ultimo modello).

Inoltre è stata inserita la geometria dei fabbricati presenti all'esterno all'alveo modificando la quota delle celle della batimetria che ricadono all'interno della loro impronta (per le finalità della modellazione la quota edifici è stata imposta a 119 m s.m.). Per poter fornire una rappresentazione il più possibile aderente all'effettivo assetto di stato attuale dei luoghi, l'analisi dei fabbricati presenti è stata condotta sulla base di foto aerea recente (Google, 2018).

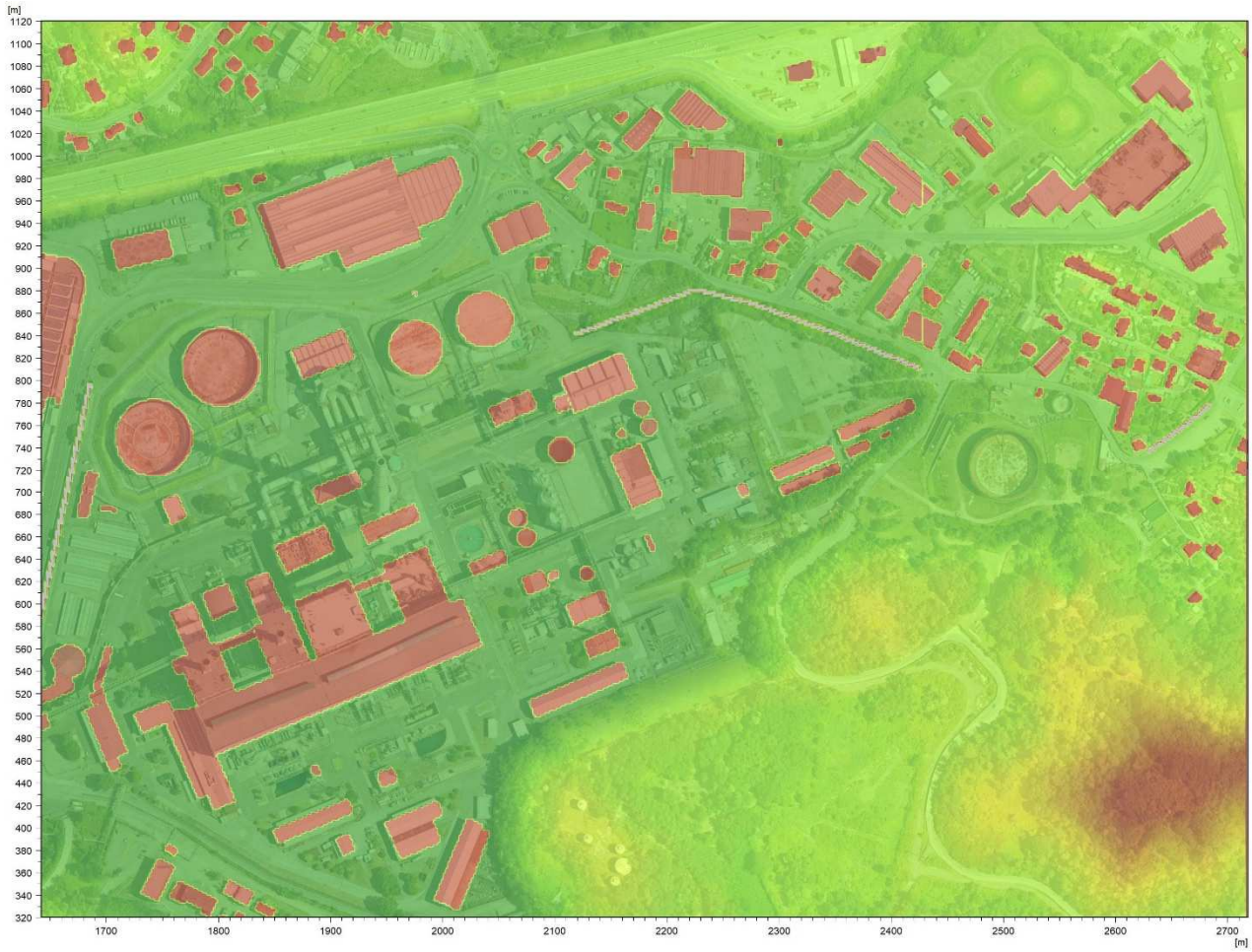


Figura 26 – Batimetria del modello 2D delle aree di propagazione della piena del Fosso Tombone, a maglia 2,0x2,0 m (dominio di calcolo complessivo).

6.3 Schema del modello di progetto

6.3.1 Modello MIKE11

Il modello monodimensionale schematizzato nel codice MIKE11 HD (modulo idrodinamico) è, per quanto riguarda le aste del Calcinara e del Tombone a valle dello sbocco della tombinatura (presso l'incrocio tra via delle Pianazze e via Valdilocchi), del tutto analogo in termini geometrici a quello di stato attuale.

Il tratto di Fosso Tombone più a monte, oggetto di intervento, è invece caratterizzato dalla geometria prevista dagli interventi in progetto, ovvero:

- un tratto a cielo aperto di estensione pari a circa 69 m caratterizzato da sezione rettangolare in calcestruzzo di dimensione B x H = 2,5 m x 2,0 m;
- un tratto di tombinatura di estensione pari a circa 254 m caratterizzato da sezione scatolare in calcestruzzo di dimensione B x H = 2,5 m x 2,1 m.

In Figura 27 e Figura 28 si riporta l'estensione del modello dell'asta del Tombone interessato dagli interventi in progetto e un dettaglio del tratto di monte; sono riportate la tracce dell'asse e delle sezioni utilizzate su base foto aerea recente (2018, Google), in coordinate UTM 32 WGS84.

Si precisa come il tracciato di progetto sia differente da quello di stato attuale (in termini di posizione planimetrica e progressive), per cui non si ha corrispondenza diretta tra i due set di sezioni (anche ove mantengano lo stesso nome), tranne la prima e l'ultima.

In corrispondenza di attraversamenti e tombinature 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, in pressione e di eventuale sormonto dell'impalcato, calcolando opportunamente le perdite di carico che si manifestano. Per i salti di fondo (soglie e briglie) si sono inserite analogamente strutture di tipo "weir".

6.3.2 Modello MIKE21

Analogamente allo stato attuale, anche per lo stato di progetto si è allestito un modello MIKE Flood che accoppia dinamicamente il modello monodimensionale MIKE11 (descritto nel capitolo 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 la medesima utilizzata per lo stato attuale, descritta nel precedente capitolo 6.2.2.; la batimetria complessiva del modello è rappresentata in Figura 26.



Figura 27 – Network del modello MIKE11 allestito per la descrizione del Fosso Tombone (porzione interessata dagli interventi in progetto).



Figura 28 – Dettaglio del primo tratto di monte del Fosso Tombone interessato dagli interventi in progetto.

7. CONDIZIONI AL CONTORNO

Il modello di simulazione, oltre alla descrizione geometrica, necessita 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 sull'asta del corso d'acqua e la documentazione progettuale disponibile 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, come riscontro, valori tipici di riferimento riscontrabili in letteratura tecnica (Tabella 5).

In accordo con i valori prescritti dalle NTA (allegato 3) si è adottato per il modello monodimensionale un valore del coefficiente di scabrezza *Ks* di Gauckler-Strickler pari a 30 $m^{1/3}/s$ lungo i tratti di alveo naturale e di 45 $m^{1/3}/s$ lungo i tratti rivestiti, coperti (manufatti di attraversamento viario e ferroviario e tombinature) o a cielo aperto.

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 $m^{1/3}/s$, mentre a quelle pavimentate un coefficiente di 50 $m^{1/3}/s$.

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.

Descrizione corso d'acqua	Coeff. di scabrezza di Gauckler Strickler Ks [$m^{1/3}*s^{-1}$]
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.

Natura della superficie	Scabrezza omogenea equivalente ε (mm) [mm]	Bazin γ [$m^{1/2}$]	Kutter m [$m^{1/2}$]	Manning n [$m^{-1/3}*s$]	Gauckler Strickler Ks [$m^{1/3}*s^{-1}$]
Pareti di cemento perfettamente lisciato. 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 lisciato. Muratura di mattoni molto regolare. Pareti metalliche con chiodatura ordinaria	0,4 ÷ 1,0	0,16	0,20 ÷ 0,25	0,013	85 ÷ 75
Pareti di cemento in non perfette condizioni. Muratura orinaria 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 ci 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 5 – Valori tipici di riferimento da letteratura tecnica dei coefficienti di scabrezza per l'alveo inciso.

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 0,25 secondi.

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 1,0 m^2/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.

Sia per lo stato attuale che per quello di progetto, 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 nel Fosso di Calcinara a valle della confluenza del Tombone.

Per quanto riguarda l'asta del Tombone, sia per lo stato attuale che per quello di progetto nella prima sezione di monte del modello è stato inserito l'idrogramma di portata calcolato per il sottobacino "A" (v. capitolo 5) secondo diversi scenari con tempo di ritorno di 50, 200 e 500 anni.

Nella sezione a valle dello sbocco della tombinatura, anche in questo caso sia per lo stato attuale che per quello di progetto, è stato invece introdotto come input l'idrogramma residuo rispetto a quello del bacino totale.

La condizione idrodinamica di valle del modello è definita sulla sezione di valle del tratto di Fosso di Calcinara rappresentato (sezione 74), immediatamente a monte dell'imbocco della tombinatura terminale. In particolare è stato inserito l'idrogramma di livello estratto (per ciascun tempo di ritorno) dai risultati delle simulazioni condotte per il sistema idrodinamico complessivo del bacino del Fossamastra nel già citato studio del Comune del 2019, in modo da tenere implicitamente conto anche dell'effetto dei tratti fluviali più a valle.

Analogamente, per mantenere la coerenza idrodinamica del tratto, in testa al tratto di Fosso di Calcinara rappresentato è stato introdotto in input l'idrogramma di portata estratto dai risultati dello studio pregresso per la sezione a monte della confluenza del Fosso Tombone.

A titolo di esempio si riportano in Figura 29 l'idrogramma di livello per tempo di ritorno di 50 anni assegnato come condizione di valle, a confronto con quelli estratti dai risultati del presente studio alla confluenza del Tombone e a monte del tratto del Fosso di Calcinara (riferimento alla simulazione di stato attuale). Si osserva come il livello risulti pressoché orizzontale sul tratto (variabile tra 7,22 e 7,10 m s.m.).

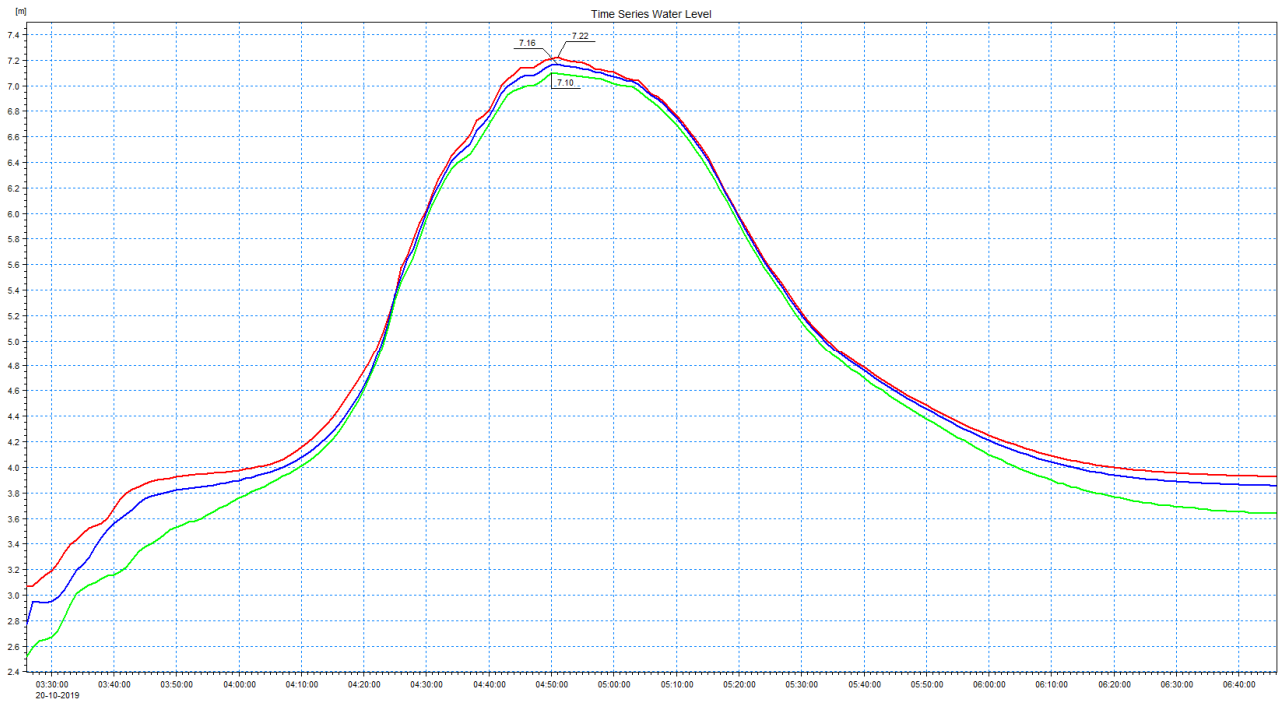


Figura 29 – Idrogrammi di livello sull'asta fluviale del Fosso di Calcinara per tempo di ritorno di 50 anni (stato attuale): condizione di valle (linea verde), confluenza Tombone (linea blu), inizio tratto di monte (linea rossa).

Si riscontra inoltre una minima differenza tra i vari tempi di ritorno (livelli massimi assunti a valle pari a 7,10 m s.m., 7,18 m s.m. e 7,21 m s.m. rispettivamente per 50, 200 e 500 anni), in quanto il tratto è rigurgitato dal sistema idrodinamico di valle e inoltre già per TR50 si hanno livelli nel Calcinara di incipiente sormonto (sezione pressoché a bordi pieni), con fuoriuscita di portata per TR200 e TR500 che minimizza l'escursione di livello.

Si precisa come nel presente studio, per prendere in esame il solo effetto del Fosso Tombone in termini di propagazione delle esondazioni, il ramo 1D del Fosso di Calcinara non sia stato collegato con il modello 2D, per cui da esso non si verificano esondazioni (il livello imposto a valle tiene comunque conto del comportamento effettivo riscontrato dalle simulazioni condotte nello studio pregresso).

Si evidenzia inoltre come la condizione di valle assunta (Calcinara all'incirca a bordi pieni in corrispondenza del colmo di portata) sia particolarmente gravosa per il deflusso della piena del Fosso Tombone, in quanto la sezione di confluenza di quest'ultimo, tombinata, è posta sul fondo alveo del corpo idrico recettore (cfr. Figura 14). I livelli idrici di Calcinara sono dunque di per sé già sufficienti a causare il funzionamento in pressione della tombinatura terminale del Tombone al di sotto dell'area ENEL per tutti i tempi di ritorno considerati.

8. RISULTATI – STATO ATTUALE

I risultati delle simulazioni effettuate con il modello integrato mono-bidimensionale sono illustrati nei capitoli seguenti mediante l'ausilio di rappresentazioni grafiche esplicative quali:

- mappe delle aree di esondazione con rappresentazione dei valori massimi di inviluppo delle altezze idriche e velocità sul piano campagna;
- profili longitudinali di inviluppo dei massimi livelli idrici lungo l'alveo inciso dei corsi d'acqua.

I parametri idraulici non sono definiti in corrispondenza delle strutture inserite all'interno dei modelli numerici monodimensionali (quali attraversamenti, tombini o salti di fondo); per queste si fa riferimento alla sezione immediatamente a monte (con riferimento alla quale, ad esempio, vengono definiti il livello idrico e il carico cinetico per la valutazione del franco idraulico di un attraversamento).

Non sono restituiti i risultati sulle sezioni interpolate (introdotte unicamente per migliorare l'integrazione delle equazioni del moto ottimizzando il passo spaziale).

I risultati esposti fanno riferimento ai seguenti 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.

8.1 Scenario TR50 (tempo di ritorno 50 anni)

Nella Tabella 6 sono elencati i principali parametri idrodinamici relativi agli alvei incisi delle aste del reticolo idrografico considerato (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 50 anni, intesi come inviluppo dei valori massimi.

In Figura 30 è rappresentato graficamente il profilo di corrente del medesimo scenario.

I parametri relativi al Fosso di Calcinara sono inclusi in tabella per completezza, ma si precisa come l'inserimento di questo ramo abbia la sola funzione di definire condizioni di valle per il ramo del Fosso Tombone che risultino coerenti con l'assetto idrodinamico del reticolo idrografico a valle, definito nell'ambito dello studio pregresso del Comune citato in premessa. La verifica idraulica di tali Fossi esula quindi dall'obiettivo del presente studio.

Corso d'acqua	Note	Sezione	Progressiva	Fondo alveo	Tirante	Livello idrico	Carico totale	Portata	Velocità	Froude
		-	m	m s.m.	m	m s.m.	m s.m.	m^3/s	m/s	-
Tombone monte	imbocco sezione chiusa a volta	120	0,00	15,88	2,09	17,97	19,81	17,56	6,01	1,33
Tombone monte	sbocco sezione chiusa a volta	121	5,27	15,78	2,08	17,86	19,70	17,56	6,01	1,33
Tombone monte		122	6,27	15,76	2,08	17,84	19,51	17,56	5,72	1,30
Tombone monte		123	7,46	15,70	2,11	17,81	19,42	17,56	5,63	1,27
Tombone monte		124	12,27	15,51	2,20	17,71	19,10	16,85	5,22	1,15
Tombone monte	monte ponte	125	24,00	15,08	2,47	17,55	18,20	11,38	3,57	0,77
Tombone monte	valle ponte	126	27,36	15,06	2,02	17,08	17,93	10,30	4,09	0,99
Tombone monte		127	33,95	15,01	1,93	16,94	17,92	10,47	4,38	1,05
Tombone monte		128	69,47	14,77	1,52	16,29	17,05	7,28	3,87	1,05
Tombone monte	imbocco tombinatura	129	73,95	14,40	1,85	16,25	16,40	6,31	1,71	0,40
Tombone monte	monte tombinatura	130	76,00	14,36	1,91	16,27	16,40	6,10	1,60	0,37
Tombone monte	valle tombinatura	131	304,10	9,80	0,72	10,52	11,71	6,09	4,83	1,94
Tombone		57	0,00	9,30	1,22	10,52	10,68	6,09	1,77	0,53
Tombone		58	94,12	7,55	1,52	9,07	9,55	13,36	3,07	0,81
Tombone		59	110,10	7,24	1,56	8,80	9,31	14,10	3,16	0,83
Tombone		60	176,32	5,95	1,80	7,75	8,13	14,10	2,72	0,66
Tombone		61	195,66	5,57	2,04	7,61	7,90	14,09	2,39	0,55
Tombone	monte ponte	61.1	211,66	5,26	2,35	7,61	7,85	13,30	2,19	0,49
Tombone	valle ponte	61.1	217,66	5,22	2,25	7,47	7,76	13,79	2,37	0,54
Tombone		61.2	220,00	5,10	2,29	7,39	7,72	14,10	2,54	0,59
Tombone		62	283,39	3,87	3,44	7,31	7,47	14,10	1,76	0,35
Tombone		62.5	328,72	3,68	3,71	7,39	7,44	11,29	1,02	0,22
Tombone	imbocco tombinatura	63	331,72	3,67	3,69	7,36	7,44	11,31	1,27	0,31
Tombone	tombinatura	64	346,94	3,59	3,76	7,35	7,43	11,31	1,27	0,31
Tombone	tombinatura	65	360,33	3,53	3,82	7,35	7,43	11,32	1,27	0,31
Tombone	tombinatura	66	375,49	3,45	3,89	7,34	7,42	11,32	1,27	0,31
Tombone	tombinatura	67	561,79	3,29	3,98	7,27	7,35	11,33	1,28	0,31
Tombone	tombinatura	68	596,41	3,26	3,99	7,25	7,33	11,33	1,28	0,31
Tombone	tombinatura	69	649,23	3,21	4,02	7,23	7,31	11,33	1,28	0,31
Tombone	tombinatura	70	678,60	3,18	4,04	7,22	7,30	11,33	1,28	0,31
Tombone	sbocco tombinatura	71	829,38	3,05	4,11	7,16	7,24	11,34	1,28	0,31
Calcinara	monte tombinatura	78	1200,39	4,50	3,17	7,67	7,80	19,33	1,59	0,32
Calcinara	confluenza Colombiera	77.1	1397,94	3,42	3,99	7,41	7,57	19,33	1,75	0,37
Calcinara	valle tombinatura	77	1460,85	3,08	4,06	7,14	7,42	26,01	2,36	0,50
Calcinara		76	1465,35	3,07	4,15	7,22	7,30	26,01	1,28	0,20
Calcinara	confluenza Tombone	75	1601,52	2,77	4,39	7,16	7,23	25,78	1,21	0,19
Calcinara		74	1715,79	2,52	4,58	7,10	7,22	33,63	1,52	0,24

Tabella 6 – Risultati di sintesi per lo scenario TR50.

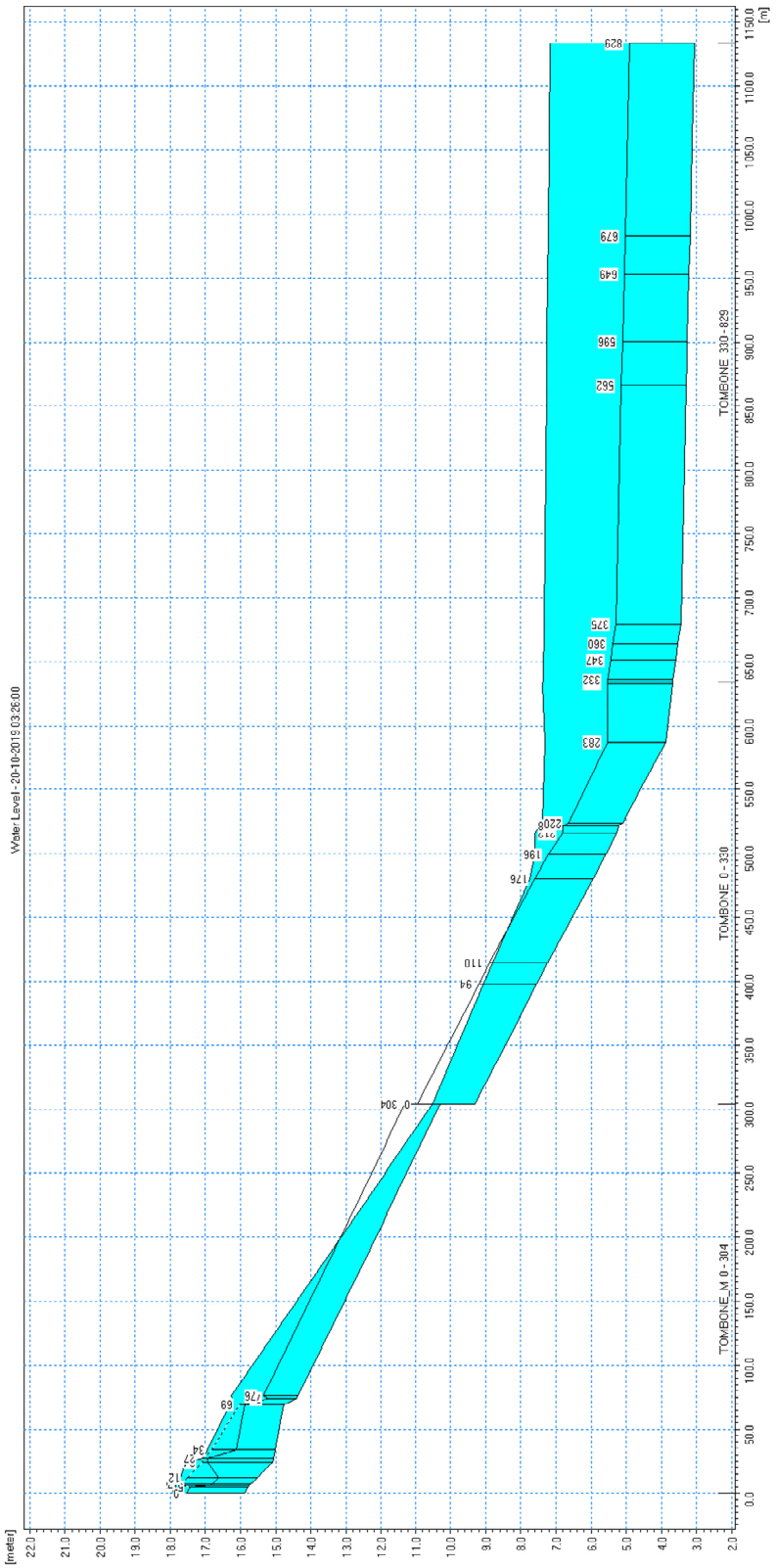


Figura 30 – Profilo longitudinale di corrente del fosso Tombone per lo scenario TR50.

Nel tratto di monte del Fosso Tombone oggetto di studio si riscontra come la tombinatura costituita dalle due tubazioni DN1000 risulti inadeguata al deflusso della portata di progetto (circa 17,6 m^3/s), funzionando in pressione.

Il deflusso dell'intera portata all'interno della sezione dei due tubi comporterebbe la presenza di una velocità media della corrente di circa 11,1 m/s, che da un lato è fisicamente improbabile raggiungere (al di sopra di circa 10 m/s la corrente diventa aerata, inglobando aria e incrementando significativamente i fenomeni dissipativi distribuiti), dall'altro per potersi instaurare comporterebbe la necessità di un carico idraulico a monte (equivalente alle perdite di carico su circa 230 m di tombinatura) di molti metri più alto delle quote di sponda del Fosso.

Si genera pertanto il sormonto delle sponde e la fuoriuscita di una cospicua portata, come rappresentato in Figura 31; nella tombinatura riesce a essere smaltita una portata massima di circa 6 m^3/s.

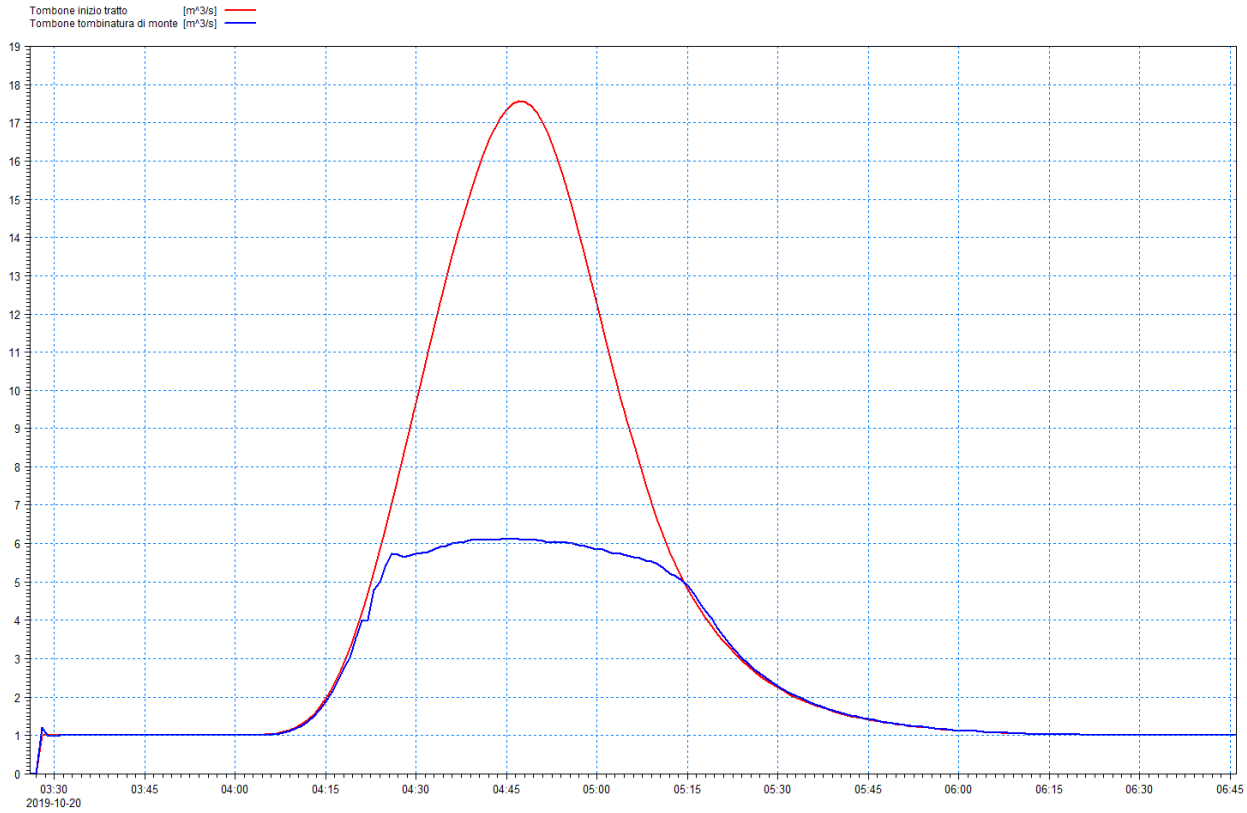


Figura 31 – Idrogramma di portata estratto dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 50 anni defluente all'interno della tombinatura costituita dalle due tubazioni DN1000 (linea blu), a confronto con l'idrogramma di input a inizio tratto (linea rossa).

Si evidenzia peraltro come, anche in assenza della tombinatura e del relativo effetto di rigurgito, la sezione d'alveo del tratto in esame risulti non sufficiente a contenere le portate di riferimento: da una verifica in condizioni di moto uniforme -considerando la geometria di stato attuale del corso d'acqua- il livello idrico risulterebbe superiore alla quota della strada già per TR50.

Allo sbocco della tombinatura il Fosso riceve in input l'idrogramma che rappresenta l'apporto del bacino residuo, oltre a deflussi di rientro verso l'alveo dalle aree circostanti di propagazione delle esondazioni. La portata torna quindi a valori di circa 14 m^3/s, che defluiscono nel tratto sistemato con rilevante effetto di rigurgito da parte dei livelli imposti a valle sul Fosso di Calcinara, soprattutto nel tratto a valle del ponticello.

A monte di quest'ultimo la portata risulta sostanzialmente contenuta dalle sponde della sezione sistemata in calcestruzzo, con deflusso circa a bordi pieni. La tombinatura di monte (i due tubi DN1000) non è rigurgitata dai livelli che si instaurano nell'alveo a valle e provoca quindi una disconnessione idraulica.

Il ponte, che mostra un funzionamento in pressione, provoca un effetto di rigurgito modesto, di circa 15 cm.

L'area ex ENEL oggetto della presente analisi non è quindi interessata da allagamenti diretti da parte del Fosso, risultando impostata ad una quota di circa 9,0 m s.m.

A valle il livello supera di circa 2 m la sponda sistemata in calcestruzzo; l'alveo è comunque piuttosto inciso rispetto ai piani circostanti, per cui il piano viabile di via delle Pianazze (circa 8,4-8,5 m s.m.) mostra più di 1 m di franco rispetto al livello di massima piena; l'area della centrale ENEL è invece impostata ad una quota inferiore (circa 6,2 m s.m.) per cui risulta interessata da allagamenti diretti, a seguito di sormonto del rilevato spondale che definisce la quota di ritenuta.

La Figura 32 rappresenta gli idrogrammi di portata in alcune sezioni dell'area della confluenza:

- confronto tra gli idrogrammi relativi al Fosso di Calcinara in input (sez.78) e in uscita (sez.74) dal modello, a seguito dei contributi del Tombone e dei due affluenti minori;
- idrogramma del Fosso Tombone alla confluenza a confronto con quello idrologico calcolato per il bacino complessivo: è possibile apprezzare l'effetto di laminazione e di ritardo del colmo prodotto dalle esondazioni a monte e dalla limitata capacità di smaltimento delle tombinature, oltre che l'entità del volume complessivo esondato.

La portata massima che il Fosso Tombone riesce a recapitare nel Calcinara è pari a circa 11,3 m^3/s, successivamente al transito del picco di portata sul Calcinara stesso (in corrispondenza del quale la portata massima smaltibile è di circa 8 m^3/s).

La portata esondata nel primo tratto di monte del Fosso Tombone inserito nel modello (a monte delle due tubazioni DN1000) allaga dapprima le aree a destinazione agricola in sponda destra, propagandosi verso valle in corrispondenza degli edifici di civile abitazione posti più a Ovest e raggiungendo quindi via delle Pianazze; al crescere delle portate l'esondazione avviene anche in sponda sinistra, con sormonti della sponda variabili tra 0,1 e 0,4 m e interessamento diretto di via delle Pianazze.

La portata prosegue lungo l'asse di tale viabilità verso Nord e verso Ovest, interessando le aree circostanti e in particolare allagando l'area limitrofa in cui è presente una grossa cisterna e delle infrastrutture impiantistiche. Tale area è perimetrata da una recinzione in lamiere metalliche, considerata permeabile sia per la presenza di un ampio cancello di ingresso che per la non idoneità di tale recinzione a fungere da ritenuta dei livelli idrici. Lato valle invece l'area è delimitata da un muro in calcestruzzo continuo di altezza superiore ai 2 m e raccordato con le quote di versante verso Sud; tale muro è stato quindi inserito nel modello 2D come elemento di ritenuta.

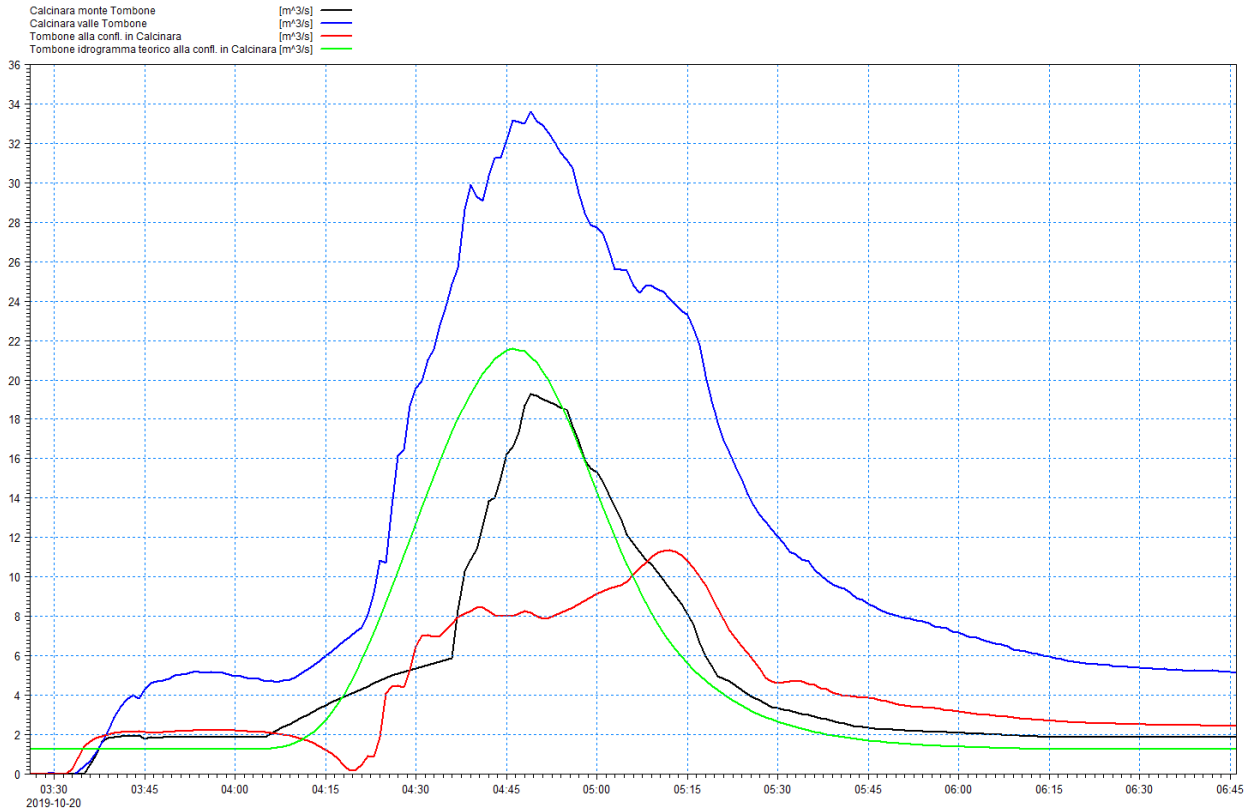


Figura 32 – Idrogrammi di portata estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 50 anni (stato attuale): portata nel Fosso di Calcinara in input (sez.78, linea nera) e in uscita dal modello (linea blu, con aggiunta dei contributi del Tombone e dei due affluenti minori a monte); portata nel Fosso Tombone alla confluenza con il Calcinara (linea rossa) a confronto con l'idrogramma idrologico per il bacino complessivo (linea verde).

L'area descritta si allaga con altezze d'acqua che crescono fino a sormontare il dosso presente presso il cancello di ingresso sul lato Nord verso via delle Pianazze, con portata che raggiunge nuovamente la carreggiata di quest'ultima.

Da qui i deflussi si propagano fino alla recinzione dell'area ex ENEL oggetto del presente studio e si suddividono tra la rampa di accesso a quest'ultima e la prosecuzione di via delle Pianazze verso Ovest.

L'area ex ENEL viene allagata dal flusso che proviene dalla rampa; la portata defluisce quindi verso la sottostante centrale ENEL e parzialmente rientra in alveo al Fosso Tombone dalla scarpata a Nord-Ovest.

La quota parte di portata che prosegue invece lungo via delle Pianazze rientra completamente nel sottostante Fosso Tombone (nel quale scaricano anche le acque meteoriche afferenti alla viabilità) nell'arco di circa 200 m.

In Figura 33 e Figura 34 sono rappresentate le distribuzioni delle massime altezze d'acqua sul piano campagna e delle massime velocità osservate per lo scenario TR50. In Figura 35 è rappresentato un dettaglio delle medesime distribuzioni sull'area di maggiore interesse per il presente studio.

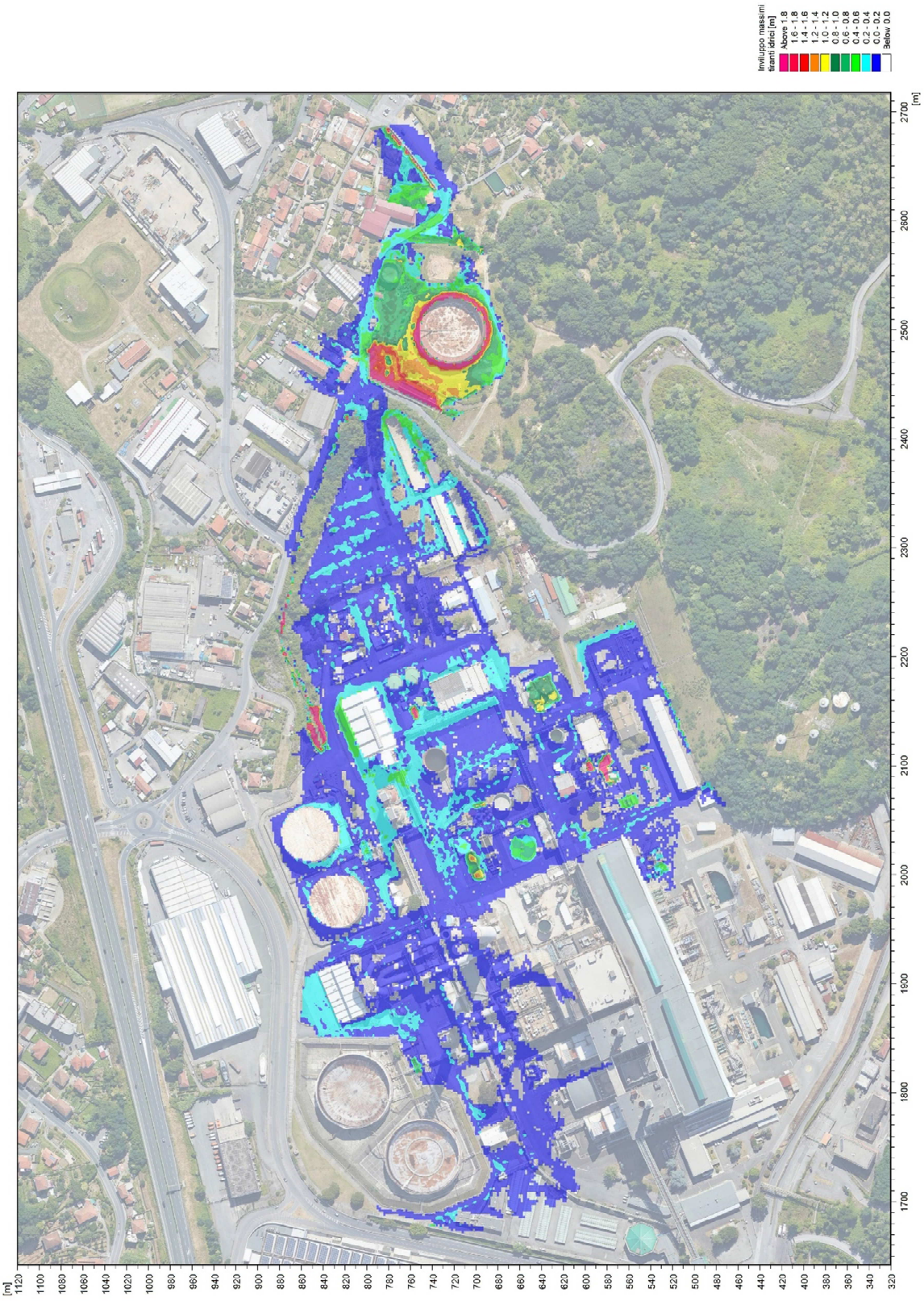


Figura 33 – Distribuzione inviluppo delle massime altezze idriche rispetto al piano campagna per TR=50 anni.

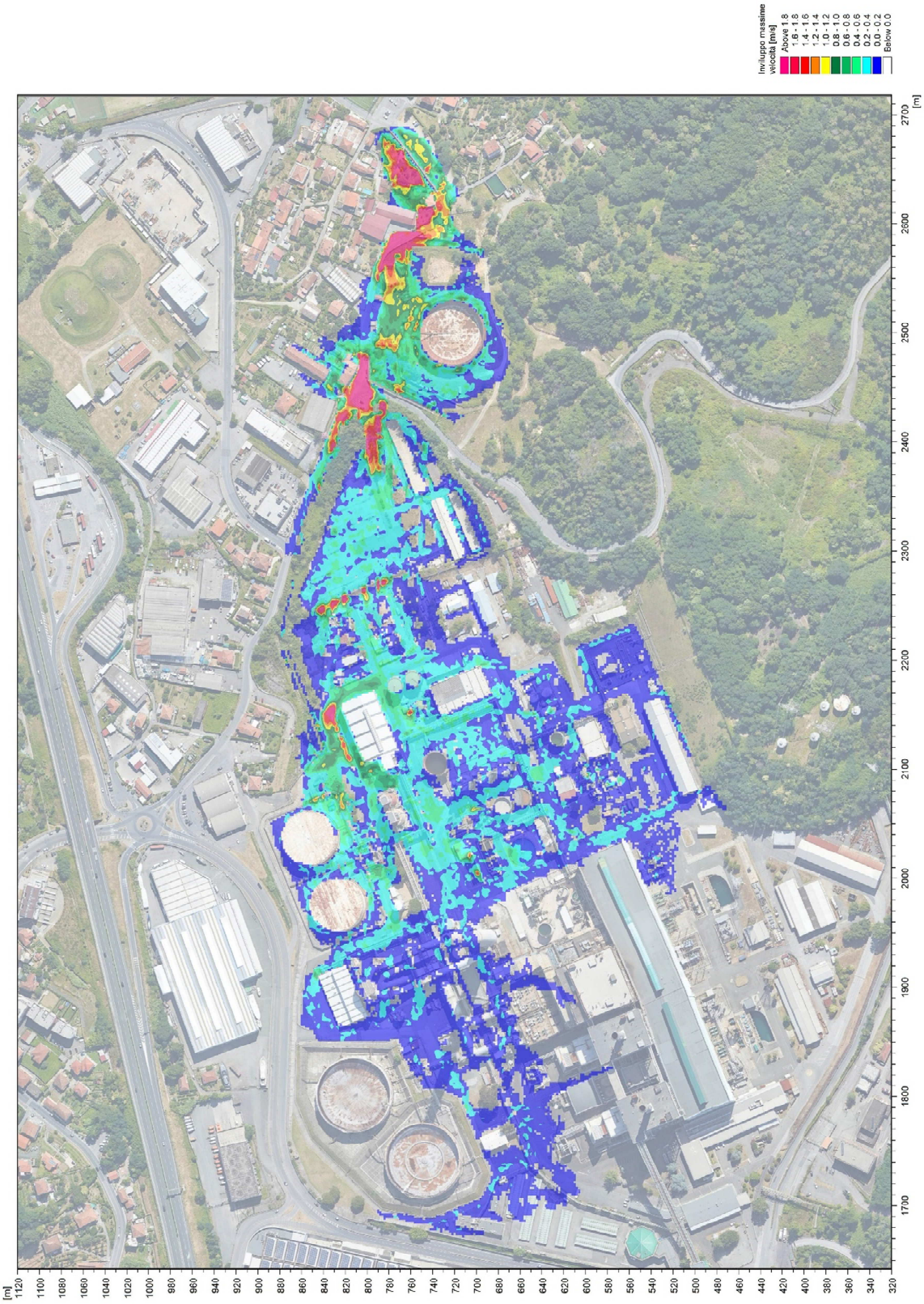


Figura 34 – Distribuzione inviluppo delle massime velocità di corrente per TR=50 anni.

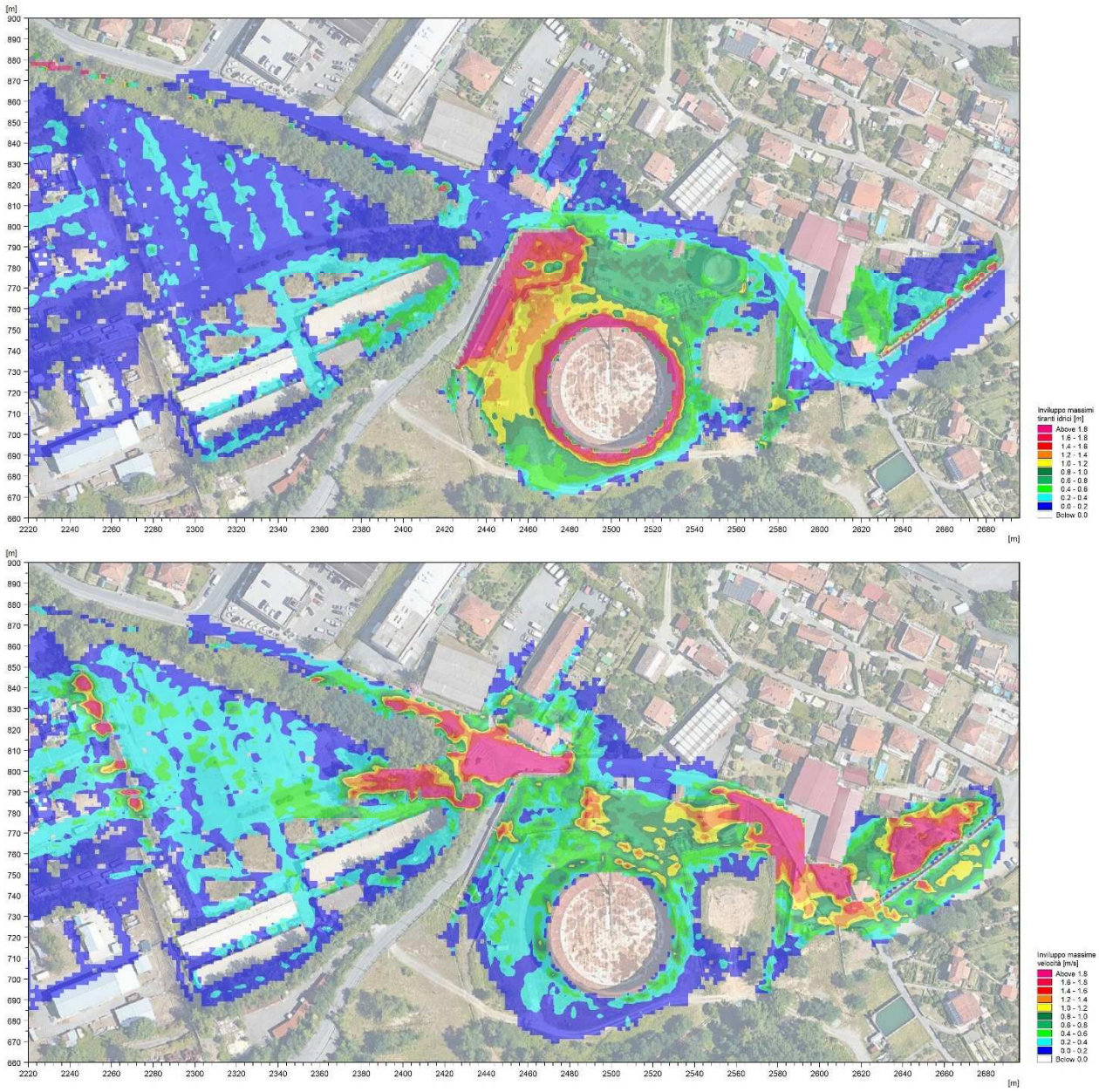


Figura 35 – Distribuzione inviluppo delle massime altezze idriche rispetto al piano campagna (sopra) e delle massime velocità (sotto) per TR=50 anni; zoom nell'area di maggior interesse per il presente studio.

8.2 Scenario TR200 (tempo di ritorno 200 anni)

Nella Tabella 7 sono elencati i principali parametri idrodinamici relativi agli alvei incisi delle aste del reticolo idrografico considerato (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 200 anni, intesi come inviluppo dei valori massimi.

In Figura 36 è rappresentato graficamente il profilo di corrente del medesimo scenario.

Nuovamente si precisa come i parametri relativi al Fosso di Calcinara siano inclusi in tabella per completezza, ma l'inserimento di questo ramo abbia la sola funzione di definire condizioni di valle per il ramo del Fosso Tombone coerenti con l'assetto idrodinamico del reticolo idrografico a valle, definito nell'ambito dello studio pregresso del Comune citato in premessa. La verifica idraulica di tali Fossi esula quindi dall'obiettivo del presente studio.

Corso d'acqua	Note	Sezione	Progressiva	Fondo alveo	Tirante	Livello idrico	Carico totale	Portata	Velocità	Froude
		-	m	m s.m.	m	m s.m.	m s.m.	m3/s	m/s	-
Tombone monte	imbocco sezione chiusa a volta	120	0,00	15,88	2,16	18,04	20,58	21,34	7,07	1,54
Tombone monte	sbocco sezione chiusa a volta	121	5,27	15,78	2,13	17,91	20,51	21,34	7,14	1,56
Tombone monte		122	6,27	15,76	2,13	17,89	20,23	21,34	6,77	1,52
Tombone monte		123	7,46	15,70	2,16	17,86	20,13	21,34	6,67	1,48
Tombone monte		124	12,27	15,51	2,24	17,75	19,73	20,49	6,23	1,36
Tombone monte	monte ponte	125	24,00	15,08	2,50	17,58	18,80	15,74	4,89	1,05
Tombone monte	valle ponte	126	27,36	15,06	2,25	17,31	18,71	14,97	5,23	1,19
Tombone monte		127	33,95	15,01	2,13	17,14	18,70	14,97	5,52	1,24
Tombone monte		128	69,47	14,77	1,56	16,33	17,13	7,66	3,97	1,06
Tombone monte	imbocco tombinatura	129	73,95	14,40	1,89	16,29	16,44	6,39	1,69	0,39
Tombone monte	monte tombinatura	130	76,00	14,36	1,95	16,31	16,44	6,18	1,59	0,36
Tombone monte	valle tombinatura	131	304,10	9,80	0,83	10,63	15,06	6,15	9,32	5,18
Tombone		57	0,00	9,30	1,33	10,63	10,77	6,15	1,64	0,47
Tombone		58	94,12	7,55	1,74	9,29	9,88	16,95	3,39	0,84
Tombone		59	110,10	7,24	1,77	9,01	9,66	18,11	3,56	0,87
Tombone		60	176,32	5,95	2,01	7,96	8,46	18,17	3,13	0,72
Tombone		61	195,66	5,57	2,23	7,80	8,20	18,19	2,81	0,61
Tombone	monte ponte	61.1	211,66	5,26	2,57	7,83	8,15	16,03	2,49	0,54
Tombone	valle ponte	61.1	217,66	5,22	2,38	7,60	8,00	17,31	2,80	0,62
Tombone		61.2	220,00	5,10	2,41	7,51	7,99	18,12	3,06	0,70
Tombone		62	283,39	3,87	3,46	7,33	7,59	18,13	2,27	0,44
Tombone		62.5	328,72	3,68	3,79	7,47	7,52	10,74	0,97	0,21
Tombone	imbocco tombinatura	63	331,72	3,67	3,77	7,44	7,51	10,77	1,21	0,29
Tombone	tombinatura	64	346,94	3,59	3,84	7,43	7,50	10,77	1,21	0,29
Tombone	tombinatura	65	360,33	3,53	3,90	7,43	7,50	10,77	1,21	0,29
Tombone	tombinatura	66	375,49	3,45	3,97	7,42	7,49	10,77	1,21	0,29
Tombone	tombinatura	67	561,79	3,29	4,06	7,35	7,43	10,79	1,22	0,29
Tombone	tombinatura	68	596,41	3,26	4,08	7,34	7,42	10,79	1,22	0,29
Tombone	tombinatura	69	649,23	3,21	4,11	7,32	7,40	10,79	1,22	0,29
Tombone	tombinatura	70	678,60	3,18	4,13	7,31	7,39	10,80	1,22	0,29
Tombone	sbocco tombinatura	71	829,38	3,05	4,22	7,27	7,35	10,80	1,22	0,29
Calcinara	monte tombinatura	78	1200,39	4,50	3,47	7,97	8,11	21,07	1,66	0,33
Calcinara	confluenza Colombiera	77.1	1397,94	3,42	4,25	7,67	7,86	21,07	1,91	0,41
Calcinara	valle tombinatura	77	1460,85	3,08	4,20	7,28	7,66	30,31	2,75	0,58
Calcinara		76	1465,35	3,07	4,28	7,35	7,46	30,31	1,45	0,22
Calcinara	confluenza Tombone	75	1601,52	2,77	4,50	7,27	7,37	30,54	1,40	0,22
Calcinara		74	1715,79	2,52	4,66	7,18	7,32	37,44	1,66	0,25

Tabella 7 – Risultati di sintesi per lo scenario TR200.

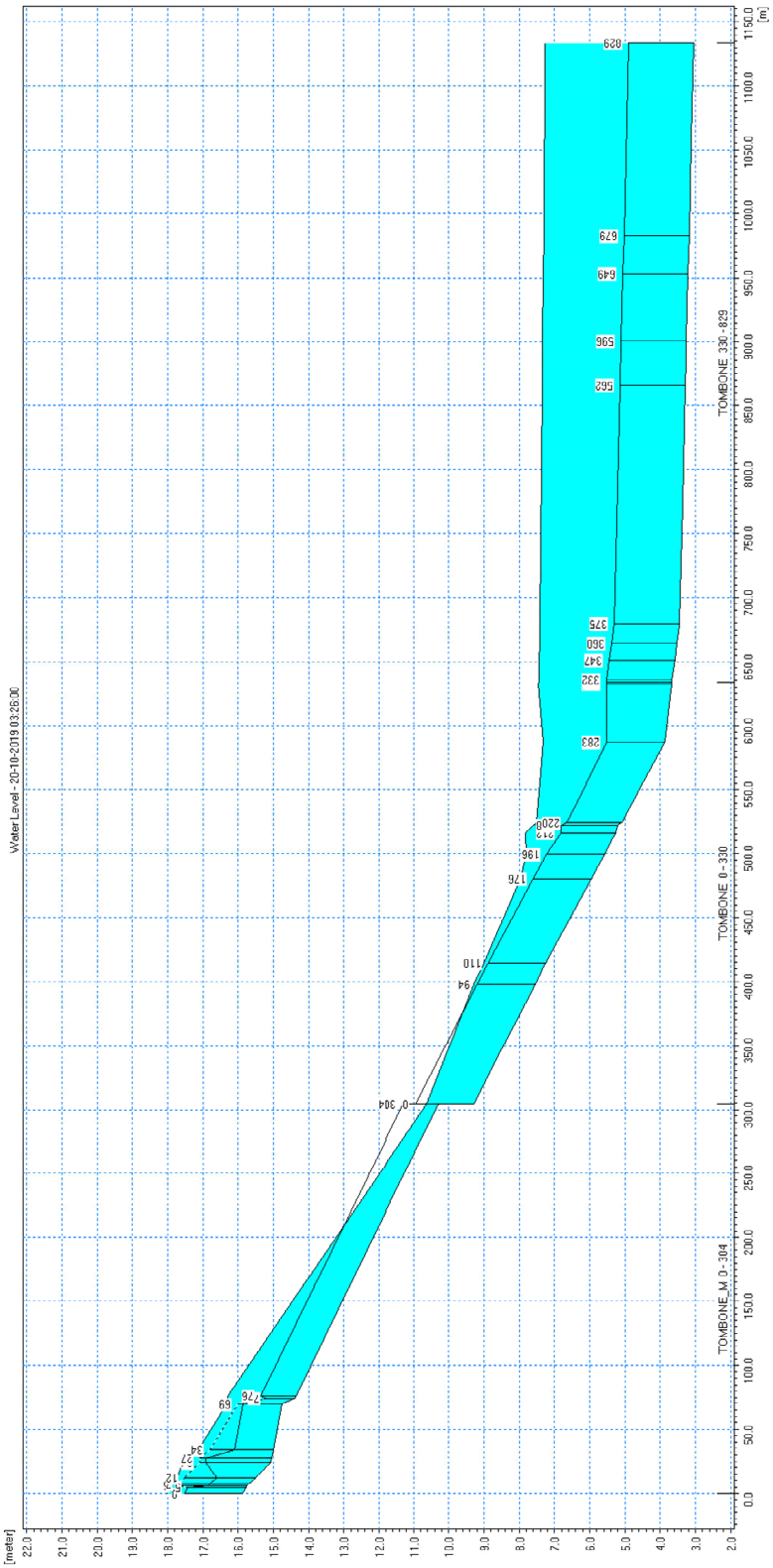


Figura 36 – Profilo longitudinale di corrente del fosso Tombone per lo scenario TR200.

I risultati ottenuti per lo scenario TR200 mostrano modalità di deflusso della piena, esondazione e propagazione dei deflussi sul piano campagna del tutto analoghe a quelle già descritte per l'evento cinquantennale, ma caratterizzate da maggiore intensità dei fenomeni (in termini sia di portate esondate che di livelli idrici e velocità massimi), in relazione alle maggiori portate afferenti.

Dagli idrogrammi di Figura 37 e Figura 38 si riscontra come la massima portata smaltibile dalla tombinatura costituita dalle due tubazioni DN1000 (circa 6 m^3/s) e recapitabile nel Fosso di Calcinara (circa 11 m^3/s) sia sostanzialmente la stessa osservata per TR50; in relazione al maggior volume dell'idrogramma duecentennale, l'entità delle esondazioni sarà superiore.

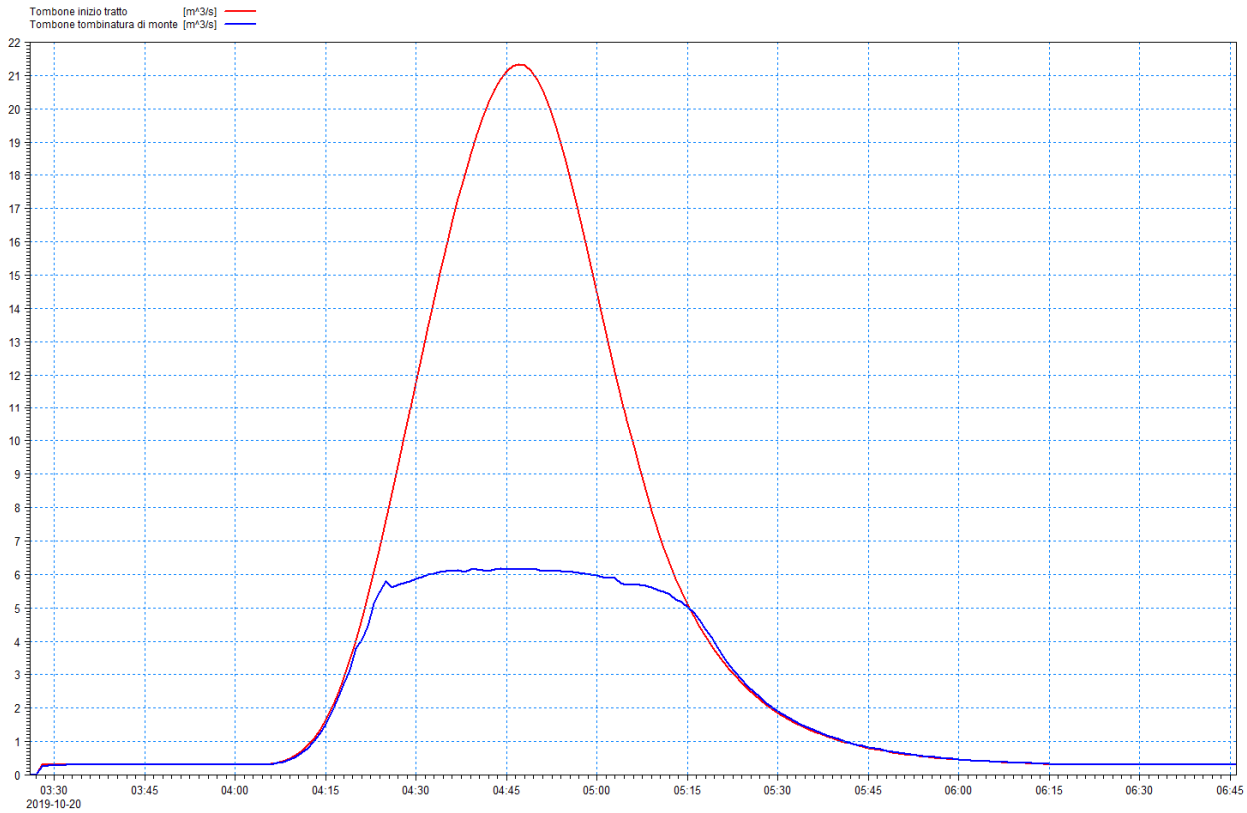


Figura 37 – Idrogramma di portata estratto dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 200 anni defluente all'interno della tombinatura costituita dalle due tubazioni DN1000 (linea blu), a confronto con l'idrogramma di input a inizio tratto (linea rossa).

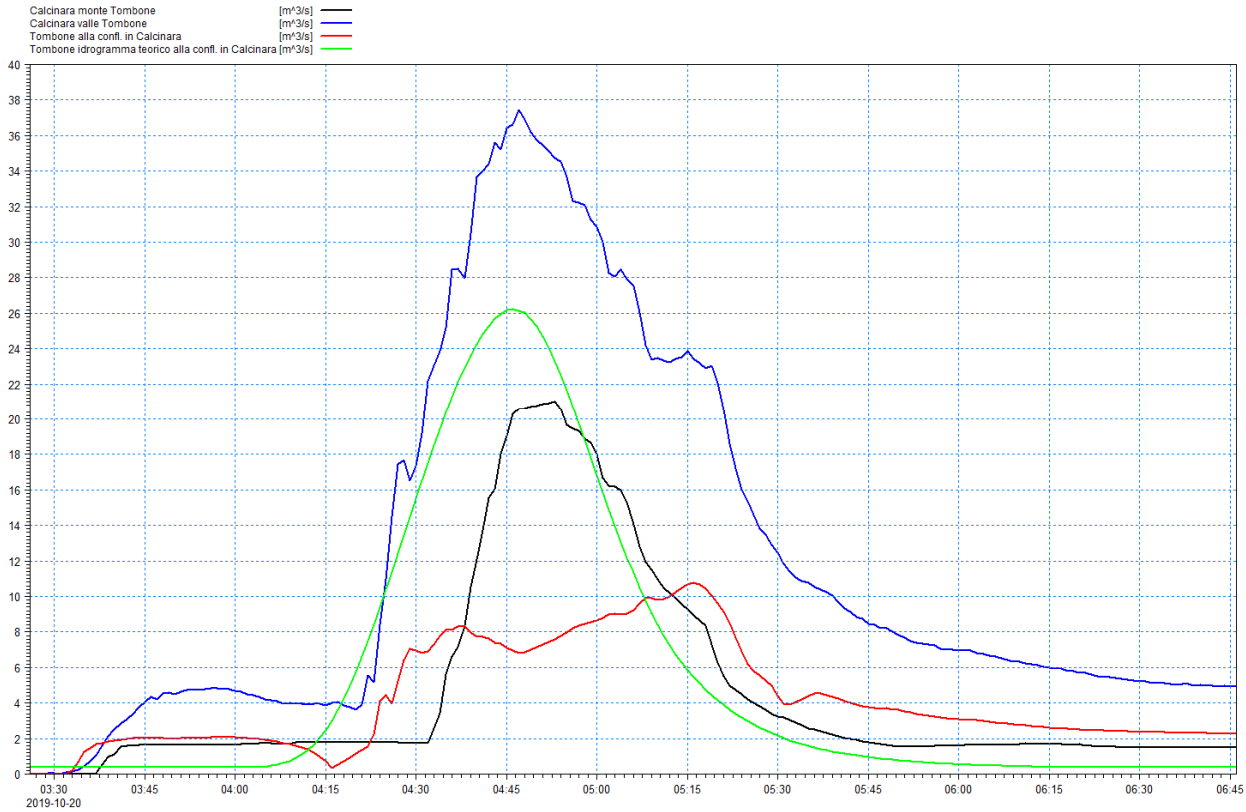


Figura 38 – Idrogrammi di portata estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 200 anni (stato attuale): portata nel Fosso di Calcinara in input (sez.78, linea nera) e in uscita dal modello (linea blu, con aggiunta dei contributi del Tombone e dei due affluenti minori a monte); portata nel Fosso Tombone alla confluenza con il Calcinara (linea rossa) a confronto con l'idrogramma idrologico per il bacino complessivo (linea verde).

L'estensione delle aree allagate, rappresentata in Figura 39, Figura 40 e Figura 41, non differisce molto da quella già esaminata per lo scenario TR50, riscontrando però una maggiore propagazione (in relazione ai maggiori flussi di ruscellamento) verso valle, interessando l'intera area della centrale ENEL, e lateralmente nel primo tratto di monte.

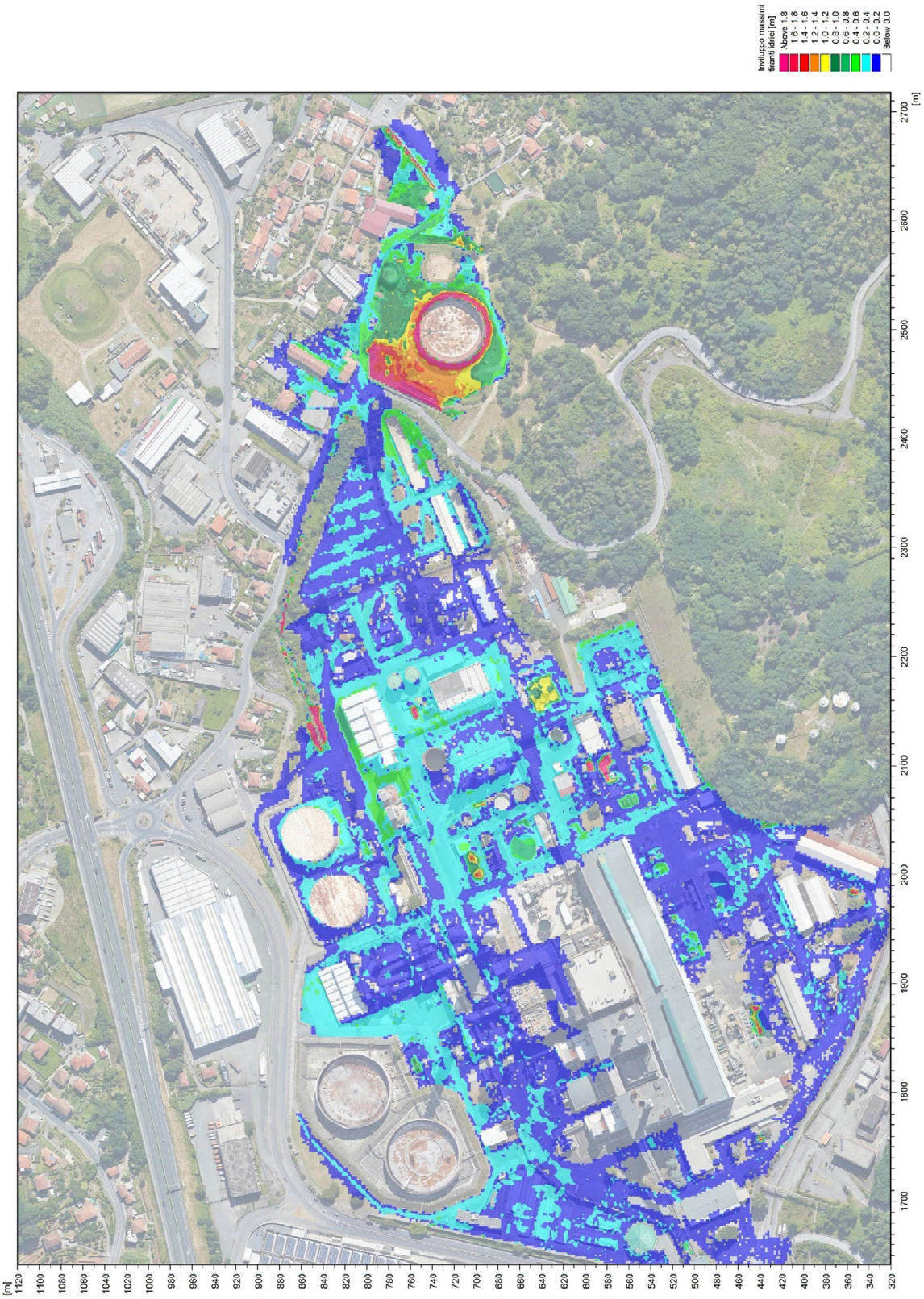


Figura 39 – Distribuzione inviluppo delle massime altezze idriche rispetto al piano campagna per TR=200 anni.

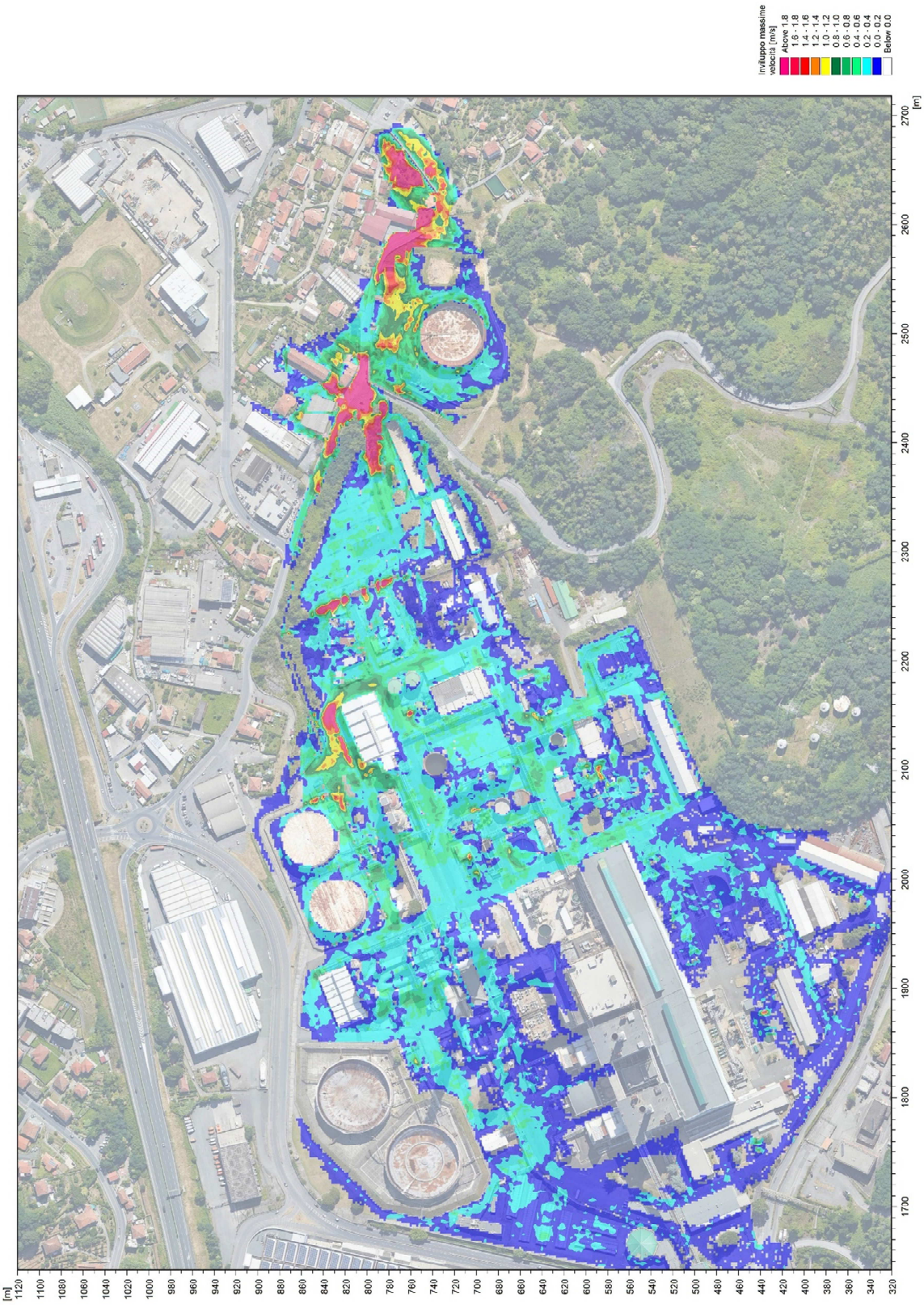


Figura 40 – Distribuzione inviluppo delle massime velocità di corrente per TR=200 anni.

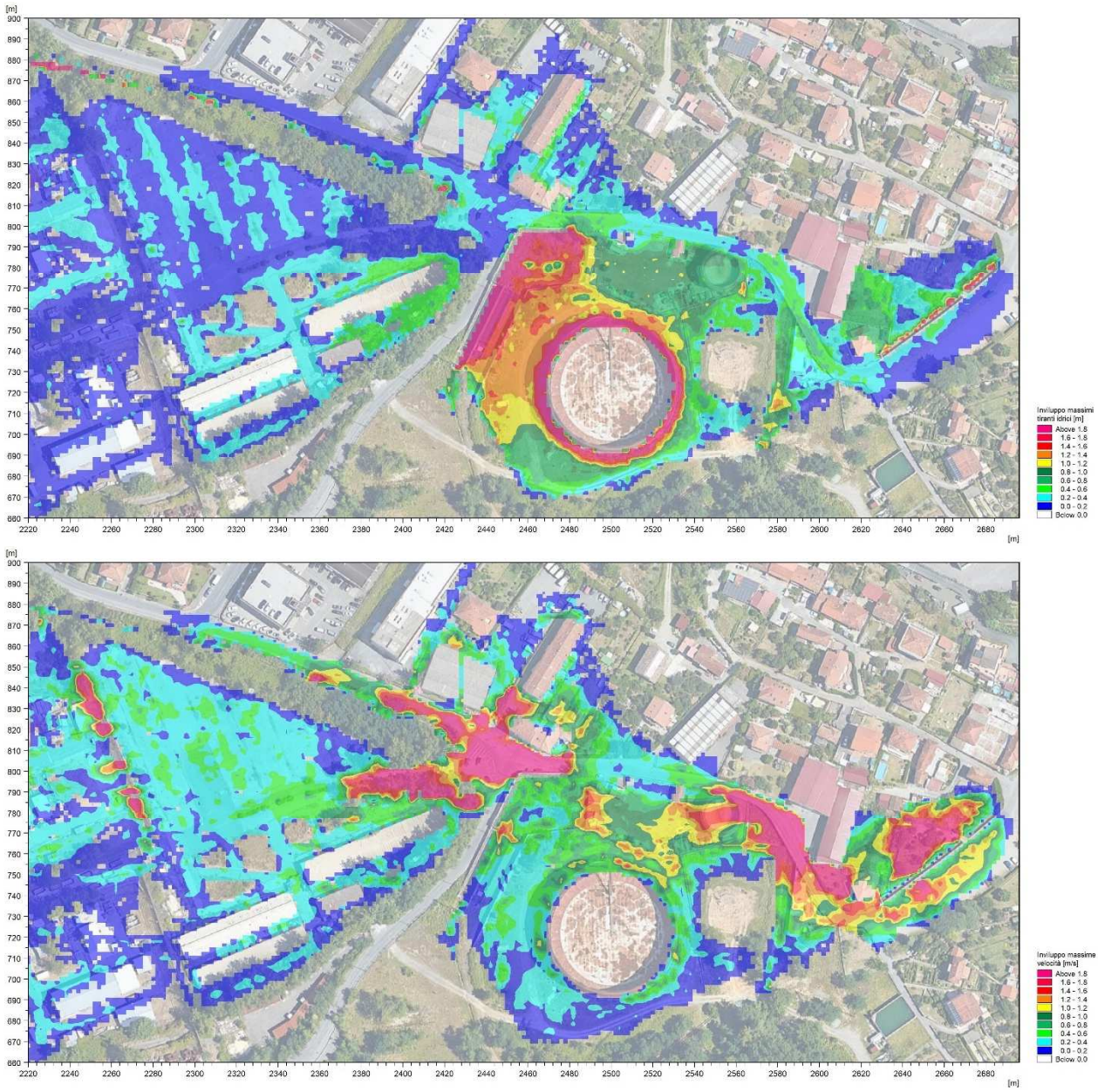


Figura 41 – Distribuzione inviluppo delle massime altezze idriche rispetto al piano campagna (sopra) e delle massime velocità (sotto) per TR=200 anni; zoom nell'area di maggior interesse per il presente studio.

8.3 Scenario TR500 (tempo di ritorno 500 anni)

Nella Tabella 8 sono elencati i principali parametri idrodinamici relativi agli alvei incisi delle aste del reticolo idrografico considerato (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 500 anni, intesi come inviluppo dei valori massimi.

In Figura 42 è rappresentato graficamente il profilo di corrente del medesimo scenario.

Nuovamente si precisa come i parametri relativi al Fosso di Calcinara siano inclusi in tabella per completezza, ma l'inserimento di questo ramo abbia la sola funzione di definire condizioni di valle per il ramo del Fosso Tombone coerenti con l'assetto idrodinamico del reticolo idrografico a valle, definito nell'ambito dello studio pregresso del Comune citato in premessa. La verifica idraulica di tali Fossi esula quindi dall'obiettivo del presente studio.

Corso d'acqua	Note	Sezione	Progressiva	Fondo alveo	Tirante	Livello idrico	Carico totale	Portata	Velocità	Froude
		-	m	m s.m.	m	m s.m.	m s.m.	m3/s	m/s	-
Tombone monte	imbocco sezione chiusa a volta	120	0,00	15,88	2,23	18,11	21,08	23,82	7,63	1,63
Tombone monte	sbocco sezione chiusa a volta	121	5,27	15,78	2,19	17,97	21,04	23,82	7,76	1,67
Tombone monte		122	6,27	15,76	2,18	17,94	20,71	23,82	7,37	1,63
Tombone monte		123	7,46	15,70	2,20	17,90	20,62	23,82	7,31	1,61
Tombone monte		124	12,27	15,51	2,24	17,75	20,18	22,73	6,91	1,51
Tombone monte	monte ponte	125	24,00	15,08	2,50	17,58	18,93	16,59	5,15	1,10
Tombone monte	valle ponte	126	27,36	15,06	2,21	17,27	18,85	15,58	5,56	1,28
Tombone monte		127	33,95	15,01	2,10	17,11	18,85	15,54	5,84	1,33
Tombone monte		128	69,47	14,77	1,59	16,36	17,28	8,38	4,25	1,12
Tombone monte	imbocco tombinatura	129	73,95	14,40	1,93	16,33	16,51	7,22	1,87	0,43
Tombone monte	monte tombinatura	130	76,00	14,36	1,98	16,34	16,50	7,04	1,77	0,40
Tombone monte	valle tombinatura	131	304,10	10,30	0,40	10,70	13,84	6,20	7,85	3,99
Tombone		57	0,00	9,30	1,40	10,70	10,82	6,20	1,57	0,44
Tombone		58	94,12	7,55	1,85	9,40	10,07	19,31	3,62	0,87
Tombone		59	110,10	7,24	1,89	9,13	9,87	20,77	3,82	0,91
Tombone		60	176,32	5,95	2,14	8,09	8,67	20,90	3,37	0,75
Tombone		61	195,66	5,57	2,36	7,93	8,41	20,95	3,05	0,64
Tombone	monte ponte	61.1	211,66	5,26	2,71	7,97	8,35	18,02	2,75	0,59
Tombone	valle ponte	61.1	217,66	5,22	2,45	7,67	8,16	19,50	3,10	0,68
Tombone		61.2	220,00	5,10	2,49	7,59	8,16	20,52	3,34	0,74
Tombone		62	283,39	3,87	3,47	7,34	7,61	20,65	2,30	0,42
Tombone		62.5	328,72	3,68	3,83	7,51	7,56	10,75	0,97	0,21
Tombone	imbocco tombinatura	63	331,72	3,67	3,81	7,48	7,55	10,41	1,17	0,28
Tombone	tombinatura	64	346,94	3,59	3,88	7,47	7,54	10,41	1,17	0,28
Tombone	tombinatura	65	360,33	3,53	3,93	7,46	7,53	10,41	1,17	0,28
Tombone	tombinatura	66	375,49	3,45	4,01	7,46	7,53	10,41	1,17	0,28
Tombone	tombinatura	67	561,79	3,29	4,10	7,39	7,46	10,42	1,17	0,28
Tombone	tombinatura	68	596,41	3,26	4,11	7,37	7,44	10,42	1,17	0,28
Tombone	tombinatura	69	649,23	3,21	4,14	7,35	7,42	10,42	1,17	0,28
Tombone	tombinatura	70	678,60	3,18	4,16	7,34	7,41	10,42	1,17	0,28
Tombone	sbocco tombinatura	71	829,38	3,05	4,25	7,30	7,37	10,43	1,17	0,28
Calcinara	monte tombinatura	78	1200,39	4,50	3,68	8,18	8,33	22,37	1,69	0,33
Calcinara	confluenza Colombiera	77.1	1397,94	3,42	4,39	7,81	8,02	22,37	2,03	0,43
Calcinara	valle tombinatura	77	1460,85	3,08	4,27	7,35	7,81	33,09	3,00	0,64
Calcinara		76	1465,35	3,07	4,32	7,39	7,51	33,09	1,56	0,24
Calcinara	confluenza Tombone	75	1601,52	2,77	4,53	7,30	7,42	33,35	1,51	0,24
Calcinara		74	1715,79	2,52	4,69	7,21	7,37	39,96	1,76	0,27

Tabella 8 – Risultati di sintesi per lo scenario TR500.

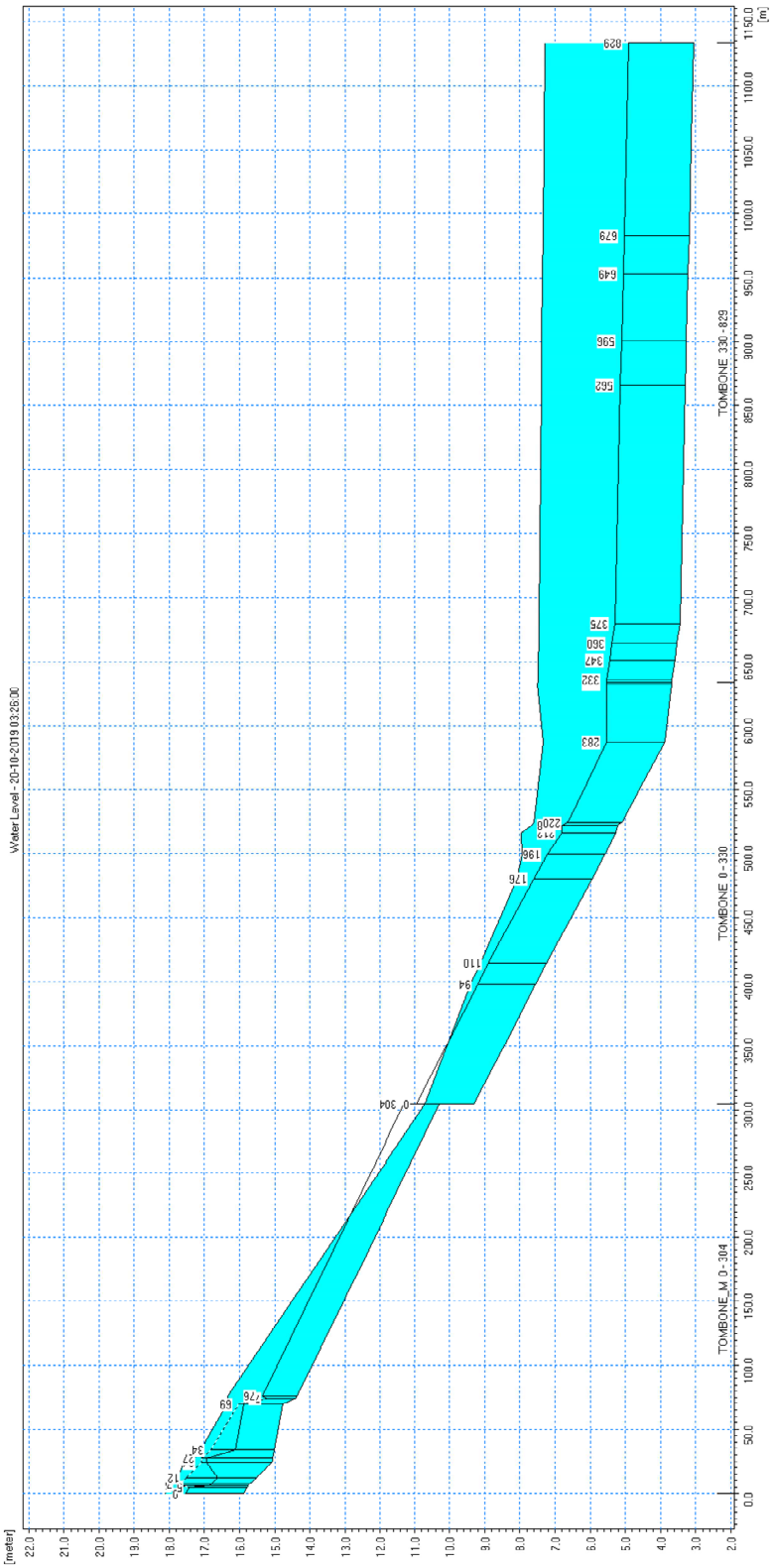


Figura 42 – Profilo longitudinale di corrente del fosso Tombone per lo scenario TR500.

I risultati ottenuti per lo scenario TR500 mostrano modalità di deflusso della piena, esondazione e propagazione dei deflussi sul piano campagna del tutto analoghe a quelle già descritte per gli eventi cinquantennale e duecentennale, ma caratterizzate da maggiore intensità dei fenomeni (in termini sia di portate esondate che di livelli idrici e velocità massimi), in relazione alle maggiori portate afferenti.

Dagli idrogrammi di Figura 43 e Figura 44 si riscontra come la massima portata smaltibile dalla tombinatura costituita dalle due tubazioni DN1000 (circa 6 m^3/s) e recapitabile nel Fosso di Calcinara (circa 10,5 m^3/s) sia sostanzialmente la stessa osservata per TR50 e TR200; in relazione al maggior volume dell'idrogramma duecentennale, l'entità delle esondazioni sarà superiore.

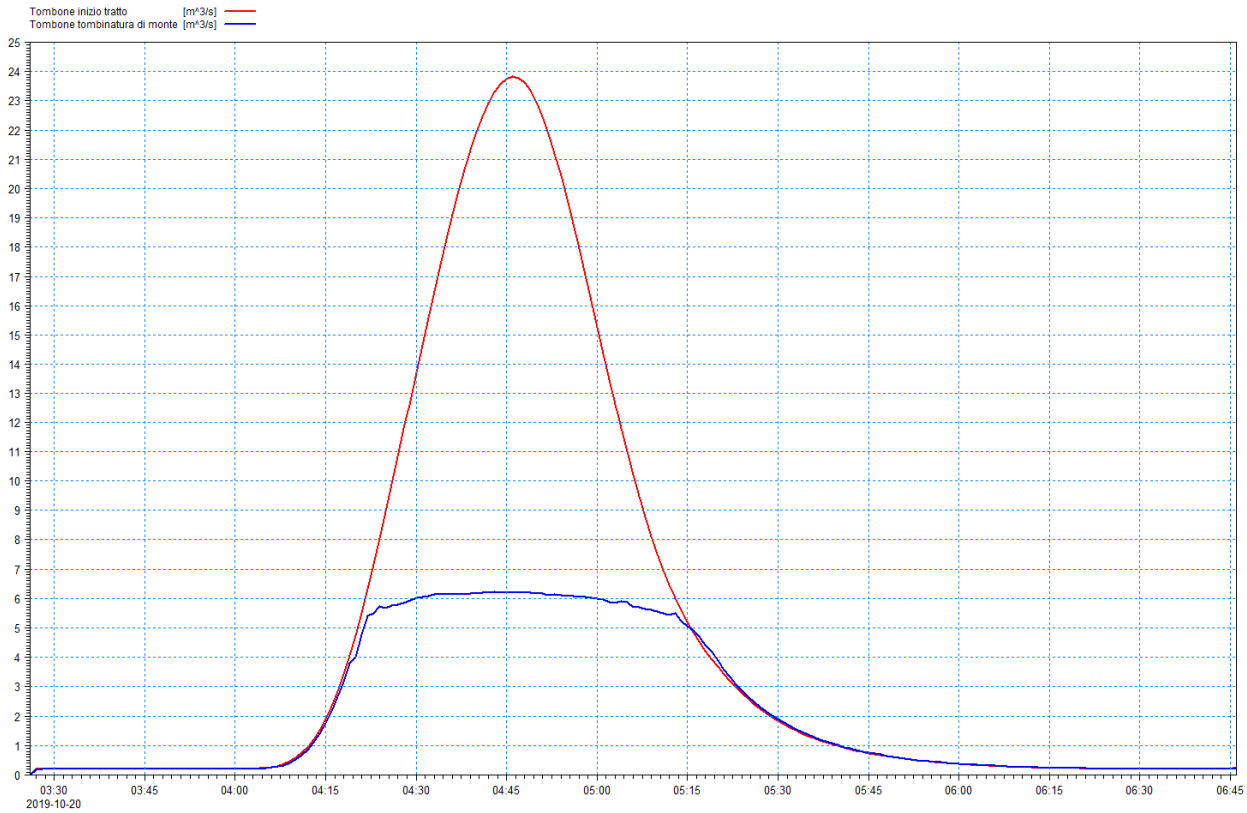


Figura 43 – Idrogramma di portata estratto dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 500 anni defluente all'interno della tombinatura costituita dalle due tubazioni DN1000 (linea blu), a confronto con l'idrogramma di input a inizio tratto (linea rossa).

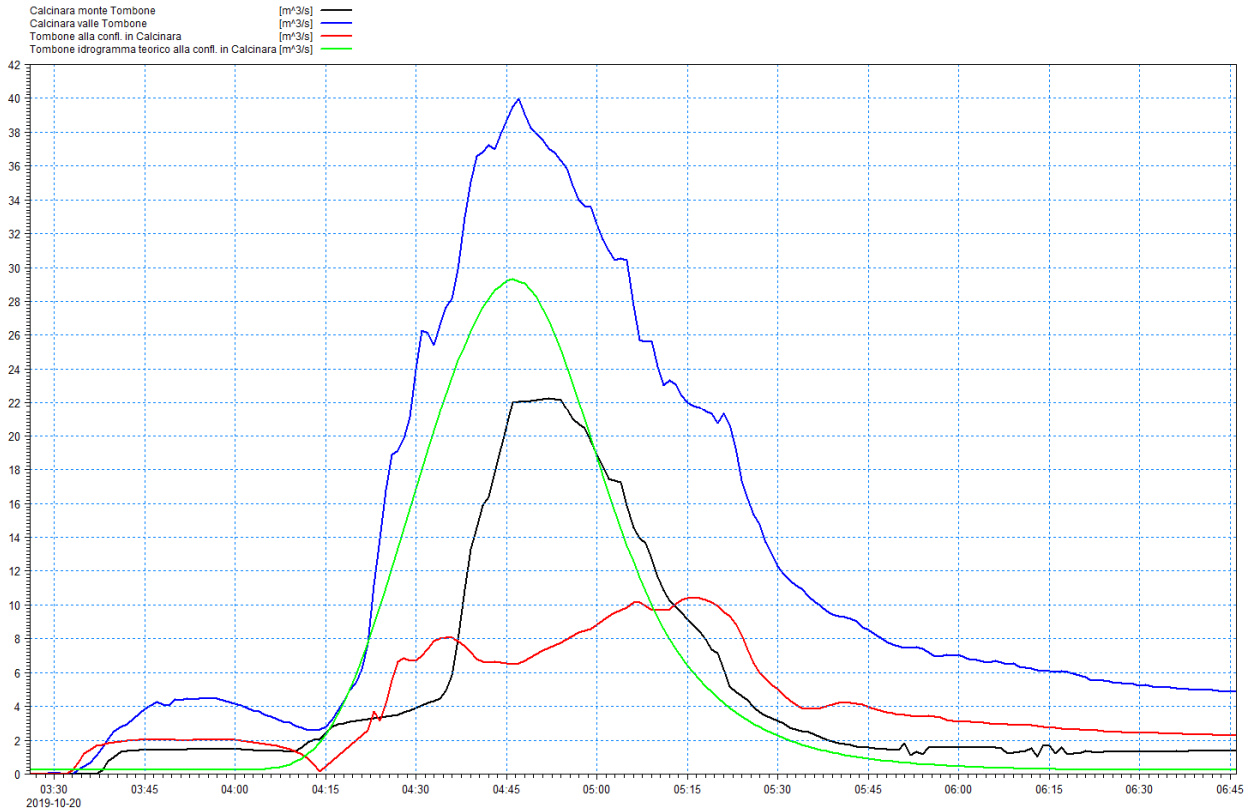


Figura 44 – Idrogrammi di portata estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 500 anni (stato attuale): portata nel Fosso di Calcinara in input (sez.78, linea nera) e in uscita dal modello (linea blu, con aggiunta dei contributi del Tombone e dei due affluenti minori a monte); portata nel Fosso Tombone alla confluenza con il Calcinara (linea rossa) a confronto con l'idrogramma idrologico per il bacino complessivo (linea verde).

L'estensione delle aree allagate, rappresentata in Figura 45, Figura 46 e Figura 47, non differisce molto da quella già esaminata per lo scenario TR200, riscontrando però una maggiore propagazione (in relazione ai maggiori flussi di ruscellamento) verso valle, interessando anche via Valdilocchi a valle della centrale ENEL, e lateralmente nel primo tratto di monte.

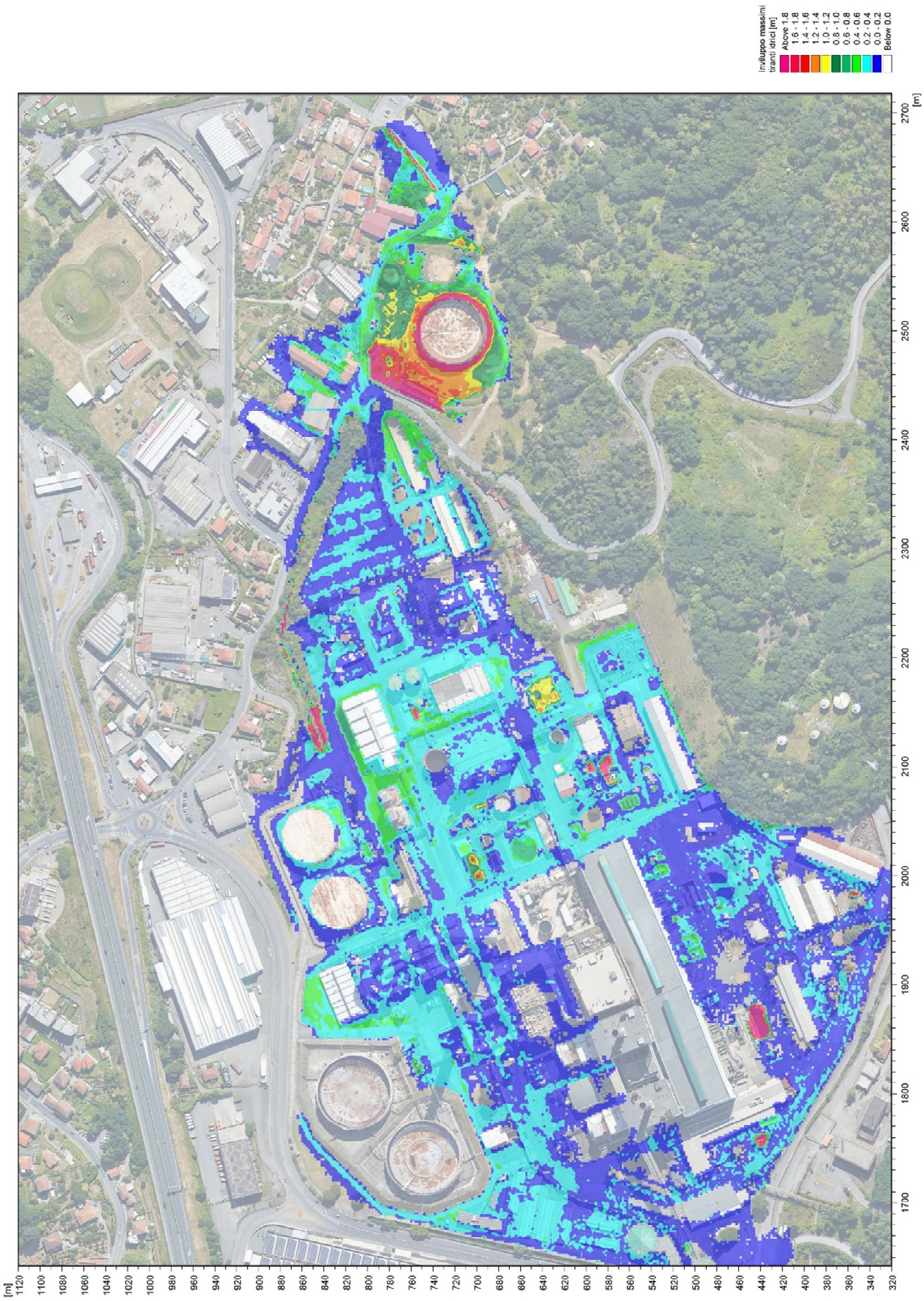


Figura 45 – Distribuzione inviluppo delle massime altezze idriche rispetto al piano campagna per TR=500 anni.

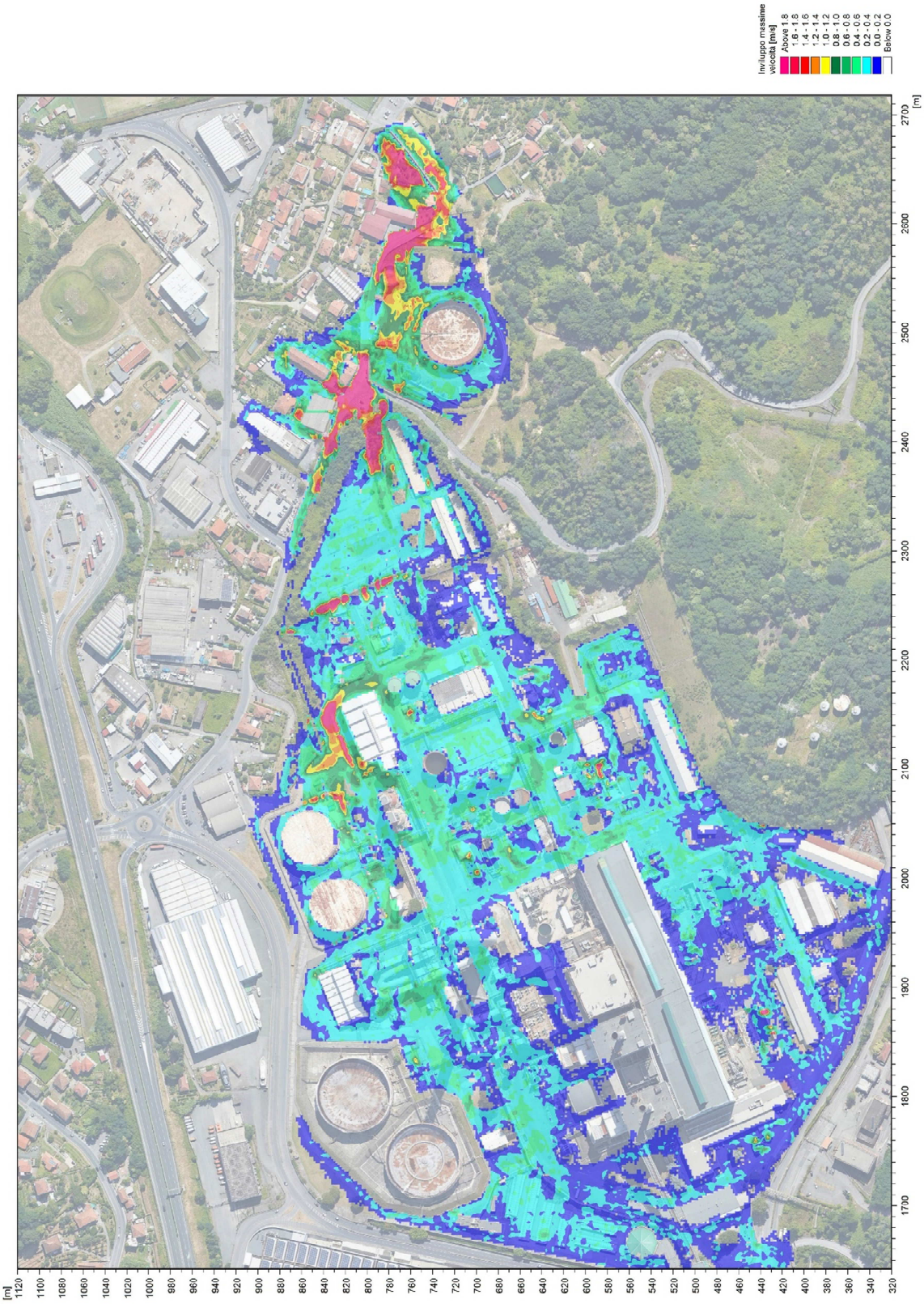


Figura 46 – Distribuzione inviluppo delle massime velocità di corrente per TR=500 anni.

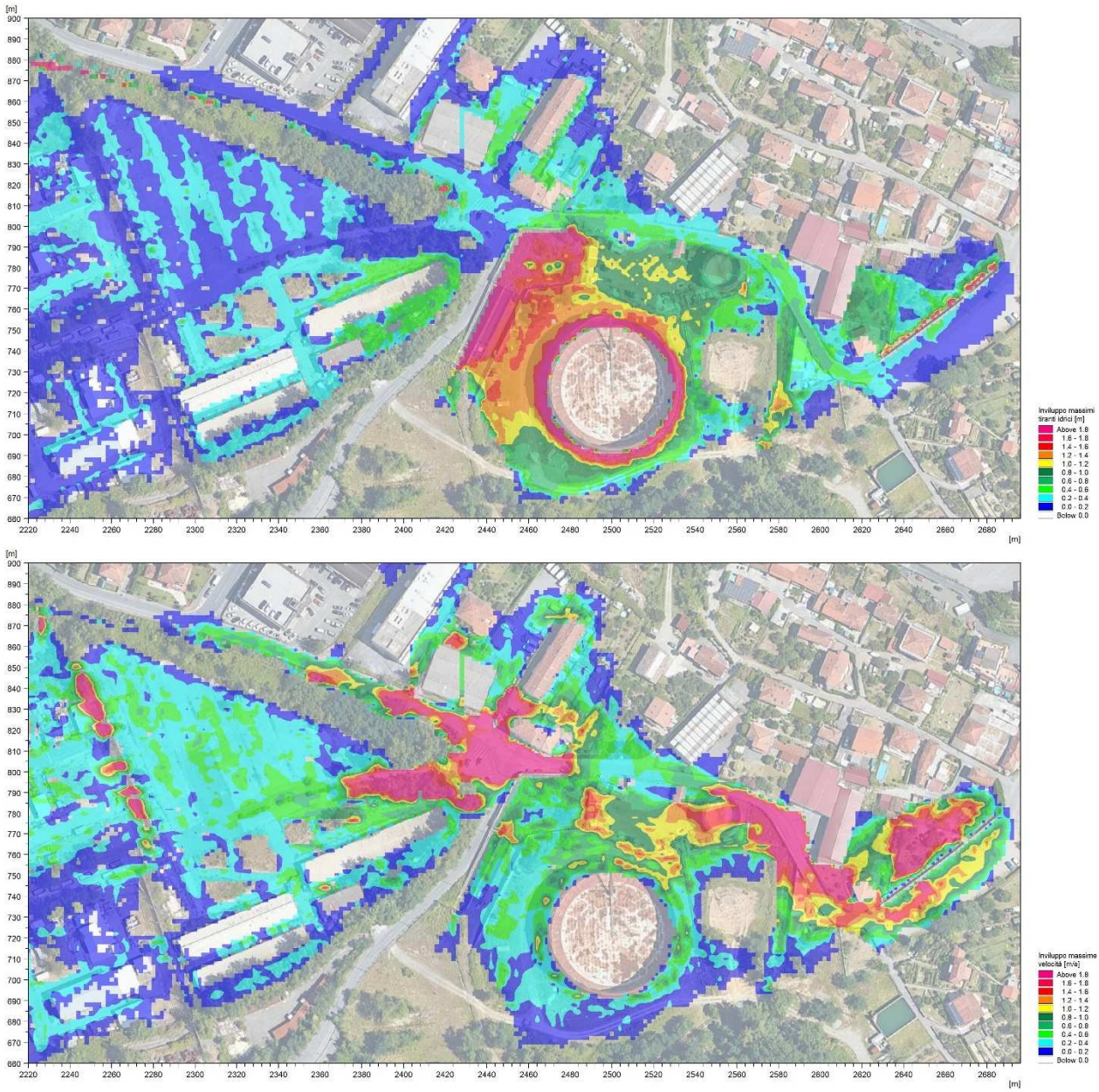


Figura 47 – Distribuzione inviluppo delle massime altezze idriche rispetto al piano campagna (sopra) e delle massime velocità (sotto) per TR=500 anni; zoom nell'area di maggior interesse per il presente studio.

9. RISULTATI – CONFIGURAZIONE DI PROGETTO

I risultati delle simulazioni effettuate con il modello integrato mono-bidimensionale sono illustrati nei capitoli seguenti mediante l'ausilio di rappresentazioni grafiche esplicative del tutto analoghe a quelle presentate per lo stato attuale, e in particolare:

- mappe delle aree di esondazione con rappresentazione dei valori massimi di inviluppo delle altezze idriche e velocità sul piano campagna;
- profili longitudinali di inviluppo dei massimi livelli idrici lungo l'alveo inciso dei corsi d'acqua.

I parametri idraulici non sono definiti in corrispondenza delle strutture inserite all'interno dei modelli numerici monodimensionali (quali attraversamenti, tombini o salti di fondo); per queste si fa riferimento alla sezione immediatamente a monte (con riferimento alla quale, ad esempio, vengono definiti il livello idrico e il carico cinetico per la valutazione del franco idraulico di un attraversamento).

Non sono restituiti i risultati sulle sezioni interpolate (introdotte unicamente per migliorare l'integrazione delle equazioni del moto ottimizzando il passo spaziale).

I risultati esposti fanno riferimento ai seguenti 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.

9.1 Scenario TR50 (tempo di ritorno 50 anni)

Nella Tabella 6 sono elencati i principali parametri idrodinamici relativi agli alvei incisi delle aste del reticolo idrografico considerato (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 50 anni, intesi come inviluppo dei valori massimi.

In Figura 48 è rappresentato graficamente il profilo di corrente e il carico totale (in colore rosso) del medesimo scenario; in Figura 49 si rappresenta l'ingrandimento del deflusso cinquantennale per il tratto in progetto.

I parametri relativi al Fosso di Calcinara sono inclusi in tabella per completezza; valgono a tal proposito le medesime considerazioni già esposte nel capitolo 8.

Corso d'acqua	Note	Sezione	Progressiva	Fondo alveo	Tirante	Livello idrico	Carico totale	Portata	Velocità	Larghezza livello idrico	Froude	Quota sommità sponda/ intradosso	Franco idraulico
-	-	-	m	m s.m.	m	m s.m.	m s.m.	m3/s	m/s	m	-	m s.m.	m
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	120	0,00	15,81	1,26	17,07	18,65	17,56	5,56	2,50	1,58	17,81	0,74
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	121	5,00	15,67	1,26	16,93	18,51	17,56	5,56	2,50	1,58	17,67	0,74
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122	10,00	15,53	1,26	16,79	18,37	17,56	5,57	2,50	1,59	17,53	0,74
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122.1	15,00	15,40	1,25	16,65	18,26	17,56	5,63	2,50	1,61	17,40	0,75
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122.2	20,62	15,24	1,24	16,48	18,11	17,56	5,66	2,50	1,62	17,24	0,76
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122.3	25,00	15,12	1,23	16,35	18,01	17,56	5,70	2,50	1,64	17,12	0,77
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122.4	30,00	14,98	1,22	16,20	17,89	17,56	5,76	2,50	1,66	16,98	0,78
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122.5	35,00	14,84	1,20	16,04	17,78	17,55	5,83	2,50	1,70	16,84	0,80

Corso d'acqua	Note	Sezione	Progressiva	Fondo alveo	Tirante	Livello idrico	Carico totale	Portata	Velocità	Larghezza livello idrico	Froude	Quota sommità sponda/ intradosso	Franco idraulico
-	-	-	m	m s.m.	m	m s.m.	m s.m.	m3/s	m/s	m	-	m s.m.	m
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122.6	40,00	14,70	1,18	15,88	17,68	17,55	5,95	2,50	1,75	16,70	0,82
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122.7	45,00	14,57	1,24	15,81	17,44	17,55	5,66	2,50	1,62	16,57	0,76
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122.8	50,00	14,43	1,23	15,66	17,32	17,55	5,70	2,50	1,64	16,43	0,77
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122.9	55,00	14,29	1,22	15,51	17,20	17,55	5,75	2,50	1,66	16,29	0,78
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	123	60,00	14,15	1,21	15,36	17,08	17,55	5,81	2,50	1,69	16,15	0,79
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	123.1	65,00	14,01	1,19	15,20	16,98	17,55	5,93	2,50	1,74	16,01	0,81
Tombone monte	inizio scatolare progetto BxH= 2.5x2.1	123.2	69,14	13,90	1,16	15,06	16,94	17,55	6,07	2,50	1,80	16,00	0,94
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	124	74,90	13,32	1,53	14,85	15,92	17,55	4,59	2,50	1,19	15,42	0,57
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	124.4	86,63	13,11	1,54	14,65	15,71	17,55	4,56	2,50	1,17	15,21	0,56
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	124.8	89,63	13,06	1,54	14,60	15,66	17,55	4,56	2,50	1,17	15,16	0,56
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	125.2	99,07	12,89	1,55	14,44	15,49	17,55	4,53	2,50	1,16	14,99	0,55
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	125.6	102,27	12,84	1,55	14,39	15,44	17,55	4,55	2,50	1,17	14,94	0,55
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	126	111,90	12,67	1,55	14,22	15,26	17,55	4,51	2,50	1,15	14,77	0,55
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	126.4	112,90	12,65	1,56	14,21	15,24	17,55	4,50	2,50	1,15	14,75	0,54
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	126.8	162,99	11,77	1,62	13,39	14,35	17,55	4,33	2,50	1,09	13,87	0,48
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	127.2	166,41	11,72	1,62	13,34	14,30	17,55	4,33	2,50	1,09	13,82	0,48
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	127.6	186,41	11,44	1,60	13,04	14,02	17,56	4,38	2,50	1,10	13,54	0,50
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	128	187,32	11,42	1,61	13,03	14,00	17,56	4,36	2,50	1,10	13,52	0,49
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	128.4	225,13	10,89	1,57	12,46	13,48	17,56	4,46	2,50	1,13	12,99	0,53
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	128.8	227,13	10,86	1,57	12,43	13,45	17,56	4,46	2,50	1,13	12,96	0,53
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	129.2	280,75	10,10	1,47	11,57	12,73	17,57	4,74	2,50	1,24	12,20	0,63

Corso d'acqua	Note	Sezione	Progressiva	Fondo alveo	Tirante	Livello idrico	Carico totale	Portata	Velocità	Larghezza livello idrico	Froude	Quota sommità sponda/ intradosso	Franco idraulico
-	-	-	m	m s.m.	m	m s.m.	m s.m.	m3/s	m/s	m	-	m s.m.	m
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	129.6	283,05	10,06	1,47	11,53	12,69	17,57	4,75	2,50	1,25	12,16	0,63
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	130	316,17	9,56	1,33	10,89	12,28	17,57	5,15	2,50	1,41	11,66	0,77
Tombone monte	fine scatolare progetto BxH= 2.5x2.1	131	322,87	9,33	1,40	10,73	11,99	17,57	4,89	2,50	1,30	11,43	0,70
Tombone		57.5	8,12	9,15	1,58	10,73	11,50	17,57	3,79	3,00	0,98		
Tombone		58	94,12	7,55	1,91	9,46	10,29	21,82	3,70	3,00	0,84		
Tombone		59	110,10	7,24	1,96	9,20	10,02	21,89	3,51	3,00	0,78		
Tombone		60	176,32	5,95	2,29	8,24	9,15	21,38	2,55	3,00	0,49		
Tombone		61	195,66	5,57	2,57	8,14	9,09	21,34	2,21	3,00	0,39		
Tombone	monte ponte	61.1	211,66	5,26	2,81	8,07	9,02	21,43	2,00	3,00	0,34		
Tombone	valle ponte	61.1	217,66	5,22	2,44	7,66	8,49	21,56	2,52	3,00	0,48		
Tombone		61.2	220,00	5,10	2,49	7,59	8,43	21,62	2,92	3,00	0,59		
Tombone		62	283,39	3,87	3,44	7,31	8,19	22,57	1,85	3,00	0,29		
Tombone		62.5	328,72	3,68	3,80	7,48	8,15	22,16	1,02	5,00	0,16		
Tombone	imbocco tombinatura	63	331,72	3,67	3,77	7,44	8,15	16,20	1,82	5,00	0,44		
Tombone	tombinatura	64	346,94	3,59	3,85	7,44	8,12	16,20	1,82	5,00	0,44		
Tombone	tombinatura	65	360,33	3,53	3,90	7,43	8,10	16,20	1,82	5,00	0,44		
Tombone	tombinatura	66	375,49	3,45	3,97	7,42	8,07	16,20	1,82	5,00	0,44		
Tombone	tombinatura	67	561,79	3,29	4,03	7,32	7,77	16,16	1,82	5,00	0,44		
Tombone	tombinatura	68	596,41	3,26	4,04	7,30	7,72	16,15	1,82	5,00	0,44		
Tombone	tombinatura	69	649,23	3,21	4,06	7,27	7,64	16,14	1,82	5,00	0,44		
Tombone	tombinatura	70	678,60	3,18	4,07	7,25	7,60	16,14	1,82	5,00	0,44		
Tombone	sbocco tombinatura	71	829,38	3,05	4,12	7,17	7,36	16,13	1,82	5,00	0,44		
Calcinara	valle ponte	78.2	1151,09	4,66	3,10	7,76	7,86	19,30	1,19	5,20	0,21		
Calcinara		78.1	1194,39	4,60	3,14	7,74	7,86	19,30	1,24	4,90	0,22		
Calcinara		78.05	1198,39	4,50	3,24	7,74	7,86	19,30	1,20	4,90	0,21		
Calcinara	monte tombinatura	78	1200,39	4,50	3,18	7,68	7,86	19,31	1,75	4,90	0,37		
Calcinara	confluenza Colombiera	77.1	1397,94	3,42	3,99	7,41	7,60	19,31	1,75	4,90	0,37		
Calcinara	valle tombinatura	77	1460,85	3,08	4,06	7,14	7,44	26,07	2,36	4,90	0,50		
Calcinara		76	1465,35	3,07	4,16	7,23	7,33	26,07	1,27	4,90	0,20		
Calcinara	confluenza Tombone	75	1601,52	2,77	4,40	7,17	7,27	25,79	1,20	5,25	0,19		
Calcinara		74	1715,79	2,52	4,58	7,10	7,27	41,51	1,87	5,25	0,29		

Tabella 9 – Risultati di sintesi per lo scenario TR50.

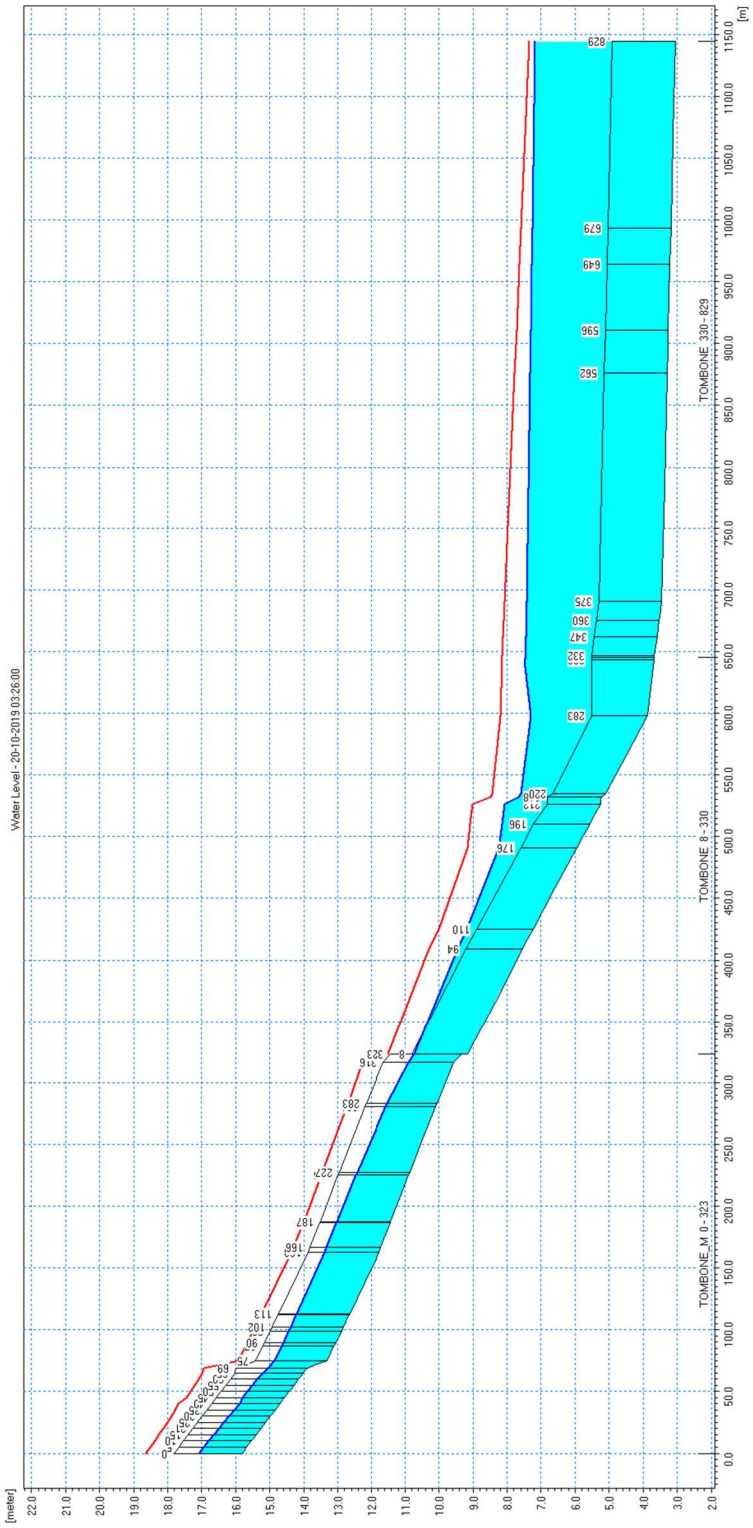


Figura 48 – Profilo longitudinale di corrente del fosso Tombone per lo scenario TR50.

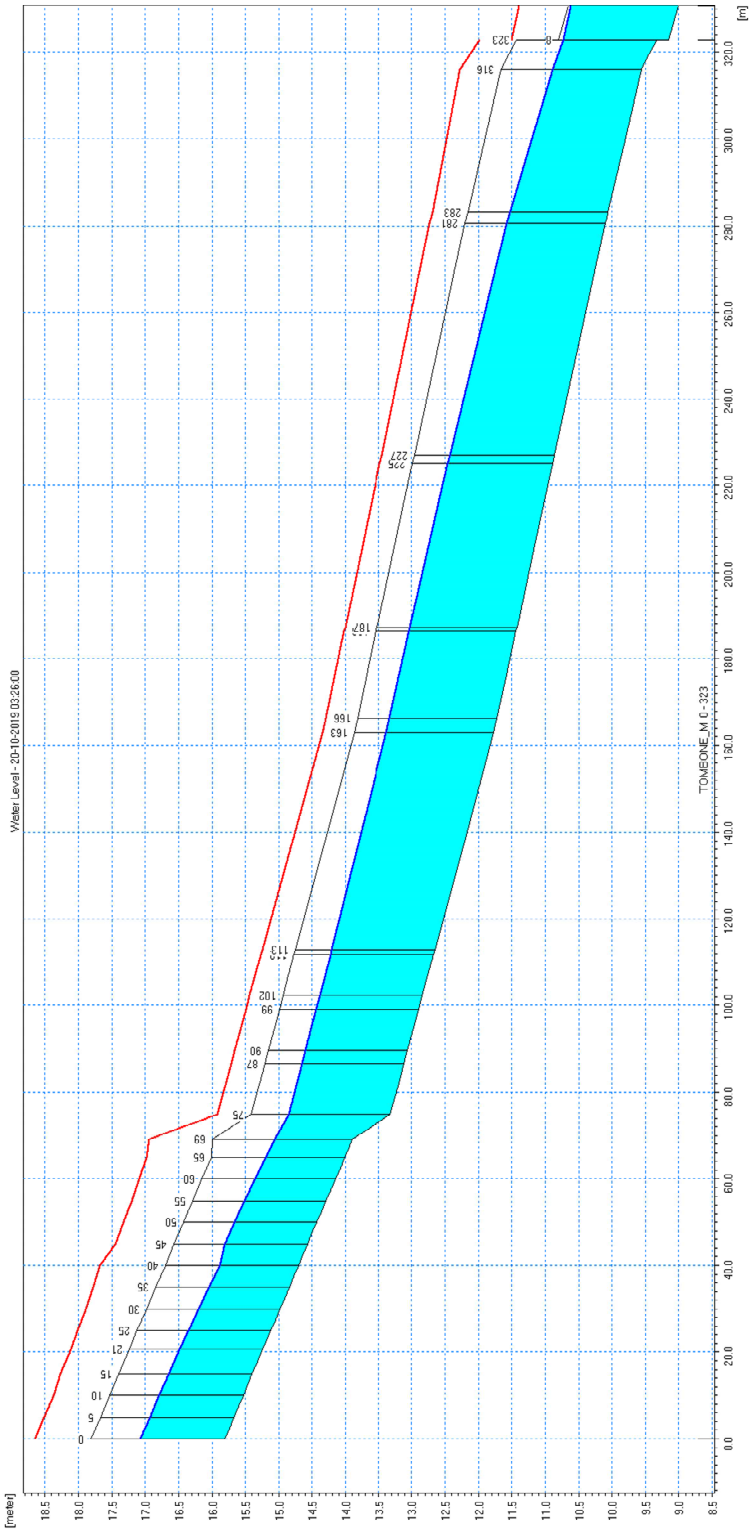


Figura 49 – Dettaglio del profilo longitudinale di corrente del fosso Tombone del solo tratto di intervento, per lo scenario TR50.

La sistemazione prevista in progetto consente il transito della portata a tempo di ritorno 50 anni nel tratto di intervento senza che vengano generate esondazioni.

In Tabella 9 si è riportato anche il franco idraulico ottenuto per il tratto sistemato, misurato rispetto alla quota sommitale di sponda per il tratto di monte a cielo aperto, e rispetto all'intradosso della sezione scatolare per il tratto tombato. Per il tempo di ritorno di 50 anni il franco risulta pari a circa:

- 0,75÷0,80 m nel tratto a cielo aperto;
- 0,50÷0,70 m per il tratto tombato.

La Figura 50 rappresenta gli idrogrammi di portata in alcune sezioni dell'area della confluenza, per diretto confronto con l'analoga rappresentazione di stato attuale (Figura 32, capitolo 8.1):

- confronto tra gli idrogrammi relativi al Fosso di Calcinara in input (sez.78) e in uscita (sez.74) dal modello, a seguito dei contributi del Tombone e dei due affluenti minori;
- idrogramma del Fosso Tombone alla confluenza a confronto con quello idrologico calcolato per il bacino complessivo: è possibile apprezzare l'effetto di laminazione prodotto dalle esondazioni residue, oltre che l'entità del volume complessivo esondato.

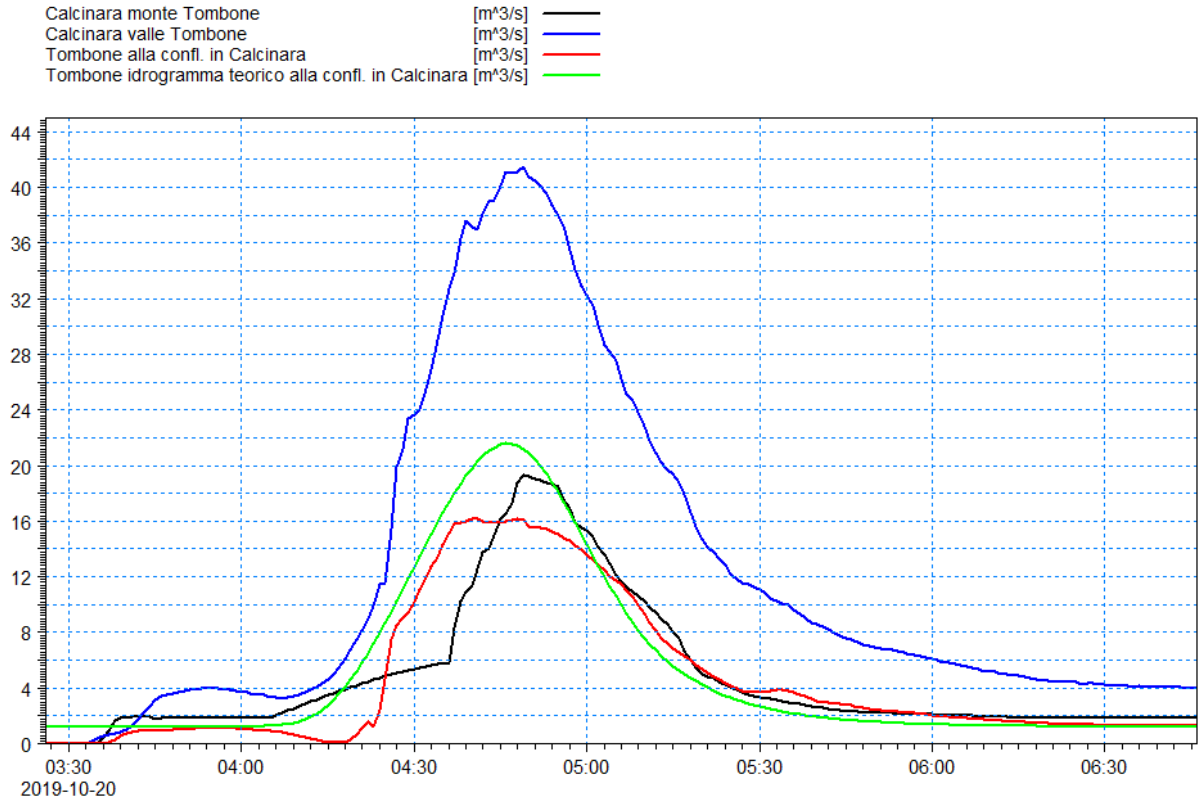


Figura 50 – Idrogrammi di portata estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 50 anni (stato di progetto): portata nel Fosso di Calcinara in input (sez.78, linea nera) e in uscita dal modello (linea blu, con aggiunta dei contributi del Tombone e dei due affluenti minori a monte); portata nel Fosso Tombone alla confluenza con il Calcinara (linea rossa) a confronto con l'idrogramma idrologico per il bacino complessivo (linea verde).

Nello stato di progetto la portata massima che il Fosso Tombone riesce a recapitare nel Calcinara è pari a circa 16,0 m^3/s, rispetto agli 11,3 m^3/s di stato attuale: la capacità di portata del tratto di valle è superiore a quello dell'attuale tombinatura e pertanto in assenza di esondazioni dal tratto sistemato una maggiore portata giunge a confluenza entro la sezione d'alveo.

Questo provoca conseguentemente un incremento anche della portata del Calcinara alla confluenza nel Fossamastra (estremità di valle del modello allestito per il presente studio), che risulta pari a circa 41 m^3/s rispetto ai circa 33 m^3/s di stato attuale.

Si precisa come tale incremento non modifichi le condizioni di rischio idraulico per le aree a valle, ovvero le esondazioni dal Canale Fossamastra, in quanto le analisi idrauliche svolte per la definizione degli ambiti di pericolosità di quest'ultimo considerano che esso sia interessato dal deflusso dell'intera portata idrologica del bacino contribuente, come se nell'intero bacino a monte non si verificassero esondazioni o comunque laminazioni del colmo. L'intervento in progetto va quindi nella direzione di progressiva sistemazione del reticolo idrografico di monte già prevista nelle analisi di rischio idraulico pregresse.

Nell'attuale assetto del tratto di valle del Fosso Tombone, le maggiori portate veicolate dalla nuova tombinatura comportano maggiori volumi di esondazione nell'area della centrale ENEL, che si traducono in una maggiore estensione verso valle delle aree allagate, rimanendo sempre all'interno dell'area della centrale e con altezze d'acqua modeste (10-20 cm).

In Figura 51 e Figura 52 sono rappresentate le distribuzioni delle massime altezze d'acqua sul piano campagna e delle massime velocità osservate per lo scenario TR50 (stato di progetto).

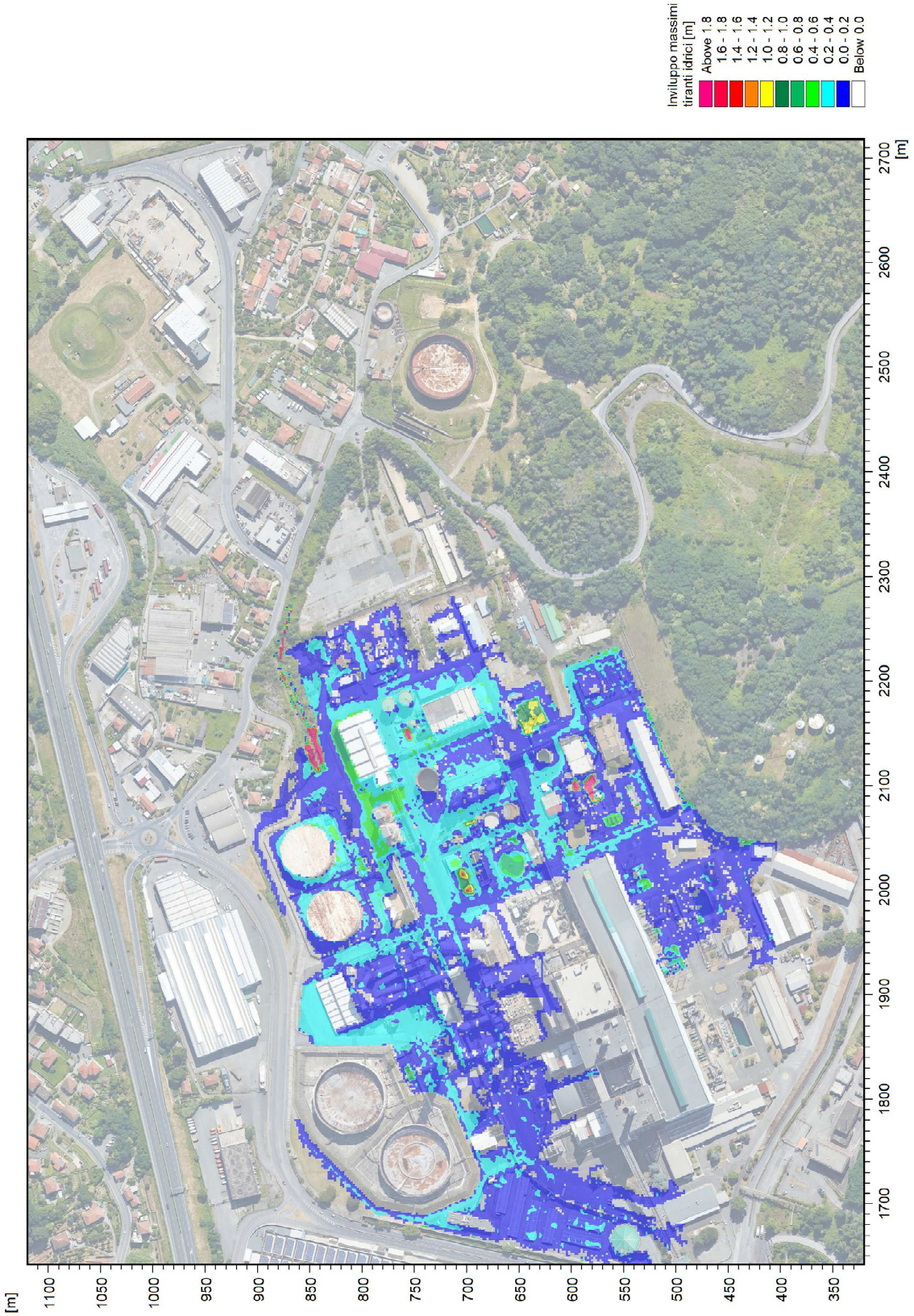


Figura 51 – Distribuzione inviluppo delle massime altezze idriche rispetto al piano campagna per TR=50 anni.

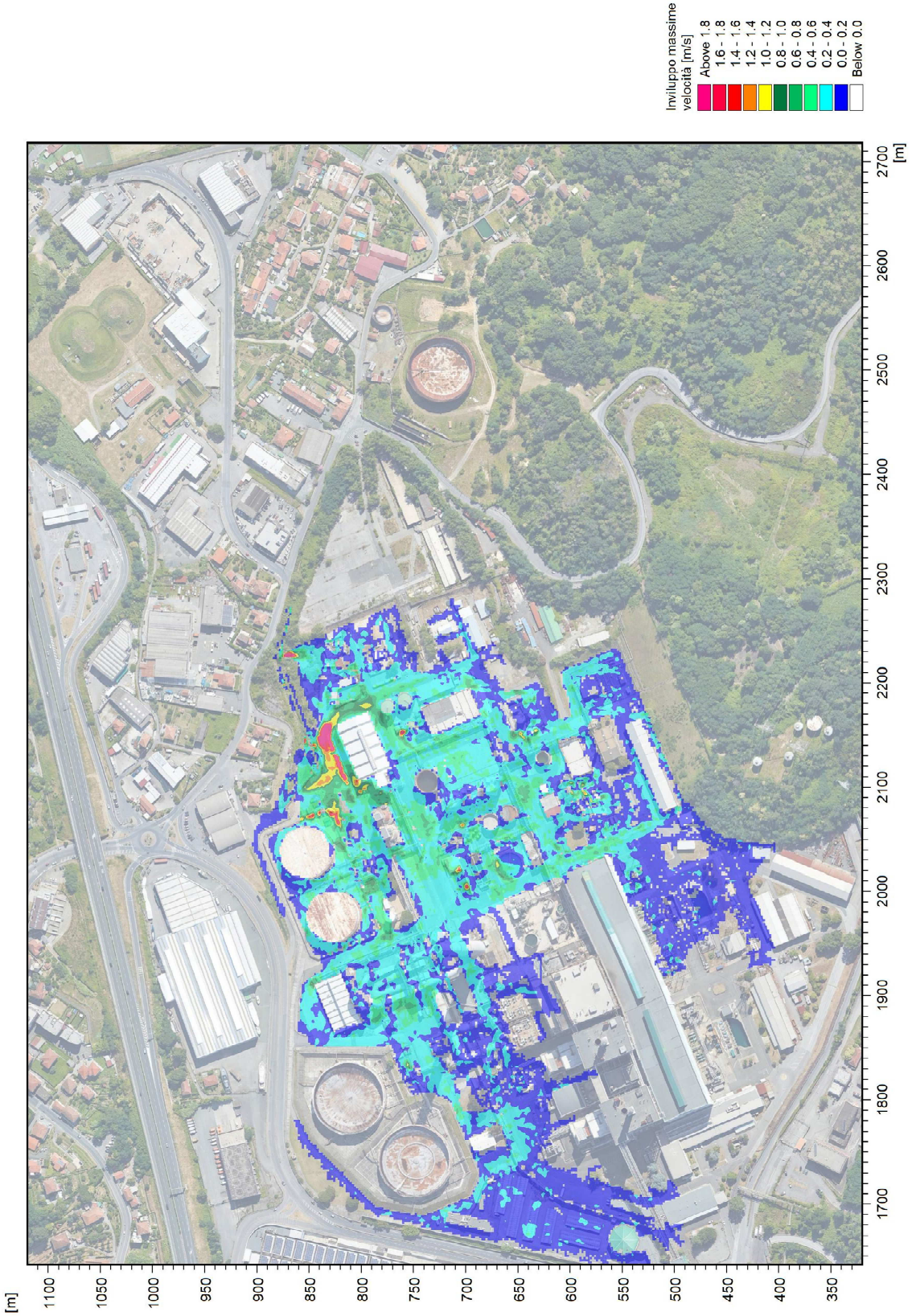


Figura 52 – Distribuzione inviluppo delle massime velocità di corrente per TR=50 anni.

9.2 Scenario TR200 (tempo di ritorno 200 anni)

Nella Tabella 7 sono elencati i principali parametri idrodinamici relativi agli alvei incisi delle aste del reticolo idrografico considerato (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 200 anni, intesi come inviluppo dei valori massimi.

In Figura 53 è rappresentato graficamente il profilo di corrente e il carico totale (in colore rosso) del medesimo scenario; in Figura 54 si rappresenta l'ingrandimento del deflusso bicentenario per il tratto in progetto.

I parametri relativi al Fosso di Calcinara sono inclusi in tabella per completezza; valgono a tal proposito le medesime considerazioni già esposte nel capitolo 8.

Corso d'acqua	Note	Sezione	Progressiva	Fondo alveo	Tirante	Livello idrico	Carico totale	Portata	Velocità	Larghezza livello idrico	Froude	Quota sommità sponda/ intradosso	Franco idraulico
-	-	-	m	m s.m.	m	m s.m.	m s.m.	m3/s	m/s	m	-	m s.m.	m
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	120	0,00	15,81	1,46	17,27	19,01	21,34	5,83	2,50	1,54	17,81	0,54
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	121	5,00	15,67	1,46	17,13	18,87	21,34	5,85	2,50	1,54	17,67	0,54
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122	10,00	15,53	1,46	16,99	18,74	21,34	5,86	2,50	1,55	17,53	0,54
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122.1	15,00	15,40	1,44	16,84	18,63	21,34	5,91	2,50	1,57	17,40	0,56
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122.2	20,62	15,24	1,44	16,68	18,47	21,34	5,94	2,50	1,58	17,24	0,56
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122.3	25,00	15,12	1,43	16,55	18,37	21,34	5,98	2,50	1,60	17,12	0,57
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122.4	30,00	14,98	1,41	16,39	18,25	21,34	6,03	2,50	1,62	16,98	0,59
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122.5	35,00	14,84	1,40	16,24	18,14	21,34	6,10	2,50	1,65	16,84	0,60
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122.6	40,00	14,70	1,38	16,08	18,03	21,34	6,19	2,50	1,68	16,70	0,62
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122.7	45,00	14,57	1,45	16,02	17,79	21,33	5,89	2,50	1,56	16,57	0,55
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122.8	50,00	14,43	1,44	15,87	17,66	21,33	5,93	2,50	1,58	16,43	0,56
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122.9	55,00	14,29	1,43	15,72	17,53	21,33	5,96	2,50	1,59	16,29	0,57
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	123	60,00	14,15	1,42	15,57	17,41	21,33	5,99	2,50	1,60	16,15	0,58
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	123.1	65,00	14,01	1,41	15,42	17,29	21,33	6,04	2,50	1,62	16,01	0,59
Tombone monte	inizio scatolare progetto 2.5x2.1	123.2	69,14	13,90	1,39	15,29	17,21	21,33	6,13	2,50	1,66	16,00	0,71

Corso d'acqua	Note	Sezione	Progressiva	Fondo alveo	Tirante	Livello idrico	Carico totale	Portata	Velocità	Larghezza livello idrico	Froude	Quota sommità sponda/ intradosso	Franco idraulico
-	-	-	m	m s.m.	m	m s.m.	m s.m.	m3/s	m/s	m	-	m s.m.	m
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	124	74,90	13,32	1,78	15,10	16,27	21,33	4,78	2,50	1,14	15,42	0,32
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	124.4	86,63	13,11	1,79	14,90	16,06	21,33	4,76	2,50	1,14	15,21	0,31
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	124.8	89,63	13,06	1,79	14,85	16,01	21,33	4,76	2,50	1,14	15,16	0,31
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	125.2	99,07	12,89	1,80	14,69	15,83	21,33	4,73	2,50	1,12	14,99	0,30
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	125.6	102,27	12,84	1,80	14,64	15,78	21,33	4,74	2,50	1,13	14,94	0,30
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	126	111,90	12,67	1,81	14,48	15,61	21,32	4,71	2,50	1,12	14,77	0,29
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	126.4	112,90	12,65	1,81	14,46	15,59	21,32	4,70	2,50	1,11	14,75	0,29
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	126.8	162,99	11,77	1,88	13,65	14,70	21,32	4,54	2,50	1,06	13,87	0,22
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	127.2	166,41	11,72	1,87	13,59	14,65	21,32	4,55	2,50	1,06	13,82	0,23
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	127.6	186,41	11,44	1,85	13,29	14,37	21,32	4,58	2,50	1,07	13,54	0,25
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	128	187,32	11,42	1,86	13,28	14,35	21,32	4,58	2,50	1,07	13,52	0,24
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	128.4	225,13	10,89	1,81	12,70	13,83	21,33	4,69	2,50	1,11	12,99	0,29
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	128.8	227,13	10,86	1,81	12,67	13,80	21,33	4,70	2,50	1,11	12,96	0,29
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	129.2	280,75	10,10	1,69	11,79	13,08	21,34	5,00	2,50	1,22	12,20	0,41
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	129.6	283,05	10,06	1,68	11,74	13,04	21,35	5,01	2,50	1,23	12,16	0,42
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	130	316,17	9,56	1,53	11,09	12,64	21,35	5,45	2,50	1,39	11,66	0,57
Tombone monte	fine scatolare progetto BxH= 2.5x2.1	131	322,87	9,33	1,59	10,92	12,35	21,35	5,21	2,50	1,30	11,43	0,51
Tombone		57.5	8,12	9,15	1,77	10,92	11,82	21,35	4,07	3,00	0,98		
Tombone		58	94,12	7,55	2,09	9,64	10,63	26,24	3,98	3,00	0,86		
Tombone		59	110,10	7,24	2,15	9,39	10,36	26,25	3,75	3,00	0,78		
Tombone		60	176,32	5,95	2,51	8,46	9,56	27,13	2,92	3,00	0,53		
Tombone		61	195,66	5,57	2,82	8,39	9,52	28,54	2,65	3,00	0,45		
Tombone	monte ponte	61.1	211,66	5,26	3,04	8,30	9,50	35,67	3,01	3,00	0,48		
Tombone	valle ponte	61.1	217,66	5,22	2,62	7,84	9,13	35,97	3,69	3,00	0,65		

Corso d'acqua	Note	Sezione	Progressiva	Fondo alveo	Tirante	Livello idrico	Carico totale	Portata	Velocità	Larghezza livello idrico	Froude	Quota sommità sponda/ intradosso	Franco idraulico
-	-	-	m	m s.m.	m	m s.m.	m s.m.	m3/s	m/s	m	-	m s.m.	m
Tombone		61.2	220,00	5,10	2,75	7,85	9,07	35,96	4,13	3,00	0,77		
Tombone		62	283,39	3,87	3,51	7,38	8,49	26,22	2,01	3,00	0,31		
Tombone		62.5	328,72	3,68	3,90	7,58	8,45	26,31	1,14	5,00	0,17		
Tombone	imbocco tombinatura	63	331,72	3,67	3,87	7,54	8,42	17,23	1,94	5,00	0,46		
Tombone	tombinatura	64	346,94	3,59	3,96	7,55	8,39	17,23	1,94	5,00	0,46		
Tombone	tombinatura	65	360,33	3,53	4,03	7,56	8,36	17,23	1,94	5,00	0,46		
Tombone	tombinatura	66	375,49	3,45	4,12	7,57	8,34	17,22	1,94	5,00	0,46		
Tombone	tombinatura	67	561,79	3,29	4,14	7,43	8,00	17,20	1,94	5,00	0,46		
Tombone	tombinatura	68	596,41	3,26	4,15	7,41	7,94	17,20	1,94	5,00	0,46		
Tombone	tombinatura	69	649,23	3,21	4,17	7,38	7,84	17,19	1,94	5,00	0,46		
Tombone	tombinatura	70	678,60	3,18	4,20	7,38	7,79	17,19	1,94	5,00	0,46		
Tombone	sbocco tombinatura	71	829,38	3,05	4,23	7,28	7,51	17,20	1,94	5,00	0,46		
Calcinara	valle ponte	78.2	1151,09	4,66	3,40	8,06	8,17	21,02	1,17	5,20	0,20		
Calcinara		78.1	1194,39	4,60	3,44	8,04	8,16	21,07	1,23	4,90	0,21		
Calcinara		78.05	1198,39	4,50	3,54	8,04	8,16	21,08	1,20	4,90	0,20		
Calcinara	monte tombinatura	78	1200,39	4,50	3,48	7,98	8,16	21,08	1,91	4,90	0,41		
Calcinara	confluenza Colombiera	77.1	1397,94	3,42	4,26	7,68	7,89	21,08	1,91	4,90	0,41		
Calcinara	valle tombinatura	77	1460,85	3,08	4,21	7,29	7,71	30,31	2,75	4,90	0,58		
Calcinara		76	1465,35	3,07	4,28	7,35	7,50	30,31	1,43	4,90	0,22		
Calcinara	confluenza Tombone	75	1601,52	2,77	4,51	7,28	7,42	30,51	1,38	5,25	0,21		
Calcinara		74	1715,79	2,52	4,66	7,18	7,40	47,61	2,11	5,25	0,32		

Tabella 10 – Risultati di sintesi per lo scenario TR200.

La sistemazione prevista in progetto consente il transito della portata associata a un tempo di ritorno di 200 anni senza che si generino esondazioni nel tratto di intervento.

In Tabella 10 è riportato per ciascuna sezione il franco idraulico ottenuto per il tratto sistemato, misurato rispetto alla quota sommitale di sponda per il tratto di monte a cielo aperto, e rispetto all'intradosso della sezione scatolare per il tratto tombato. Per il tempo di ritorno di 200 anni il franco risulta pari a circa:

- 0,55÷0,60 m nel tratto a cielo aperto;
- 0,22÷0,50 m per il tratto tombato.

Il minimo franco (0,22 m) si rileva tra le sezioni 126.8 e 127.2, in corrispondenza della curva di tracciato più accentuata nel tratto in progetto (circa 45°), necessaria per seguire il sedime stradale, che comporta un innalzamento locale di livello con (minimo) effetto di rigurgito verso monte. Il franco medio nella nuova tombinatura è pari a circa 0,33 m.

Nel tratto a cielo aperto quindi i franchi ottenuti per l'alveo sistemato sono congruenti con quanto richiesto dalle NTA del vigente Piano di Bacino; per le tombinature invece i franchi richiesti dalla normativa vigente sono cospicui (1,5 m), per cui l'intervento si configura in questo tratto non come una completa messa in sicurezza idraulica del corpo idrico bensì come una mitigazione del rischio idraulico rispetto alla configurazione attuale.

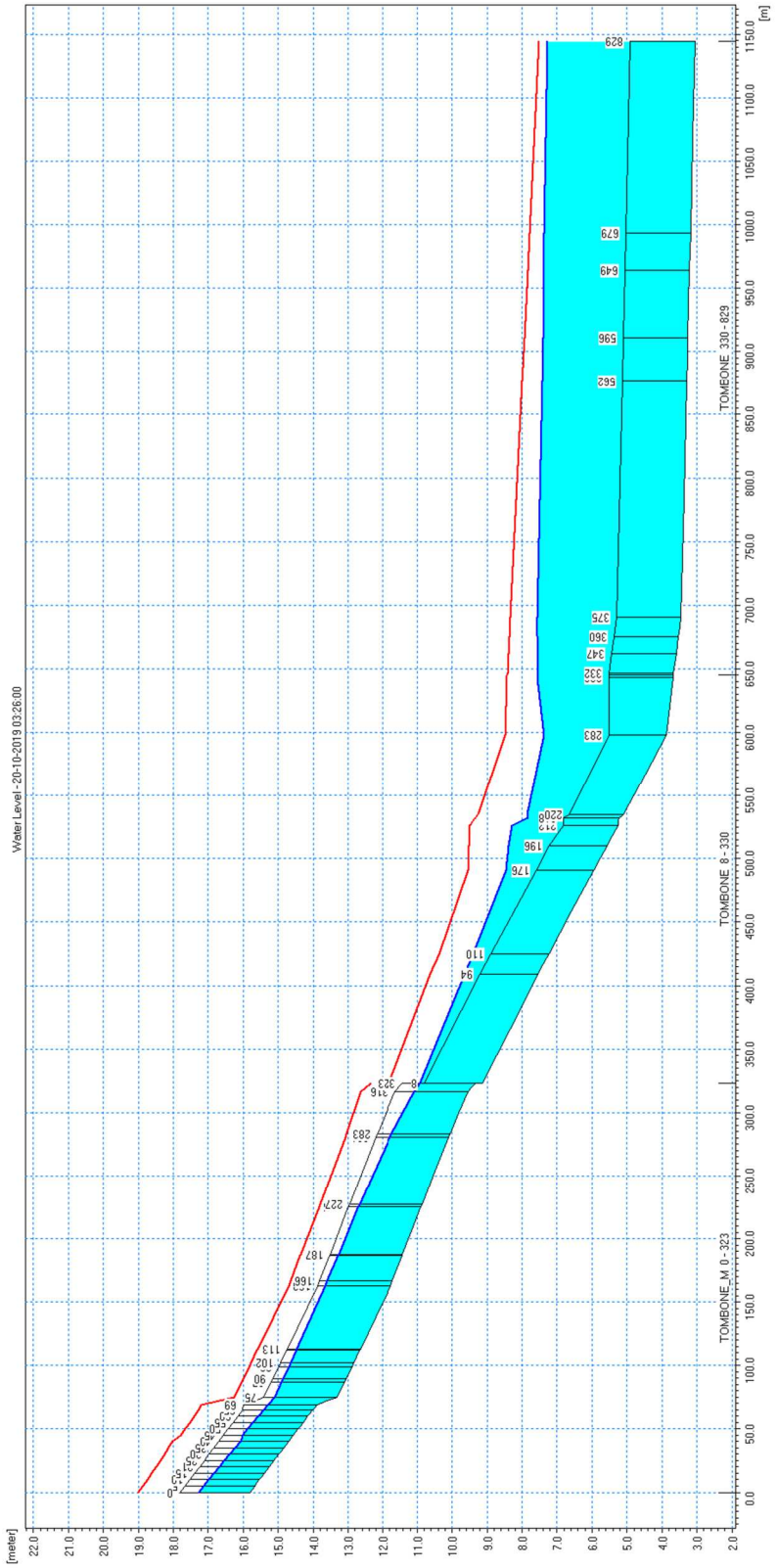


Figura 53 – Profilo longitudinale di corrente del fosso Tombone per lo scenario TR200.

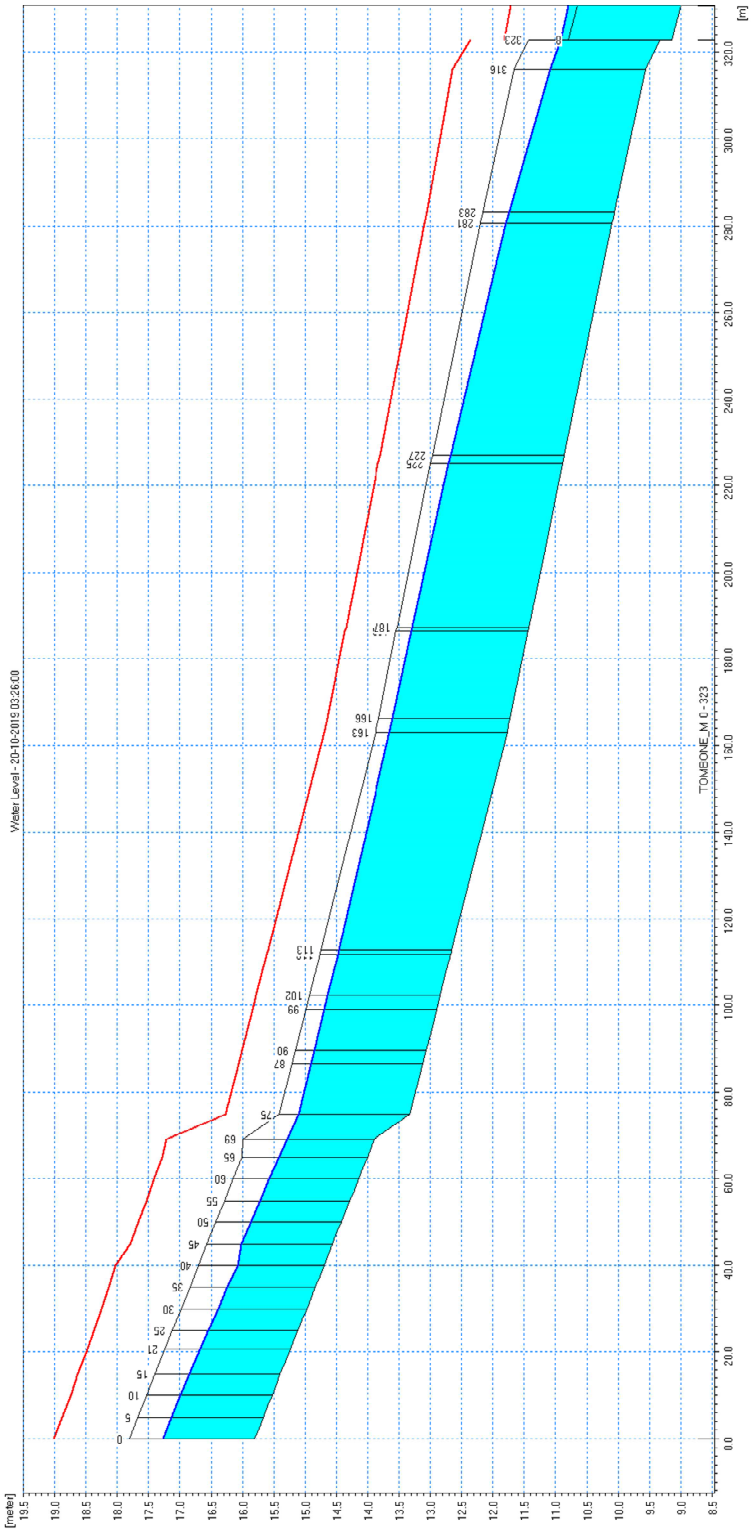


Figura 54 – Dettaglio del profilo longitudinale di corrente del fosso Tombone per il solo tratto di intervento per lo scenario TR200.

La Figura 55 rappresenta gli idrogrammi di portata in alcune sezioni dell'area della confluenza, per diretto confronto con l'analoga rappresentazione di stato attuale (Figura 38, capitolo 8.2):

- confronto tra gli idrogrammi relativi al Fosso di Calcinara in input (sez.78) e in uscita (sez.74) dal modello, a seguito dei contributi del Tombone e dei due affluenti minori;
- idrogramma del Fosso Tombone alla confluenza a confronto con quello idrologico calcolato per il bacino complessivo: è possibile apprezzare l'effetto di laminazione prodotto dalle esondazioni residue, oltre che l'entità del volume complessivo esondato.

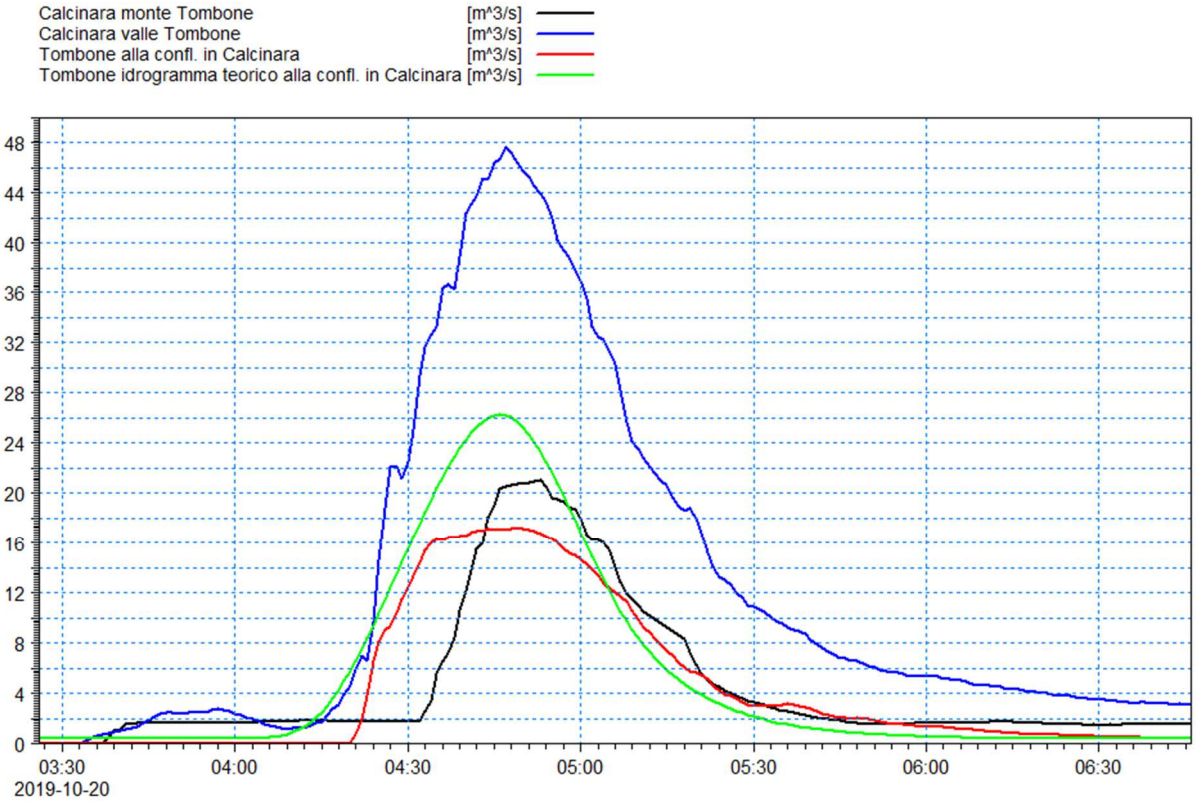


Figura 55 – Idrogrammi di portata estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 200 anni: portata nel Fosso di Calcinara in input (sez.78, linea nera) e in uscita dal modello (linea blu, con aggiunta dei contributi del Tombone e dei due affluenti minori a monte); portata nel Fosso Tombone alla confluenza con il Calcinara (linea rossa) a confronto con l'idrogramma idrologico per il bacino complessivo (linea verde).

Nello stato di progetto la portata massima che il Fosso Tombone riesce a recapitare nel Calcinara è pari a circa 17 m^3/s, a fronte di circa 11 m^3/s di stato attuale. La capacità di portata del tratto di valle è superiore a quello dell'attuale tombinatura e pertanto in assenza di esondazioni dal tratto sistemato una maggiore portata giunge a confluenza entro la sezione d'alveo.

Questo provoca conseguentemente un incremento anche della portata del Calcinara alla confluenza nel Fossamastra (estremità di valle del modello allestito per il presente studio), che risulta pari a quasi 48 m^3/s rispetto ai circa 37 m^3/s di stato attuale.

Si precisa anche in questo caso come tale incremento non modifichi le condizioni di rischio idraulico per le aree a valle, ovvero le esondazioni dal Canale Fossamastra, in quanto le analisi idrauliche svolte per la definizione degli ambiti di pericolosità di quest'ultimo considerano che esso sia interessato dal deflusso dell'intera portata idrologica del bacino contribuente, come se nell'intero bacino a monte non si verificassero esondazioni o comunque laminazioni del colmo. L'intervento in progetto va quindi nella direzione di progressiva sistemazione del reticolo idrografico di monte già prevista nelle analisi di rischio idraulico pregresse.

Nell'attuale assetto del tratto di valle del Fosso Tombone, le maggiori portate veicolate dalla nuova tombinatura comportano maggiori volumi di esondazione nell'area della centrale ENEL, che si traducono in una maggiore estensione verso valle delle aree allagate, che con altezze d'acqua modeste (dell'ordine dei 10 cm) interessano anche la prima porzione di via Valdilocchi per fuoriuscita dal cancello di accesso alla centrale.

Anche nel caso che la portata del Fosso Tombone fosse recapitata al Calcinara senza esondazioni nell'area della centrale ENEL, essa fuoriuscirebbe comunque dal tratto a cielo aperto del Calcinara, giungendo ad allagare le medesime porzioni di via Valdilocchi.

L'estensione delle aree allagate è rappresentata in Figura 56 e Figura 57 (mappe delle massime altezze idriche e velocità osservate nel corso dell'evento) sulle medesime viste utilizzate per l'evento TR50; in Figura 58 si visualizza l'estensione della propagazione di esondazione lungo via Valdilocchi.

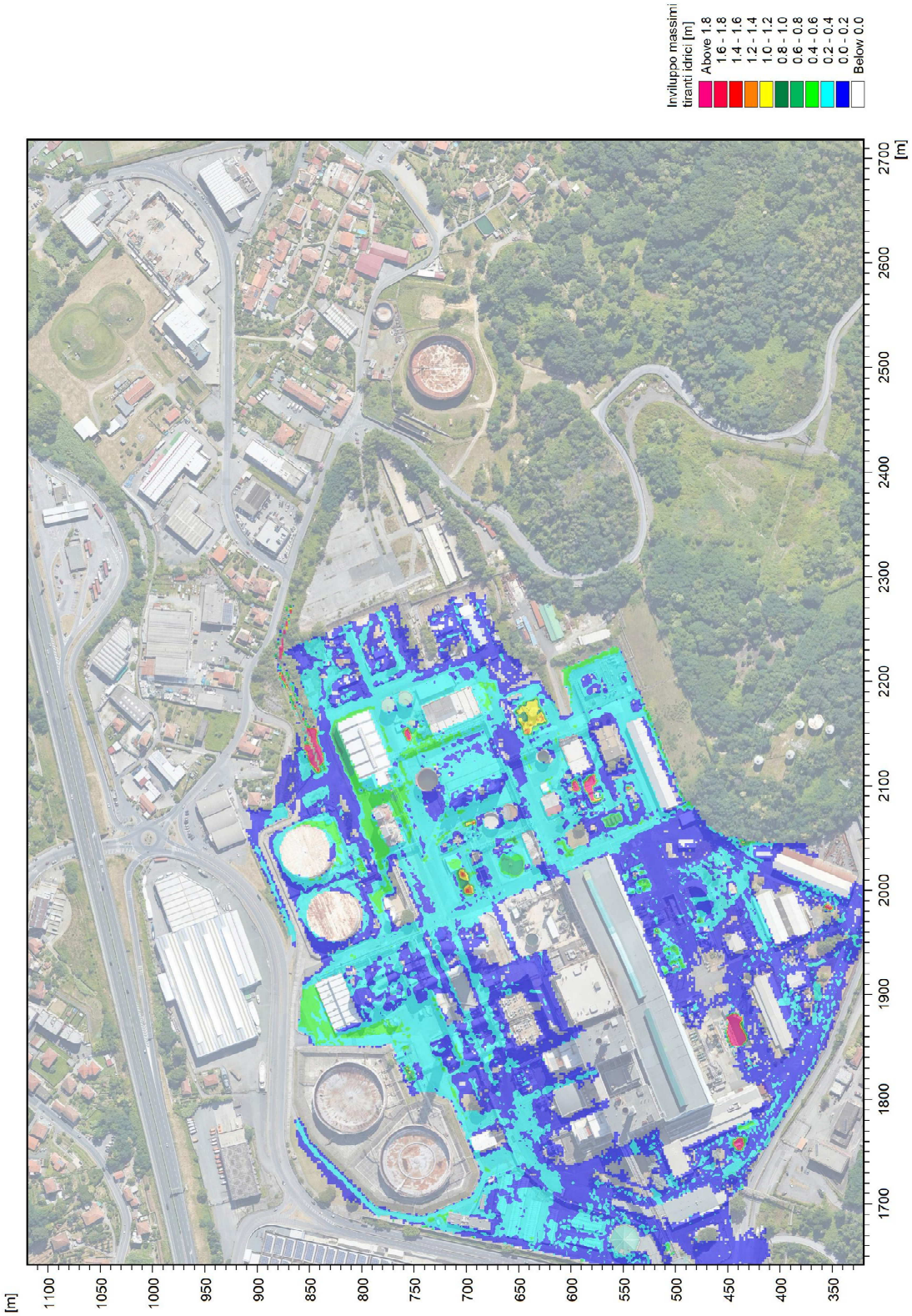


Figura 56 – Distribuzione inviluppo delle massime altezze idriche rispetto al piano campagna per TR=200 anni.

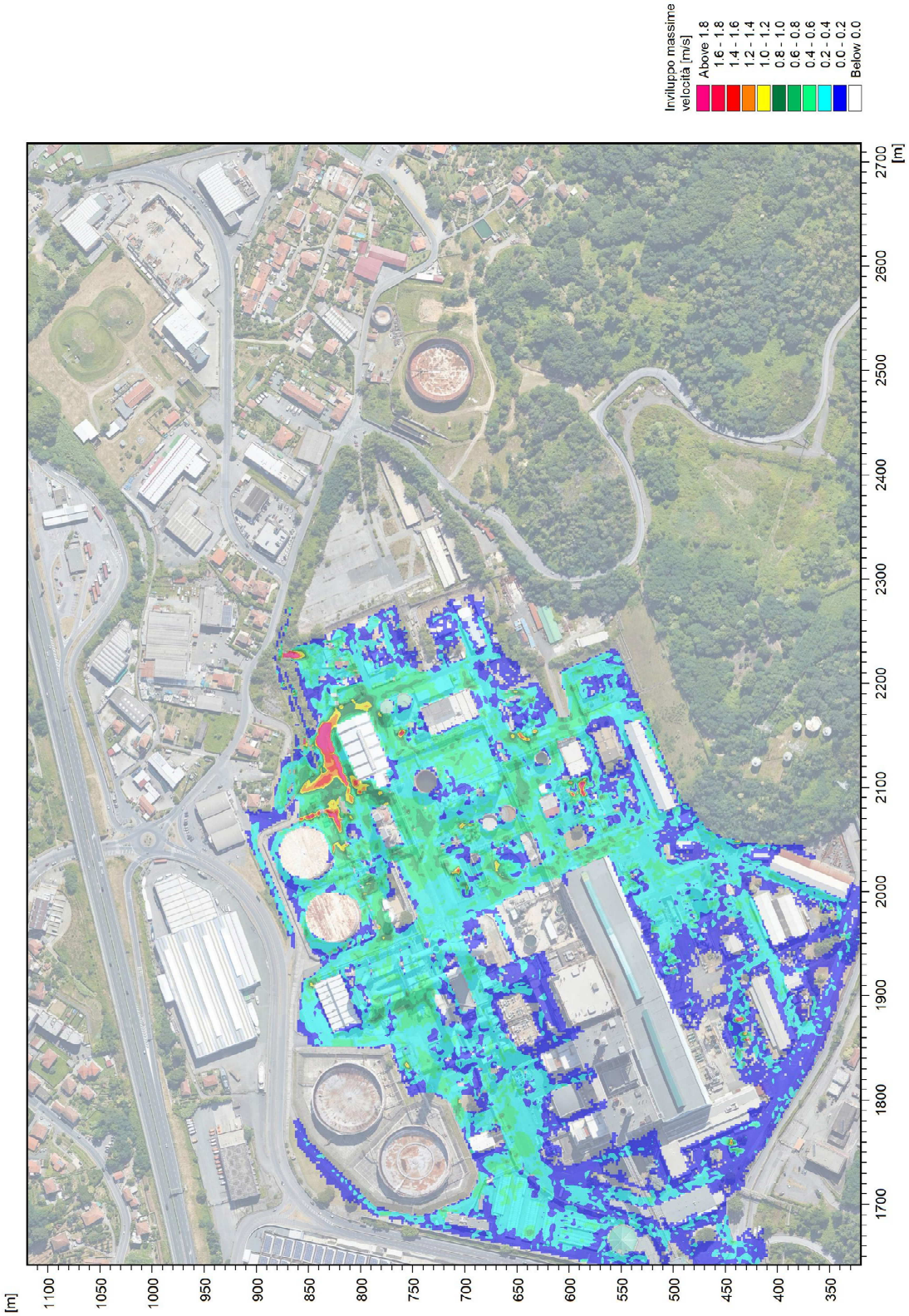


Figura 57 – Distribuzione inviluppo delle massime velocità di corrente per TR=200 anni.

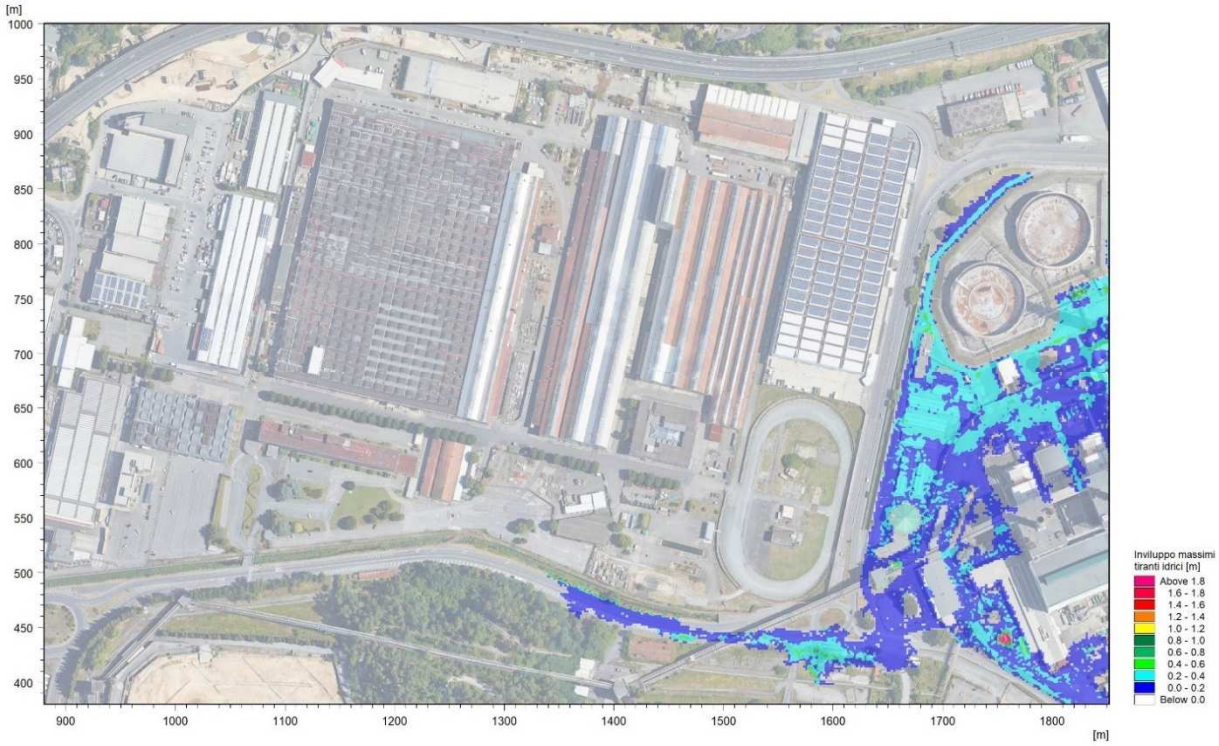


Figura 58 – Distribuzione inviluppo delle massime altezze idriche rispetto al piano campagna per TR=200 anni (porzione a valle della centrale ENEL).

9.3 Scenario TR500 (tempo di ritorno 500 anni)

Nella Tabella 8 sono elencati i principali parametri idrodinamici relativi agli alvei incisi delle aste del reticolo idrografico considerato (output del modello monodimensionale) per lo scenario con tempo di ritorno di 500 anni, intesi come inviluppo dei valori massimi. I parametri relativi al Fosso di Calcinara sono inclusi in tabella per completezza; valgono a tal proposito le medesime considerazioni già esposte nel capitolo 8.

In Figura 59 è rappresentato graficamente il profilo di corrente e il carico totale (in colore rosso) del medesimo scenario; in Figura 60 si rappresenta l'ingrandimento del deflusso bicentenario per il tratto in progetto.

Corso d'acqua	Note	Sezione	Progressiva	Fondo alveo	Tirante	Livello idrico	Carico totale	Portata	Velocità	Larghezza livello idrico	Froude	Quota sommità sponda/intradosso	Franco idraulico
-	-	-	m	m s.m.	m	m s.m.	m s.m.	m3/s	m/s	m	-	m s.m.	m
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	120	0,00	15,81	1,59	17,40	19,23	23,82	5,98	2,50	1,51	17,81	0,41
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	121	5,00	15,67	1,59	17,26	19,09	23,82	6,00	2,50	1,52	17,67	0,41
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122	10,00	15,53	1,58	17,11	18,96	23,82	6,02	2,50	1,53	17,53	0,42
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122.1	15,00	15,40	1,57	16,97	18,85	23,82	6,06	2,50	1,54	17,40	0,43
Tombone monte	sezione progetto	122.2	20,62	15,24	1,56	16,80	18,69	23,82	6,09	2,50	1,56	17,24	0,44

Corso d'acqua	Note	Sezione	Progressiva	Fondo alveo	Tirante	Livello idrico	Carico totale	Portata	Velocità	Larghezza livello idrico	Froude	Quota sommità sponda/intradosso	Franco idraulico
-	-	-	m	m s.m.	m	m s.m.	m s.m.	m3/s	m/s	m	-	m s.m.	m
	BxH=2.5x2												
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122.3	25,00	15,12	1,55	16,67	18,59	23,82	6,12	2,50	1,57	17,12	0,45
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122.4	30,00	14,98	1,54	16,52	18,47	23,82	6,17	2,50	1,59	16,98	0,46
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122.5	35,00	14,84	1,53	16,37	18,35	23,81	6,23	2,50	1,61	16,84	0,47
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122.6	40,00	14,70	1,51	16,21	18,24	23,81	6,30	2,50	1,64	16,70	0,49
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122.7	45,00	14,57	1,58	16,15	18,00	23,81	6,01	2,50	1,53	16,57	0,42
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122.8	50,00	14,43	1,58	16,01	17,86	23,81	6,03	2,50	1,53	16,43	0,42
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	122.9	55,00	14,29	1,57	15,86	17,73	23,81	6,06	2,50	1,54	16,29	0,43
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	123	60,00	14,15	1,57	15,72	17,60	23,81	6,07	2,50	1,55	16,15	0,43
Tombone monte	sezione progetto BxH=2.5x2	123.1	65,00	14,01	1,56	15,57	17,47	23,81	6,11	2,50	1,56	16,01	0,44
Tombone monte	inizio scatolare progetto BxH= 2.5x2.1	123.2	69,14	13,90	1,54	15,44	17,38	23,81	6,17	2,50	1,58	16,00	0,56
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	124	74,90	13,32	1,95	15,27	16,49	23,81	4,89	2,50	1,12	15,42	0,15
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	124.4	86,63	13,11	1,96	15,07	16,27	23,80	4,87	2,50	1,11	15,21	0,14
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	124.8	89,63	13,06	1,96	15,02	16,22	23,80	4,87	2,50	1,11	15,16	0,14
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	125.2	99,07	12,89	1,97	14,86	16,05	23,80	4,84	2,50	1,10	14,99	0,13
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	125.6	102,27	12,84	1,96	14,80	16,00	23,80	4,84	2,50	1,10	14,94	0,14
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	126	111,90	12,67	1,97	14,64	15,83	23,80	4,82	2,50	1,09	14,77	0,13
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	126.4	112,90	12,65	1,98	14,63	15,81	23,80	4,81	2,50	1,09	14,75	0,12
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	126.8	162,99	11,77	2,04	13,81	14,92	23,80	4,66	2,50	1,04	13,87	0,06
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	127.2	166,41	11,72	2,04	13,76	14,87	23,80	4,67	2,50	1,04	13,82	0,06
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	127.6	186,41	11,44	2,01	13,45	14,59	23,80	4,71	2,50	1,06	13,54	0,09
Tombone monte	scatolare progetto 2.5x2.1	128	187,32	11,42	2,02	13,44	14,57	23,80	4,70	2,50	1,06	13,52	0,08

Corso d'acqua	Note	Sezione	Progressiva	Fondo alveo	Tirante	Livello idrico	Carico totale	Portata	Velocità	Larghezza livello idrico	Froude	Quota sommità sponda/intradosso	Franco idraulico
-	-	-	m	m s.m.	m	m s.m.	m s.m.	m3/s	m/s	m	-	m s.m.	m
Tombone	scatolare progetto 2.5x2.1 monte	128.4	225,13	10,89	1,96	12,85	14,05	23,81	4,82	2,50	1,09	12,99	0,14
Tombone	scatolare progetto 2.5x2.1 monte	128.8	227,13	10,86	1,96	12,82	14,02	23,81	4,83	2,50	1,10	12,96	0,14
Tombone	scatolare progetto 2.5x2.1 monte	129.2	280,75	10,10	1,82	11,92	13,30	23,83	5,15	2,50	1,21	12,20	0,28
Tombone	scatolare progetto 2.5x2.1 monte	129.6	283,05	10,06	1,82	11,88	13,26	23,83	5,16	2,50	1,21	12,16	0,28
Tombone	scatolare progetto 2.5x2.1 monte	130	316,17	9,56	1,65	11,21	12,86	23,83	5,59	2,50	1,37	11,66	0,45
Tombone	fine scatolare progetto BxH= 2.5x2.1 monte	131	322,87	9,33	1,70	11,03	12,58	23,83	5,38	2,50	1,29	11,43	0,40
Tombone		57.5	8,12	9,15	1,88	11,03	12,01	23,83	4,23	3,00	0,98		
Tombone		58	94,12	7,55	2,21	9,76	10,86	29,29	4,13	3,00	0,86		
Tombone		59	110,10	7,24	2,27	9,51	10,60	29,29	3,89	3,00	0,78		
Tombone		60	176,32	5,95	2,64	8,59	9,90	29,88	2,99	3,00	0,52		
Tombone		61	195,66	5,57	2,96	8,53	9,83	33,14	2,90	3,00	0,47		
Tombone	monte ponte	61.1	211,66	5,26	3,18	8,44	9,81	41,36	3,30	3,00	0,52		
Tombone	valle ponte	61.1	217,66	5,22	2,69	7,91	9,62	42,15	3,88	3,00	0,65		
Tombone		61.2	220,00	5,10	2,80	7,90	9,46	41,37	4,42	3,00	0,80		
Tombone		62	283,39	3,87	3,52	7,39	8,68	29,38	2,18	3,00	0,33		
Tombone		62.5	328,72	3,68	3,94	7,62	8,62	29,44	1,23	5,00	0,18		
Tombone	imbocco tombinatura	63	331,72	3,67	3,90	7,57	8,59	18,18	2,05	5,00	0,49		
Tombone	tombinatura	64	346,94	3,59	4,01	7,60	8,56	18,18	2,05	5,00	0,49		
Tombone	tombinatura	65	360,33	3,53	4,10	7,63	8,53	18,18	2,05	5,00	0,49		
Tombone	tombinatura	66	375,49	3,45	4,22	7,67	8,50	18,17	2,05	5,00	0,49		
Tombone	tombinatura	67	561,79	3,29	4,20	7,49	8,13	18,17	2,05	5,00	0,49		
Tombone	tombinatura	68	596,41	3,26	4,20	7,46	8,05	18,17	2,05	5,00	0,49		
Tombone	tombinatura	69	649,23	3,21	4,21	7,42	7,94	18,17	2,05	5,00	0,49		
Tombone	tombinatura	70	678,60	3,18	4,25	7,43	7,88	18,17	2,05	5,00	0,49		
Tombone	sbocco tombinatura	71	829,38	3,05	4,26	7,31	7,57	18,16	2,05	5,00	0,49		
Calcinara	valle ponte	78.2	1151,09	4,66	3,62	8,28	8,40	22,28	1,17	5,20	0,19		
Calcinara		78.1	1194,39	4,60	3,66	8,26	8,38	22,36	1,23	4,90	0,20		
Calcinara		78.05	1198,39	4,50	3,77	8,27	8,38	22,37	1,20	4,90	0,20		
Calcinara	monte tombinatura	78	1200,39	4,50	3,69	8,19	8,38	22,37	2,03	4,90	0,43		
Calcinara	confluenza Colombiera	77.1	1397,94	3,42	4,40	7,82	8,07	22,38	2,03	4,90	0,43		
Calcinara	valle tombinatura	77	1460,85	3,08	4,28	7,36	7,86	33,09	3,00	4,90	0,64		
Calcinara		76	1465,35	3,07	4,33	7,40	7,57	33,09	1,54	4,90	0,24		
Calcinara	confluenza Tombone	75	1601,52	2,77	4,54	7,31	7,48	33,37	1,49	5,25	0,23		
Calcinara		74	1715,79	2,52	4,69	7,21	7,46	51,48	2,26	5,25	0,35		

Tabella 11 – Risultati di sintesi per lo scenario TR500.

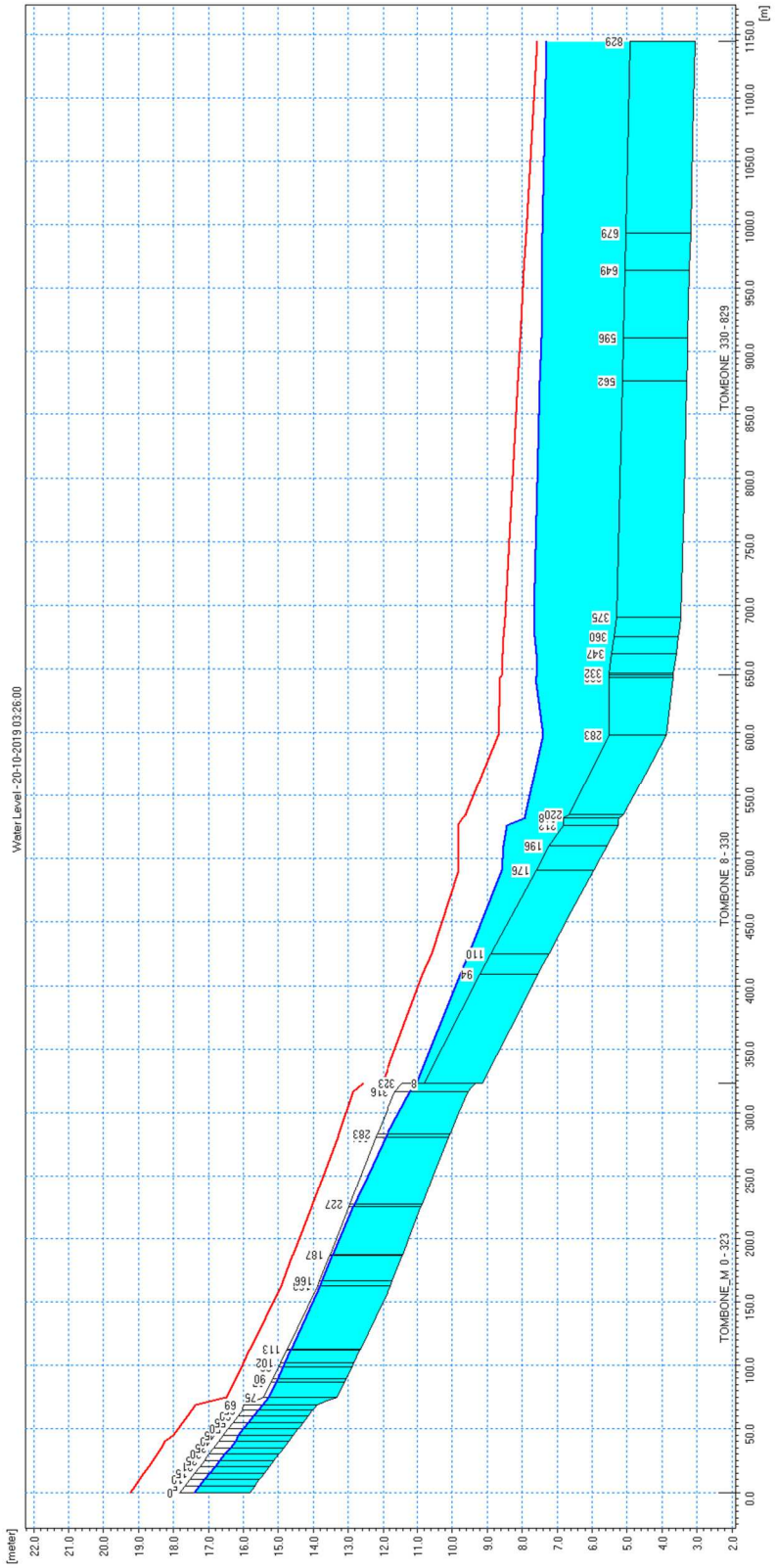


Figura 59 – Profilo longitudinale di corrente del fosso Tombone per lo scenario TR500.

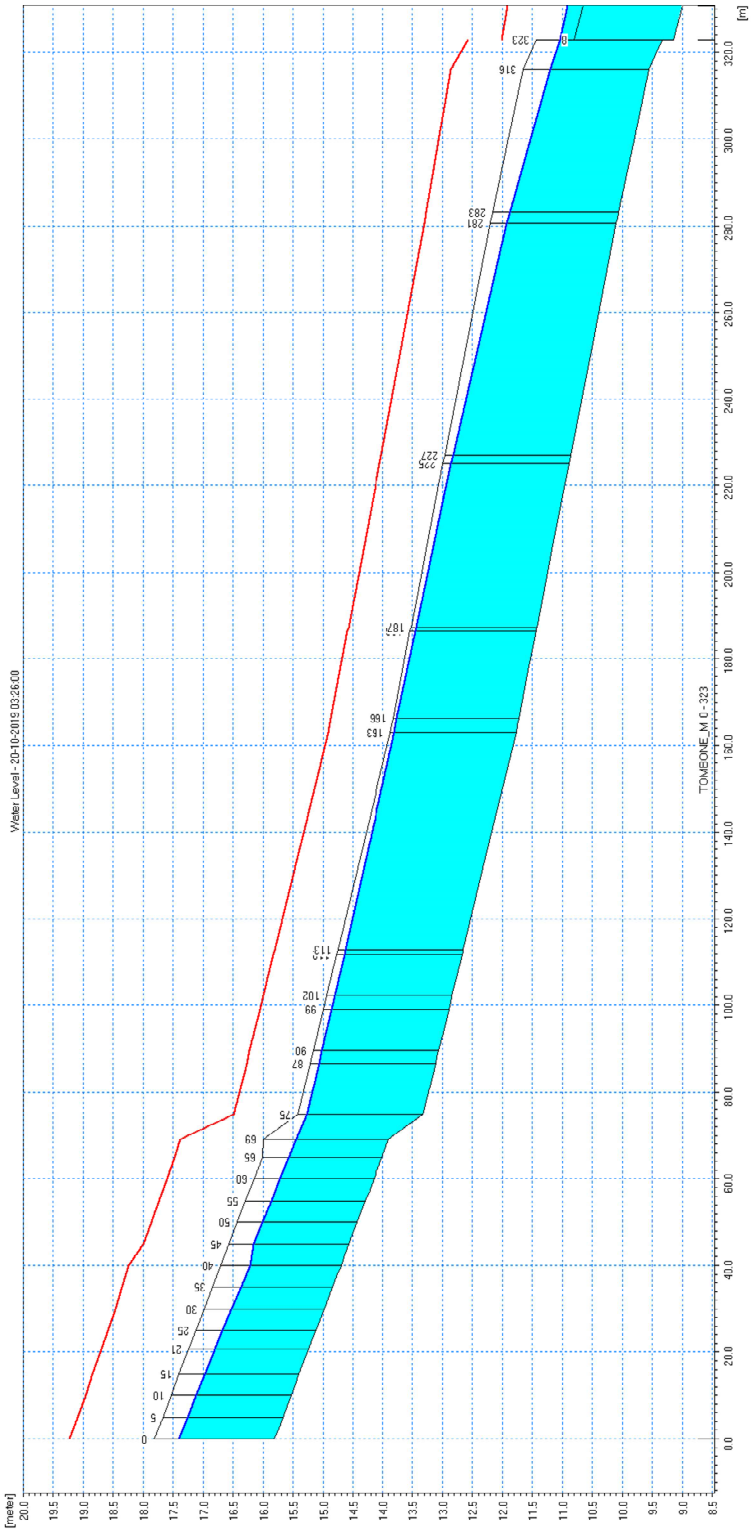


Figura 60 – Dettaglio del profilo longitudinale di corrente del fosso Tombone nel solo tratto di intervento per lo scenario TR500.

La sistemazione prevista in progetto consente il transito anche della portata associata a un tempo di ritorno di 500 anni nel tratto di intervento senza generare esondazioni, pur in condizioni di incipiente moto in pressione all'interno della nuova tombinatura (che mantiene funzionamento a pelo libero ma con franco minimo -nel punto più sfavorito- di soli 6 cm).

In Tabella 11 è riportato per ciascuna sezione il franco idraulico ottenuto per il tratto sistemato, misurato rispetto alla quota sommitale di sponda per il tratto di monte a cielo aperto, e rispetto all'intradosso della sezione scatolare per il tratto tombato. Per il tempo di ritorno di 500 anni il franco risulta pari a circa:

- 0,41÷0,49 m nel tratto a cielo aperto;
- 0,06÷0,40 m (valore medio 0,17 m) per il tratto tombato.

La Figura 61 rappresenta gli idrogrammi di portata in alcune sezioni dell'area della confluenza, per diretto confronto con l'analoga rappresentazione di stato attuale (Figura 44 – Idrogrammi di portata estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 500 anni (stato attuale): portata nel Fosso di Calcinara in input (sez.78, linea nera) e in uscita dal modello (linea blu, con aggiunta dei contributi del Tombone e dei due affluenti minori a monte); portata nel Fosso Tombone alla confluenza con il Calcinara (linea rossa) a confronto con l'idrogramma idrologico per il bacino complessivo (linea verde).Figura 44, capitolo 8.3):

- confronto tra gli idrogrammi relativi al Fosso di Calcinara in input (sez.78) e in uscita (sez.74) dal modello, a seguito dei contributi del Tombone e dei due affluenti minori;
- idrogramma del Fosso Tombone alla confluenza a confronto con quello idrologico calcolato per il bacino complessivo: è possibile apprezzare l'effetto di laminazione prodotto dalle esondazioni residue, oltre che l'entità del volume complessivo esondato.

Nello stato di progetto la portata massima che il Fosso Tombone riesce a recapitare nel Calcinara è pari a circa 18 m^3/s, a fronte dei circa 11 m^3/s di stato attuale. La capacità di portata del tratto di valle è superiore a quello dell'attuale tombinatura e pertanto in assenza di esondazioni dal tratto sistemato una maggiore portata giunge a confluenza entro la sezione d'alveo.

Questo provoca conseguentemente un incremento anche della portata del Calcinara alla confluenza nel Fossamastra (estremità di valle del modello allestito per il presente studio), che risulta pari a circa 51 m^3/s rispetto ai circa 40 m^3/s di stato attuale.

Si precisa come tale incremento non modifichi le condizioni di rischio idraulico per le aree a valle, ovvero le esondazioni dal Canale Fossamastra, in quanto le analisi idrauliche svolte per la definizione degli ambiti di pericolosità di quest'ultimo considerano che esso sia interessato dal deflusso dell'intera portata idrologica del bacino contribuente, come se nell'intero bacino a monte non si verificassero esondazioni o comunque laminazioni del colmo. L'intervento in progetto va quindi nella direzione di progressiva sistemazione del reticolo idrografico di monte già prevista nella analisi di rischio idraulico pregresse.

Nell'attuale assetto del tratto di valle del Fosso Tombone, le maggiori portate veicolate dalla nuova tombinatura comportano maggiori volumi di esondazione nell'area della centrale ENEL, che si traducono in una maggiore estensione verso valle delle aree allagate, con propagazione lungo via Valdilocchi più estesa di quella che si verifica già attualmente per l'evento TR500, pur con altezze d'acqua modeste (dell'ordine dei 10 cm).

Anche nel caso che la portata del Fosso Tombone fosse recapitata al Calcinara senza esondazioni nell'area della centrale ENEL, essa fuoriuscirebbe comunque dal tratto a cielo aperto del Calcinara, giungendo ad allagare le medesime porzioni di via Valdilocchi.

L'estensione delle aree allagate è rappresentata in Figura 62 e Figura 63 (mappe delle massime altezze idriche e velocità osservate nel corso dell'evento) sulle medesime viste utilizzate per l'evento TR50; in Figura 64 si visualizza l'estensione della propagazione di esondazione lungo via Valdilocchi.

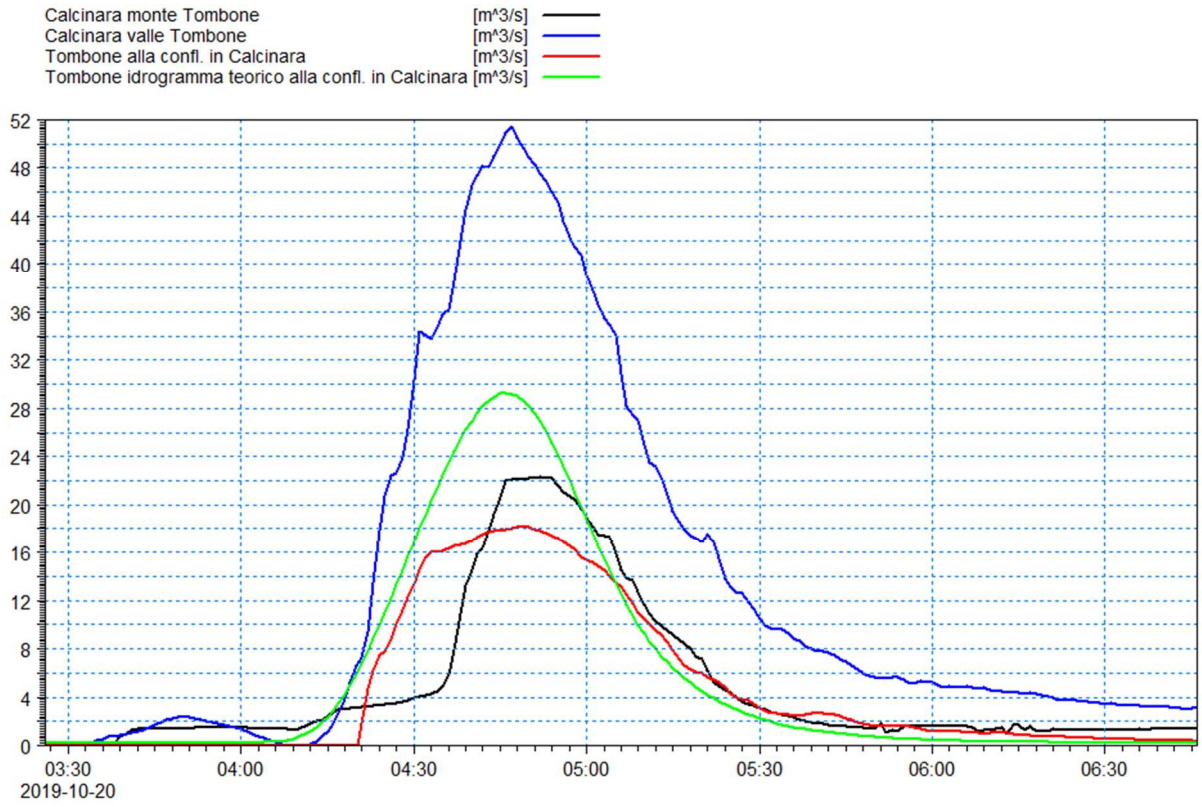


Figura 61 – Idrogrammi di portata estratti dai risultati della simulazione con tempo di ritorno di 500 anni: portata nel Fosso di Calcinara in input (sez.78, linea nera) e in uscita dal modello (linea blu, con aggiunta dei contributi del Tombone e dei due affluenti minori a monte); portata nel Fosso Tombone alla confluenza con il Calcinara (linea rossa) a confronto con l'idrogramma idrologico per il bacino complessivo (linea verde).

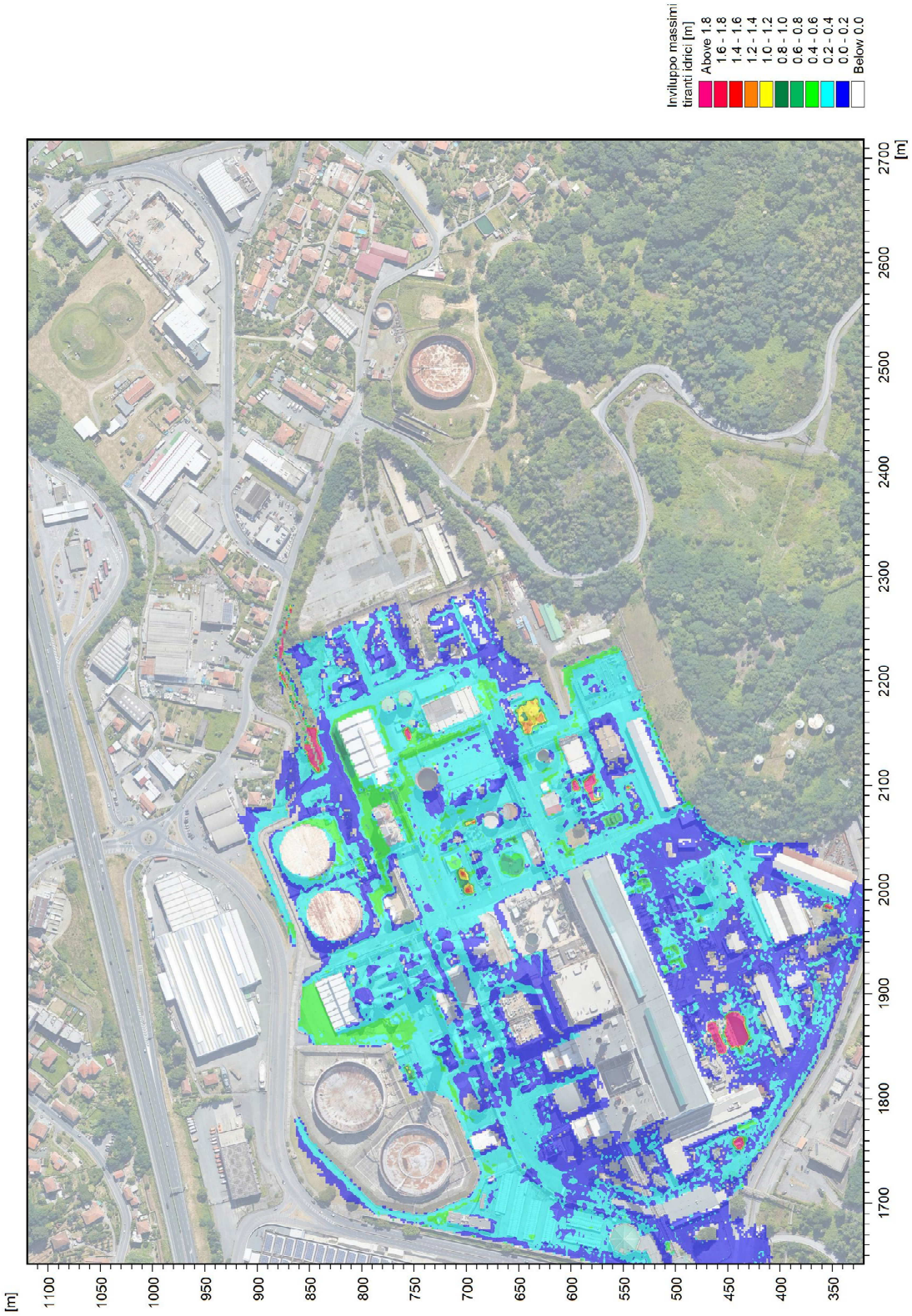


Figura 62 – Distribuzione inviluppo delle massime altezze idriche rispetto al piano campagna per TR=500 anni.

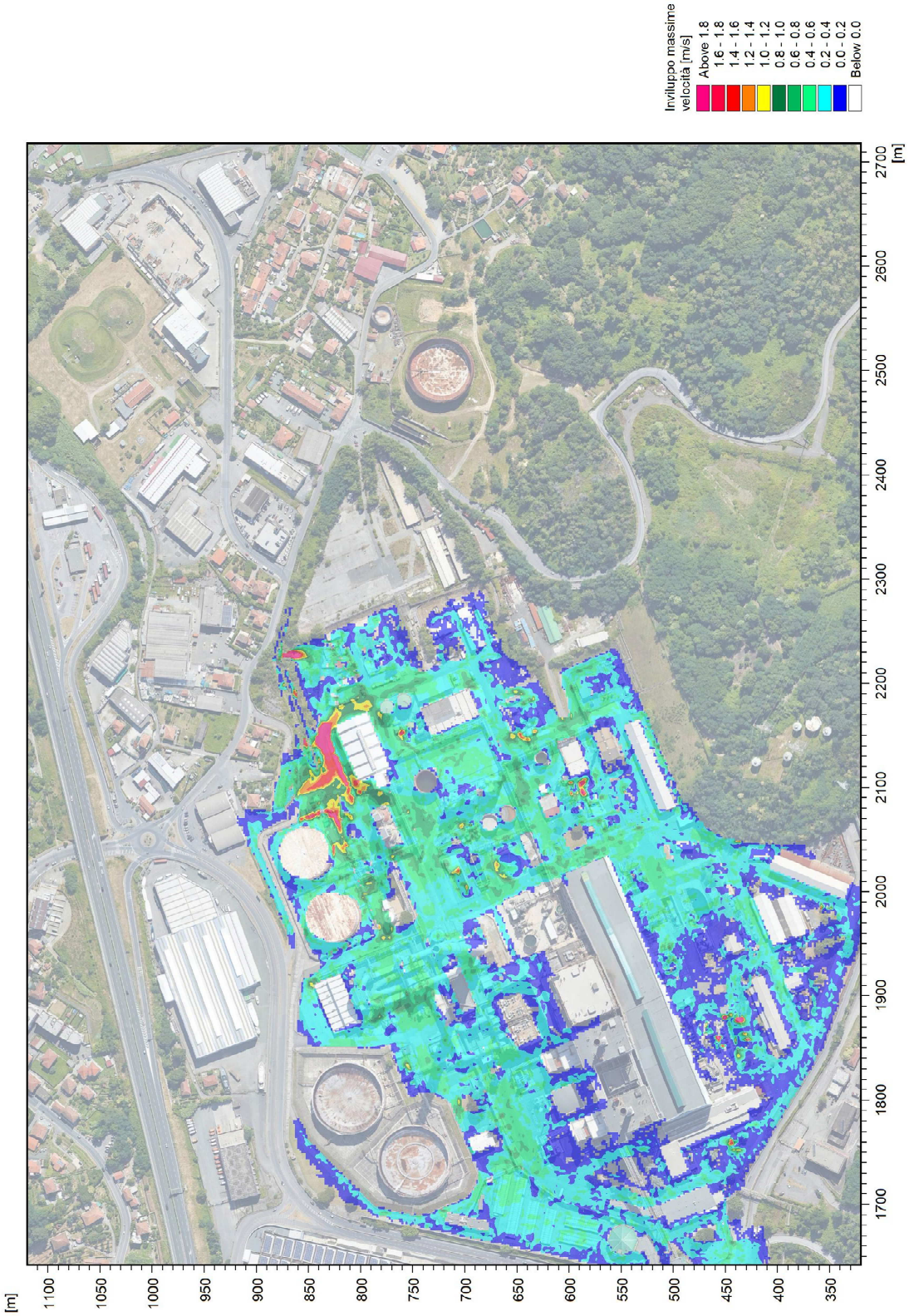


Figura 63 – Distribuzione inviluppo delle massime velocità di corrente per TR=500 anni.

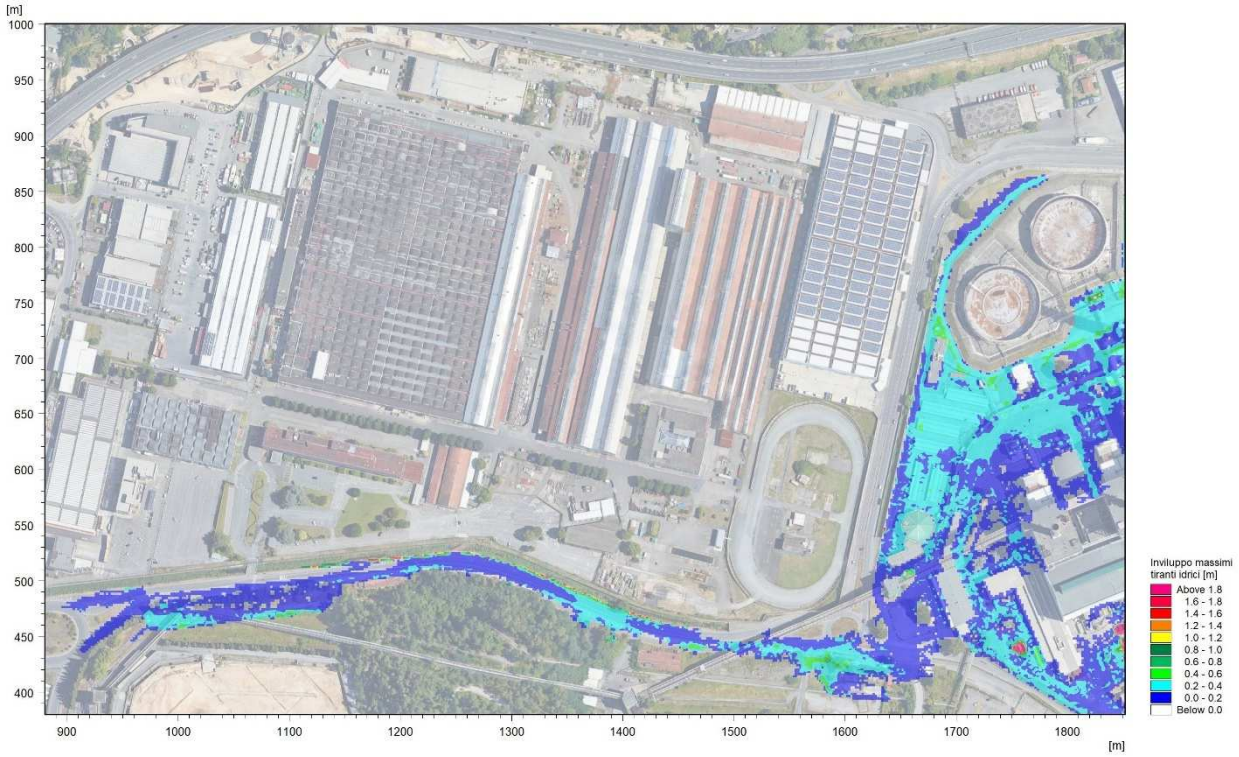


Figura 64 – Distribuzione inviluppo delle massime altezze idriche rispetto al piano campagna per TR=500 anni (porzione a valle della centrale ENEL).

10. CONCLUSIONI E PROPOSTA DI PERIMETRAZIONE DI PROGETTO DELLE FASCE DI PERICOLOSITÀ

Il vigente Piano di Bacino, come descritto nel capitolo 2, inserisce l'area ex ENEL in località Pianazze in Comune di La Spezia (oggetto del presente studio) all'interno di una perimetrazione di pericolosità idraulica elevata (fascia A), recependo i risultati dello studio F.i.l.s.e. del 2020 già citato, in cui era definita la proposta di perimetrazione riportata in Figura 65.

È stato pertanto richiesto ai soggetti interessati all'acquisizione dell'area in oggetto di farsi carico degli adempimenti tecnici necessari ai fini del Procedimento di Svincolo Idraulico, predisponendo in particolare un Progetto Definitivo di interventi di mitigazione del rischio, di cui il presente studio idraulico è parte integrante.

Il Progetto in particolare sviluppa con maggiore dettaglio tecnico gli interventi di mitigazione già ipotizzati preliminarmente nel citato studio Fi.l.s.e. del 2020, consistenti nell'adeguamento della sezione d'alveo nel tratto di monte a cielo aperto del Fosso, e soprattutto nella sostituzione dell'attuale tombinatura costituita da due tubazioni DN1000 con una nuova tombinatura a sezione scatolare in grado di garantire una maggiore capacità di deflusso.

Lo studio idraulico di dettaglio descritto nel presente documento ha consentito di verificare l'adeguatezza della soluzione tecnica proposta per l'efficace mitigazione del rischio idraulico nelle aree di interesse, oltre che di ricostruire con accuratezza l'effettiva estensione degli allagamenti residui attesi in relazione al deflusso delle piene associate a un tempo di ritorno di 50, 200 e 500 anni del Fosso Tombone.

In particolare il tratto di corso d'acqua oggetto di sistemazione risulta in grado di far defluire senza esondazioni le portate di piena (idrogrammi idrologici, che assumono l'assenza di effetti di esondazione/laminazione nei tratti più a monte) fino a un tempo di ritorno di 500 anni, a fronte delle attuali ampie esondazioni che si riscontrano già per un evento con TR=50 anni.

Con riferimento a TR=200 anni, i franchi idraulici valutati per il tratto di sistemazione a cielo aperto rispettano i vincoli delle NTA del PAI, risultando superiori a 0,50 m rispetto alla sommità spondale, mentre all'interno della nuova tombinatura il rispetto di tali vincoli non risulta possibile, per limitazioni di tipo tecnico in relazione alla dimensione di scatolare realizzabile.

Si riescono in ogni caso ad ottenere in tutto il tratto condizioni di deflusso a pelo libero del colmo di piena duecentennale, pur con franchi ridotti -dell'ordine dei 30-40 cm rispetto all'intradosso dello scatolare-; considerando anche come l'assetto attuale del reticolo idrografico a monte non consenta[3] in realtà la formazione dell'onda di piena teorica per la quale è stata svolta la verifica, si ritiene l'intervento efficace in termini di mitigazione delle attuali condizioni di rischio idraulico per le aree in esame.

In particolare si riscontra l'annullamento delle aree allagate dal Fosso Tombone in tutte le aree a monte della centrale ENEL, per tutti gli eventi di piena considerati (fino a TR=500 anni).

In relazione ai risultati ottenuti si è provveduto a predisporre una proposta di perimetrazione di progetto delle fasce di pericolosità idraulica, propedeutica alle attività istruttorie da parte dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale finalizzate alla c.d. "riperimetrazione preventiva", la quale definisce lo stato di inondabilità delle aree a seguito della realizzazione delle opere di mitigazione.

Secondo i criteri definiti dal Piano di Bacino e dalla specifica normativa vigente, il tracciamento delle fasce A, B e C è stato condotto considerando l'inviluppo delle aree interessate da allagamenti per tempi di ritorno rispettivamente di 50, 200 e 500 anni. I risultati ottenuti sono rappresentati in Figura 66.

Si precisa come questa perimetrazione sia relativa alle potenziali esondazioni producibili dal solo Fosso Tombone (oggetto del presente studio), affluente del Fosso di Calcinara, pur tenendo conto -in termini di condizioni imposte a valle- dell'effetto prodotto dalle condizioni idrodinamiche di piena riscontrabili nel corpo idrico recettore. Tali esondazioni sono le uniche che potenzialmente possono interferire con l'area ex ENEL in esame, ma nelle aree più a valle (centrale ENEL, via Valdilocchi, via Melara) questi allagamenti si sovrappongono a quelli generabili da altri corsi d'acqua (Calcinara, Colombiera, Fossamastra).

La capacità di smaltimento del tratto terminale del Fosso Tombone inoltre è significativamente condizionata dalle elevate altezze d'acqua che si instaurano in condizioni di piena nel Fosso Calcinara nel tratto di confluenza, già esse prossime o superiori alle quote dei muri spondali.

[3] È opportuno precisare che per il corso d'acqua in esame -come previsto dalla normativa vigente- si è fatto riferimento a una valutazione idrologica che considera l'intera portata producibile dal bacino afferente, nonostante si riscontri nella realtà l'impossibilità tecnica per tali significative portate al colmo di poter essere veicolate alle sezioni di monte dei tratti simulati, per presenza di tratti tombati a monte di minore capacità di deflusso (per cui si verificheranno allagamenti già nelle porzioni di reticolo più a monte).

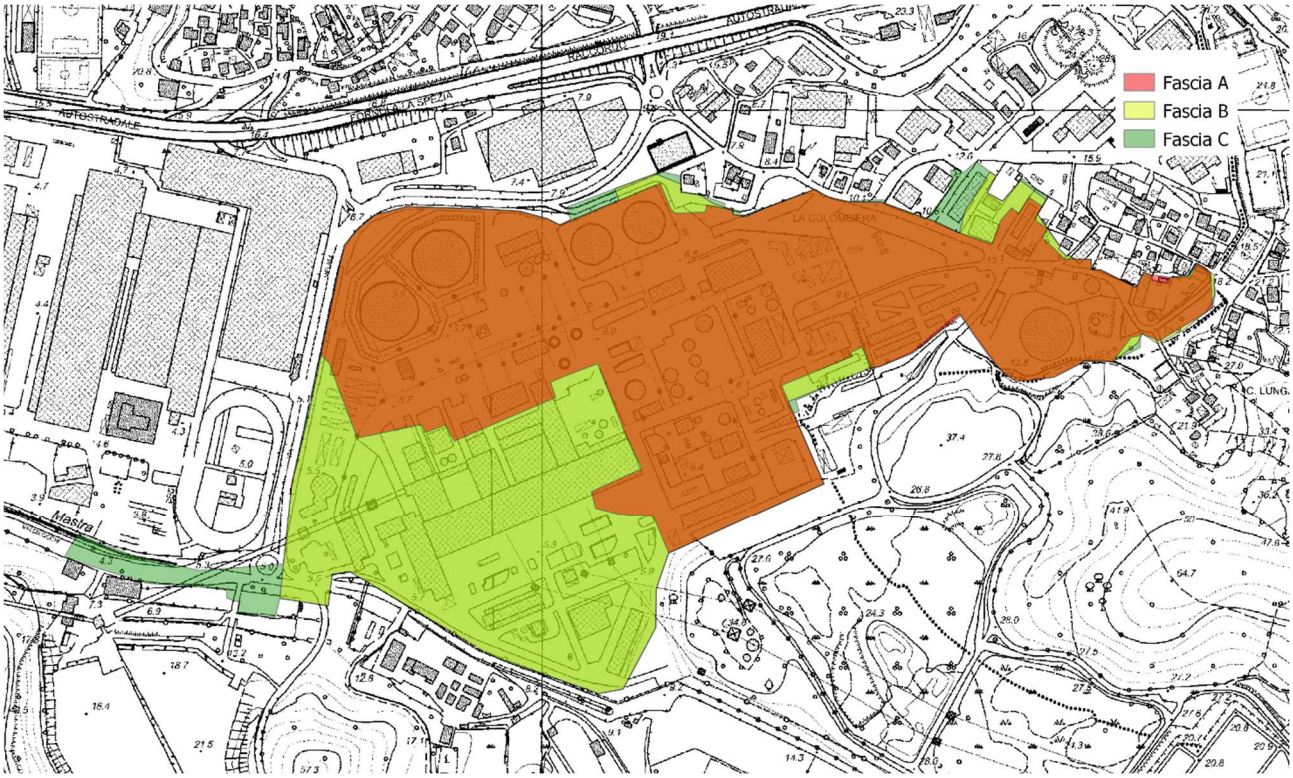


Figura 65 – Estensione delle fasce A, B e C per il Fosso Tombone allo stato attuale.

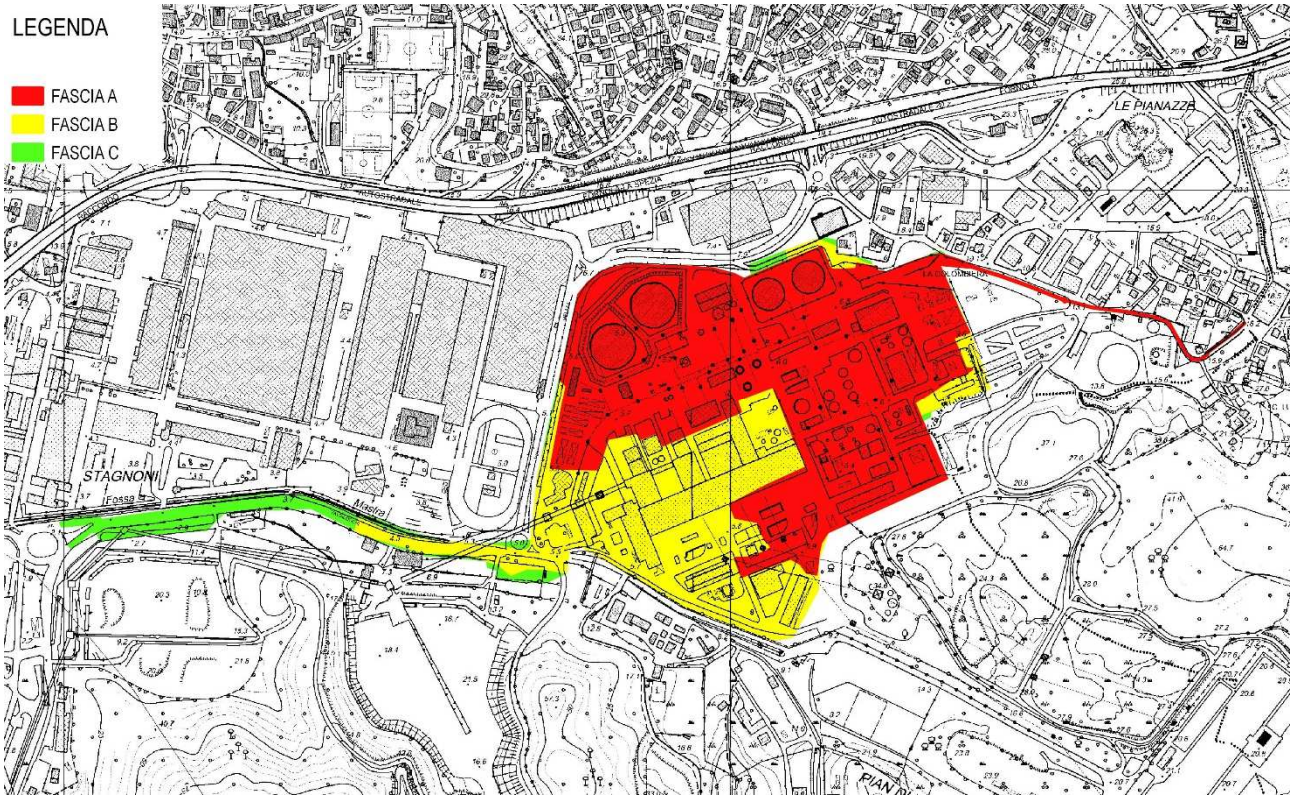


Figura 66 – Estensione delle fasce A, B e C per il Fosso Tombone conseguenti agli interventi in progetto.

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 67.

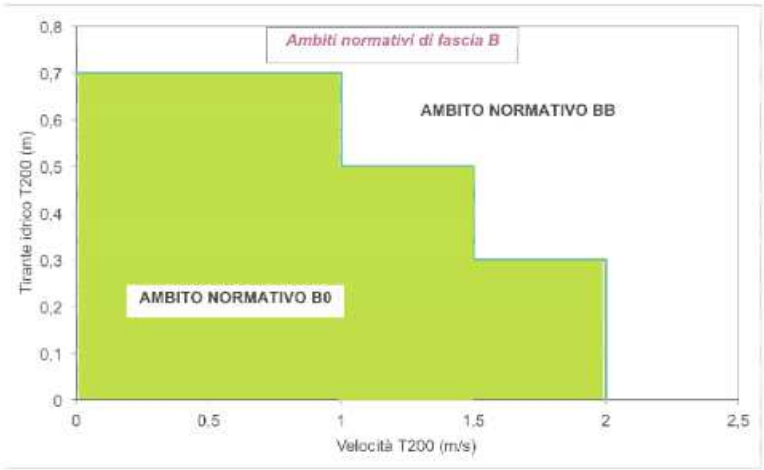


Figura 67 – Definizione delle fasce fluviali BB e B0 ai sensi della DGR 91/2013.

Gli ambiti "B0" e "BB" di stato attuale per l'area di studio del Fosso Tombone sono rappresentati in Figura 68; le aree perimetrate in fascia B risultano prevalentemente associabili a un ambito B0, in quanto gli allagamenti sono dovuti alla propagazione su un'ampia area dei volumi di esondazione, generalmente con tiranti idrici e velocità modeste. Solo nel tratto di monte si riscontra un'area associabile ad un ambito BB in relazione alle

velocità più elevate lungo la strada e la rampa di accesso all'area ex ENEL, e alle altezze d'acqua rilevanti nell'area di espansione a Sud di via delle Pianazze.

Nella condizione di progetto l'intera area perimetrata in fascia B risulta invece associabile a un ambito di minore pericolosità B0, come rappresentato in Figura 69.

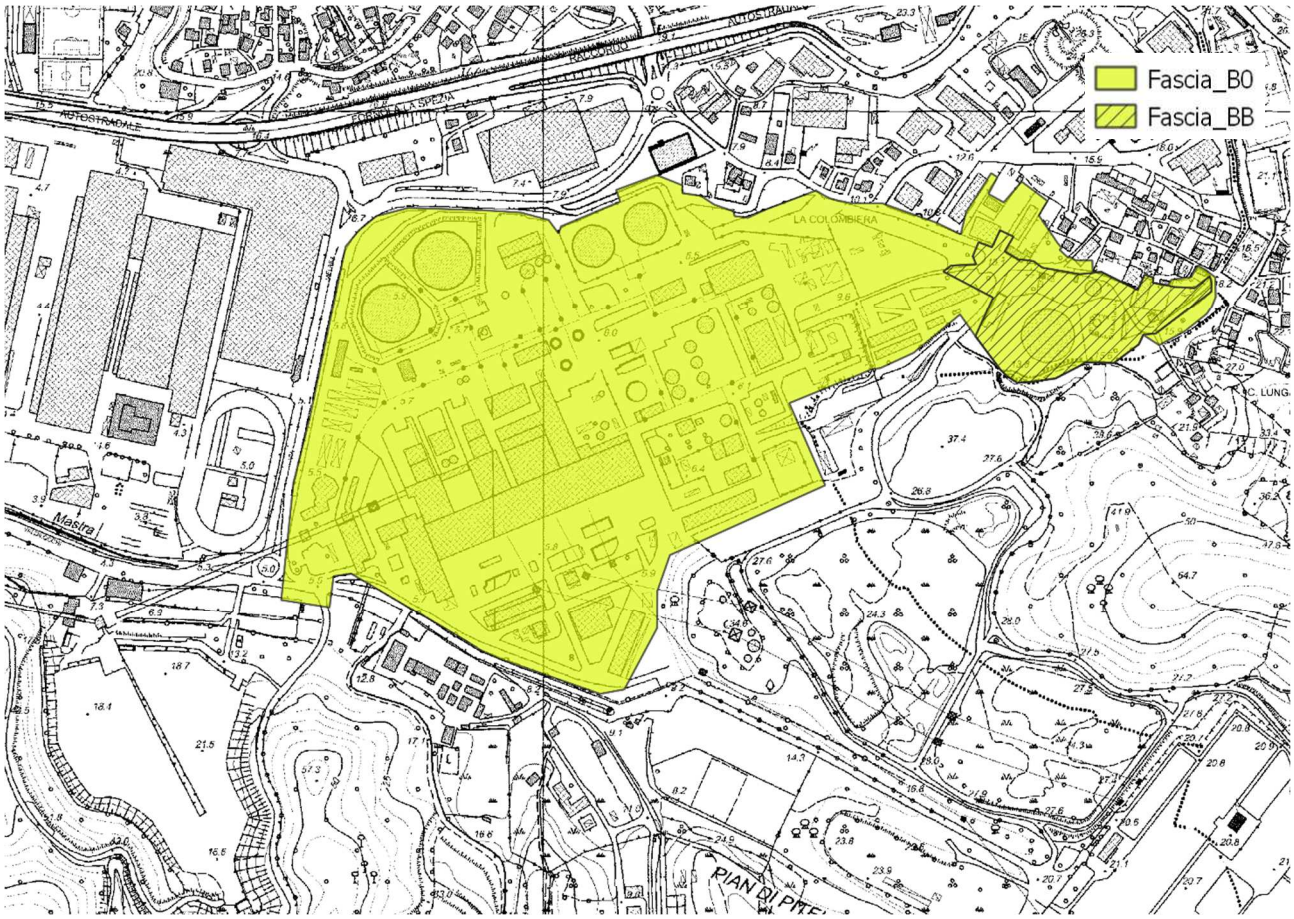


Figura 68 – Definizione delle aree B0 e BB all'interno della fascia B per il Fosso Tombone – stato attuale.



Figura 69 – Definizione delle aree B0 e BB all'interno della fascia B per il Fosso Tombone – condizione di progetto.

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:

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

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

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

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

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

dove:
A = area della sezione bagnata (m^2);
C = coefficiente di attrito di Chezy ($m^{1/2}s^{-1}$);
g = accelerazione di gravità ($m\ s^{-2}$);
h = altezza del pelo libero rispetto ad un livello di riferimento orizzontale (m);
Q = portata (m^3/s);
R = raggio idraulico (m);
α = coefficiente di distribuzione della quantità di moto;
q = portata laterale addotta (m^2/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:

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

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 $Q = A(Z_{j1}) . Z_{j2}$

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 sovracitati 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:

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

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

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

nelle quali:

h(x,y,t)	=	profondità dell'acqua;
ζ (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,Vx,Vy(x,y,t)	=	velocità del vento e componenti lungo le direzioni x e y;
Ω (x,y)	=	parametro di Coriolis;
pa (x,y,t)	=	pressione atmosferica;

ρw = densità dell'acqua;
x,y = coordinate spaziali;
t = tempo;
τxx, τxy, τyy = componenti dello sforzo di taglio che tengono conto della turbolenza e del profilo verticale delle velocità;
Sxx,Sxy,Syy = 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 τ 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:

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

2. oppure dipendente dalla velocità locale:

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

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, Δ 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.

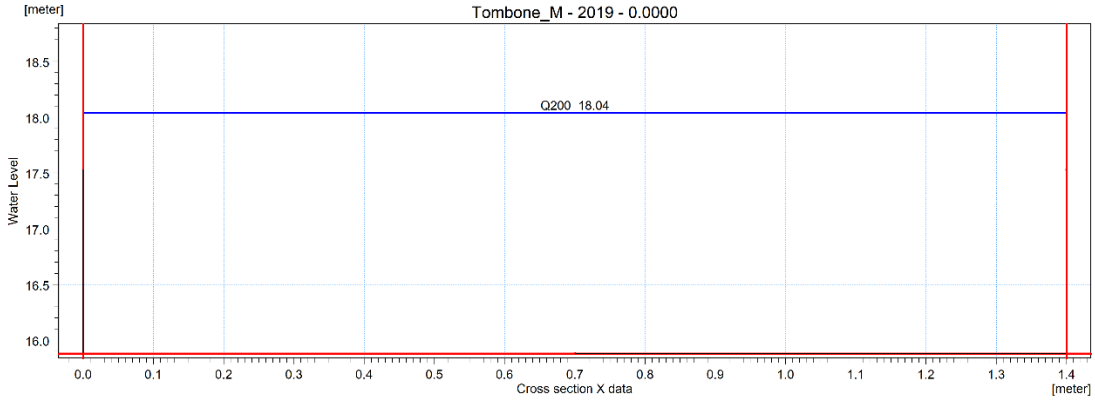
La condizioni iniziale è rappresentata da una situazione di "quiete", nel senso che tutte le componenti delle forzanti sono nulle (portate, velocità, livelli) e variano poi linearmente nel tempo fino a raggiungere il valore

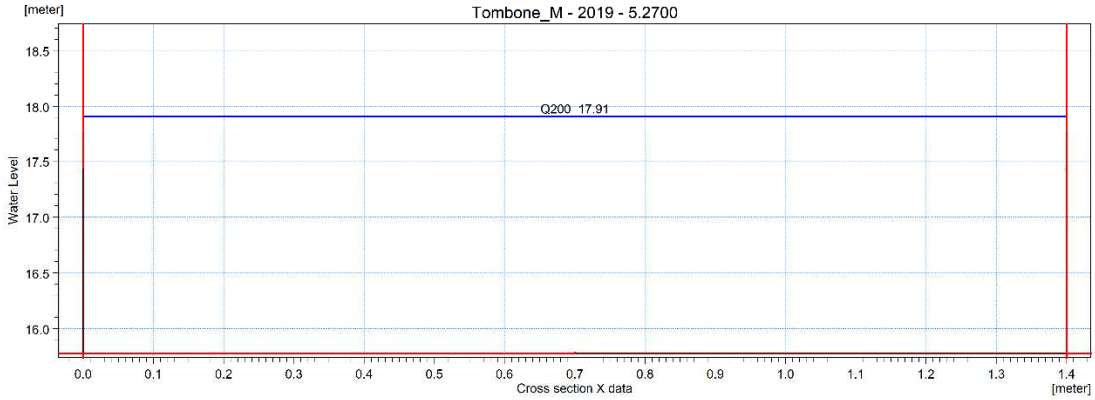
assegnato in un tempo prefissato. Questa tecnica, detta del "soft start" consente di eliminare eventuali brusche oscillazioni iniziali della soluzione che potrebbero presentarsi per problemi di stabilità numerica. Al termine del "soft start" si verifica che la situazione ottenuta sia di effettiva stazionarietà.

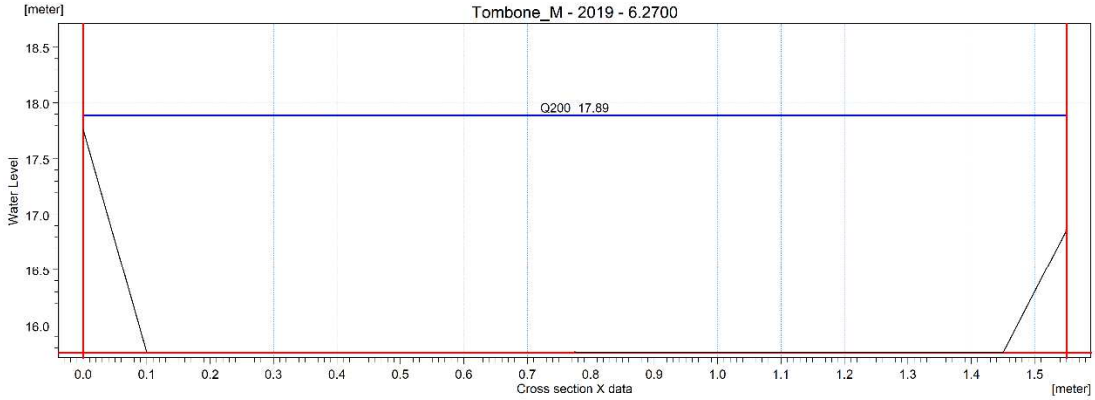
Le equazioni del modello sono risolte alle differenze finite utilizzando il metodo ADI (Alternating Direction Implicit). Il sistema di equazioni linearizzate che scaturisce dall'algoritmo è risolto con il metodo DS (Double Sweep, Abbott, 1979).

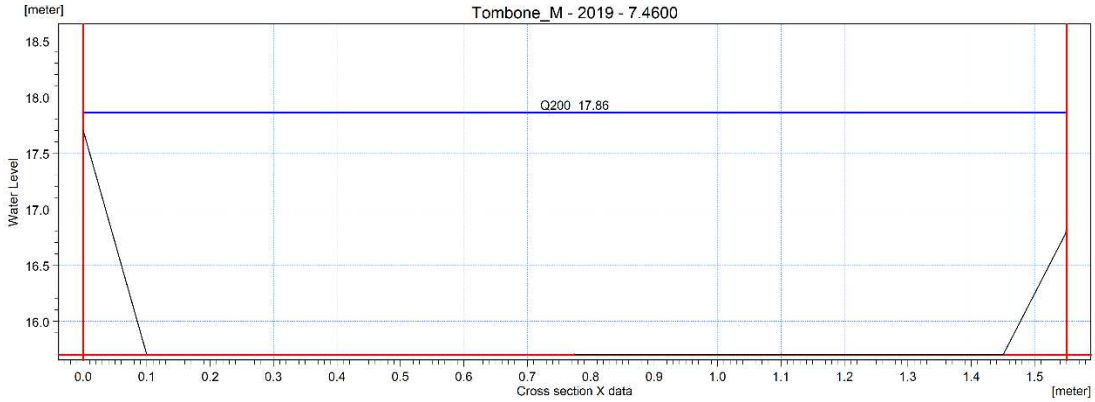
ALLEGATO 3 – Sezioni trasversali inserite nel modello idraulico, con indicato il livello massimo di piena duecentennale

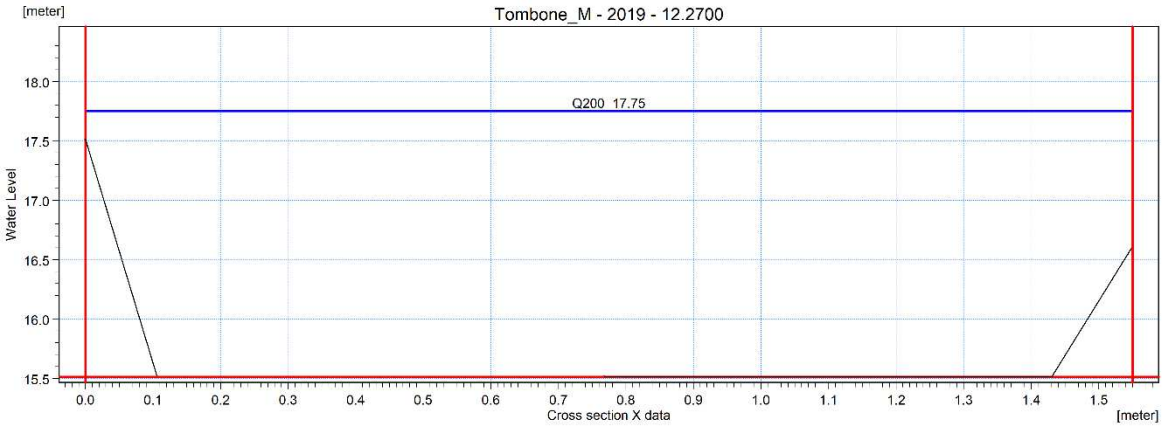
CONFIGURAZIONE DI STATO ATTUALE

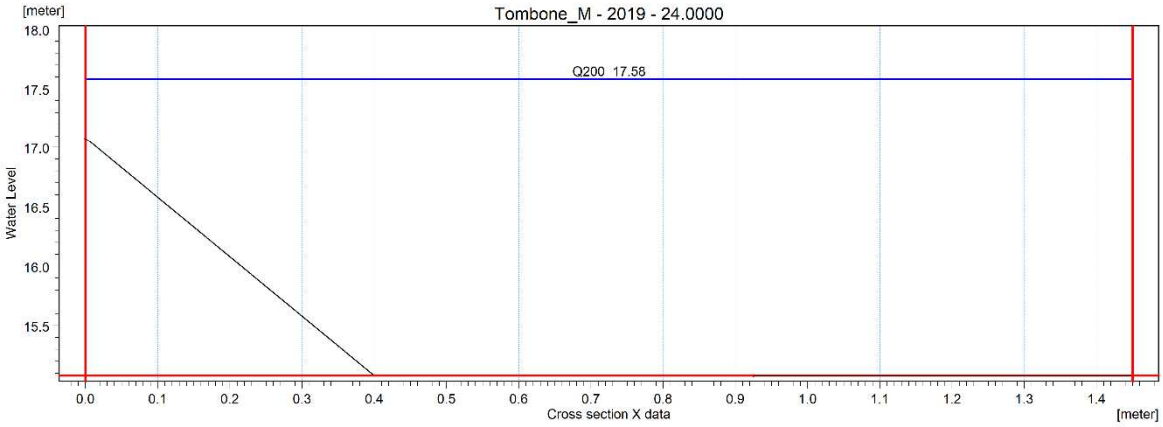


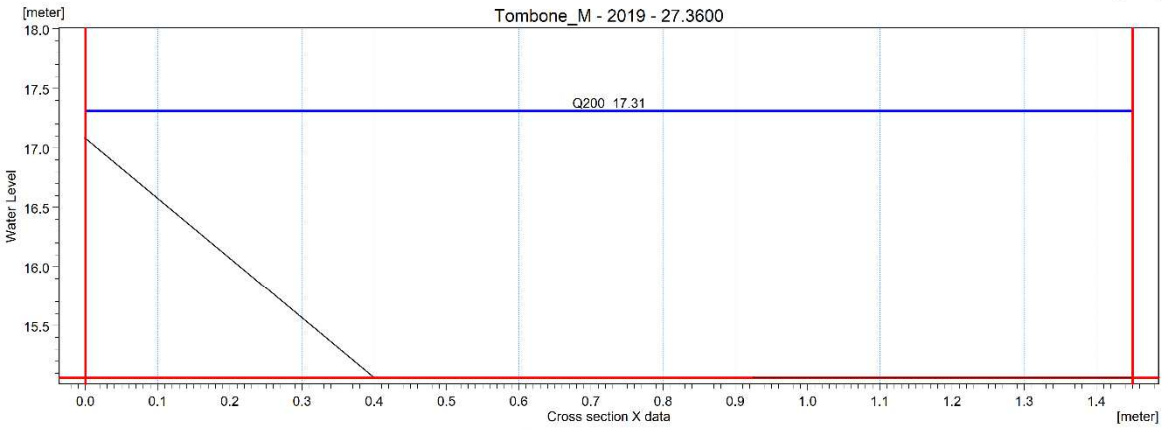


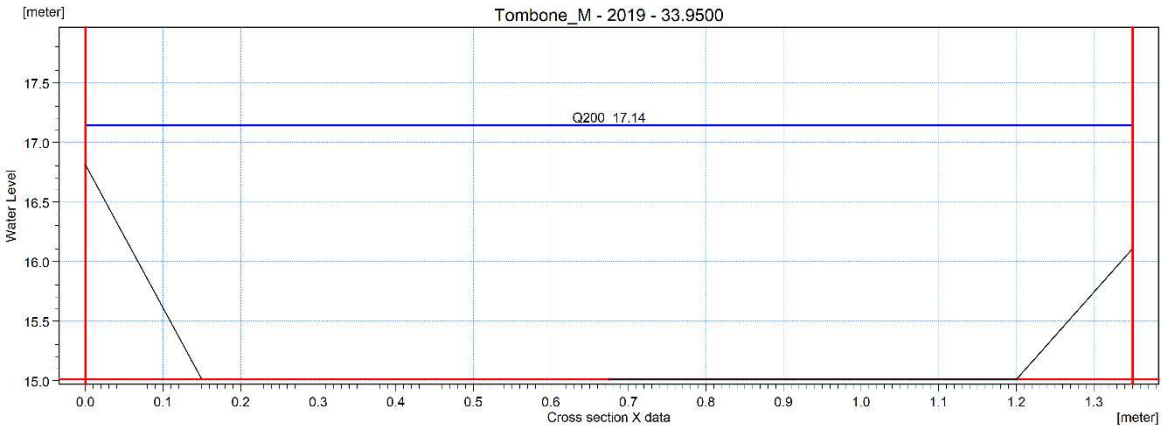


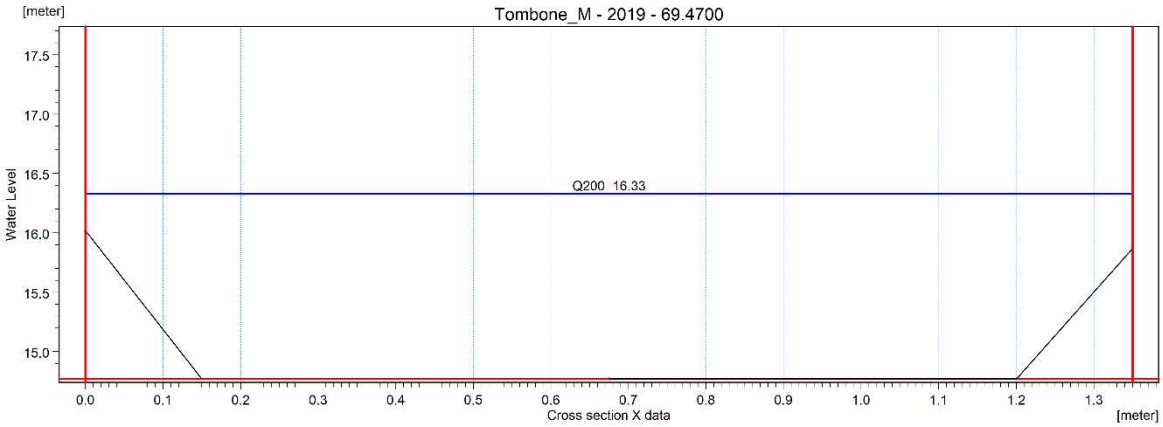


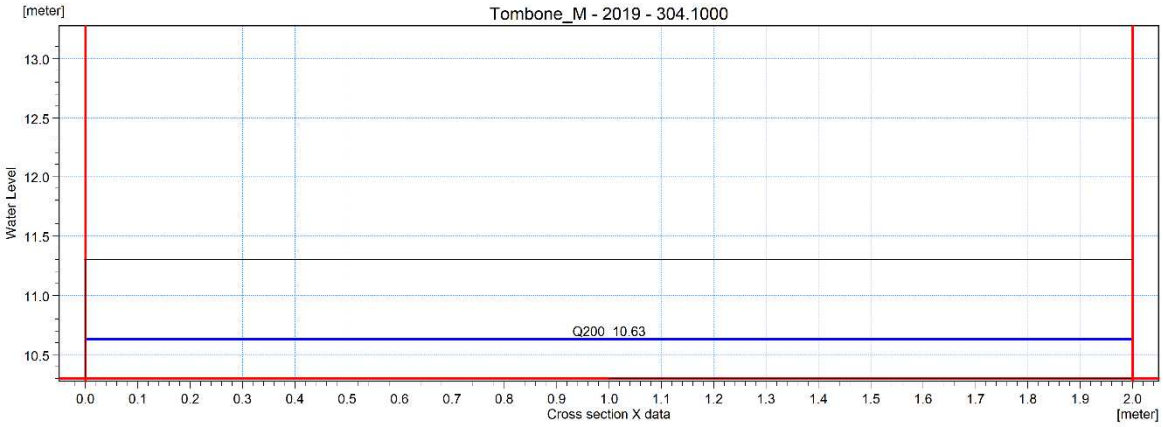

[meter]
Tombone_M - 2019 - 12.2700
Q200 17.75
Water Level
Cross section X data
[meter]

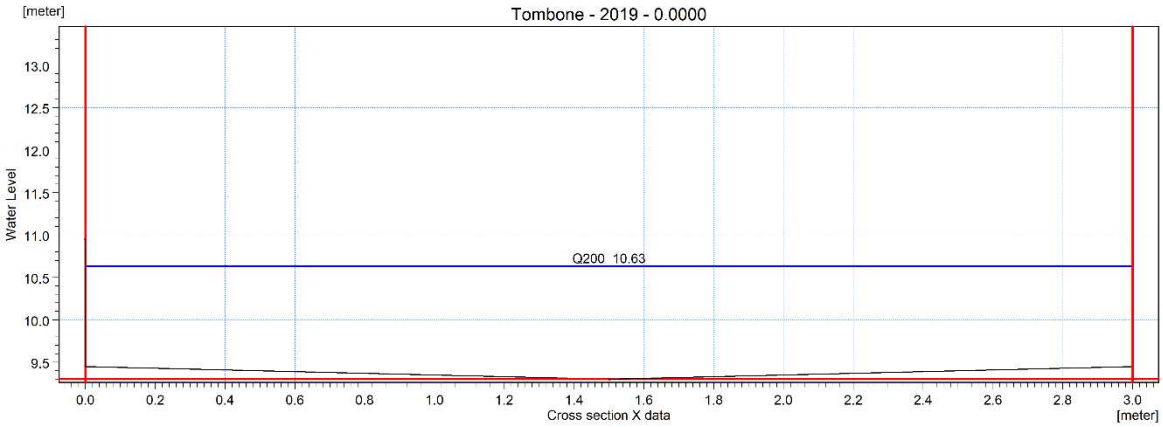

[meter]
Tombone_M - 2019 - 24.0000
Q200 17.58
Water Level
Cross section X data
[meter]

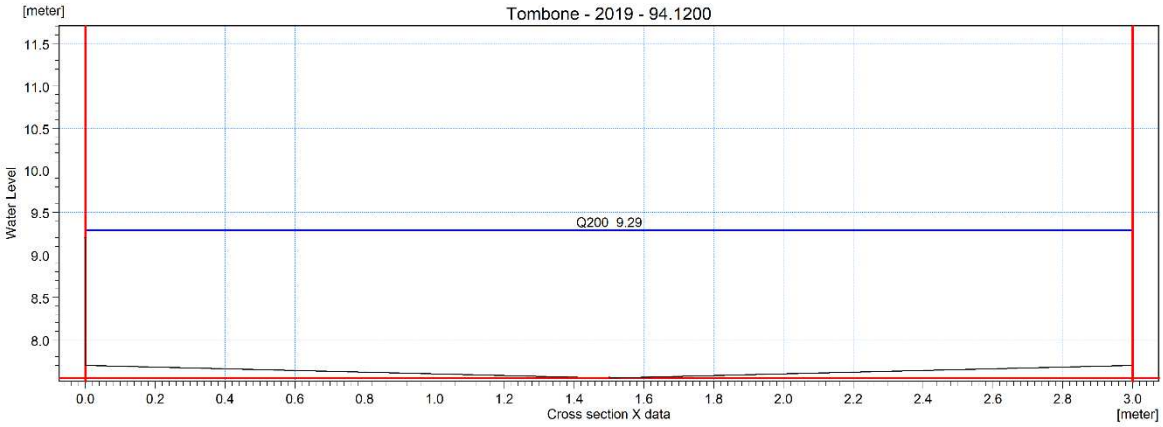

[meter]
Tombone_M - 2019 - 27.3600
Q200 17.31
Water Level
Cross section X data
[meter]

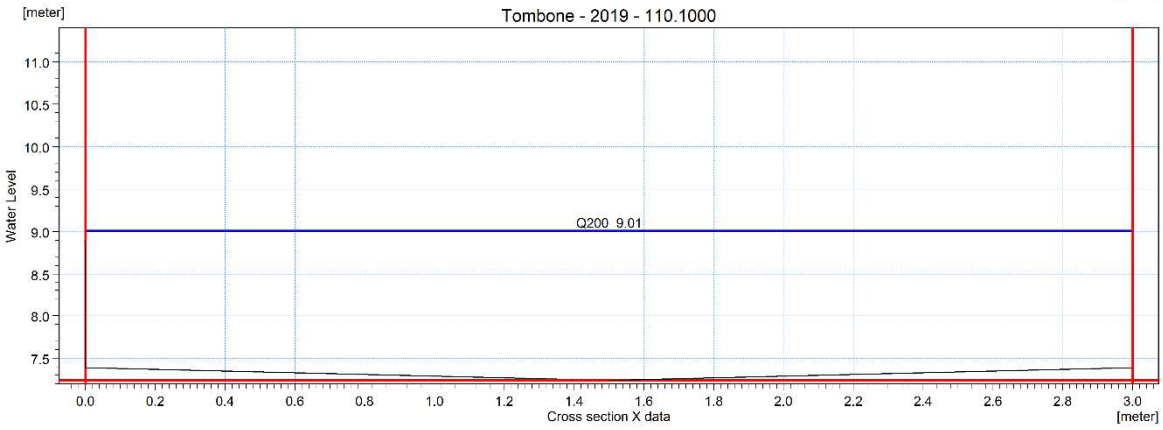

[meter]
Tombone_M - 2019 - 33.9500
Q200 17.14
Water Level
Cross section X data
[meter]

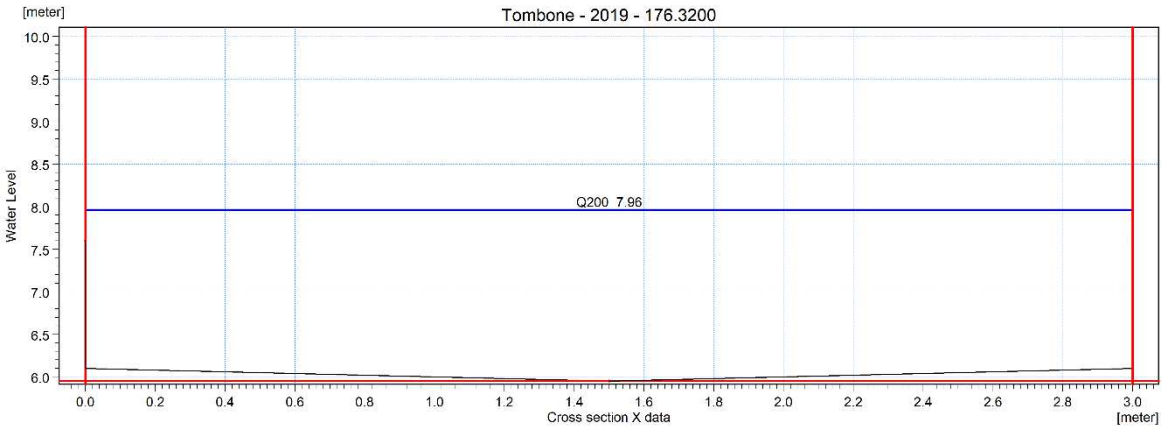

[meter]
Tombone_M - 2019 - 69.4700
Water Level
Q200 16.33
Cross section X data
[meter]

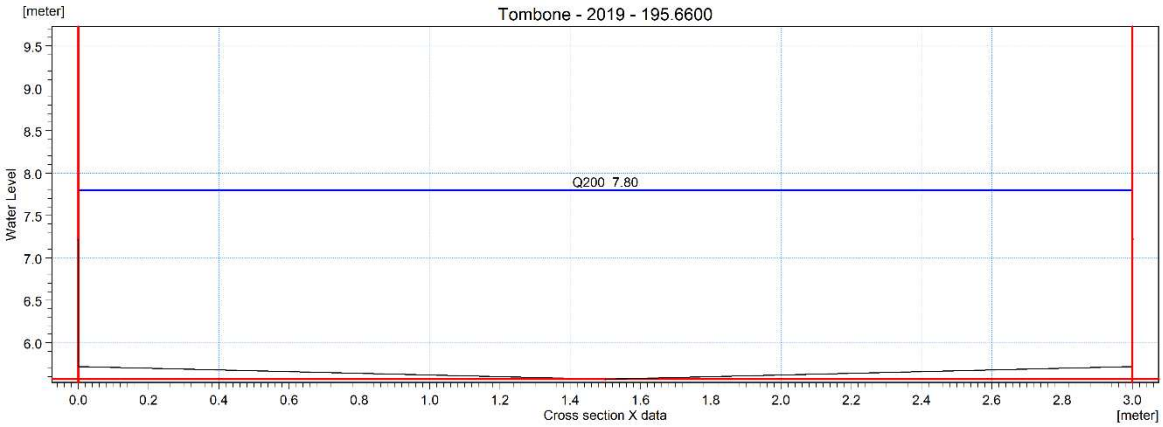

[meter]
Tombone_M - 2019 - 304.1000
Water Level
Q200 10.63
Cross section X data
[meter]

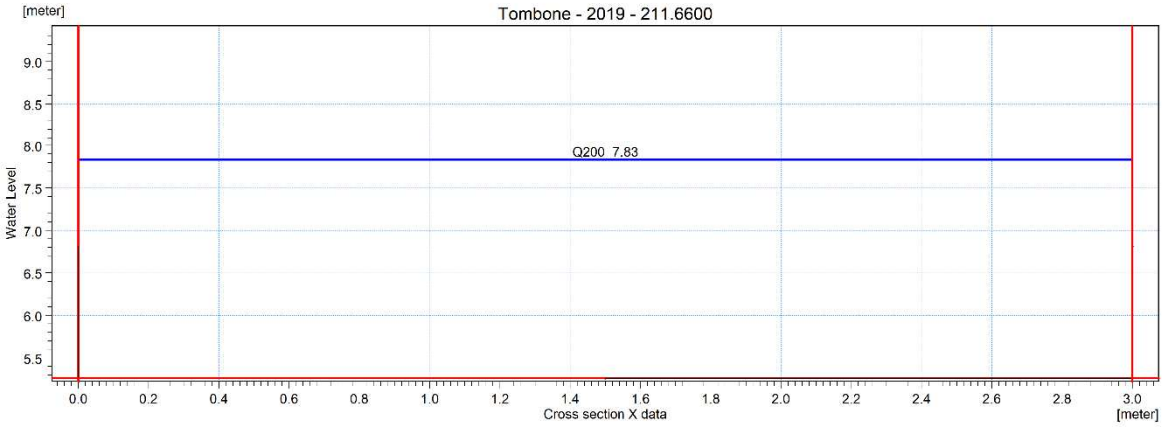

[meter]
Tombone - 2019 - 0.0000
Water Level
Q200 10.63
Cross section X data
[meter]

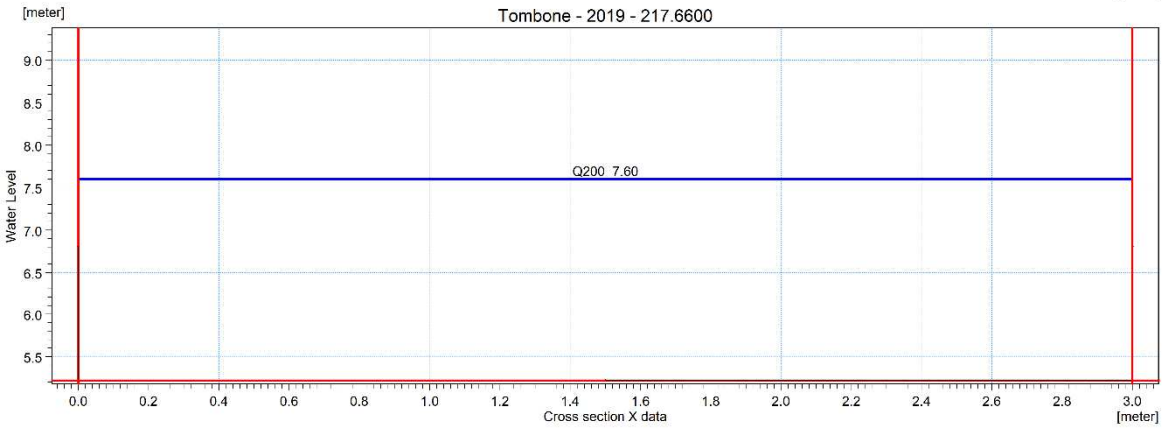

[meter]
Tombone - 2019 - 94.1200
Water Level
Q200 9.29
Cross section X data
[meter]

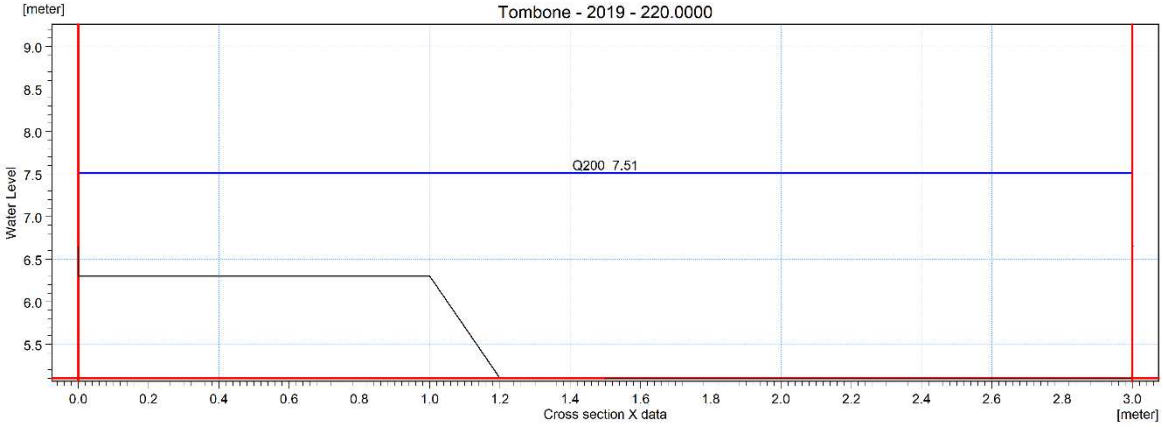

[meter]
Tombone - 2019 - 110.1000
Water Level
Q200 9.01
Cross section X data
[meter]

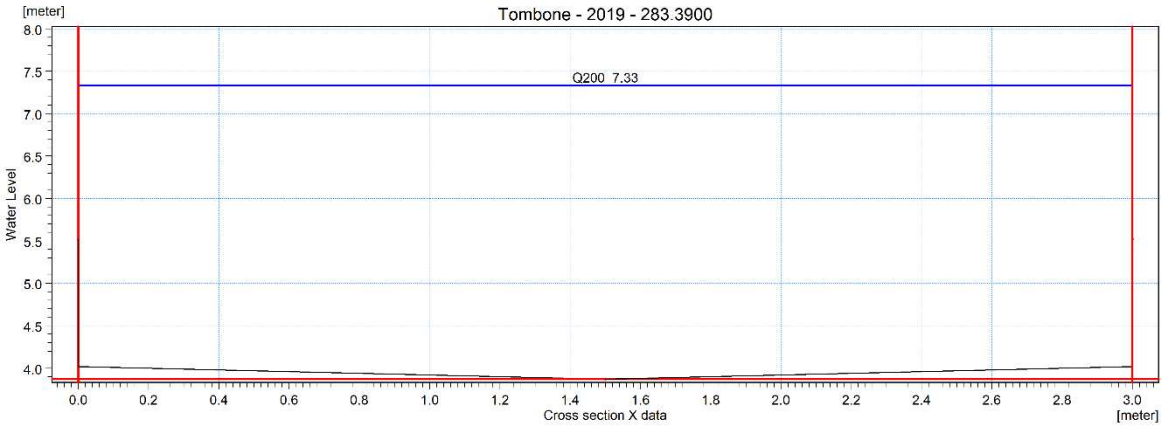

[meter]
Tombone - 2019 - 176.3200
Water Level
Q200 7.96
Cross section X data
[meter]

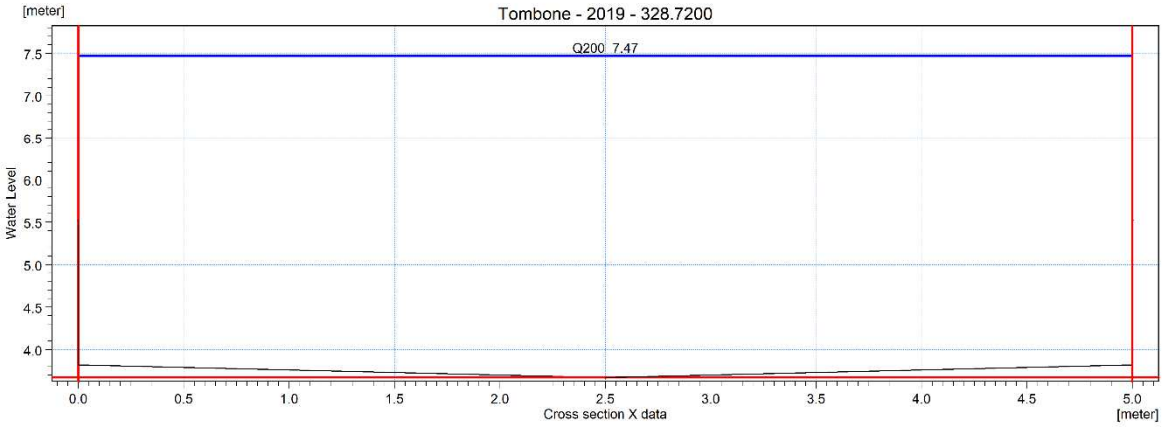

[meter]
Tombone - 2019 - 195.6600
Water Level
Q200 7.80
Cross section X data
[meter]


[meter]
Tombone - 2019 - 211.6600
Water Level
Q200 7.83
Cross section X data
[meter]

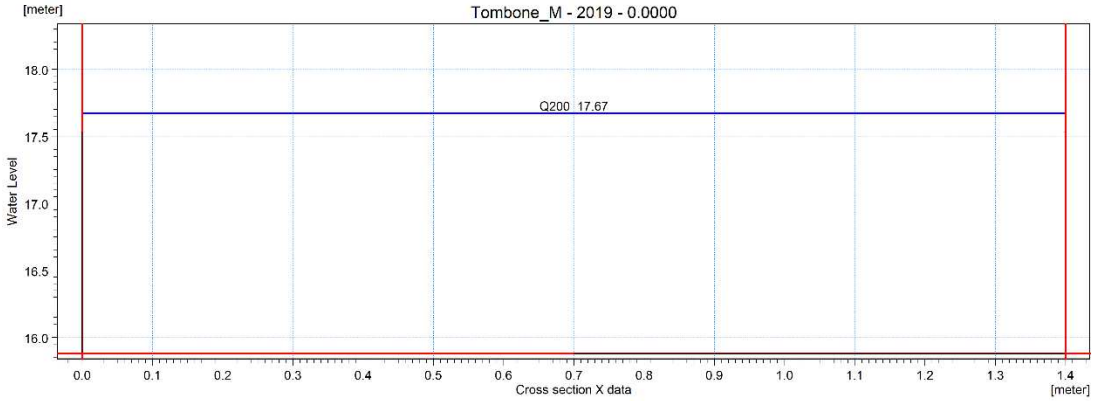

[meter]
Tombone - 2019 - 217.6600
Water Level
Q200 7.60
Cross section X data
[meter]

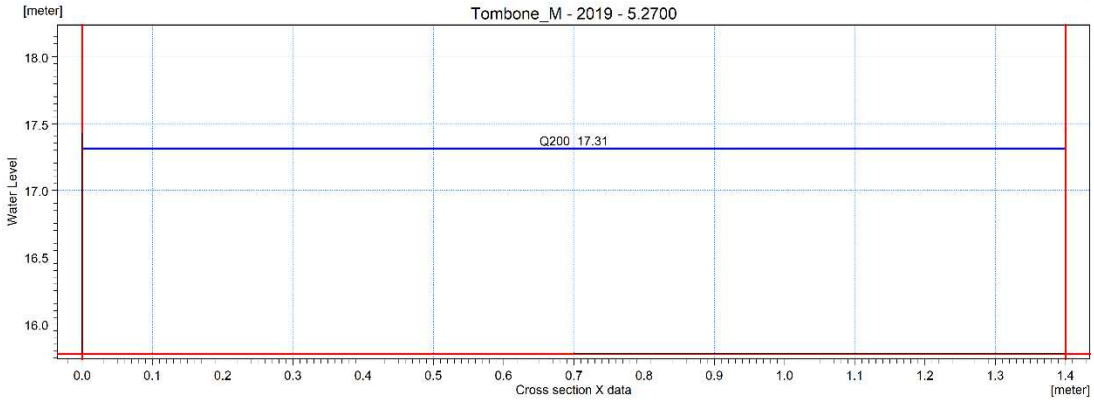

[meter]
Tombone - 2019 - 220.0000
Water Level
Q200 7.51
Cross section X data
[meter]

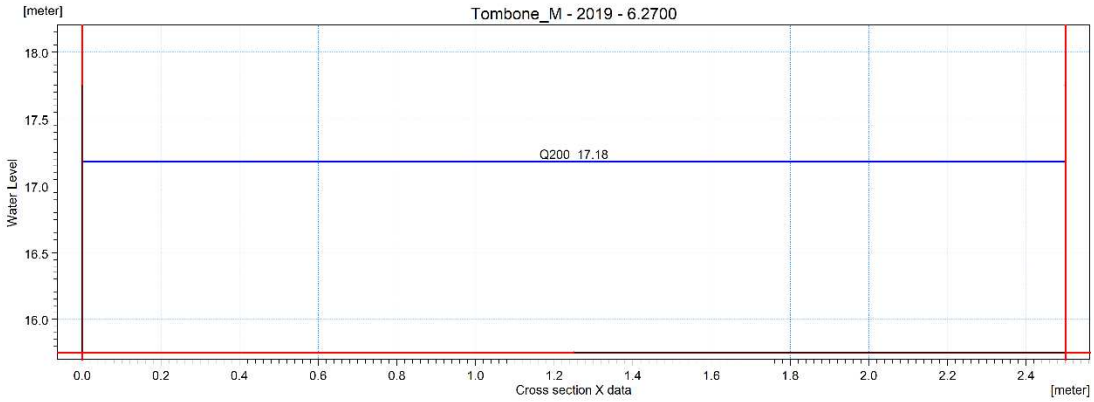

[meter]
Tombone - 2019 - 283.3900
Q200 7.33
Water Level
8.0
7.5
7.0
6.5
6.0
5.5
5.0
4.5
4.0
0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8 2.0 2.2 2.4 2.6 2.8 3.0
Cross section X data
[meter]

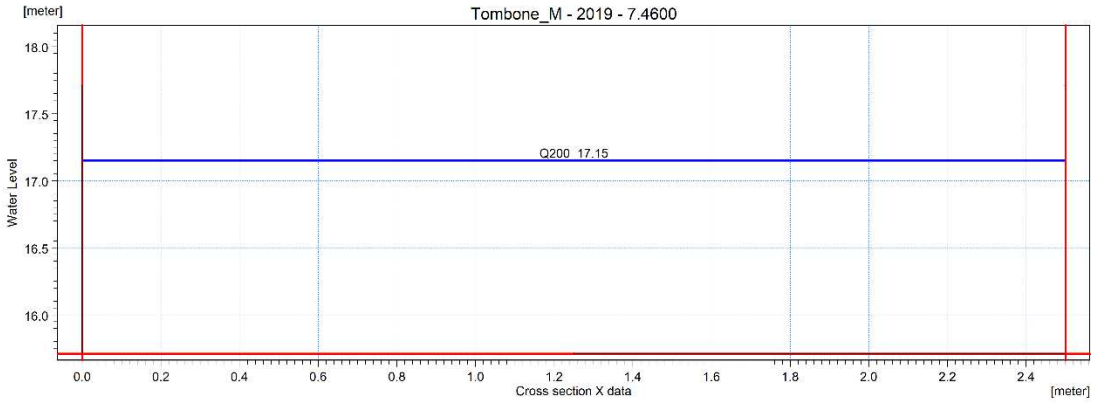

[meter]
Tombone - 2019 - 328.7200
Q200 7.47
Water Level
7.5
7.0
6.5
6.0
5.5
5.0
4.5
4.0
0.0 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 5.0
Cross section X data
[meter]

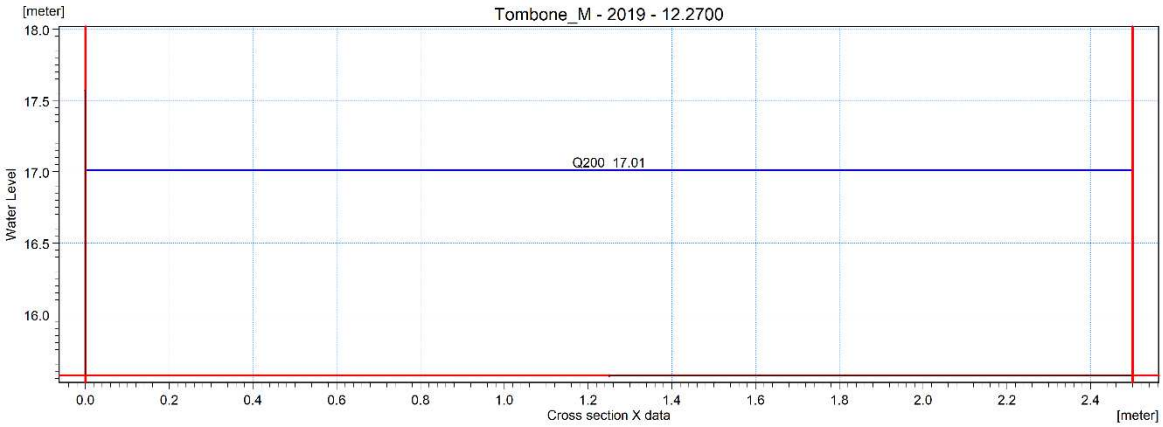
CONFIGURAZIONE DI PROGETTO (SOLO TRATTO DI INTERVENTO)

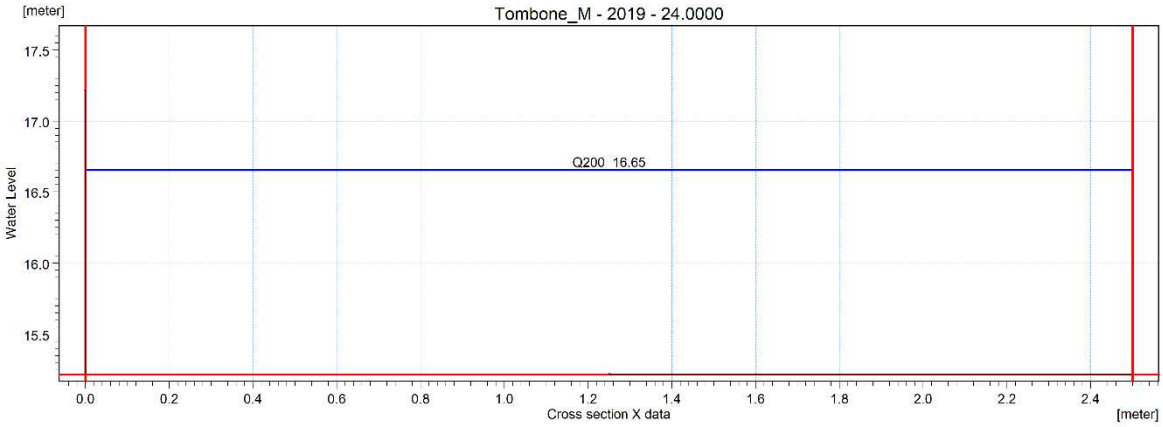


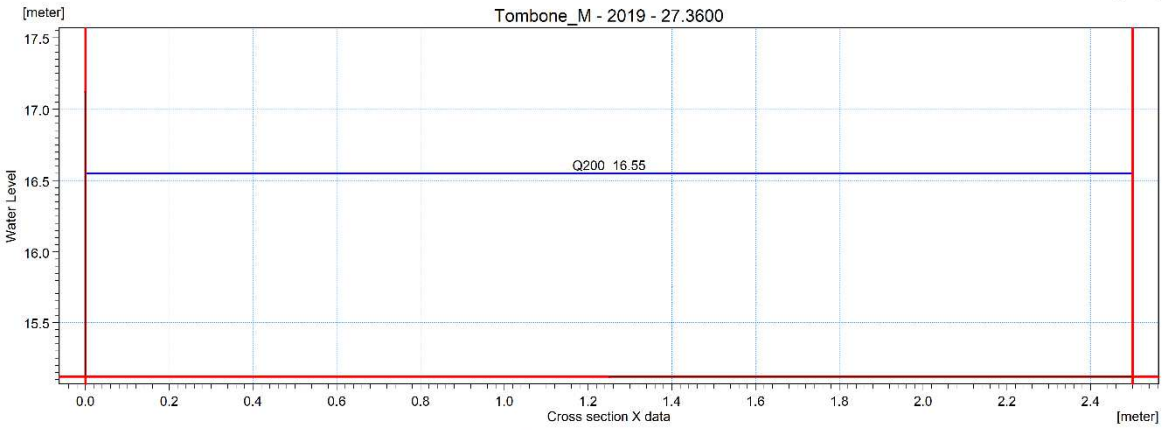


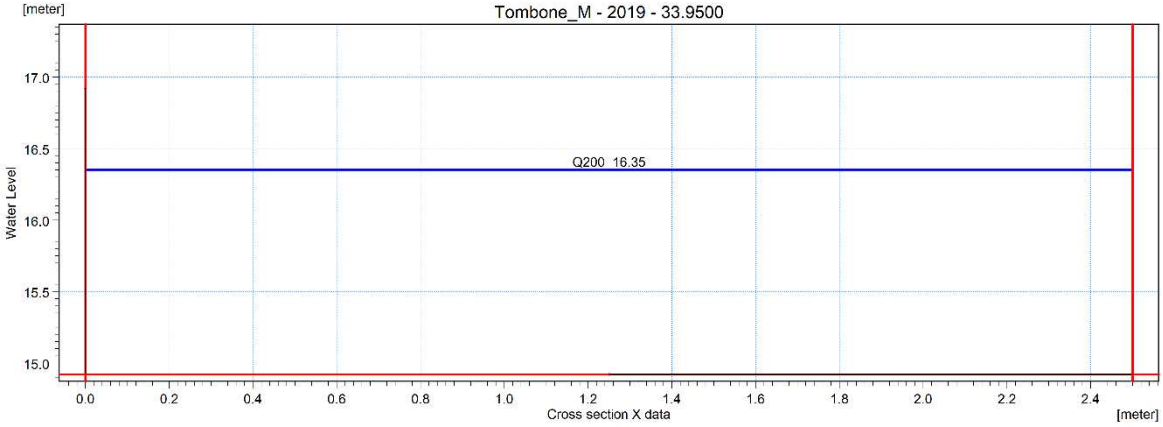


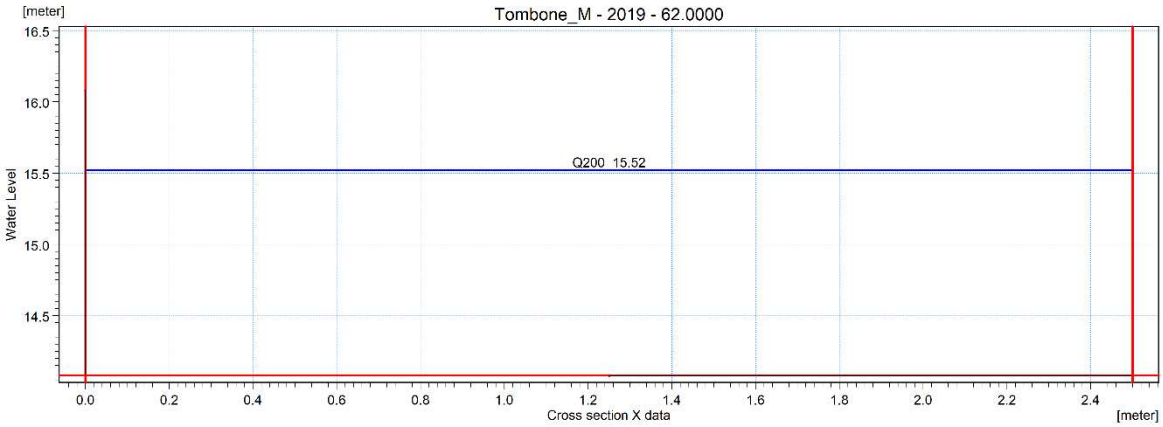


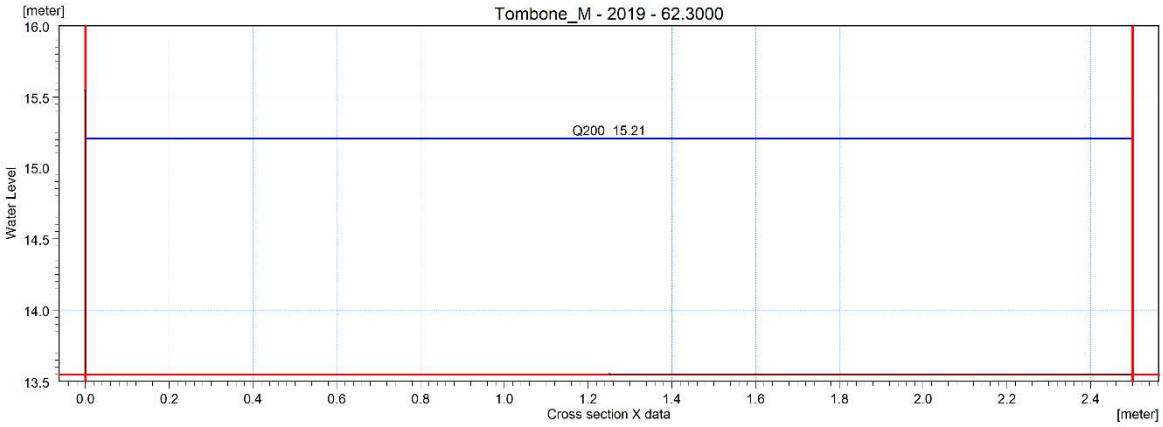

[meter]
Tombone_M - 2019 - 12.2700
Q200 17.01
Water Level
Cross section X data
[meter]

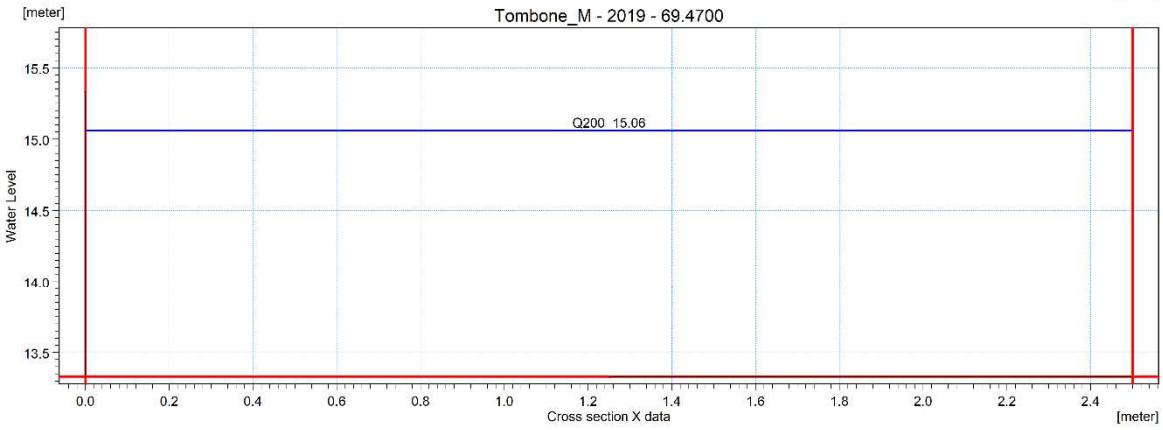

[meter]
Tombone_M - 2019 - 24.0000
Q200 16.65
Water Level
Cross section X data
[meter]

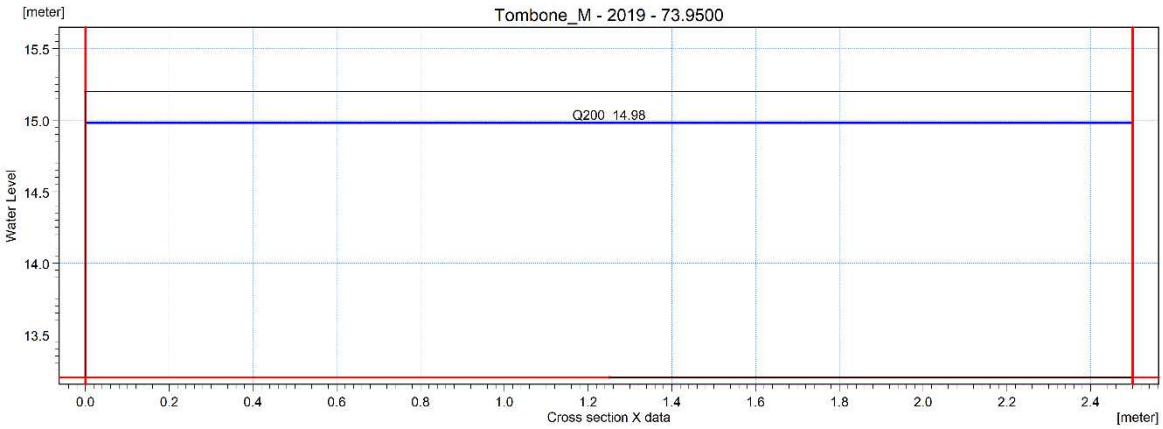

[meter]
Tombone_M - 2019 - 27.3600
Q200 16.55
Water Level
Cross section X data
[meter]

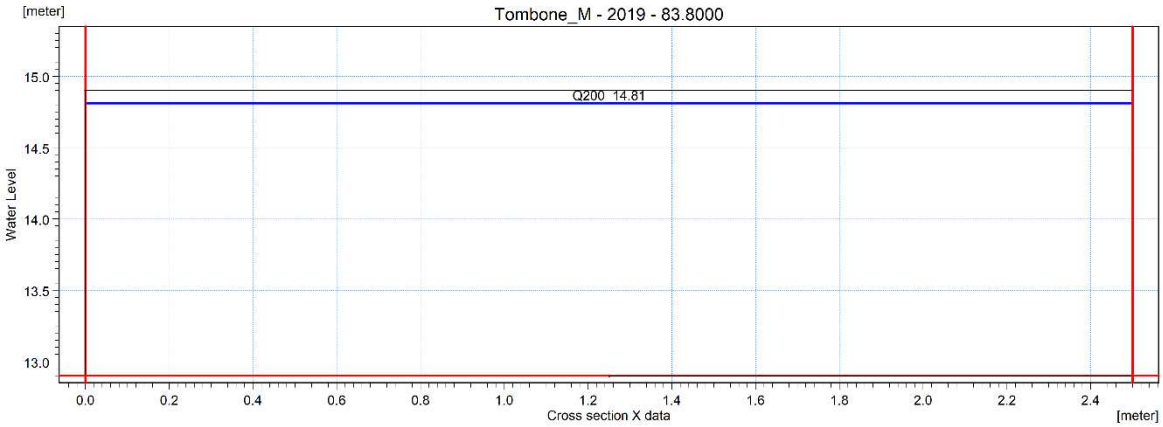

[meter]
Tombone_M - 2019 - 33.9500
Q200 16.35
Water Level
Cross section X data
[meter]

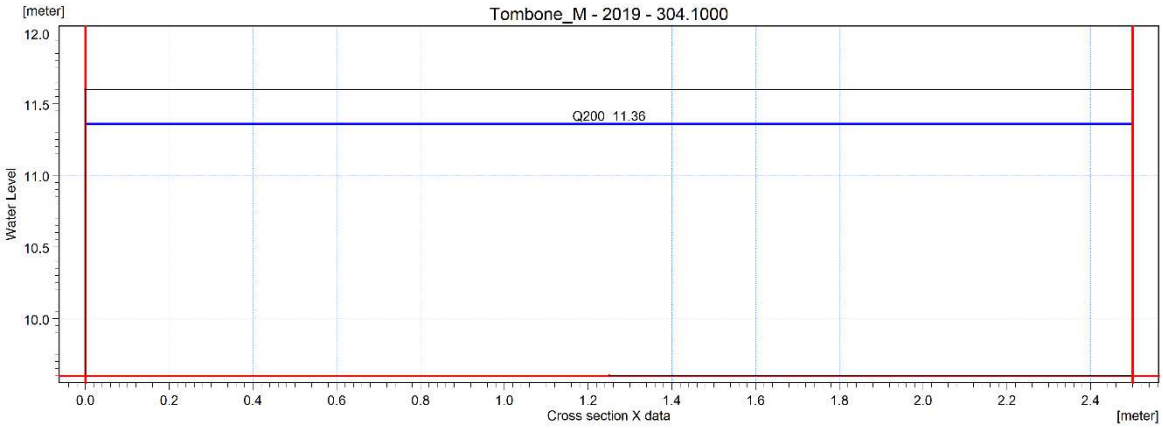

[meter]
Tombone_M - 2019 - 62.0000
Q200 15.52
Water Level
Cross section X data
[meter]


[meter]
Tombone_M - 2019 - 62.3000
Q200 15.21
Water Level
Cross section X data
[meter]


[meter]
Tombone_M - 2019 - 69.4700
Q200 15.06
Water Level
Cross section X data
[meter]


[meter]
Tombone_M - 2019 - 73.9500
Q200 14.98
Water Level
Cross section X data
[meter]


Tombone_M - 2019 - 83.8000
[meter]
Water Level
Q200 14.81
15.0
14.5
14.0
13.5
13.0
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
1.6
1.8
2.0
2.2
2.4
Cross section X data
[meter]


Tombone_M - 2019 - 304.1000
[meter]
Water Level
Q200 11.36
12.0
11.5
11.0
10.5
10.0
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
1.6
1.8
2.0
2.2
2.4
Cross section X data
[meter]