

Aggiornamento mappe alluvione fluviale del PGRA – Reticolo secondario Liguria

Scheda di sintesi

Aggiornamento delle mappe di pericolosità da alluvione fluviale relativa al torrente Molinero, in comune di Savona.

INQUADRAMENTO

Provincia	SAVONA
Comune	SAVONA
Località	CAPOLUOGO
Sottobacino	MOLINERO
Corso d'acqua	MOLINERO – da ponte viadotto A10 alla foce
Interferenza con reticolo principale	NO

PREMESSA

Il Comune di Savona, nell'ambito delle attività collegate alla variante al PUC volta alla modifica della disciplina urbanistica relativa ad alcune aree strategiche e tematiche di carattere puntuale, ha affidato un incarico per l'aggiornamento dello studio idraulico del tratto del rio Molinero compreso fra il cavalcavia dell'autostrada A10 all'altezza di via Molinero e la sua foce, finalizzato al riesame delle mappe di pericolosità da alluvione fluviale del PGRA.

CONTENUTI DELLA MODIFICA

Lo studio idraulico di riferimento per l'aggiornamento delle aree inondabili è stato realizzato dalla società Itec Engineering, revisione B, agosto 2025, su incarico del Comune di Savona.

Il rio Molinero è caratterizzato da un bacino pari a circa 5.8 km² e lunghezza dell'asta principale è circa 4.40 km, è un bacino mediamente acclive caratterizzato dalla forma ortogonale rispetto alla direzione costiera, con il tratto medio-terminale orientato a NE e la testata convergente in quella direzione. Il tratto studiato comprende il tratto urbanizzato compreso tra il ponte autostradale e lo sbocco a mare, per una lunghezza di circa 1.5 km.

In tale tratto il torrente è caratterizzato da una pendenza media dell'alveo pari a 1% con presenza di arginature su entrambe le sponde.

Nella prima porzione del tratto indagato di lunghezza circa 550 m, il rio Molinero scorre a cielo aperto ed è attraversato da due ponti a campata unica, il primo in corrispondenza del civico 48 di via Molinero ed il secondo, ubicato circa 170 m a valle, in prossimità del Campus Universitario di Savona. All'altezza dei due attraversamenti il rio Molinero presenta sempre una sezione rettangolare, nel primo attraversamento si misura una larghezza dell'alveo di circa 8 m con una altezza degli argini di 3 m, mentre nel secondo il torrente presenta un alveo di larghezza di 5 m con una altezza degli argini di circa 2.5 m.

A valle dei due attraversamenti appena descritti il rio Molinero scorre a cielo aperto per ulteriori 370 m fino all'imbocco del primo tratto tombinato al di sotto di Via Bonini per una lunghezza di circa 50 m. Il tratto di attraversamento di Via Bonini è caratterizzato da due tratti distinti: il tratto a monte è costituito da una tombinatura con due fornici della larghezza di 4.5 m ciascuno e luce libera di deflusso di 2.5 m circa, mentre il tratto a valle è costituito invece da una tombinatura a campata unica con larghezza di 8 m e altezza libera di 3.0 m circa; la pendenza media del tratto è pari al 1.2% circa.

Superato il tratto tombinato il torrente prosegue per una distanza di circa 60 m a cielo aperto, anch'esso recentemente sistemato, con sezione rettangolare di larghezza 7.75 m e altezza delle sponde di 3.9 m. A valle del suddetto tratto con scorrimento a pelo libero è presente un'ulteriore tombinatura di circa 140 m lungo il lato lungo dello stadio avente sezione rettangolare con larghezza media di 8 m e altezza delle sponde di 3.5 m.

Superato il tratto tombinato segue un ulteriore percorso a cielo aperto di lunghezza 180 m fino all'incrocio di via Bove e poi nuovamente è presente una tombinatura fino oltre il parco ferroviario. La tombinatura fino all'uscita del parco ferroviario è caratterizzata da due parti significative per quanto riguarda le dimensioni delle sezioni. La prima ha sezioni

larghe da 6 m a 8.50 m e alte da 3.40 m a 3.60 m, mentre la seconda presenta sezioni ad arco alte mediamente 5.0 m e larghe mediamente 8.0 m.

Infine, all'uscita della tombinatura relativa la ferrovia di Savona, il rio Molinero è attraversato da due ulteriori ponti posizionati a distanza molto ravvicinata. Il primo è un ponte medioevale a campata unica. In questa sezione il torrente presenta sempre una sezione rettangolare con larghezza di circa 12 m e altezza delle sponde di 4 m. Il secondo ponte invece è ubicato pochi metri a valle del ponte medioevale ed è quello relativo all'attraversamento dell'Aurelia in corrispondenza di via Nizza dove l'alveo è caratterizzato da sezioni molto larghe prima e dopo il ponte e da sezioni a due fornici di larghezza 4.20 – 4.50 m e altezza 2.30 – 1.40 m sotto il ponte stesso.

Superati questi ultimi attraversamenti il rio Molinero prosegue con un tratto a cielo aperto di lunghezza 100 m fino allo sbocco a mare.

Il torrente Molinero è stato oggetto di un progetto generale di sistemazione, redatto dallo Studio Gaggero nel 2017, che ha individuato una serie di interventi per la mitigazione del rischio; tra questi, alcuni sono stati già realizzati e pertanto costituiscono lo scenario di stato attuale che si differenzia rispetto a quello assunto a riferimento della mappatura del PGRA. Si riporta di seguito l'elenco degli interventi già realizzati e quindi già recepiti nella geometria del modello; la lettera fa riferimento alla suddivisione degli interventi come riportata nel progetto del 2017:

A) demolizione della soletta insistente nell'alveo a monte del ponte di Via Bonini ed utilizzata come parcheggio pubblico; conseguente rialzamento degli argini (lunghezza tratto circa 45 m);

D) allargamento puntuale con realizzazione del nuovo argine in sponda sx mediante paratia di micropali per consentire l'utilizzo della rampa di accesso allo stadio;

E) demolizione della soletta di copertura della tombinatura e della platea e rifacimento completo degli argini e della platea, mediante realizzazione di due muri a mensola posizionati mantenendo il muro in sponda dx e demolendo e traslando il muro in sponda sx, con conseguente rialzamento degli argini e formazione del parapetto per una lunghezza complessiva di circa 60 m;

H) adeguamento dei primi 25 m di tombinatura mediante la demolizione della soletta esistente e la realizzazione parziale, per soli 20 m circa, di una nuova copertura formata da travi prefabbricate in cemento armato precompresso disposte a ventaglio (per seguire la curvatura dell'alveo) completate da una soletta gettata in opera utilizzando come cassero a perdere una lamiera grecata zincata; con estradosso finito superiore di 55 cm rispetto all'attuale piano stradale, a seguito dell'aggiornamento del rilievo topografico con le quote di superficie, e i conseguenti raccordi stradali;

I) demolizione del vecchio ponte ad arco, rifacimento dei muri d'argine con berlinese provvisoria e ricostruzione con soletta piana;

O) riprofilatura e pulizia alveo a monte di Via Bonini;

P) riprofilatura e pulizia alveo tra stadio e Via Bove.

Le **informazioni topografiche** e dimensionali riguardanti le sezioni idrauliche del torrente e i manufatti di attraversamento presenti sono state desunte dai seguenti elaborati e progetti:

- Rilievo topografico dell'alveo del rio Molinero eseguito per conto del Comune di Savona dai geom. Repetto e Saettone nell'aprile del 2004;
- Rilievo topografico eseguito dal geom. Sciandra nell'ambito del progetto di IRE del 2020, ad integrazione del precedente e che riguardava:
 - le aree di superficie comprese tra il posteggio di via Bonini, in fregio alle aree del Polo Universitario Savonese, e l'incrocio tra Via Bove e Via Buonarroti.
 - l'alveo del rio Molinero con i relativi manufatti interferenti (ponti, briglie, tombinature).

Inoltre, sono stati effettuati una serie di sopralluoghi con misure speditive delle sezioni dell'alveo al fine di controllare i dati riportati nei vari progetti.

In merito alla scelta delle **portate** da utilizzare per la definizione delle aree inondabili, è stato effettuato un approfondimento idrologico volto a verificare l'effetto sui valori al colmo dell'utilizzo delle curve di possibilità pluviometrica aggiornate secondo lo studio "Rapporto sull'aggiornamento delle analisi statistiche dei tempi di ritorno

degli eventi pluviometrici estremi”, del Dipartimento di Ingegneria Chimica, Civile e Ambientale (DICCA) dell’Università degli studi di Genova - 2020. I valori ottenuti sono risultati sempre inferiori a quelli del piano di bacino e pertanto si è deciso di mantenere i valori di portata già utilizzati nel piano di bacino.

Gli **idrogrammi di piena** sono stati determinati secondo le procedure previste dalle linee guida DGR 357/2008 “Criteri di verifica e valutazione delle portate al colmo e degli idrogrammi di piena nei bacini idrografici liguri”. In particolare, si è utilizzato il metodo indiretto dell’evento idrometeorologico critico, che permette la valutazione degli idrogrammi di riferimento condizionati dal valore della portata al colmo di progetto. In particolare, sono stati determinati gli idrogrammi di piena per gli eventi con tempo di ritorno di 50, 200 e 500 anni allo sbocco a mare.

Il **dominio 2D** esterno all’alveo è stato creato a partire dal DTM fornito dal Ministero dell’Ambiente, prodotto con tecnologia Laser Scanner in volo (LIDAR), caratterizzato da una maglia quadrata 1x1 m, opportunamente verificato e integrato localmente con una serie di condizioni interne, quali arginature, muri perimetrali di edifici, per rappresentare in modo più dettagliato e preciso la realtà urbana indagata.

Lo studio relativo all’allagamento delle aree in esame è stato effettuato implementando **un modello idraulico** bidimensionale con il **software Infoworks ICM**. Il software consente il calcolo in moto vario monodimensionale e bidimensionale di alvei fluviali, reticoli di bonifica e fognature urbane utilizzando la metodologia dei volumi finiti. Tra i principali risultati fornisce per ciascun dominio di calcolo (maglia di discretizzazione) i massimi tiranti idrici e la massima velocità di scorrimento.

Quali **condizioni al contorno** sono stati assunti in ingresso al dominio 1D gli idrogrammi come sopra calcolati e, a valle, è stata imposta una quota del livello del medio mare pari a 0.45 m s.l.m. circa, corrispondente alla quota massima del livello del mare registrata dal mareografo di Genova dal 2010 (inizio misurazione) fino a novembre 2024, secondo quanto riportato nel sito ISPRA. La scabrezza in alveo è stata assunta, in coerenza con i valori di riferimento indicati nelle Norme di Attuazione del Piano di Bacino, pari a:

- $n=0.033 \text{ sm}^{-1/3}$, per il tratto di monte fino a via Bonini, corrispondente ad alvei naturali con salti, rocce o vegetazione anche arbustiva-arborea in alveo;
- $n=0.025 \text{ sm}^{-1/3}$, per il tratto da via Bonini fino a mare, corrispondente tratti urbanizzati di corsi d’acqua naturali con argini cementati.

I **risultati** della modellazione mostrano che la portata **50-ennale** esonda nel tratto di monte a valle dell’autostrada dove risultano insufficienti al deflusso della portata 50-ennale i due ponti di via Molinero. Da qui l’acqua esondata defluisce verso valle allagando le aree limitrofe al corso d’acqua lungo entrambe le sponde finì a via Bonini.

A valle di via Bonini l’acqua defluisce solo in sponda sinistra lungo via Luigi Cadorna fino al rilevato ferroviario con tiranti dell’ordine dei 0.3 m.

I seguenti manufatti risultano con quota del pelo libero superiore all’intradosso:

- ponte via Molinero;
- ponte via Molinero ingresso Università;
- ponte di via Nizza;

La tombinatura di via Bonini ha un franco inferiore a 0.5 m e carico superiore all’estradosso. Anche la tombinatura dello stadio ha un franco di poche decine di centimetri e carico superiore all’estradosso. La tombinatura di via Buonarroti ha un franco di 1 m circa all’imbocco, mentre il tratto di valle ha un franco di circa 0.5 m. La tombinatura della ferrovia ha tratti con sezione differente, nel primo tratto ha un franco di circa 1 m mentre nel secondo tratto ha un franco di oltre 2 m. Il deflusso in corrispondenza del ponte medioevale avviene con una quota del pelo libero pari a 4 m circa e la quota della sommità dell’arco è pari a circa 6 m. La quota del pelo libero risulta pressoché coincidente con il piano viabile limitrofo.

La portata **200-ennale** esonda nel tratto di monte a valle dell’autostrada dove risultano insufficienti al deflusso i due ponti di via Molinero. Da qui l’acqua esondata defluisce verso valle allagando le aree limitrofe al corso d’acqua lungo entrambe le sponde finì a via Bonini.

La tombinatura di via Bonini non è in grado di smaltire la portata 200-ennale come la tombinatura dello stadio. A valle di via Bonini l’acqua defluisce sia lungo via Luigi Cadorna che lungo via Chiabrera fino al rilevato ferroviario con tiranti

variabile tra 0.3 e 1 m circa. La portata supera il rilevato ferroviario tramite il sottopasso di Corso Svizzera allagando le aree a valle della ferrovia. Inoltre, esonda anche da via Nizza allagando le aree adiacenti verso mare.

I seguenti manufatti risultano con quota del pelo libero superiore all'intradosso:

- ponte via Molinero;
- ponte via Molinero ingresso Università;
- tombinatura di via Bonini;
- tombinatura dello stadio;
- ponte di via Nizza.

La tombinatura di via Buonarroto ha un franco di 0.7 m circa all'imbocco, mentre il tratto di valle ha un franco quasi nullo. La tombinatura della ferrovia ha tratti con sezione differente, nel primo tratto ha un franco di circa 0.6 m mentre nel secondo tratto ha un franco di oltre 2 m. Il deflusso in corrispondenza del ponte medioevale avviene con una quota del pelo libero pari a 4.5 m circa e la quota della sommità dell'arco è pari a circa 6 m. La quota del pelo libero risulta superiore rispetto al piano viabile limitrofo.

La portata **500-ennale** defluisce sostanzialmente con le stesse modalità di quella 200-ennale con quote del pelo libero mediamente superiori di 0.2 m.

Per maggiori dettagli, si rimanda alla relazione tecnica trasmessa dal Comune riportata in allegato alla presente.

Committente:



Comune di Savona

Titolo:

Variante al PUC volta alla modifica della disciplina urbanistica relativa ad alcune aree strategiche e tematiche di carattere puntuale.

Oggetto:

Relazione idraulica rio Molinero

Gruppo di lavoro

Ing. P. Misurale
Ing. M. Ivaldi
Ing. A. Porri

Livello di progetto:

Nome File:

P120-24-I-RE-IDR-002-B

Codice progetto: P120-24

Elaborato n°:

IDR-002

Firme:

Rev:	Modifiche / Revisioni	Data	Redatto	Controllato	Approvato
A	PRIMA EMISSIONE	16/04/2025	APO	MIV	PMI
B	RISPOSTE A SEGUITO DELLE INTEGRAZIONI	13/08/2025	APO	MIV	PMI

INDICE

1	PREMESSA.....	1
2	RISPOSTE INTEGRAZIONI	2
3	INQUADRAMENTO TERRITORIALE.....	4
3.1	RIO MOLINERO	4
3.2	TRATTO D'ALVEO OGGETTO DI STUDIO	5
4	INTERVENTI EFFETTUATI LUNGO ASTA TERMINALE RIO MOLINERO	12
4.1	PROGETTO DI SISTEMAZIONE COMPLESSIVA	12
4.2	INTERVENTI REALIZZATI	15
4.3	INTERVENTI APPROVATI MA NON ANCORA REALIZZATI	16
5	INDAGINI E RILIEVI	19
6	ASPETTI NORMATIVI.....	20
6.1	PIANO DI GESTIONE RISCHIO ALLUVIONI DEL DISTRETTO DELL'APPENNINO SETTENTRIONALE - PGRA 20	
6.2	PIANO DI BACINO – RIO MOLINERO.....	21
6.3	REGOLAMENTO REGIONALE N. 3 DEL 14/07/2011	24
6.4	REGOLAMENTO REGIONALE N. 291/2025	26
7	CALCOLO PORTATE DI PIENA	29
7.1	LINEE SEGNALETRICI DI POSSIBILITÀ PLUVIOMETRICA CON L'AGGIORNAMENTO DELLE PIOGGE DEL DICCA.....	29
7.2	DETERMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA CON LA REGIONALIZZAZIONE DELLA DGR357/08.	32
7.3	DETERMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA CON METODO CIMA.....	34
7.4	RAFFRONTI TRA LE PORTATE DEL PIANO DI BACINO E QUELLE DETERMINATE CON LE PIOGGE DEL DICCA.....	34
8	IDROGRAMMI DI PIENA	36
9	MODELLO BIDIMENSIONALE DI ALLAGAMENTO	40
9.1	BASE TOPOGRAFICA E SCHEMATIZZAZIONE DEL DOMINIO DI STUDIO	40
9.2	METODOLOGIA DI CALCOLO	41
9.3	PARAMETRI DI CALCOLO E CONDIZIONI AL CONTORNO	42
9.4	IDROGRAMMI DI PIENA	44
9.5	CONFIGURAZIONI DI VERIFICA	44
9.6	RISULTATI	44
9.6.1	Stato attuale	45
9.6.2	Stato di progetto (Stralcio 2 e 3)	48

10 RIPERIMETRAZIONE DELLE AREE INONDABILI..... 49

Allegati:

ALLEGATO 1: Proposta mappatura aree inondabili stato attuale rio Molinero

ALLEGATO 2: Proposta mappatura aree inondabili stralcio 2-3 rio Molinero

ALLEGATO 3: Proposta mappatura aree inondabili stato attuale rio Molinero unita alla mappatura del rio Quattro Stagioni e San Cristoforo

ALLEGATO 4: Proposta mappatura aree inondabili stralcio 2-3 rio Molinero unita alla mappatura del rio Quattro Stagioni e San Cristoforo

ALLEGATO A: Grandezze idrauliche in alveo

ALLEGATO B: Risultati verifiche idrauliche bidimensionali

Appendici:

APPENDICE 1: Software di calcolo HEC-RAS

APPENDICE 2: Software di calcolo Infoworks ICM

APPENDICE 3: Calcolo idrogramma di piena secondo i criteri della DGR 357/2008

1 PREMESSA

La presente relazione contiene lo studio idraulico del tratto del rio Molinero compreso fra il cavalcavia dell'autostrada A10 all'altezza di via Molinero e la sua foce finalizzato alla modifica della disciplina urbanistica relativa ad alcune aree strategiche e tematiche di carattere puntuale a Savona (SV).

Lo studio è stato svolto attraverso l'utilizzo di un modello idraulico bidimensionale¹ in grado di ricostruire i fenomeni di allagamento in caso di eventi di piena e ha riguardato le seguenti attività:

- raccolta e analisi della documentazione disponibile relativa a cartografia, rilievi topografici, studi idraulici, progetti, riguardanti le aree in esame;
- determinazione degli idrogrammi di piena del rio Molinero per i tempi di ritorno pari a 50, 200 e 500 anni secondo la metodologia riportata nella DGR 357/2008;
- acquisizione della base topografica costituita dal LIDAR del Ministero dell'Ambiente a maglia 1x1 metri per la porzione di territorio interessata dallo studio;
- integrazione e controllo dei punti della maglia del DTM in base alla cartografia e ai rilievi topografici di dettaglio disponibili;
- ricostruzione dei fenomeni di allagamento per eventi di piena con assegnato tempo di ritorno e determinazione dei tiranti idraulici e delle velocità di scorrimento;
- analisi di sensitività del modello e dei parametri di calcolo adottati;
- mappatura dei tiranti idraulici e delle velocità di scorrimento in caso di portate di piena 50-ennale, 200-ennale e 500-ennale nello stato attuale e a seguito dei lavori dello Stralcio 2-3;
- proposta di aggiornamento delle fasce di inondabilità per l'asta del rio Molinero in accordo con i criteri indicati dall'Allegato 3 al Piano di Gestione e Rischio Alluvioni del Distretto dell'Appennino Settentrionale e dal Regolamento Regionale n. 291/2025.

Si allegano alla presente l'aggiornamento della mappatura delle aree inondabili del rio Molinero, nel tratto compreso dal cavalcavia dell'autostrada A10 al suo sbocco a mare, allo stato attuale e la proposta di mappatura preventiva a seguito dei lavori dello Stralcio 2-3 (DdDG n. 26 del 7/2/2018).

¹ Infoworks ICM 2024 HR Wallingford Innovyze.

2 RISPOSTE INTEGRAZIONI

La presente relazione costituisce una revisione di quella emessa nell'aprile 2025, a seguito della richiesta di integrazioni della Regione Liguria, Direzione Generale protezione civile e difesa suolo – Unità organizzativa assetto del territorio (Prot-2025-0335450 del 07/07/2025).

Nel seguito si riportano gli aspetti tecnici che è necessario integrare per poter procedere con la modifica e le relative risposte.

- a) lo scenario geometrico di riferimento deve essere quello di stato attuale del corso d'acqua e non può includere interventi che sono ancora in fase di appalto e / o di realizzazione; laddove tali interventi debbano essere considerati, è possibile procedere con una modifica delle mappe di pericolosità ad efficacia differita, secondo quanto previsto dal comma 12 dell'art.3 dell'Accordo, acquisendo però il parere preventivo dell'Autorità ai sensi degli art. 7, 9 e 11 della disciplina di piano del PGRA sulle opere idrauliche previste;*

Con DdDG n. 26 del 7/2/2018, è stato espresso il parere di compatibilità sul Progetto di fattibilità degli interventi di mitigazione del rischio idraulico sul rio Molinero nel tratto compreso tra Via Bonini e il rilevato ferroviario, in Comune di Savona in attuazione del Piano di Bacino (Stralcio 2-3).

Si allegano alla presente l'aggiornamento della mappatura delle aree inondabili del rio Molinero, nel tratto compreso dal cavalcavia dell'autostrada A10 al suo sbocco a mare, allo stato attuale e la proposta di mappatura preventiva a seguito dei lavori dello Stralcio 2-3 (DdDG n. 26 del 7/2/2018).

- d) per quanto riguarda lo studio sul T. Molinero e con specifico riferimento alla parte a valle del rilevato ferroviario, si chiede la revisione della proposta di ripermimetrazione complessiva, quella, cioè, redatta unendo i risultati del nuovo studio condotto sul Molinero alle fasce vigenti dei rii Quattro Stagioni e San Cristoforo: nell'area attenzionata, infatti, la sovrapposizione della fascia di pericolosità P1 del Molinero a quella del San Cristoforo risulta errata.*

È stata aggiornata la sovrapposizione delle aree inondabili.

Si precisa che le aree a minor pericolosità (P2_0) non sono previste dalla disciplina del PGRA e pertanto non possono fare parte della proposta di riesame delle mappe; tuttavia, le stesse possono essere utilizzate in accordo con le previsioni del nuovo Regolamento regionale 20 giugno 2025, n.1 "Disposizioni concernenti l'attuazione dei Piani di Bacino distrettuali.... Omissis.." che entrerà in vigore il giorno 17/7/2025.

La mappatura delle aree inondabili è stata fatta secondo quanto indicato nel Regolamento Regionale n. 291/2025.

3 INQUADRAMENTO TERRITORIALE

3.1 RIO MOLINERO

Il rio Molinero è caratterizzato da un bacino pari a circa 5.8 km² e lunghezza dell'asta principale è circa 4.40 km, è un bacino mediamente acclive caratterizzato dalla forma ortogonale rispetto alla direzione costiera, con il tratto medio-terminale orientato a NE e la testata convergente in quella direzione.

Lo spartiacque del bacino dal mare si eleva ad Ovest verso il Passo del Priocco, segue i crinali del Bric Uvin (295 m) e del Bric Masaè (397 m) fino a raggiungere la quota più elevata presso il Forte Ciuto (431 m). Lo spartiacque continua in direzione Est verso il Monte Curlo (383 m) per discendere lungo la dorsale del Bric Renzia (299 m) fino ad attraversare l'abitato di Savona. Il bacino del Rio Molinero confina con quello del Torrente Letimbro ad Est e con il bacino del Torrente Quiliano ad Ovest.

Il tratto urbanizzato del rio Molinero, compreso tra il ponte autostradale e lo sbocco a mare, ha una lunghezza di circa 1.5 km e pendenza media dell'ordine del 1%.

3.2 TRATTO D'ALVEO OGGETTO DI STUDIO

Lo studio riguarda il tratto del rio Molinero compreso tra il ponte dell'autostrada A10 all'altezza di via Molinero fino alla foce a mare, per una lunghezza di circa 1.5 km.

Nella figura seguente è riportato il tratto d'alveo oggetto del presente studio con indicato il reticolo idrografico significativo della zona in esame.



Figura 3-1 - Vista dell'area oggetto di studio

In tale tratto il torrente è caratterizzato da una pendenza media dell'alveo pari a 1% con presenza di arginature su entrambe le sponde.

Nella prima porzione del tratto indagato di lunghezza circa 550 m, il rio Molinero scorre a cielo aperto ed è attraversato da due ponti a campata unica, il primo in corrispondenza del civico 48 di via Molinero ed il secondo, ubicato circa 170 m a valle, in prossimità del Campus Universitario di Savona come mostrato nelle immagini seguenti.



Figura 3-2: Ponte in corrispondenza del viadotto autostradale A10



Figura 3-3: Ponte in prossimità del Campus Universitario di Savona

All'altezza dei due attraversamenti il rio Molinero presenta sempre una sezione rettangolare, nel primo attraversamento si misura una larghezza dell'alveo di circa 8 m con una altezza degli argini di 3 m , mentre nel secondo il torrente presenta un alveo di larghezza di 5 m con una altezza degli argini di circa 2.5 m.

A valle dei due attraversamenti appena descritti il rio Molinero scorre a cielo aperto per ulteriori 370 m fino all'imbocco del primo tratto tombinato al di sotto di Via Bonini per una lunghezza di circa 50 m.

Il tratto di attraversamento di Via Bonini è caratterizzato da due tratti distinti: il tratto a monte è costituito da una tombinatura con due fornici della larghezza di 4.5 m ciascuno e luce libera di deflusso di 2.5 m circa, mentre il tratto a valle è costituito invece da una tombinatura a campata unica con larghezza di 8 m e altezza libera di 3.0 m circa; la pendenza media del tratto è pari al 1.2% circa.

Nelle immagini seguenti sono rappresentate delle fotografie eseguite in sito in sede di sopralluogo raffiguranti le sezioni di imbocco e di sbocco della tombinatura di Via Bonini.



Figura 3-4: Tratto a cielo aperto a monte della tombinatura via Bonini - vista verso monte

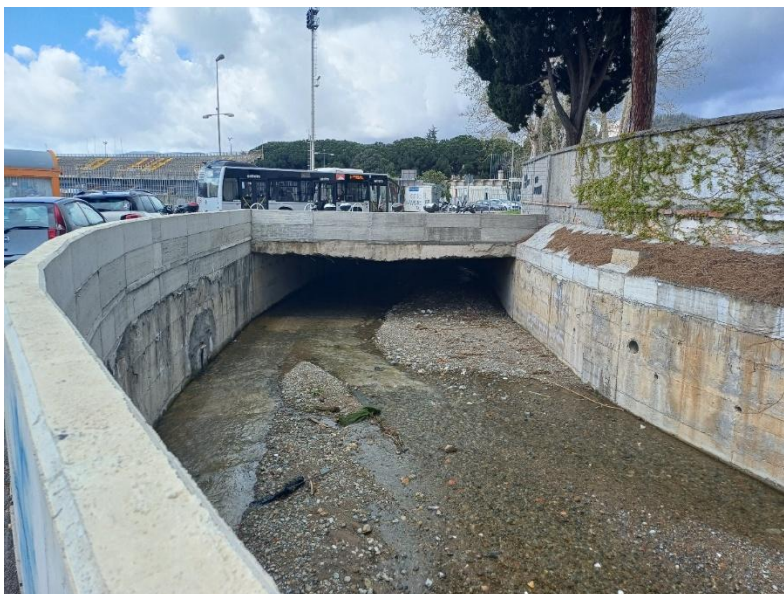


Figura 3-5 - Imbocco tombinatura di via Bonini - vista verso valle



Figura 3-6 - Sbocco tombinatura di via Bonini - vista verso monte

Superato il tratto tombinato il torrente prosegue per una distanza di circa 60 m a cielo aperto, anch'esso recentemente sistemato, con sezione rettangolare di larghezza 7.75 m e altezza delle sponde di 3.9 m.



Figura 3-7 - Tratto a cielo aperto a valle della tombinatura via Bonini - vista verso valle

A valle del suddetto tratto con scorrimento a pelo libero è presente un'ulteriore tombinatura di circa 140 m lungo il lato lungo dello stadio avente sezione rettangolare con larghezza media di 8 m e altezza delle sponde di 3.5 m come mostrato nell'immagine seguente.

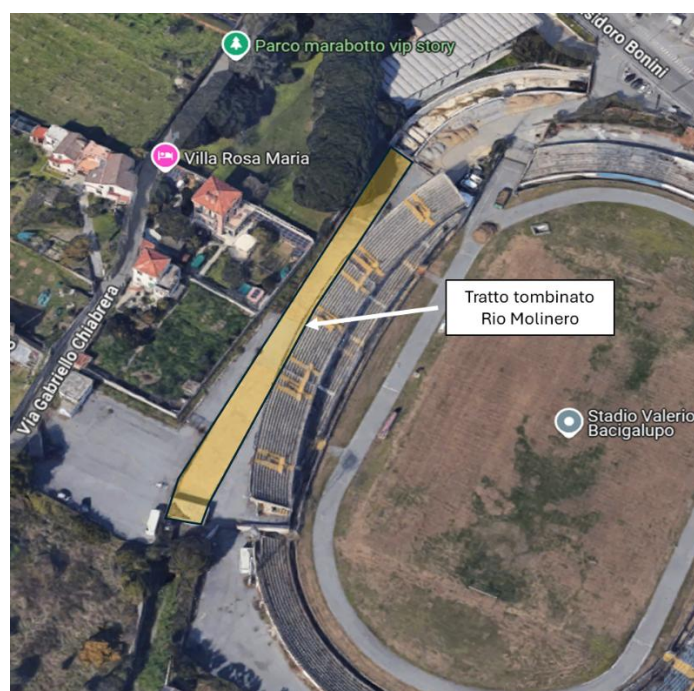


Figura 3-8: Tratto tombinato lato lungo stadio

Superato il tratto tombinato segue un ulteriore percorso a cielo aperto di lunghezza 180 m fino all'incrocio di via Bove e poi nuovamente è presente una tombinatura fino oltre il parco ferroviario.

Nell'immagine seguente viene riportata la vista da Via Bove del rio Molinero dove si nota l'imbocco del tratto tombinato relativo al parco ferroviario.



Figura 3-9: Imbocco tombinatura parco Ferroviario

La tombinatura fino all'uscita del parco ferroviario è caratterizzata da due parti significative per quanto riguarda le dimensioni delle sezioni. La prima ha sezioni larghe da 6 m a 8.50 m e alte da 3.40 m a 3.60 m, mentre la seconda presenta sezioni ad arco alte mediamente 5.0 m e larghe mediamente 8.0 m.

Infine, all'uscita della tombinatura relativa la ferrovia di Savona, il rio Molinero è attraversato da due ulteriori ponti posizionati a distanza molto ravvicinata.

Il primo è un ponte medioevale a campata unica, come mostrato nell'immagine seguente. In questa sezione il torrente presenta sempre una sezione rettangolare con larghezza di circa 12 m e altezza delle sponde di 4 m.



Figura 3-10: Ponte medioevale

Il secondo ponte invece è ubicato pochi metri a valle del ponte medioevale ed è quello relativo all'attraversamento dell'Aurelia in corrispondenza di via Nizza dove l'alveo è caratterizzato da sezioni molto larghe prima e dopo il ponte e da sezioni a due fornici di larghezza $4.20 \div 4.50$ m e altezza $2.30 \div 1.40$ m sotto il ponte stesso.

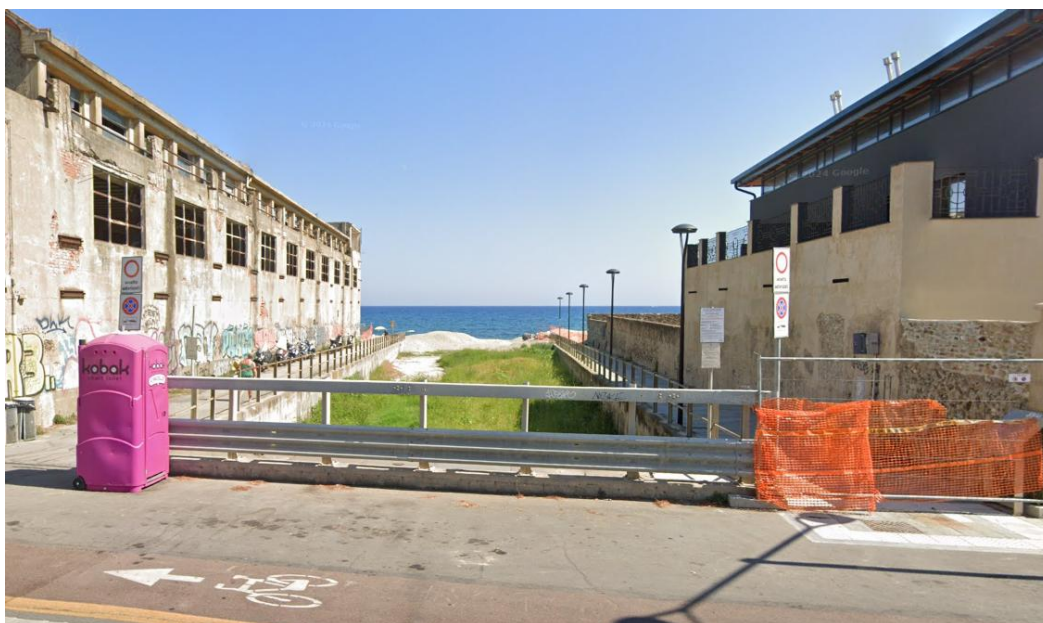


Figura 3-11: Ponte sull'Aurelia vista

Superati questi ultimi attraversamenti il rio Molinero prosegue con un tratto a cielo aperto di lunghezza 100 m fino allo sbocco a mare.

4 INTERVENTI EFFETTUATI LUNGO ASTA TERMINALE RIO MOLINERO

Di seguito si riporta una schematizzazione generale dei progetti di sistemazione complessivi riguardanti l'area oggetto di studio della presente relazione.

4.1 PROGETTO DI SISTEMAZIONE COMPLESSIVA

Con riferimento allo schema planimetrico riportato nella figura seguente, di seguito sono elencate le opere previste nel progetto generale di sistemazione redatto dallo Studio Gaggero nel 2017:

- A)** demolizione della soletta insistente nell'alveo a monte del ponte di Via Bonini, ed utilizzata come parcheggio pubblico; conseguente rialzamento degli argini (lunghezza tratto circa 50.0 m);
- B)** demolizione e ricostruzione del ponte a due luci di Via Bonini, con struttura ad unica campata di larghezza pari a 9.5 netti trasversali all'asta fluviale e rialzamento della soletta per estradosso finito superiore di circa 80 cm all'attuale piano stradale con relativi raccordi delle quote del piano viabile. La sezione idraulica finita avrà dimensioni di 9.5x3.50 m (lunghezza tratto circa 30.0 m);
- C)** demolizione e ricostruzione parziale della soletta a valle del ponte di Via Bonini, con percorsi carrabili idonei all'ingresso nell'area del campo sportivo (lunghezza tratto circa 20.0 m);
- D)** allargamento puntuale in sponda sinistra dell'alveo a partire dalla congiunzione delle attuali due diverse coperture (lunghezza tratto circa 10.0 m). La sezione viene allargata sino a 8.0 m;
- E)** demolizione della soletta di copertura della tombinatura latistante allo stadio per una lunghezza di circa 50.0 m; conseguente rialzamento degli argini e formazione parapetto
- F) ,G)** demolizione della soletta di copertura della tombinatura latistante allo stadio per una lunghezza di circa 150.0 m. Conseguente rialzamento degli argini e formazione parapetto. Realizzazione di due ponti sul canale residuale a lato dello stadio, di larghezza pari a 9.0 m, muniti di rampe per abbattimento delle barriere architettoniche;
- H)** demolizione soletta a monte del ponte di Via Bove, conseguente rialzamento argini e realizzazione parapetto (lunghezza tratto circa 20.0 m). La soletta deve esser parzialmente ricostruita per dare accesso al parcheggio privato esistente. In riva destra, a monte della soletta, sono presenti aperture di locali a quota inferiore ai livelli di massima piena: dovranno essere opportunamente chiuse o protette se ammissibili sotto il profilo normativo demaniale;
- I)** demolizione del ponte voltato di Via Bove e ricostruzione con soletta piana ed estradosso finito superiore di circa 0.1 m all'attuale piano stradale; raccordi delle quote del piano viabile. La sezione idraulica finita avrà dimensioni 8.5x 3.8 (lunghezza tratto circa 10.0 m);

- L)** demolizione parziale della tombinatura di Via Michelangelo Buonarroti, con ricostruzione in allargamento e rialzamento della soletta, con quota estradosso finita superiore di circa 0.3 m rispetto all'attuale; raccordi pedonali e stradali, compreso rampe box interrati. L'allargamento sarà realizzato al netto dell'occupazione dei box condominiali al piano interrato dei condomini in sponda sinistra. La sezione idraulica finita avrà dimensioni pari a 8.0x4.2 (lunghezza tratto circa 65.0 m);
- M)** demolizione parziale del ponte di Via Stalingrado, con ricostruzione e rialzamento della soletta, con quota estradosso finita superiore di circa 0.4 m rispetto all'attuale piano stradale; raccordi stradali e pedonali. La sezione idraulica finita avrà dimensioni pari a 8.25x4.30 (lunghezza tratto circa 20.0 m);
- N)** demolizione del primo tratto della tombinatura voltata nel terrapieno delle ferrovie e ricostruzione con sezione a copertura piana;
- O)** riprofilatura e pulizia alveo a monte di Via Bonini;
- P)** riprofilatura e pulizia alveo tra stadio e Via Bove;
- Q)** numero 2 briglie selettive nei pressi del ponte dell'autostrada Genova – XXmiglia.



Figura 4-1 – Schematizzazione interventi del progetto di sistemazione complessiva

4.2 INTERVENTI REALIZZATI

Rispetto a quanto indicato nel progetto generale di sistemazione sono stati appena realizzati i seguenti interventi:

- A)** demolizione della soletta insistente nell'alveo a monte del ponte di Via Bonini ed utilizzata come parcheggio pubblico; conseguente rialzamento degli argini (lunghezza tratto circa 45 m);
- D)** allargamento puntuale con realizzazione del nuovo argine in sponda sx mediante paratia di micropali per consentire l'utilizzo della rampa di accesso allo stadio;
- E)** demolizione della soletta di copertura della tombinatura e della platea e rifacimento completo degli argini e della platea, mediante realizzazione di due muri a mensola posizionati mantenendo il muro in sponda dx e demolendo e traslando il muro in sponda sx, con conseguente rialzamento degli argini e formazione del parapetto per una lunghezza complessiva di circa 60 m;
- H)** adeguamento dei primi 25 m di tombinatura mediante la demolizione della soletta esistente e la realizzazione parziale, per soli 20 m circa, di una nuova copertura formata da travi prefabbricate in cemento armato precompresso disposte a ventaglio (per seguire la curvatura dell'alveo) completate da una soletta gettata in opera utilizzando come cassero a perdere una lamiera grecata zincata; con estradosso finito superiore di 55 cm rispetto all'attuale piano stradale, a seguito dell'aggiornamento del rilievo topografico con le quote di superficie, e i conseguenti raccordi stradali;
- I)** demolizione del vecchio ponte ad arco, rifacimento dei muri d'argine con berlinese provvisoria e ricostruzione con soletta piana come sopra descritto;
- O)** riprofilatura e pulizia alveo a monte di Via Bonini;
- P)** riprofilatura e pulizia alveo tra stadio e Via Bove.

Tali interventi sono stati realizzati nel periodo 2020-2023.

4.3 INTERVENTI APPROVATI MA NON ANCORA REALIZZATI

Nel 2024 ITEC ha sviluppato il PFTE (nuovo codice appalti) e PE degli interventi B) e C), relativi alla demolizione e rifacimento della tombinatura di attraversamento di Via Bonini e della soletta immediatamente a valle.

In particolare, la sistemazione riguardava un tratto del rio Molinero della lunghezza di circa 62 m, così suddivisi da monte verso valle:

- demolizione di un tratto della copertura esistente per una lunghezza di circa 10.0 m con la contestuale realizzazione di parapetti dell'altezza di 1.1 m rispetto al piano viabile;
- demolizione della tombinatura esistente sotto Via Bonini e suo rifacimento con struttura a campata unica di larghezza variabile da 9.5 m a monte sino ad 8.0 m a valle e altezza compresa tra 3.4 m e 4.0 m, per una lunghezza di 35 m circa;
- demolizione della tombinatura a valle di Via Bonini e suo parziale rifacimento con un primo tratto a cielo aperto della lunghezza di 7.5 m (e contestuale realizzazione di parapetti sul suo perimetro esterno) e di un secondo tratto coperto della lunghezza di 9.5 m circa in corrispondenza dell'accesso allo stadio Bacigalupo, con sezione rettangolare di dimensioni 8.0x3.5 m.

Il tratto di monte della tombinatura ha una pendenza del fondo dello 0.7%, seguito da un tratto a maggior pendenza (3.5%) per compensare idraulicamente il tratto di raccordo delle larghezze, seguito a sua volta da un tratto con pendenza dell'1% circa.

La pendenza del tratto di monte pari allo 0.7% e di valle pari all'1% corrispondono alle pendenze attuali del corso d'acqua.

Il fondo sarà costituito da un fondo alveo naturale con presenza di travi di collegamento in c.a. ad interasse di 4 m circa, necessarie alla stabilità dei muri d'argine che costituiscono per la maggior parte le spalle della soprastante struttura di copertura.

L'intervento è completato da un adeguato spostamento e ricollocazione dei sottoservizi presenti e dalla sistemazione superficiale con i relativi raccordi stradali del piano viabile e dei marciapiedi pedonali e la ricollocazione dei parcheggi e del capolinea.

Il progetto è stato suddiviso in due interventi: principale e opzionale.

Nella figura sottostante è riportata la suddivisione tra i due progetti.

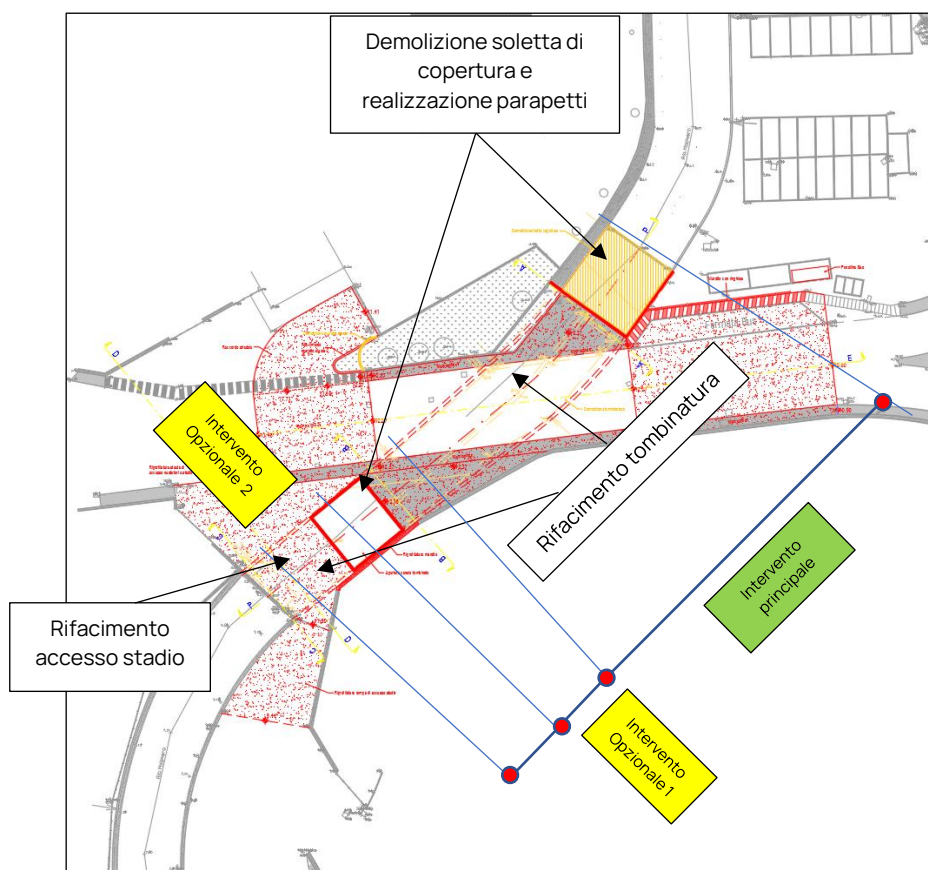


Figura 4-2 - Schema intervento principale e opzionali Stralcio 2

Nel 2023 Dott. Ing. Paolo Gaggero ha sviluppato il progetto dello Stralcio 3 relativo agli interventi L e M.

Il progetto non prevede l'allargamento del primo tratto (a monte) di Via Buonarroti in quanto, a seguito degli approfondimenti eseguiti in fase progettuale si è verificata la presenza nell'adiacenza del rio di manufatti privati che, allo stato attuale, non consentirebbero, nei tempi previsti dal finanziamento, l'individuazione di una soluzione tecnica ed economicamente sostenibile in ragione del finanziamento ottenuto; la soluzione prevista dal progetto definitivo consente comunque di poter realizzare parte degli interventi di mitigazione idraulicamente il Rio Molinero nel tratto immediatamente a monte del rilevato ferroviario, secondo quando previsto dal progetto preliminare approvato e recepito dai piani di bacino. Di conseguenza l'intervento L viene progettato solo per il tratto terminale.

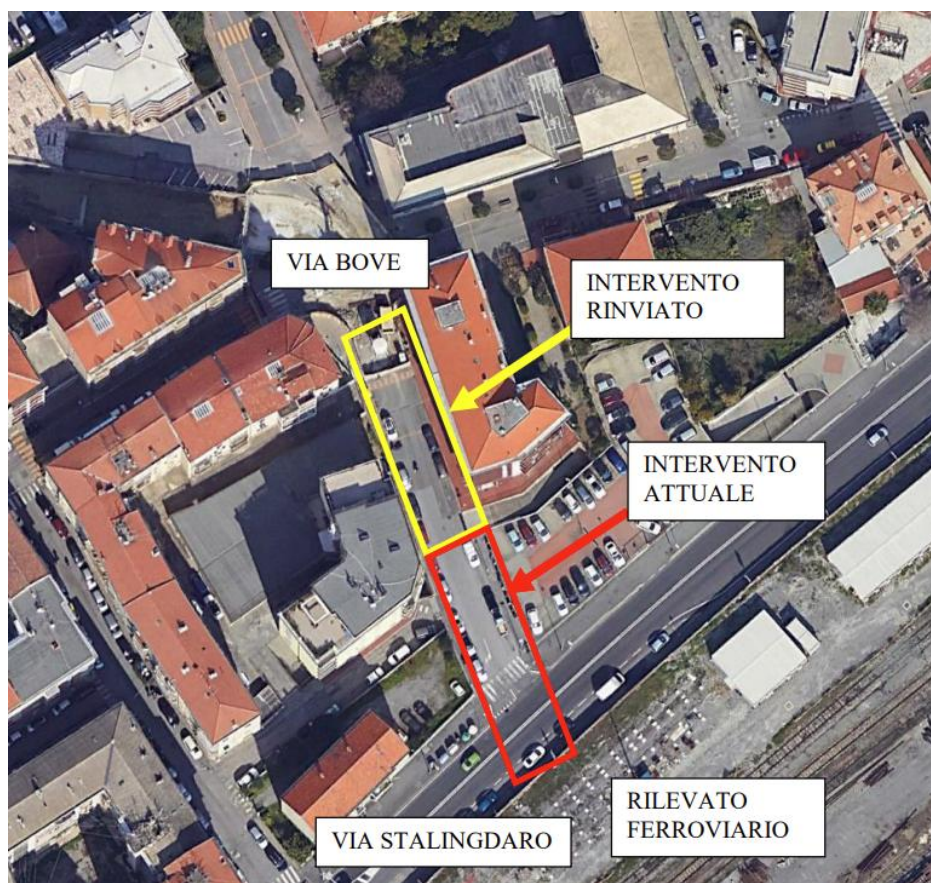


Figura 4-3 - Schema intervento Stralcio 3

Nello specifico il progetto prevede:

- allargamento della sezione a 8,0 m netti lungo Via Buonarroti;
- aumento della luce libera della sezione idraulica, con conseguente innalzamento della soletta di copertura lungo Via Buonarroti;
- aumento della luce libera della sezione idraulica, con conseguente innalzamento della soletta di copertura lungo Via Stalingrado (già larga 8,0 m). Le dimensioni delle sezioni libere di progetto nei due tratti sono:
 - Via Buonarroti 8,00 X (4,21 ÷ 4,16)
 - Via Stalingrado 8,00 X (4,16 ÷ 4,23)

Entrambi i progetti sono stati approvati in conferenza dei servizi e risultano oggetto di un finanziamento regionale e saranno appaltati in tempi brevi.

In particolare, con DdDG n. 26 del 7/2/2018, è stato espresso il parere di compatibilità sul Progetto di fattibilità degli interventi di mitigazione del rischio idraulico sul rio Molinero nel tratto compreso tra Via Bonini e il rilevato ferroviario, in Comune di Savona in attuazione del Piano di Bacino.

5 INDAGINI E RILIEVI

Le informazioni topografiche e dimensionali riguardanti le sezioni idrauliche del torrente e i manufatti di attraversamento presenti sono state desunte dai seguenti elaborati e progetti:

- Rilievo topografico dell'alveo del rio Molinero eseguito per conto del Comune di Savona dai geom. Repetto e Saettone nell'aprile del 2004;
- Rilievo topografico eseguito dal geom. Sciandra nell'ambito del progetto di IRE del 2020, ad integrazione del precedente e che riguardava:
 - le aree di superficie comprese tra il posteggio di via Bonini, in fregio alle aree del Polo Universitario Savonese, e l'incrocio tra Via Bove e Via Buonarroti.
 - l'alveo del rio Molinero con i relativi manufatti interferenti (ponti, briglie, tombinature).Tale rilievo è diviso in due: superficiale e sotterraneo.

Inoltre, sono stati effettuati una serie di sopralluoghi con misure speditive delle sezioni dell'alveo al fine di controllare i dati riportati nei vari progetti.

6 ASPETTI NORMATIVI

La normativa idraulica di riferimento è costituita dal Piano di Gestione e Rischio Alluvioni (PGRA) del Distretto dell'Appennino Settentrionale, dal Piano di Bacino Stralcio sul Rischio Idrogeologico – rio Molinero², dal Regolamento Regionale n. 3 del 14/07/2011³ così come modificato dalla DGR n. 181 del 11/03/2016 e dal Regolamento Regionale n. 291/2025.

6.1 PIANO DI GESTIONE RISCHIO ALLUVIONI DEL DISTRETTO DELL'APPENNINO SETTENTRIONALE - PGRA

Secondo quanto riportato nella Carta della pericolosità da alluvione fluviale e costiera allegata al PGRA dell'Appennino Settentrionale, un'ampia area centrale rispetto al corso d'acqua dall'autostrada fino allo sbocco a mare ricade in Fascia P3 – aree a pericolosità da alluvione elevata, mentre una fascia in ponda destra e il campo sportivo Bacigalupo ricadono in Fascia P2 – aree a pericolosità da alluvione media.

Nella figura seguente si riporta la mappatura della pericolosità da alluvione fluviale allegata al PGRA del Distretto dell'Appennino Settentrionale.

² Approvato con Delibera del Consiglio Provinciale n. 47 del 25/11/2003. Ultima variante approvata: DSG n. 114 del 06/12/2021 entrata in vigore dal 12/01/2022.

³ Disposizioni in materia di tutela delle aree di pertinenza dei corsi d'acqua, attuativo della DGR 1360/2010.

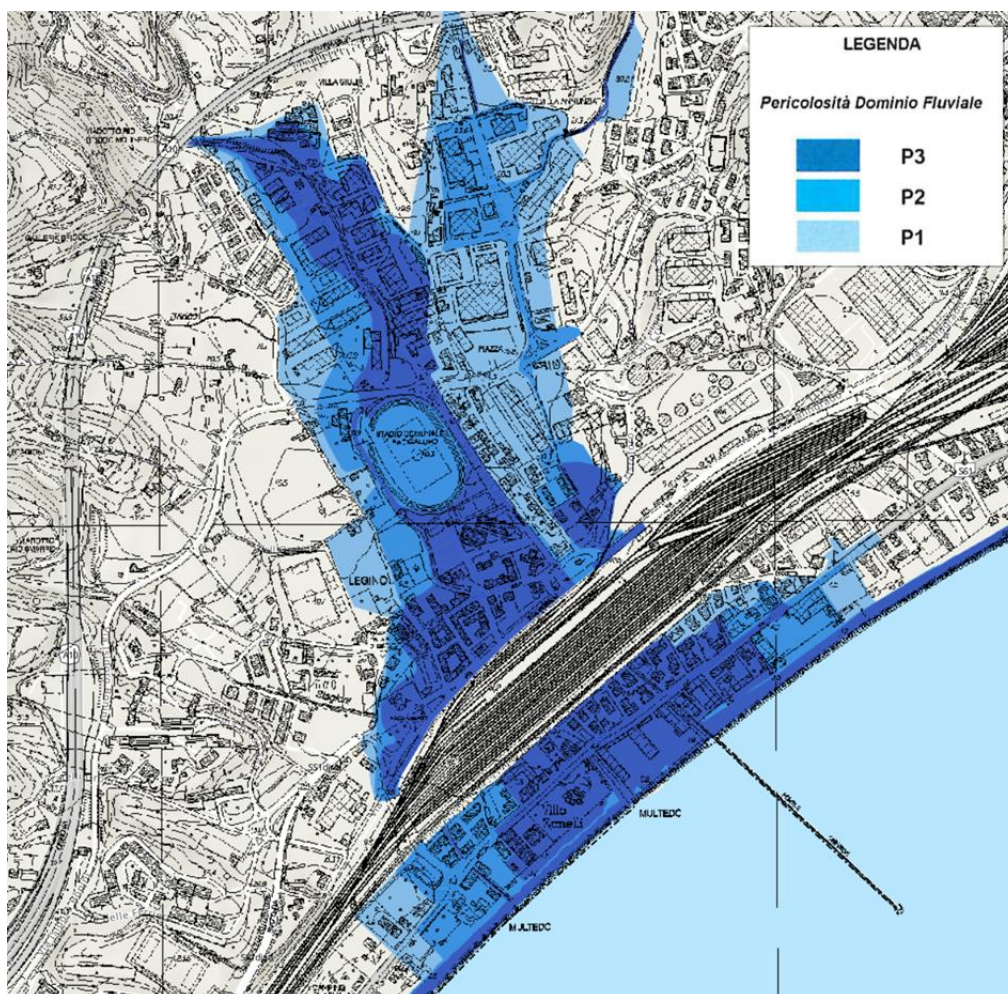


Figura 6-1 - PGRA: Estratto Mappa della pericolosità da alluvione fluviale

6.2 PIANO DI BACINO – RIO MOLINERO

A decorrere dal 1° gennaio 2024, i Piani di Bacino stralcio delle sopresse autorità di bacino sono superati per quanto riguarda la disciplina dell'assetto idraulico, mentre continuano ad applicarsi per gli aspetti relativi all'assetto geomorfologico

Fino alla emanazione del regolamento regionale ex art.91, c.1 ter2 della l.r. 18/1999 trova applicazione la disciplina per l'Assetto idraulico dei previgenti Piani di bacino Stralcio regionali con riferimento alle aree ivi mappate, ad eccezione delle seguenti previsioni normative che risultano non compatibili con la normativa del PGRA:

- Art. 15 bis (Derogabilità alla disciplina delle fasce di inondabilità per opere pubbliche);
- Art. 17 (interventi di sistemazione idrogeologica).

Secondo quanto riportato nel Piano di Bacino il rio Molinero risulta indagato mediante uno studio idraulico monodimensionale.

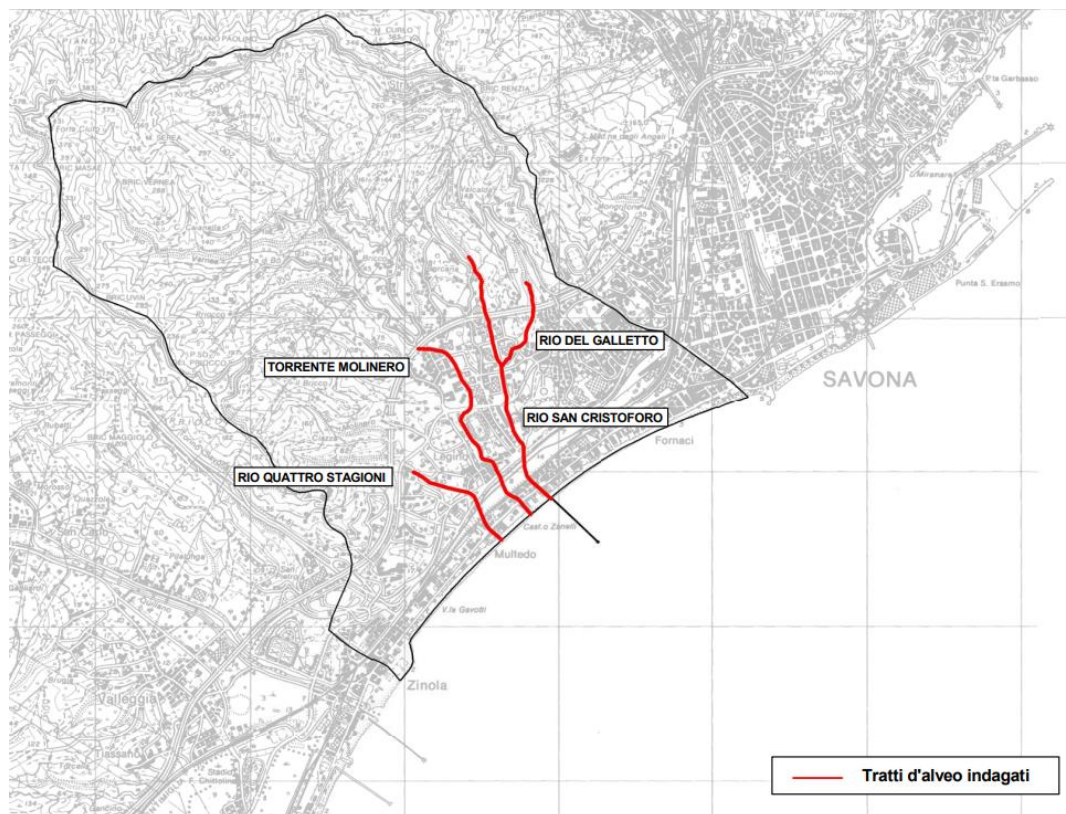


Figura 6-2 – Tracce delle sezioni idrauliche e dei tratti indagati

Nella figura seguente è riportato un estratto della Carta delle aree inondabili e delle fasce di inondabilità.

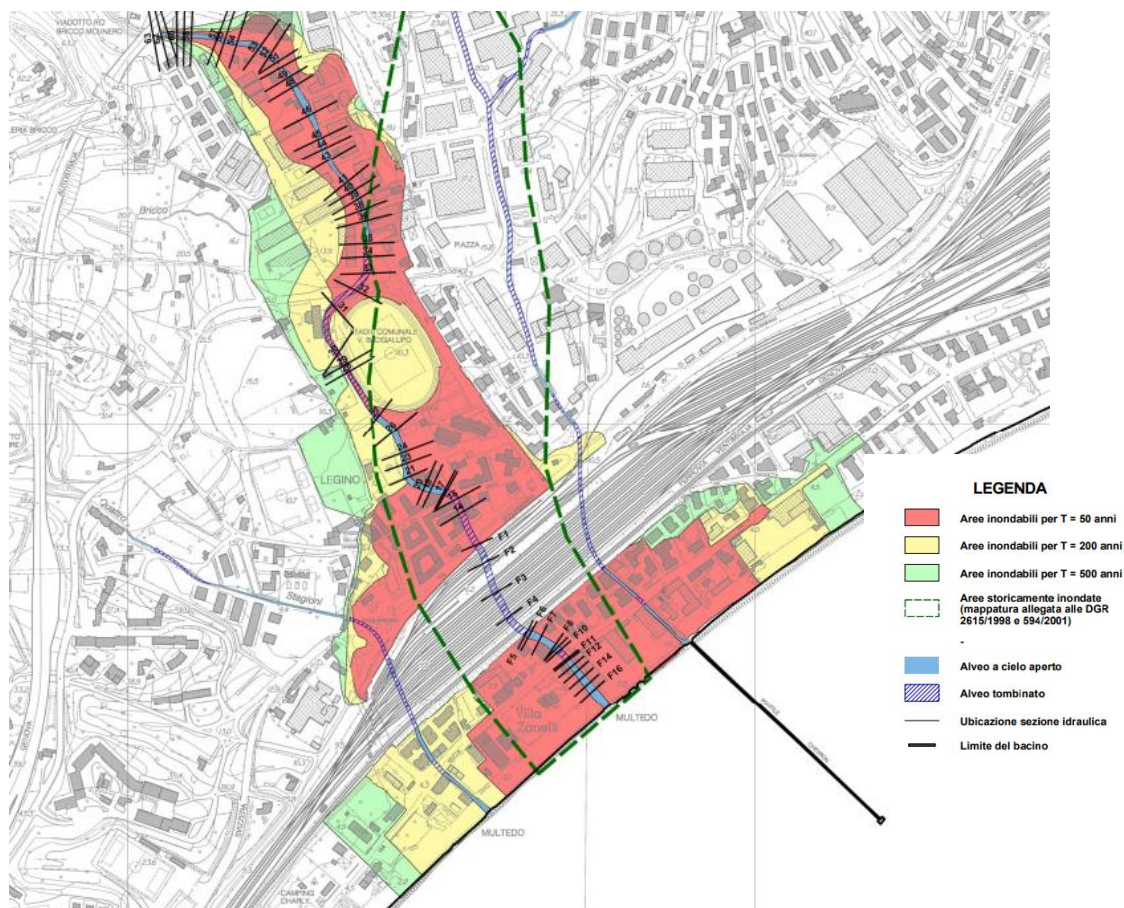


Figura 6-3 – Estratto della carta delle aree inondabili Rio Molinero

Nel Piano di Bacino sono riportati i valori delle portate di piena per assegnato periodo di ritorno per diverse sezioni di chiusura del rio Molinero.

Tratto	Area [km ²]	Q50 [m ³ /s]	Q200 [m ³ /s]	Q500 [m ³ /s]
Molinero (sez.63)	4.3	69	105	132
Molinero (sez. 34)	5.8	80	120	150

Tabella I

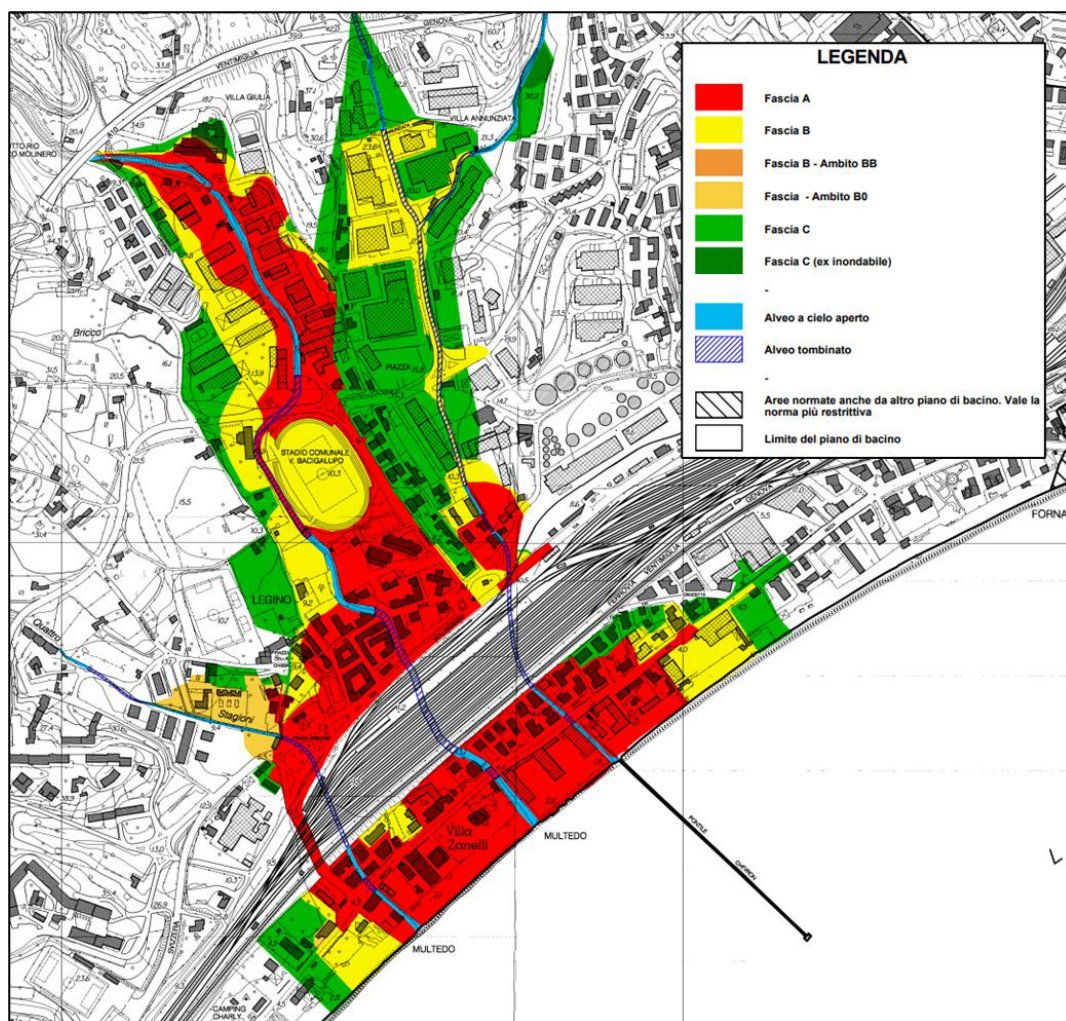


Figura 6-4 – Estratto della carta delle fasce di inondabilità rio Molinero, San Cristoforo e Quattro Stagioni

6.3 REGOLAMENTO REGIONALE N. 3 DEL 14/07/2011

Il Regolamento Regionale suddivide i corsi d'acqua appartenenti al reticolo idrografico in classi in funzione dell'estensione dei bacini sottesi secondo il seguente schema.

Superficie sottesa [km ²]	Classificazione
$S > 1$	Corso d'acqua di 1° livello
$0.25 \leq S \leq 1$	Corso d'acqua di 2° livello
$0.25 < S < 0.1$	Corso d'acqua di 3° livello
$S \leq 0.1$	Corso d'acqua minuto

Tabella II

Il rio Molinero è classificato come corso d'acqua di 1° livello essendo caratterizzato da una superficie pari a 4.8 km².

Per quanto riguarda i limiti di inedificabilità, per i corsi d'acqua di 1°, 2° e 3° livello "indagati" (ossia oggetto di studio idraulico specifico), il Regolamento (art. 4) stabilisce una fascia di inedificabilità assoluta dai limiti dell'alveo pari a 10 m, mentre per i corsi d'acqua minori tale fascia è stabilita pari a 3 m.

Nel caso specifico il corso d'acqua in esame è stato indagato nell'ambito del Piano di Bacino e, pertanto, la fascia di inedificabilità assoluta è pari a 10 m.

Per quanto concerne il coefficiente di scabrezza e i franchi idraulici di sicurezza da adottare nelle verifiche idrauliche il Regolamento indica i seguenti parametri.

Descrizione corso d'acqua	Ks (m ^{1/3} s ⁻¹)
Alvei naturali con salti, rocce o vegetazione anche arbustiva-arborea in alveo	25-30
Alvei naturali con vegetazione e movimento di materiale sul fondo	30-35
Tratti urbanizzati di corsi 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 (tubo, cavi, ecc.) o discontinuità interferenti con le acque.	40-45

Tabella III

Per i corsi d'acqua di primo livello e secondo livello il franco idraulico da adottare deve essere il maggiore tra:

- il carico cinetico della corrente determinabile come $U^2/2g$, dove U (m/s) è la velocità media della corrente e g (m/s²) è l'accelerazione di gravità
- i valori della tabella seguente:

I	Argini e difese spondali	cm 50/100
II	Ponti e strutture di attraversamento fino ad estensioni longitudinali di 12 m	cm 100/150
III	Coperture e tombature, ponti e strutture di attraversamento oltre 12 m	cm 150/200

Tabella IV

ove i due valori estremi corrispondono rispettivamente a bacini poco dissestati con previsione di modesto trasporto solido ed a bacini molto dissestati con previsione di forte trasporto solido in caso di piena, e/o a bacini di maggiore o minore estensione.

6.4 REGOLAMENTO REGIONALE N. 291/2025

Il presente regolamento tratta delle *“Disposizioni concernenti l’attuazione dei Piani di bacino distrettuali, anche stralcio, per le aree a pericolosità da alluvione fluviale e costiera in attuazione dell’articolo 91, comma 1 ter 2 della legge regionale 21 giugno 1999, n. 18 (Adeguamento delle discipline e conferimento delle funzioni agli enti locali in materia di ambiente, difesa del suolo ed energia)”*.

Al Titolo II il regolamento riporta la disciplina delle aree a pericolosità da alluvione mappate dal PGRA.

Al Titolo III sono trattate ulteriori disposizioni di disciplina del territorio, quali la portata di piena di progetto, la fascia di riassetto fluviale, le fasce di rispetto.

Negli Allegati 1a e 1b sono definiti gli *Accorgimenti tecnico-costruttivi finalizzati al non aumento del rischio idraulico da alluvione fluviale e costiera*.

Nell’Allegato 2 sono riportati i *Criteri per l’individuazione di ambiti normativi relativi ad aree a minore pericolosità relativa all’interno di aree a pericolosità da alluvione fluviale elevata e media P3 e P2*.

Nel presente regolamento regionale, in continuità con i previgenti piani di bacino delle UOM regionale ligure e UoM Magra, gli ambiti normativi vengono individuati come sottoinsiemi di aree a minore pericolosità, detta quindi “relativa”, ciascuno nell’ambito dello stesso livello di pericolosità “assoluta” P2 e P3 del PGRA.

Pertanto ai fini della determinazione degli ambiti normativi si applica la seguente impostazione:

a) aree P3 e ambito P3_0:

- all’interno dello stesso livello di pericolosità elevata P3 del PGRA (T=50 anni per gli ex bacini regionali liguri e T= 30 anni per il Magra) si individuano ambiti di minor pericolosità “relativa” -ma sempre a pericolosità “assoluta” elevata - sulla base delle caratteristiche di inondazione del corrispondente tempo di ritorno T50 (T30) al fine di individuare una disciplina urbanistico-edilizio più adeguata*
- Vengono quindi individuate, all’interno delle aree P3, aree a minor pericolosità relative, finalizzate alla definizione dell’ambito c.d. P3_0, nelle quali in considerazione di valori modesti delle caratteristiche dell’inondazione cinquantennale (trentennale) che ne consentono una protezione efficace, viene meglio calibrata la normativa edilizia per le nuove opere nell’ottica della gestione del rischio. Poiché un’area P3, inondabile a T=30/50 anni, è anche sicuramente inondabile anche a T=200 anni, per garantire la adeguata possibile protezione dei nuovi elementi dagli allagamenti, ai fini dell’effettiva individuazione delle aree P3_0 all’interno delle aree P3, è necessario verificare che nella stessa area si verifichino anche le condizioni di minor pericolosità relativa per*

l'inondabilità duecentennale sulla base delle relative caratteristiche di battenti e velocità duecentennali (come da successivo punto 2)).

- *Il livello di rischio idraulico attuale rimane sempre valutato rispetto alla pericolosità assoluta P3, in considerazione in particolare del fatto che gli insediamenti esistenti non sono in generale protetti adeguatamente dagli allagamenti, ed è in ogni caso necessario adottare misure ed azioni di protezione commisurati al livello di pericolosità "elevata".*

b) aree P2 e ambito P2_0:

- *Analogamente al punto a) viene predisposta, all'interno delle aree P2, la mappatura delle aree c.d. P2_0, nella quale in considerazione di valori più modesti delle caratteristiche dell'inondazione duecentennale che ne consentono una protezione affidabile, viene meglio calibrata la normativa edilizia per le nuove opere nell'ottica della gestione del rischio.*

- *Il livello di rischio attuale rimane sempre corrispondente alla pericolosità assoluta P2.*

A) Le aree P3_0 sono individuate secondo i criteri di cui al combinato disposto della tabella seguente (le due condizioni per T50 e T200 devono essere entrambe verificate):

Determinazione aree P3_0 all'interno di aree P3	
Evento di piena per T = 50 anni	
Velocità di scorrimento V_{50}	Battente idrico h_{50}
$V_{50} \leq 0,50 \text{ m/s}$	$h_{50} \leq 0,30 \text{ m}$
Evento di piena per T = 200 anni	
Velocità di scorrimento V_{200}	Battente idrico h_{200}
$V_{200} \leq 0,50 \text{ m/s}$	$h_{200} \leq 0,70 \text{ m}$
$0,50 \text{ m/s} < V_{200} \leq 1,00 \text{ m/s}$	$h_{200} \leq 0,50 \text{ m}$
$1,00 \text{ m/s} < V_{200} < 1,50 \text{ m/s}$	$h_{200} \leq 0,30 \text{ m}$

Tabella V

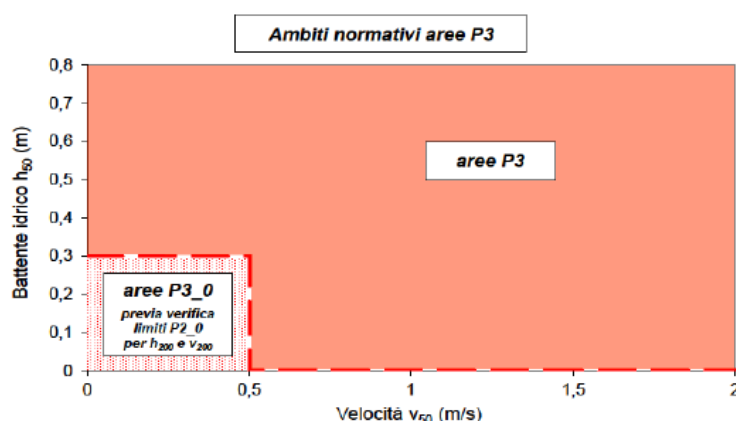


Figura 6-5 – Ambiti normativi aree P3

B) Le aree P2_0 sono individuate secondo i criteri di cui alla tabella seguente.

Determinazione aree P2_0 all'interno di aree P2	
Evento di piena per $T = 200$ anni	
velocità di scorrimento V_{200}	Battente idrico h_{200}
$V_{200} \leq 0,50$ m/s	$h_{200} \leq 0,70$ m
$0,50$ m/s $< V_{200} \leq 1,00$ m/s	$h_{200} \leq 0,50$ m
$1,00$ m/s $< V_{200} \leq 1,50$ m/s	$h_{200} \leq 0,30$ m

Tabella VI

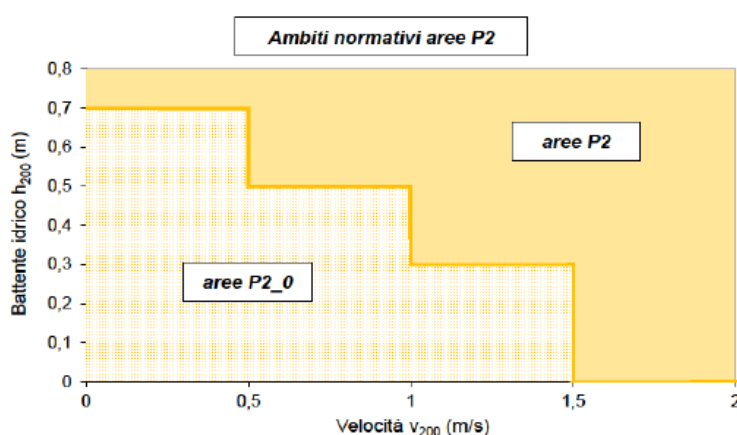


Figura 6-6 – Ambiti normativi aree P2

L'applicazione della metodologia di individuazione cartografica delle aree a minor pericolosità relativa qui delineata deve, in ogni caso, essere coerente con le mappe del PGRA. Deve basarsi su risultati di studi idraulici di dettaglio, che permettano di determinare affidabilmente, oltre alla perimetrazione delle aree a pericolosità da inondazione, le entità dei battenti idrici e delle velocità di scorrimento che vi si realizzano. Tali studi devono prendere in considerazione l'intero corso d'acqua, o, in caso di bacini di rilevanti dimensioni, tratti significativi di corso d'acqua e/o l'area inondabile interessata nella sua interezza.

7 CALCOLO PORTATE DI PIENA

La valutazione delle precipitazioni e delle portate nel Piano di Bacino è stata effettuata con la metodologia proposta dal CIMA.

Al fine di controllare e se necessario aggiornare le suddette portate sono state ricalcolate le Linee Segnalatrici di Possibilità Pluviometrica (LSPP), utilizzando la metodologia prevista dalla DGR 357/2008 con l'aggiornamento dei parametri secondo la proposta del Dipartimento di Ingegneria Chimica, Civile e Ambientale (DICCA) dell'Università degli studi di Genova.

A partire da tali valori sono stati calcolati:

- le portate di piena con la regionalizzazione della DGR357/08
- le portate di piena con la metodologia CIMA

Una volta ottenute le LSPP con le piogge del DICCA, sono state valutate le portate relative a tali curve e sono state messe a confronto con quelle del Piano di Bacino.

7.1 LINEE SEGNALETRICI DI POSSIBILITÀ PLUVIOMETRICA CON L'AGGIORNAMENTO DELLE PIOGGE DEL DICCA

Ai fini della valutazione delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica (o curve di probabilità pluviometrica) è stata effettuata un'analisi finalizzata all'individuazione del regime delle piogge intense caratteristico dell'area in esame.

L'analisi è stata condotta con riferimento ai parametri statistici delle stazioni pluviometriche dei bacini liguri riportati nella DGR 357/2008 con l'aggiornamento proposto dal Dipartimento di Ingegneria Chimica Civile e Ambientale (DICCA) dell'Università degli Studi di Genova⁴.

In tale documento una generica curva di probabilità pluviometrica di durata oraria è espressa nella forma:

$$h_T(d) = a_i \cdot w_T \cdot d^n$$

Dove a_i rappresenta il valore atteso della altezza di pioggia massima annuale per la durata di 1 ora, n è l'esponente di scala, w_T è il fattore di crescita in frequenza (secondo la distribuzione GEV), funzione a sua volta del parametro di posizione ε , del parametro di scala α , e del parametro di forma della distribuzione k .

⁴ Regione Liguria (ARPAL) – TI.6.II. Rapporto sull'aggiornamento della climatologia degli estremi

Nel caso di piogge intense di durata sub-oraria la curva di probabilità pluviometrica è espressa nella forma seguente:

$$h_T(d) = \frac{i_0 d}{(1 + B \cdot d)^\beta} \cdot w_T$$

Dove i_0 [mm/h] rappresenta il valore limite dell'intensità di precipitazione, B [h⁻¹] determina il tasso di crescita dell'altezza di precipitazione per le brevi durate, β rappresenta l'esponente di scala adimensionale e w_T il fattore di crescita in frequenza (secondo la distribuzione GEV).

Nell'aggiornamento della DGR 357/08 effettuato dal DICCA sono tabellati tali parametri per tutte le stazioni del territorio ligure.

La stazione più rappresentativa del sito in esame è quella di Savona-Istituto Nautico i cui parametri orari sono:

n [-]	a₁ [mm/h ⁿ]	k [-]	a [-]	ε [-]
0.332	40	-0.069	0.282	0.817

Tabella VII

Le curve risultanti in funzione del tempo di ritorno sono pertanto esprimibili come:

- $h = 83.19 \cdot t^{0.332}$ per T= 50 anni.
- $h = 104.79 \cdot t^{0.332}$ per T= 200 anni
- $h = 120.19 \cdot t^{0.332}$ per T= 500 anni.

Nella figura e nella tabella seguenti sono riportate in forma numerica e grafica tali curve per i diversi periodi di ritorno.

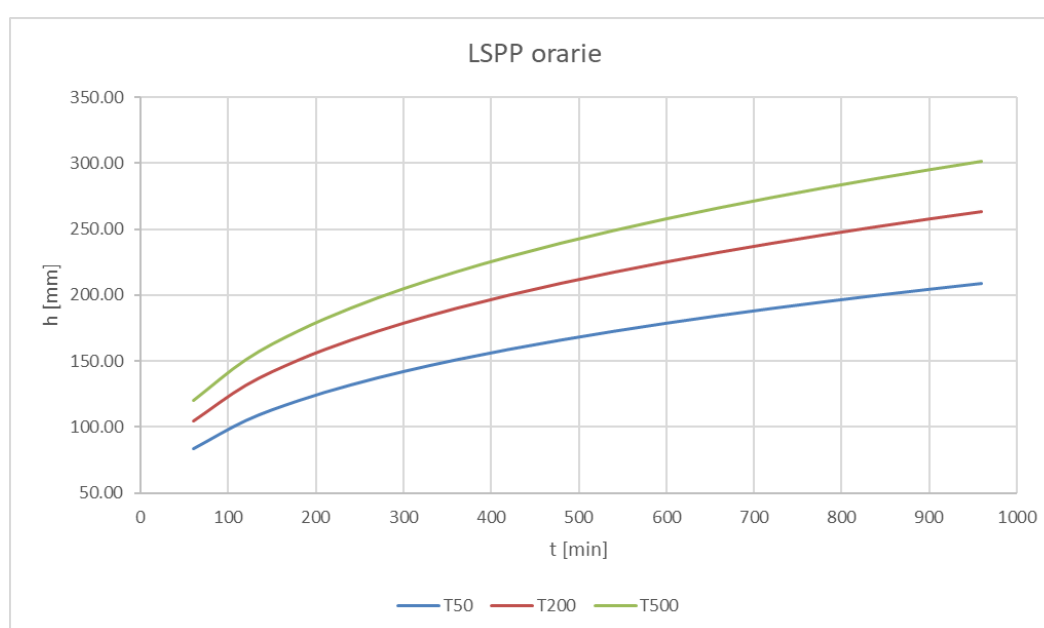


Figura 7-1 – Linee Segnalatrici di Possibilità Pluviometrica DICCA

Altezze pioggia $h_T(d)$							
	T	10	25	50	100	200	500
d	a(T)	60.141	73.051	83.188	93.750	104.791	120.193
[min]	n	0.332	0.332	0.332	0.332	0.332	0.332
5		26.36	32.01	36.46	41.08	45.92	52.67
10		33.18	40.30	45.89	51.72	57.81	66.30
15		37.96	46.10	52.50	59.17	66.14	75.86
20		41.76	50.72	57.76	65.10	72.76	83.46
25		44.97	54.63	62.21	70.10	78.36	89.88
30		47.78	58.03	66.09	74.48	83.25	95.49
40		52.57	63.85	72.71	81.94	91.59	105.06
50		56.61	68.76	78.30	88.24	98.64	113.13
60		60.14	73.05	83.19	93.75	104.79	120.19
120		75.70	91.95	104.71	118.01	131.91	151.29
180		86.61	105.20	119.80	135.01	150.91	173.09
240		95.29	115.75	131.81	148.54	166.04	190.44
300		102.62	124.65	141.95	159.97	178.81	205.09
360		109.02	132.43	150.80	169.95	189.96	217.88
420		114.75	139.38	158.72	178.87	199.94	229.33
480		119.95	145.70	165.92	186.98	209.00	239.72
540		124.73	151.51	172.53	194.44	217.34	249.28
600		129.17	156.90	178.67	201.36	225.07	258.15
660		133.33	161.94	184.42	207.83	232.31	266.45
720		137.23	166.69	189.82	213.92	239.12	274.26
780		140.93	171.18	194.94	219.68	245.56	281.65
840		144.44	175.44	199.79	225.16	251.67	288.67
900		147.79	179.51	204.42	230.37	257.51	295.35
960		150.99	183.40	208.85	235.36	263.08	301.75
1020		154.06	187.13	213.09	240.15	268.43	307.89
1080		157.01	190.71	217.18	244.75	273.57	313.78
1140		159.85	194.16	221.11	249.18	278.53	319.47
1200		162.60	197.50	224.91	253.46	283.31	324.95
1260		165.25	200.72	228.58	257.60	287.94	330.26
1320		167.82	203.85	232.14	261.61	292.42	335.40
1380		170.32	206.88	235.59	265.50	296.77	340.39
1440		172.74	209.82	238.94	269.28	300.99	345.23

Tabella VIII

7.2 DETERMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA CON LA REGIONALIZZAZIONE DELLA DGR357/08

Secondo le indicazioni della DGR la portata al colmo Q per assegnati tempi di ritorno T è calcolabile in funzione della cosiddetta “portata indice” q_{indice} nella forma;

$$Q_T = k_T \cdot q_{indice}$$

dove k_T rappresenta un fattore di crescita valutato a scala regionale.

La portata indice è calcolabile (*Allegato Tecnico Capitolo III “Metodi di valutazione della portata indice”*) tramite la seguente formula empirica:

$$q_{indice} = c_0 \cdot W_1^{c1} \cdot W_2^{c2} \cdot W_3^{c3} \cdot W_4^{c4} \cdot W_5^{c5} \cdot W_6^{c6}$$

Le variabili considerate sono:

$W_1 = A$ area del bacino imbrifero sottesa dalla sezione di interesse, in km²;

$W_2 = a_i$ coefficiente pluviale orario, indica il valore atteso dell'altezza di pioggia massima annuale per una durata unitaria di un'ora, in mm;

$W_3 = \nu$ esponente della linea segnalatrice di probabilità pluviometrica scala-invariante, adimensionale;

$W_4 = H_{mb}$ quota media del bacino sotteso rispetto alla sezione di chiusura, in km;

$W_5 = S_{III}$ massimo volume specifico di ritenzione potenziale del terreno parametrizzato tramite il metodo CN-SCS (Soil Conservation Service, 1986) per condizioni di elevato imbibimento, ossia per AMC tipo III, espresso in mm;

$W_6 = A/L_{ap}^2$ fattore di forma dove L_{ap}^2 indica la lunghezza dell'asta principale, in km;

I valori dei parametri $c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5$ e c_6 sono tabellati secondo categorie regionali come riportato nel seguito.

Regione	Esponente della Variabile Esplicativa						R^2_{Log}	SE_{Log}	R^2	Bias	
	c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5					c_6
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6					
	Area del bacino sotteso, A	Coefficiente pluviale orario ^{**} , a_1	Esponente di invarianza di scala pluviale, ν	Quota media del bacino sotteso	Parametro di ritenzione, $S_{III}/100$	Fattore di forma del bacino, A/L_{ap}^2					
	[-]	[km ²]	[mm]	[-]	[km]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[%]	
B	0.5	0.901						0.76	0.561	0.29	10
B	7.3×10^{-3}	0.920	1.523					0.89	0.374	0.75	7.6
B	1.6×10^{-2}	0.800	1.408		1.170			0.91	0.336	0.82	6.2
B	7.8×10^{-3}	0.839	1.736		1.042		0.349	0.93	0.305	0.86	4.9
C	5.2	0.750						0.75	0.442	0.63	12
C	2.62	0.807			- 0.626			0.87	0.336	0.65	5.6
C	2.51	0.874			- 0.717		0.265	0.88	0.320	0.71	5.2
C	0.21	0.897	0.678		- 0.686		0.285	0.89	0.307	0.78	4.6

* dove $W_6 = L_{ap}$ è la lunghezza dell'asta principale in km (da Brath et al., 1999).
** $E[H(1)]$: valore atteso dell'altezza di pioggia massima annuale per una durata unitaria (1 ora).

Tabella IX

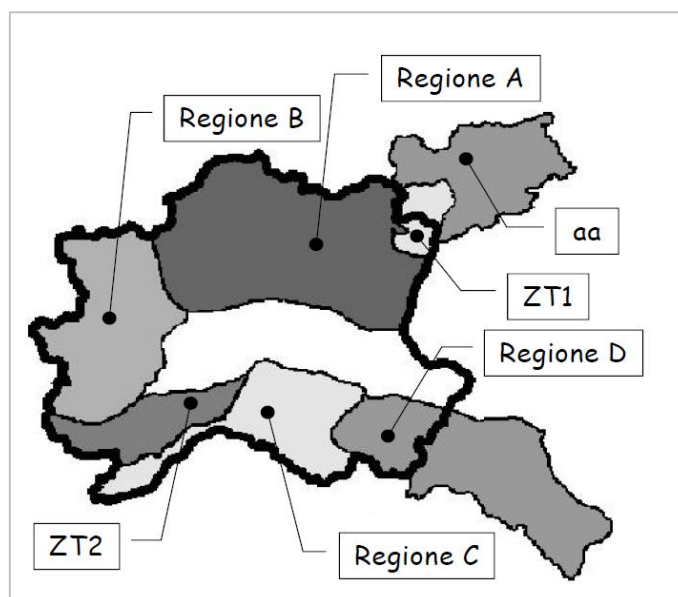


Figura 7-2 – Regioni omogenee dell'Italia Nord-Occidentale in relazione al regime di piena secondo la DGR 357/08

L'area in esame appartiene alla Regione C (Appennino Nord Occidentale e Bacini Tirrenici) relativa all'area idrografica dei bacini liguri con foce al litorale tirrenico e ai bacini padani dallo Scrivia al Taro.

Con riferimento alla DGR 357/2008 e ai parametri disponibili i valori della portata indice risulta pari a:

$$q_{indice} = 36.76 \text{ m}^3/\text{s}$$

Il fattore di crescita k_T in funzione del tempo di ritorno T è riportato per la Regione C nella seguente tabella:

$T[\text{anni}]$	10	20	50	100	200	500
k_T	1.50	1.75	2.08	2.37	2.62	3.00

Tabella X

In base a tali assunzioni i valori delle portate di piena per assegnati tempi di ritorno del rio Molinero alla foce risultano quindi:

$T = 50$ anni	$Q = 77 \text{ m}^3/\text{s}$
$T = 200$ anni	$Q = 96 \text{ m}^3/\text{s}$
$T = 500$ anni	$Q = 111 \text{ m}^3/\text{s}$

7.3 DETERMINAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA CON METODO CIMA

Sono state inoltre calcolate le portate con il metodo CIMA utilizzando le piogge aggiornate del DICCA.

Le portate per il rio Molinero alla foce risultano pari a:

$T = 50$ anni	$Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$
$T = 200$ anni	$Q = 108 \text{ m}^3/\text{s}$
$T = 500$ anni	$Q = 125 \text{ m}^3/\text{s}$

7.4 RAFFRONTO TRA LE PORTATE DEL PIANO DI BACINO E QUELLE DETERMINATE CON LE PIOGGE DEL DICCA

Una volta ottenuti i valori delle portate calcolati partendo dall'aggiornamento delle piogge del DICCA, sono stati messi a confronto con le portate del Piano di Bacino.

Nella figura seguente si riporta il confronto tra le portate per i diversi tempi di ritorno. Si può osservare che le portate ottenute con il metodo della regionalizzazione proposto dalla DGR 357/08 (in arancione) risultano inferiori rispetto a quelle riportate nel PdB (in blu) e quelle calcolate con il metodo CIMA (in grigio) risultano superiori rispetto a quelle della regionalizzazione e di poco inferiori a quelle del PdB.

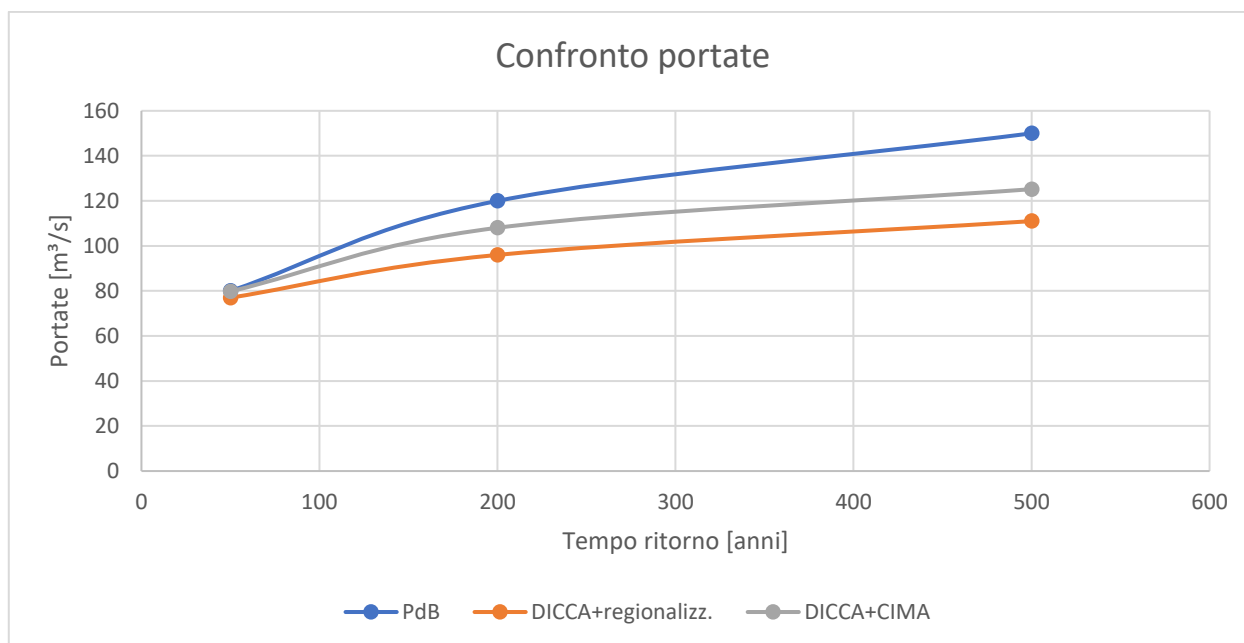


Figura 7-3 – Raffronto tra le portate del Piano di Bacino e quelle ottenute con le piogge aggiornate

Nella tabella seguente sono riportati i valori delle portate di piena risultanti dai vari metodi.

Rio Molinero sbocco a mare	Portata T = 50 anni [m³/s]	Portata T = 200 anni [m³/s]	Portata T = 500 anni [m³/s]
PdB (metodo piogge e portate CIMA)	80	120	150
Piogge DICCA + regionalizzazione DGR 357/08	77	96	111
Piogge DICCA + portate CIMA	80	108	125

Tabella XI

Alla luce dei risultati ottenuti si è deciso di mantenere i valori di portata riportati nel Piano di Bacino.

8 IDROGRAMMI DI PIENA

La determinazione degli idrogrammi di piena del rio Molinero è stata effettuata secondo le procedure previste dalla linea guida DGR 357/2008 *Criteri di verifica e valutazione delle portate al colmo e degli idrogrammi di piena nei bacini idrografici liguri*.

In particolare si è utilizzato il *metodo indiretto dell'evento idrometeorologico critico* finalizzato alla valutazione degli idrogrammi di riferimento condizionati dal valore della portata al colmo di progetto, assunta, se non diversamente specificato, pari a quella del Piano di Bacino. La metodologia di calcolo è riportata in Appendice 3.

Ai fini della modellazione bidimensionale sono stati determinati gli idrogrammi di piena per gli eventi con tempo di ritorno di 50, 200 e 500 anni allo sbocco a mare.

I parametri delle curve di probabilità pluviometrica e quelli caratteristici del bacino sotteso sono stati definiti in base ai valori riportati nella DGR 357/08 e negli Allegati Tecnici del Piano di Bacino del rio Molinero.

Per quanto riguarda le curve di probabilità pluviometrica è stata utilizzata la stazione di Savona.

La curva risultante presenta un valore della pioggia indice $a_i = 41.6$ mm/h per la sezione terminale e un valore dell'esponente di scala $n = 0.323$.

Gli idrogrammi di piena sono stati ricostruiti attraverso l'uso di un modello seriale (vedi Appendice 3) di trasformazione afflussi-deflussi costituito da una prima parte di trasformazione della pioggia di progetto in volume specifico di ruscellamento, basato sull'interpretazione Hortoniana (non lineare) del processo di assorbimento, e da una seconda parte caratterizzata da un modello lineare di formazione della piena attraverso la rete idrografica basato sul modello di Nash.

Il calcolo della precipitazione efficace al fine dello scorrimento superficiale è stato effettuato depurando gli idrogrammi precedentemente individuati dalle perdite per infiltrazione e per immagazzinamento nelle depressioni superficiali. Si è adottato il metodo di depurazione della pioggia noto come Curve Number proposto dal Soil Conservation Service basato sul modello Hortoniano di descrizione del fenomeno dell'assorbimento.

La determinazione dei parametri caratteristici del bacino quali superficie, tempo di corrivazione e valore di CN è stata effettuata sulla base dei contenuti del Piano di Bacino e della stessa DGR 357/2008 (vedi tabella).

Nodo/tratto	A [km ²]	CN III	t _c [ore]
Molineri sbocco a mare	5.8	87	0.9

Tabella XII

A completamento dell'analisi idrologica l'idrogramma è stato calcolato anche per la condizione V_{max} , ossia quello che produce il massimo valore del volume di esondazione per una portata di soglia prefissata.

Il calcolo è stato effettuato assumendo un valore della portata di soglia pari a 30 m³/s, corrispondente alla portata defluente in condizioni di franco sia per gli argini sia per i ponti.

Nella tabella seguente si riportano i valori di $a^{(*)}$, di n e del tempo di pioggia t_p assunti per le varie sezioni di chiusura, con i corrispondenti valori della portata massima nei diversi nodi individuati per le due condizioni (Q_{max} e V_{max}).

		$a^{(*)}$ [mm/h]	n	t_p [min]	Q_{max} [m ³ /s]	Q_s [m ³ /s]	$V > Q_s$ [m ³]
T=50	Q_{max}		0.323	60	80	30	118832
	V_{max}			150	64		159845
T=200	Q_{max}	114.5	0.323	60	120		253550
	V_{max}			220	73		361232
T=500	Q_{max}	137	0.323	60	150		363994
	V_{max}			260	79		539811

Tabella XIII

Nelle figure seguenti sono riportati gli idrogrammi di piena risultanti sia per la condizione di Q_{max} che di V_{max} .

Data la complessità del fenomeno risulta evidente che se da una parte tali idrogrammi possono non rappresentare l'effettivo andamento delle portate durante l'evento, dall'altra ne costituiscono tuttavia una sintesi sufficientemente attendibile per gli scopi del presente studio.

Idrogrammi di piena - T=50 anni

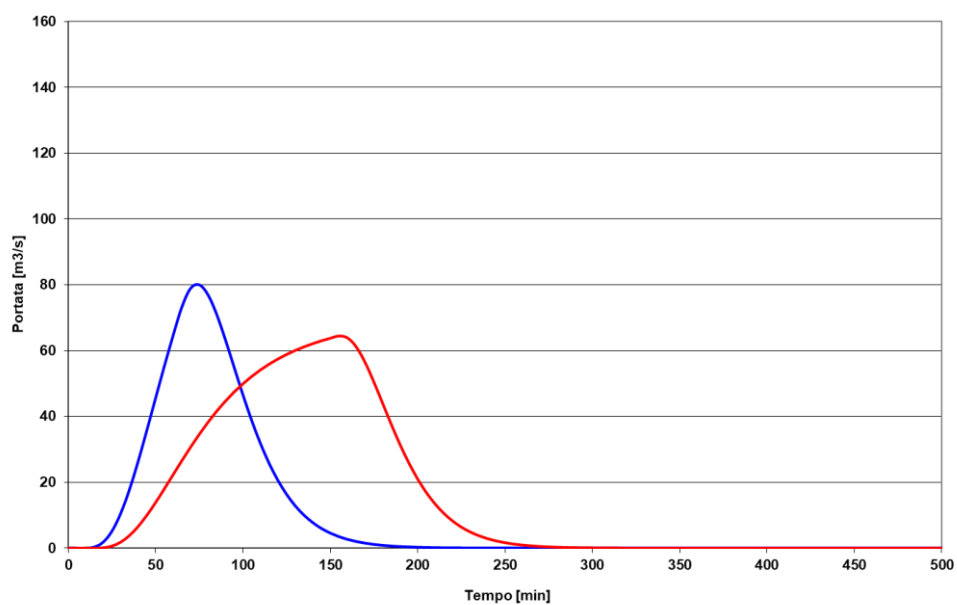


Figura 8-1 - Idrogrammi di piena = 50 anni

Idrogrammi di piena - T=200 anni

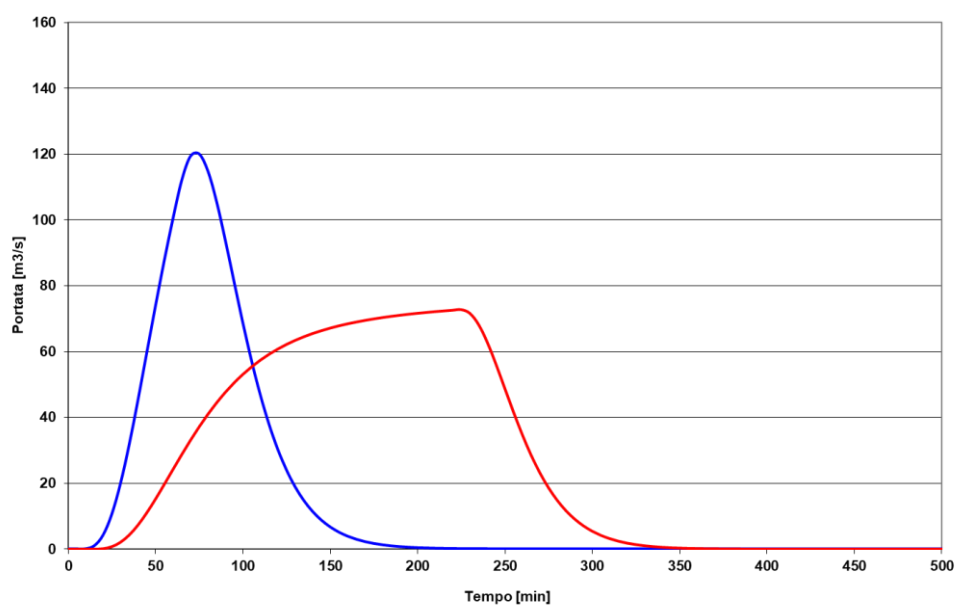


Figura 8-2 - Idrogrammi di piena = 200 anni

Idrogrammi di piena - T=500 anni

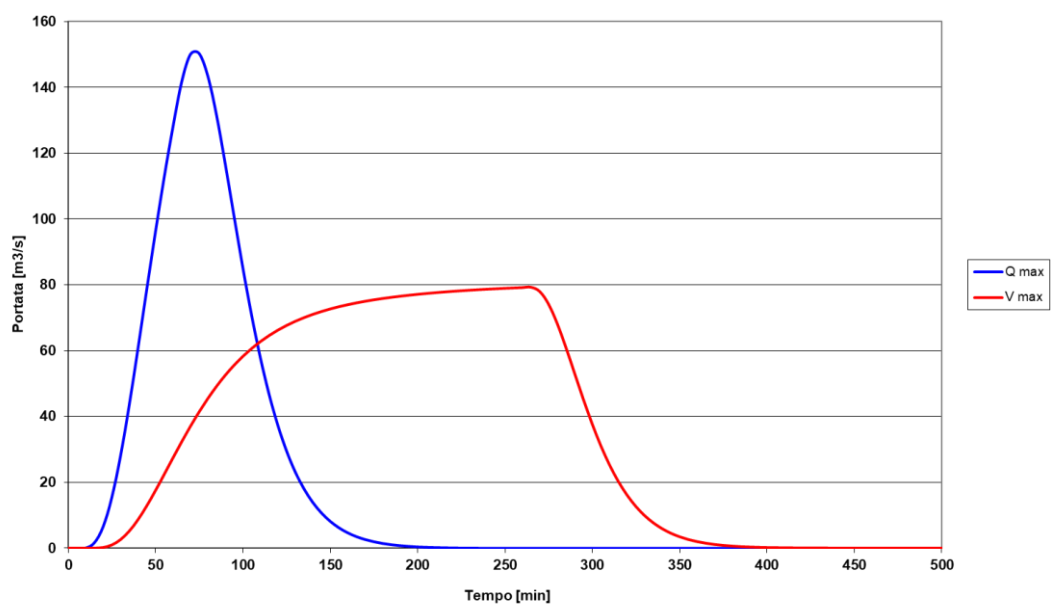


Figura 8-3 - Idrogrammi di piena = 500 anni

9 MODELLO BIDIMENSIONALE DI ALLAGAMENTO

9.1 BASE TOPOGRAFICA E SCHEMATIZZAZIONE DEL DOMINIO DI STUDIO

La modellazione idraulica dell'area indagata è stata fatta a partire da una base topografica adeguata alla tipologia di studio e alla scala di dettaglio del modello.

In particolare, per la definizione del dominio di calcolo sono state utilizzate le seguenti basi topografiche opportunamente integrate ed omogeneizzate tra loro:

- DTM fornito dal Ministero dell'Ambiente, prodotto con tecnologia Laser Scanner in volo (LIDAR), caratterizzato da una maglia quadrata 1x1 m;
- Carta Tecnica Regionale (C.T.R.), scala 1:5000, vettoriale tridimensionale;
- Rilievi aggiornati plano-altimetrici di dettaglio dei corsi d'acqua e delle aree adiacenti.

Il dominio di studio è stato schematizzato utilizzando i dati presenti nelle diverse basi topografiche disponibili suddividendo la zona di calcolo 2D (aree adiacenti al corso d'acqua) da quella 1D (alveo rio Molinero).

Dominio 2D

La base topografica di partenza importata nel software è costituita dal LIDAR del Ministero dell'Ambiente.

Poiché il DTM tiene conto solamente della superficie geodetica del territorio, sono stati importati dalla Carta Tecnica Regionale tutti gli edifici presenti nell'area indagata a cui è stata assegnata la condizione di "poligoni vuoti" non attraversabili dal flusso della corrente.

È stata fatta un'analisi della precisione e della completezza dei dati topografici del DTM al fine di verificarne l'adeguatezza per l'utilizzo nella modellazione.

L'analisi ha evidenziato che il DTM è affetto da alcune imprecisioni in quanto la risoluzione del modello non sempre riesce a rappresentare le forti discontinuità presenti nella topografia dell'area urbana indagata generando, in alcune zone, un rilievo geodetico del terreno che non rappresenta la realtà topografica dei luoghi.

La risoluzione delle imprecisioni è stata effettuata integrando la base cartografica del DTM con i rilievi e le altre cartografie tecniche disponibili.

A completamento del lavoro di integrazione sono state aggiunte una serie di condizioni interne, quali arginature, muri perimetrali di edifici, per rappresentare in modo più dettagliato e preciso la realtà urbana indagata.

Infine, è stato individuato e creato il dominio 2D di allagamento sulla base delle dinamiche di esondazione dell'area e delle mappature risultanti dal Piano di Bacino.

Il dominio 2D individuato ha un'estensione di circa 99 ha.

Dominio 1D

Il dominio 1D riguarda l'alveo del rio Molinero per una lunghezza di circa 1.5 km.

Ai fini del calcolo sono state individuate una serie di sezioni trasversali numerate in senso crescente da valle verso monte, in funzione delle caratteristiche geometriche e morfologiche dell'alveo (larghezza, pendenza, curve, presenza di manufatti, ecc.) con l'aggiunta di alcune sezioni di calcolo intermedie in corrispondenza di variazioni di sezione significative e dei manufatti.

Nella Figura 9-1 è riportato un estratto della schematizzazione del dominio di calcolo 1D-2D generato dal software di calcolo.

9.2 METODOLOGIA DI CALCOLO

Lo studio relativo all'allagamento delle aree in esame è stato effettuato implementando un modello idraulico bidimensionale con il software *Infoworks ICM*⁵.

Il software consente il calcolo in moto vario monodimensionale e bidimensionale di alvei fluviali, reticoli di bonifica e fognature urbane utilizzando la metodologia dei volumi finiti. Tra i principali risultati fornisce per ciascun dominio di calcolo (maglia di discretizzazione) i massimi tiranti idrici e la massima velocità di scorrimento.

Per maggiori approfondimenti teorici a riguardo si rimanda all'Appendice 2 allegata alla presente relazione.

⁵ *Infoworks ICM HR Wallingford Innovyze.*

9.3 PARAMETRI DI CALCOLO E CONDIZIONI AL CONTORNO

Modello 2D

Il dominio di calcolo è stato discretizzato generando una *mesh* triangolare a differente superficie, allo scopo di seguire più fedelmente possibile la geometria dei luoghi.



Figura 9-1 – Maglia di calcolo

I parametri principali relativi alla magliatura assunti nella modellazione sono i seguenti:

- dimensione massima dell'area dei triangoli generati pari a 20 m²;
- dimensione minima dell'area dei triangoli generati paria a 2 m²;
- magliatura variabile in funzione dell'andamento del terreno in modo che la variazione di quota tra i tre vertici non superi il valore di 0.20 m;
- coefficiente di scabrezza (coefficiente di Manning) di tutto il dominio pari a 0.025 m^{-1/3}s. Tale scelta è dovuta al fatto che l'area indagata è costituita da un'area urbana caratterizzata da viabilità e marciapiedi.

Il numero totale di triangoli generati dal software è pari a 104807 ognuno dei quali presenta un valore di quota univoco determinato sulla base della triangolazione dei punti del modello.

Al dominio di calcolo sono state assegnate le seguenti condizioni al contorno:

- *Condizioni di output:* in corrispondenza dell'estremità sud della maglia di calcolo (lato mare) si è assunta come condizione la profondità di moto uniforme ("*Normal Depth* ").
- *Condizioni generali della maglia:* nei restanti tratti del dominio di calcolo non interessati dalle condizioni di Input e di Output si è assunta, a favore di sicurezza, la condizione al contorno di "*Vertical Wall*" che corrisponde all'inserimento di una barriera verticale impermeabile infinitamente alta che non lascia uscire l'acqua dal dominio di calcolo qualora in simulazione si verificasse presenza d'acqua al suo perimetro.

Modello 1D

Il profilo di rigurgito del corso d'acqua è stato integrato per entrambe le condizioni di corrente lenta da valle verso monte e di corrente veloce da monte verso valle imponendo al dominio di calcolo 1D le seguenti condizioni al contorno:

- *Condizioni di input:* sono costituite dagli idrogrammi di piena calcolati con la metodologia riportata nei paragrafi precedenti.
- *Condizioni di output:* in corrispondenza della sezione di valle è stata imposta una quota del livello del medio mare pari a 0.45 m s.l.m. circa, corrispondente alla quota massima del livello del mare registrata dal mareografo di Genova dal 2010 (inizio misurazione) fino a novembre 2024, secondo quanto riportato nel sito ISPRA. Anche se ininfluyente ai fini del calcolo in quanto la quota del fondo alveo risulta superiore a tale valore.

In coerenza con i valori di riferimento indicati nelle Norme di Attuazione del Piano di Bacino la verifica è stata effettuata con il seguente valore del coefficiente di scabrezza di Manning:

- $n=0.033$ per il tratto di monte fino a via Bonini, corrispondente ad alvei naturali con salti, rocce o vegetazione anche arbustiva-arborea in alveo.
- $n=0.025$ per il tratto da via Bonini fino a mare, corrispondente tratti urbanizzati di corsi d'acqua naturali con argini cementati.

Ai fini della simulazione idraulica , sono stati adottati i seguenti parametri:

- Passo temporale di integrazione utilizzato durante il calcolo (*Timestep*) pari a 1 s.
- *Durata della simulazione* pari a 550 minuti corrispondente a circa 5 volte il tempo di picco dell'idrogramma in input.

9.4 IDROGRAMMI DI PIENA

Il confronto tra gli idrogrammi di piena relativi alle due configurazioni Q_{max} e V_{max} riportato al Capitolo 7, mostra come essi risultino con portata di picco inferiore per la configurazione V_{max} e volumi sottesi tra la portata di soglia e la portata di picco maggiori nel caso di V_{max} .

I risultati delle simulazioni con tali parametri hanno mostrato come le aree inondabili per tali configurazioni risultino pressoché identiche senza apprezzabili variazioni.

Le simulazioni che seguono sono state, pertanto, effettuate per la sola configurazione Q_{max} , che comporta valori maggiori, anche se di poco, delle portate di esondazione e quindi valori maggiori dei tiranti e delle velocità di scorrimento nelle aree inondate.

9.5 CONFIGURAZIONI DI VERIFICA

Le verifiche e le modellazioni idrauliche sono state effettuate per la piena 50-ennale, 200-ennale e 500-ennale per le seguenti configurazioni:

- Stato attuale
- Stato di progetto Stralcio 2 (interventi B e C) e Stralcio 3 (interventi L e M)

Si allegano i risultati delle simulazioni per la sola configurazione Q_{max} , che comporta valori maggiori delle portate di esondazione e quindi valori maggiori dei tiranti e delle velocità di scorrimento nelle aree inondate rispetto a quelle V_{max} .

9.6 RISULTATI

Gli allegati mostrano le mappature ricavate dal modello bidimensionale in termini di tiranti e velocità per le portate di piena aventi tempi di ritorno 50-ennale, 200-ennale e 500-ennale per la configurazione Q_{max} .

Di seguito si riportano i risultati delle verifiche idrauliche 1D-2D con particolare riferimento alla capacità di deflusso dell'alveo inciso e alla propagazione delle portate esondate nelle aree adiacenti.

Negli Allegati 1a-1b, 2a-2b e 3a-3b sono riportate le mappature dei tiranti e delle velocità massime rispettivamente per gli eventi di piena 50-ennale, 200-ennale e 500-ennale sul rio Molinero dello stato attuale e negli Allegati 4a-4b, 5a-5b e 6a-6b per lo stato di progetto Stralcio 2 (interventi B e C) e Stralcio 3 (interventi L e M.).

9.6.1 Stato attuale

Portata 50-ennale

La portata 50-ennale esonda nel tratto di monte a valle dell'autostrada dove risultano insufficienti al deflusso della portata 50-ennale i due ponti di via Molinero. Da qui l'acqua esondata defluisce verso valle allagando le aree limitrofe al corso d'acqua lungo entrambe le sponde finì a via Bonini.

A valle di via Bonini l'acqua defluisce solo in sponda sinistra lungo via Luigi Cadorna fino al rilevato ferroviario con tiranti dell'ordine dei 0.3 m.

I seguenti manufatti risultano con quota del pelo libero superiore all'intradosso:

- ponte via Molinero
- ponte via Molinero ingresso Università
- ponte di via Nizza

La tombinatura di via Bonnini ha un franco inferiore a 0.5 m e carico superiore all'estradosso. Anche la tombinatura dello stadio ha un franco di poche decine di centimetri e carico superiore all'estradosso.

La tombinatura di via Buonarroti ha un franco di 1 m circa all'imbocco, mentre il tratto di valle ha un franco di circa 0.5 m.

La tombinatura della ferrovia ha tratti con sezione differente, nel primo tratto ha un franco di circa 1 m mentre nel secondo tratto ha un franco di oltre 2 m.

Il deflusso in corrispondenza del ponte medioevale avviene con una quota del pelo libero pari a 4 m circa e la quota della sommità dell'arco è pari a circa 6 m. La quota del pelo libero risulta pressoché coincidente con il piano viabile limitrofo.

Nella figura seguente si riporta l'analisi della dinamica di esondazione per il tratto analizzato nel caso di portata 50-ennale.



Figura 9-2 – Dinamica di esondazione Molinero T=50 anni

Portata 200-ennale

La portata 200-ennale esonda nel tratto di monte a valle dell'autostrada dove risultano insufficienti al deflusso i due ponti di via Molinero. Da qui l'acqua esondata defluisce verso valle allagando le aree limitrofe al corso d'acqua lungo entrambe le sponde finì a via Bonini.

La tombinatura di via Bonini non è in grado di smaltire la portata 200-ennale come la tombinatura dello stadio.

A valle di via Bonini l'acqua defluisce sia lungo via Luigi Cadorna che lungo via Chiabrera fino al rilevato ferroviario con tiranti variabile tra 0.3 e 1 m circa.

La portata supera il rilevato ferroviario tramite il sottopasso di Corso Svizzera allagando le aree a valle della ferrovia.

Inoltre esonda anche da via Nizza allagando le aree adiacenti verso mare.

I seguenti manufatti risultano con quota del pelo libero superiore all'intradosso:

- ponte via Molinero

- ponte via Molinero ingresso Università
- tombinatura di via Bonini
- tombinatura dello stadio
- ponte di via Nizza

La tombinatura di via Buonarroti ha un franco di 0.7 m circa all'imbocco, mentre il tratto di valle ha un franco quasi nullo.

La tombinatura della ferrovia ha tratti con sezione differente, nel primo tratto ha un franco di circa 0.6 m mentre nel secondo tratto ha un franco di oltre 2 m.

Il deflusso in corrispondenza del ponte medioevale avviene con una quota del pelo libero pari a 4.5 m circa e la quota della sommità dell'arco è pari a circa 6 m. La quota del pelo libero risulta superiore rispetto al piano viabile limitrofo.



Figura 9-3 - Dinamica di esondazione Molinero T=200 anni

Portata 500-ennale

La portata 500-ennale defluisce con le stesse modalità di quella 200-ennale con quote del pelo libero mediamente superiori di 0.2 m.

9.6.2 Stato di progetto (Stralcio 2 e 3)

Gli interventi dello Stralcio 2 e 3 riguardano la tombinatura di via Bonini e parte della tombinatura di via Buonarroti. Di conseguenza il deflusso delle portate per i tre tempi di ritorno analizzati rimangono sostanzialmente coincidenti con quelli dello stato attuale. Lo stato di progetto si differenzia dallo stato attuale solo nei tratti di tombinature oggetto di intervento.

Per vedere un miglioramento significativo devono essere realizzati tutti gli interventi previsti sul Molinero.

Per la portata 200-ennale la tombinatura di via Bonini ha un franco di circa 1 m come il nuovo tratto della tombinatura di via Buonarroti.

Le mappature dei tiranti e delle velocità per la portata analizzate nelle due configurazioni esaminate sono pressoché coincidenti, differiscono solamente di pochi centimetri nelle zone limitrofe alla tombinatura di via Bonini ma senza cambiare fascia di tiranti o velocità.

10 RIPERIMETRAZIONE DELLE AREE INONDABILI

Sulla base delle verifiche e delle analisi riportate ai paragrafi precedenti, è stata redatta una nuova mappatura delle aree inondabili per l'asta del rio Molinero dall'autostrada A10 alla foce.

La mappatura proposta fa riferimento alla condizione $Q_{\max}$, più cautelativa rispetto alla condizione $V_{\max}$.

La proposta di aggiornamento delle fasce di inondabilità per l'asta del rio Molinero è stata redatta in accordo con i criteri indicati dall'Allegato 3 al Piano di Gestione e Rischio Alluvioni del Distretto dell'Appennino Settentrionale e con il Regolamento Regionale n. 291/2025.

I risultati relativi all'asta del rio Molinero mostrano alcune differenze sostanziali rispetto alla mappatura del PGRA vigente. L'estensione delle aree inondabile è rimasta pressoché coincidente, mentre sono variate le fasce di pericolosità ed in particolare:

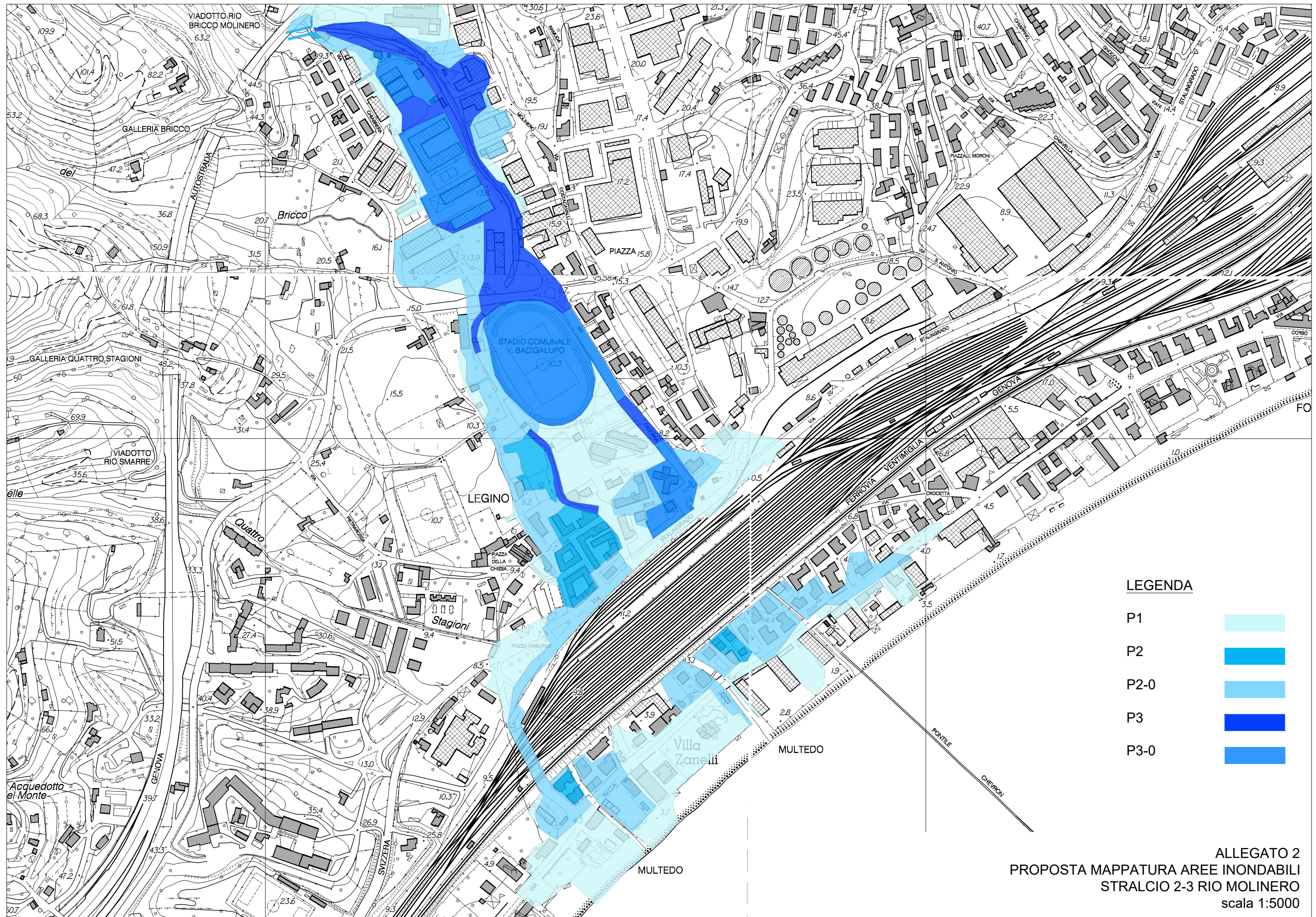
- Nel tratto a valle dello stadio comunale si riducono notevolmente le aree inondabili P3, le quali vengono sostituite dalle fasce P2, P20 e P1;
- Nel tratto terminale a valle della linea ferroviaria risultano le fasce P2, P20 e P1, rispetto alla Fascia P3 della mappatura vigente.

Le differenze tra la mappatura del Piano e quella proposta sono dovute ai lavori eseguiti lungo l'asta del corso d'acqua negli ultimi anni e alla diversa modellazione idraulica: le fasce del piano erano state redatte a seguito di un modellazione monodimensionale a sponde infinite, mentre la proposta di mappatura deriva da una modellazione bidimensionale.

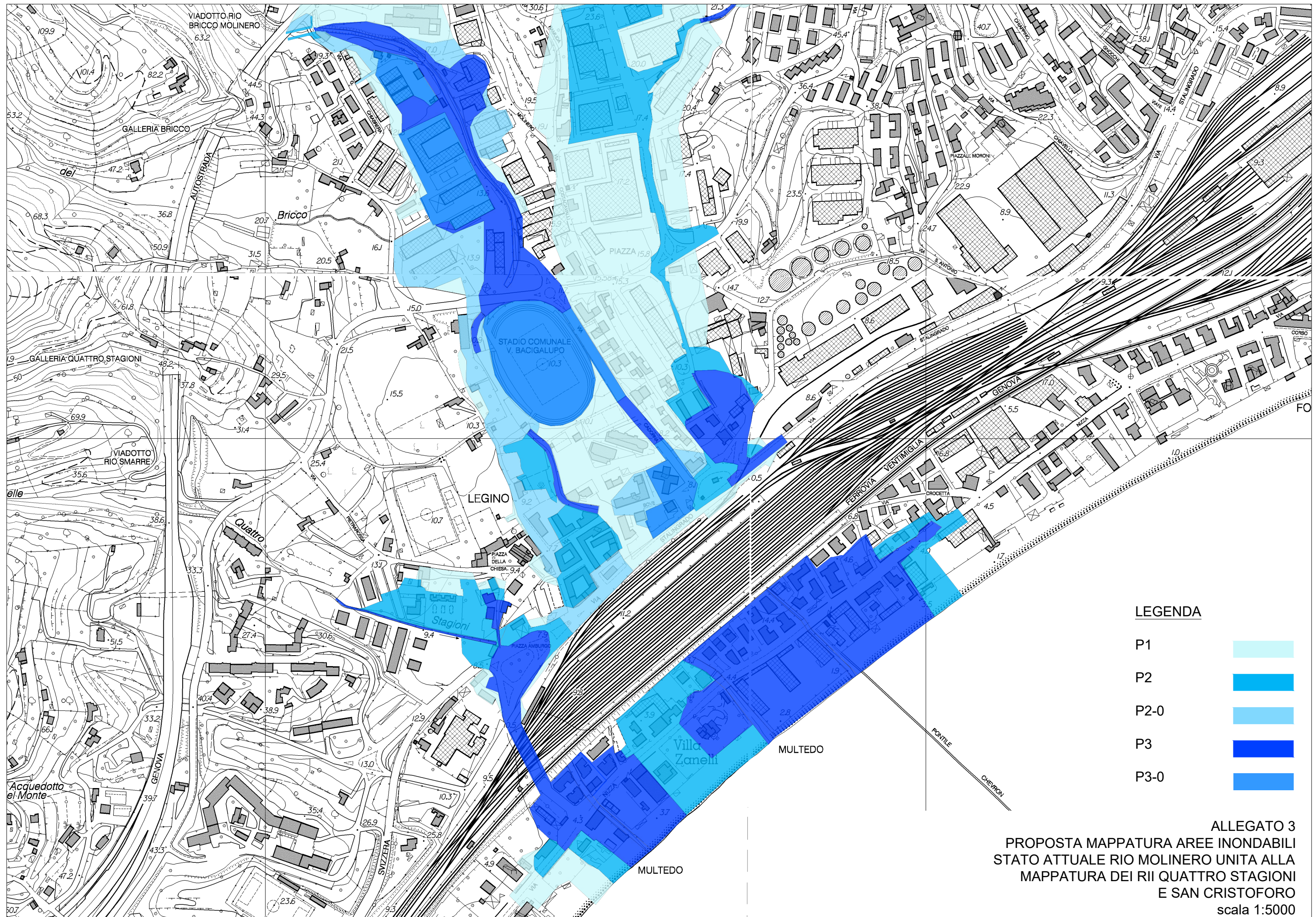
Si allegano alla presente l'aggiornamento della mappatura delle aree inondabili del rio Molinero, nel tratto compreso dal cavalcavia dell'autostrada A10 al suo sbocco a mare, allo stato attuale (Allegato 1) e la proposta di mappatura preventiva a seguito dei lavori dello Stralcio 2-3 (Allegato 2).

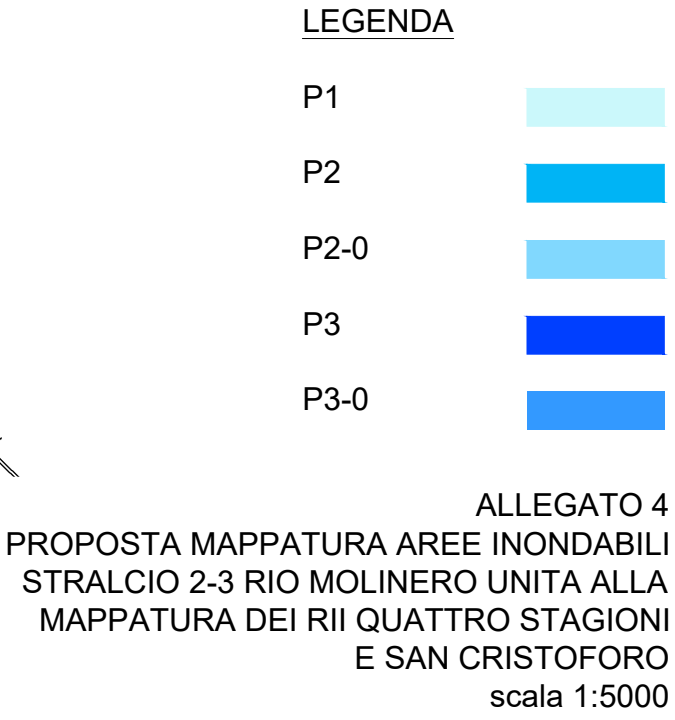
La mappatura delle aree inondabili risulta coincidente nelle due configurazioni esaminate (stato attuale e stato di progetto Stralcio 2 e 3), in quanto i due progetti riguardano due tratti di tombinature che nello stato attuale non hanno franco idraulico.

Inoltre negli Allegati 3 e 4 sono riportate rispettivamente la proposta di mappatura di stato attuale e di stato di progetto a seguito dei lavori dello Stralcio 2-3 del rio Molinero unita alle mappature dei rii San Cristoforo e Quattro Stagioni, come riportate nel Piano di Bacino.



ALLEGATO 2
PROPOSTA MAPPATURA AREE INONDABILI
STRALCIO 2-3 RIO MOLINERO
scala 1:5000





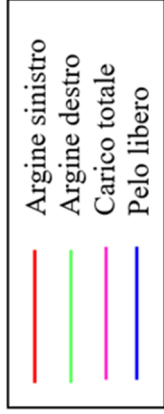
ALLEGATO A

Grandezze idrauliche in alveo

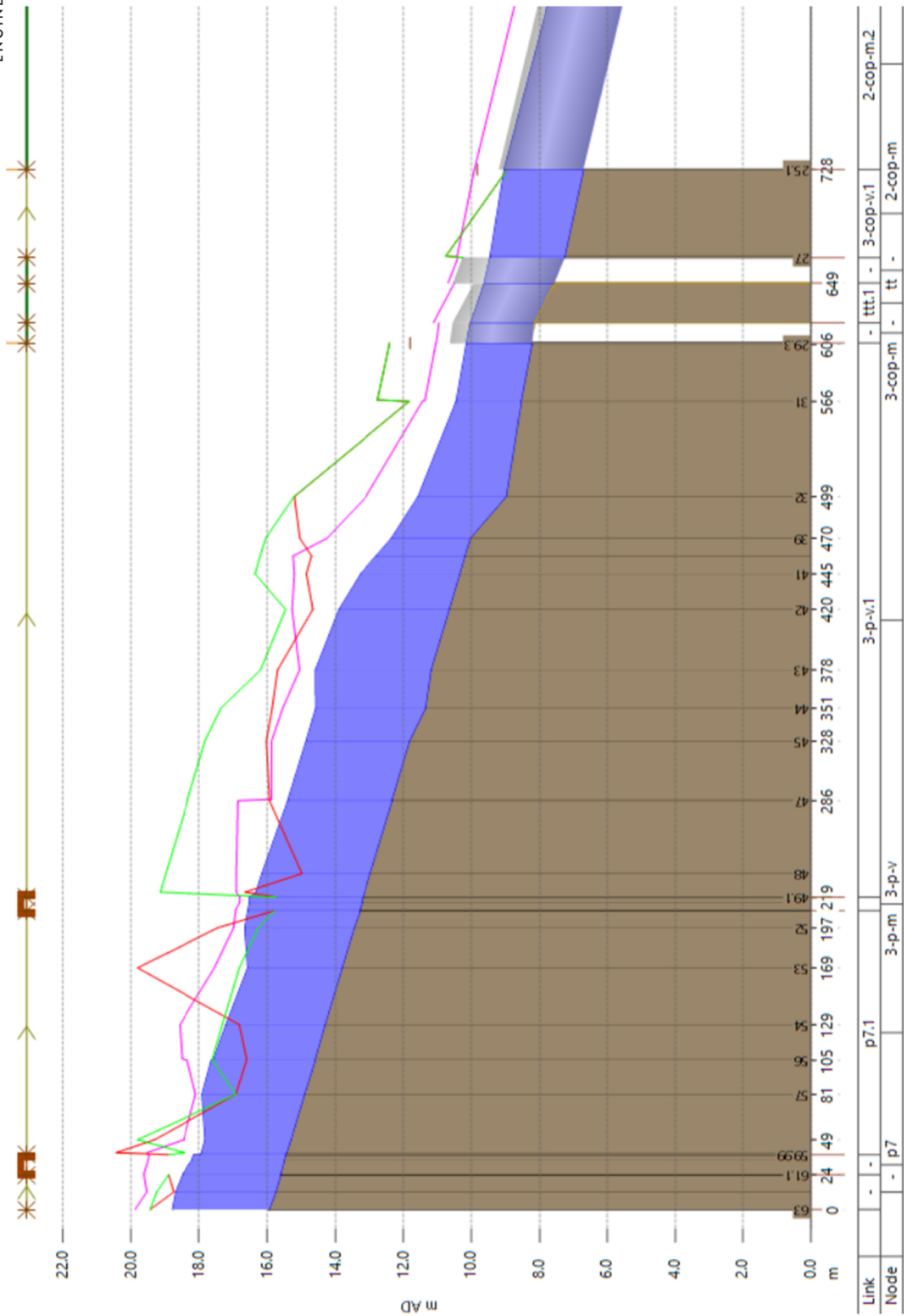


STATO ATTUALE

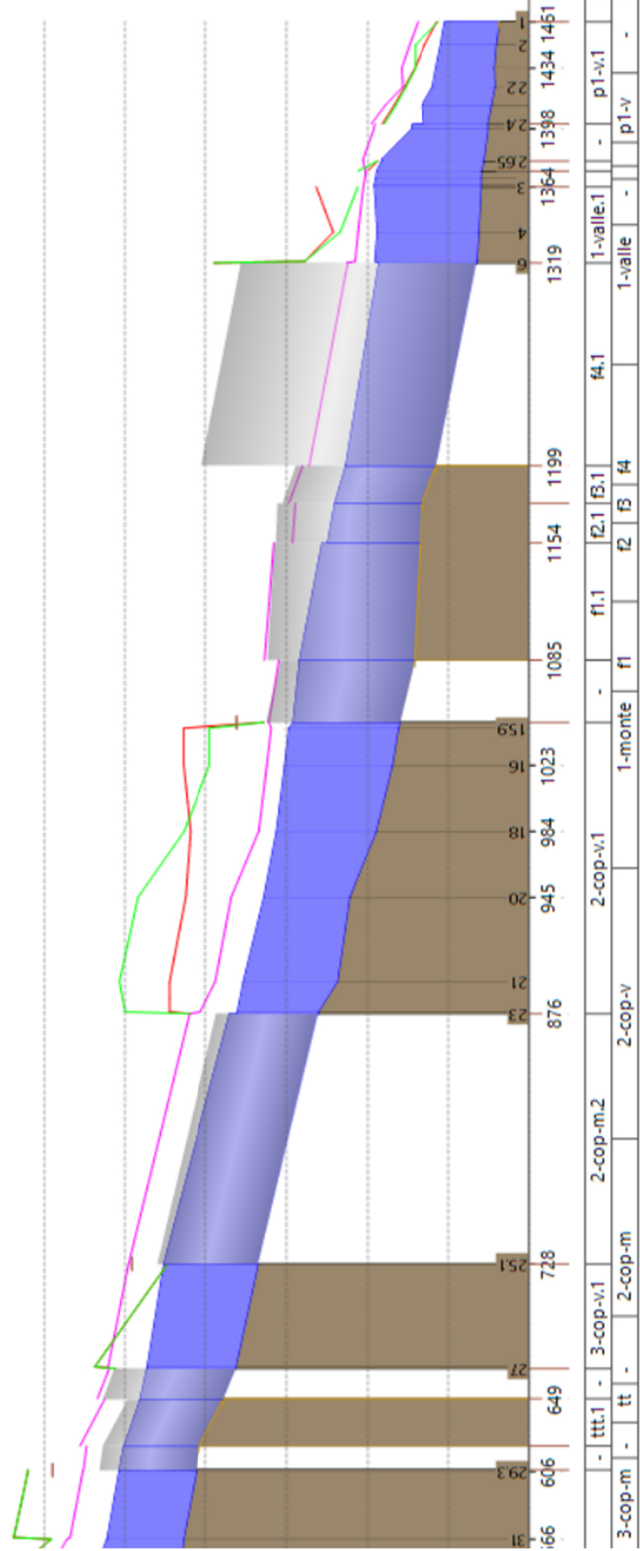
Rio Molinero T = 50 anni



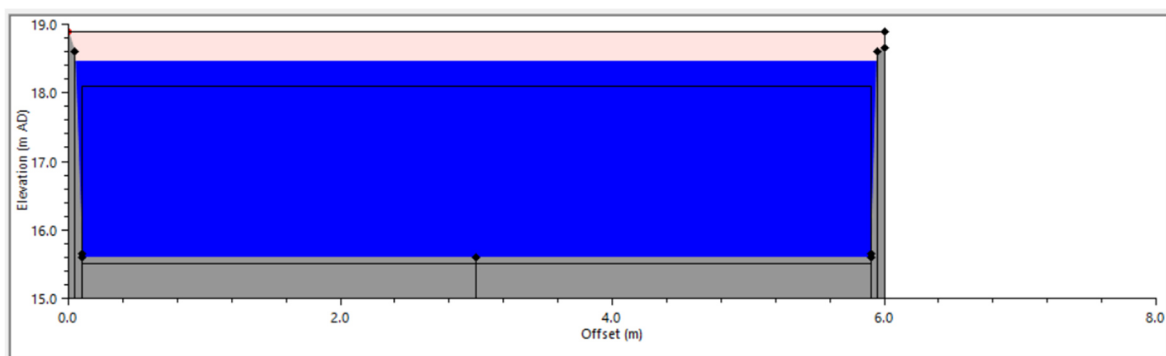
Profilo – T50



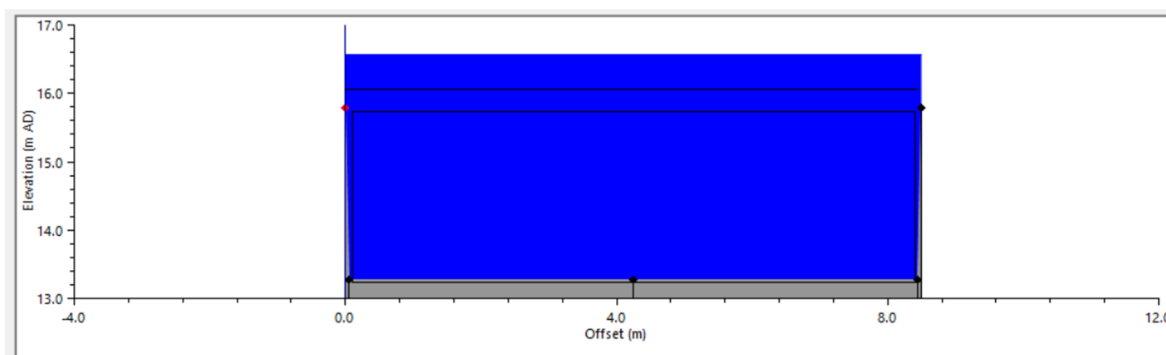
Perfil 1/2 – T50



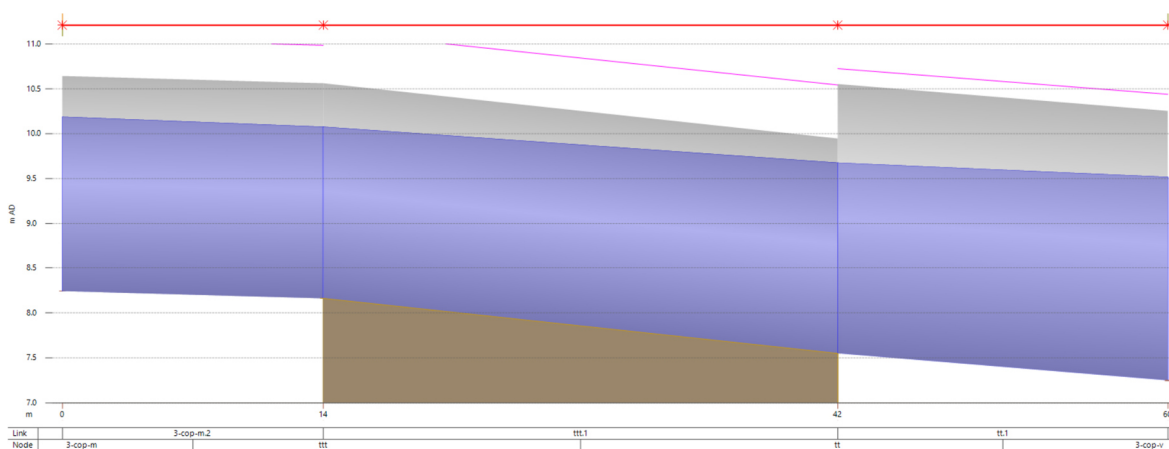
Profilo 2/2 – T50



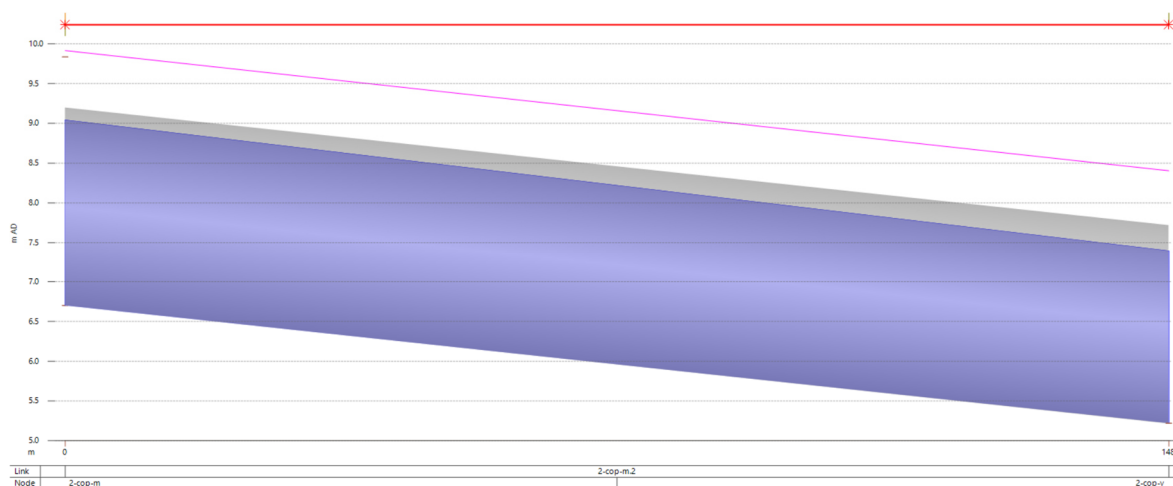
Ponte via Molinero



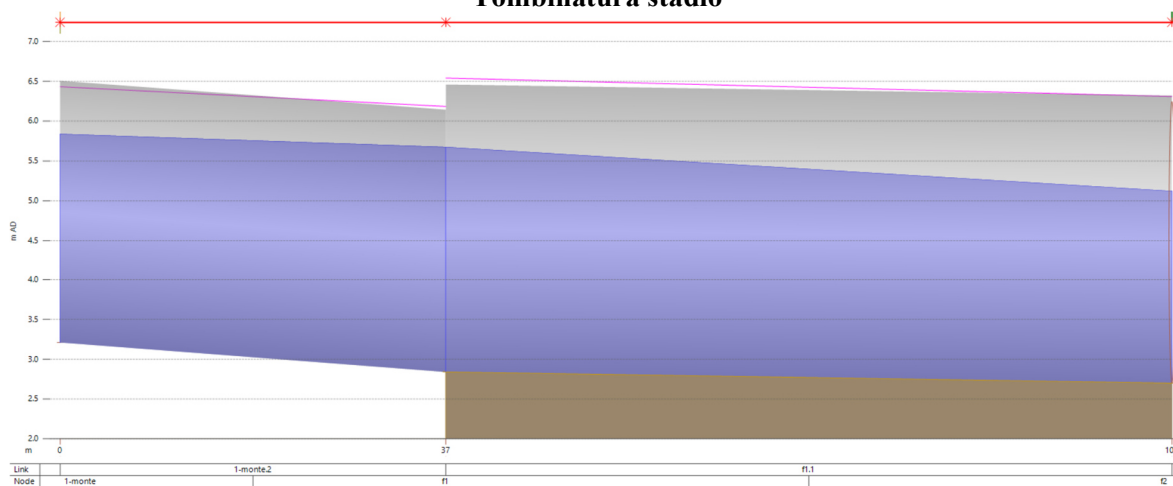
Ponte via Molinero ingresso Università



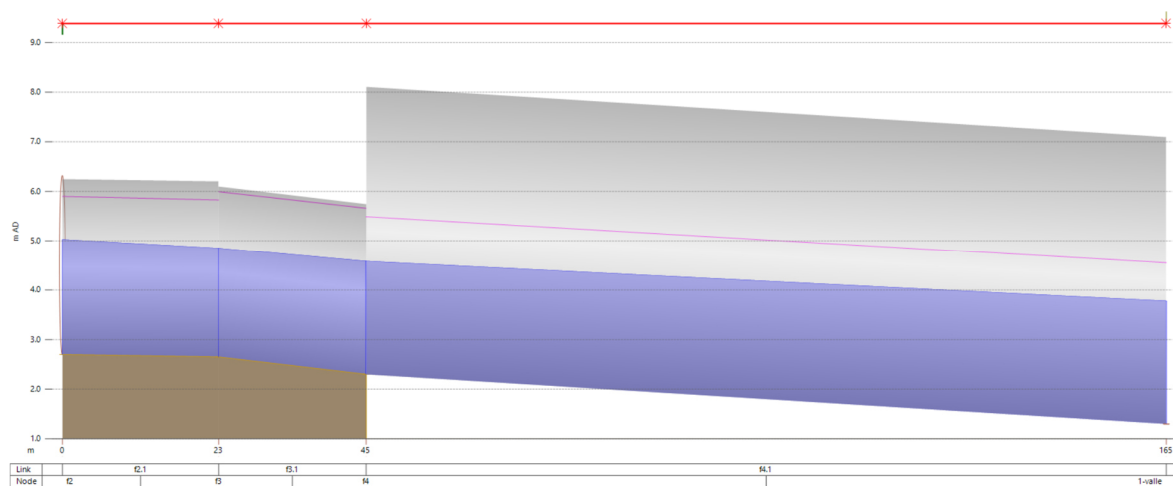
Tombinatura via Bonini



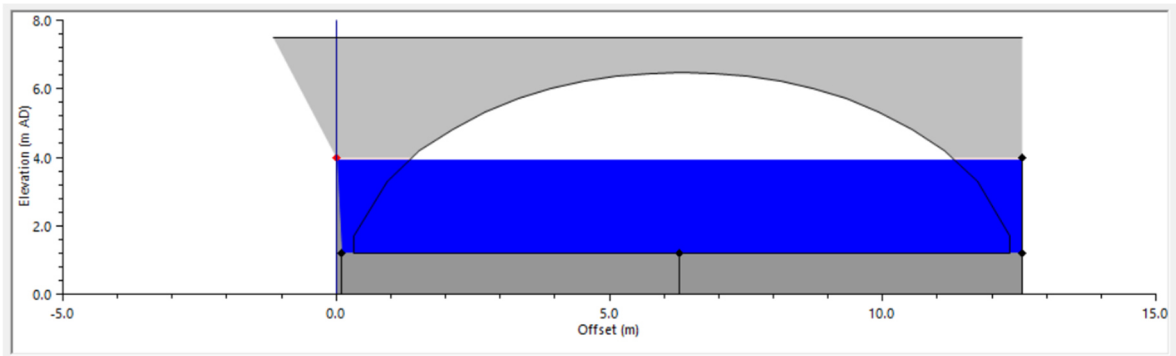
Tombinatura stadio



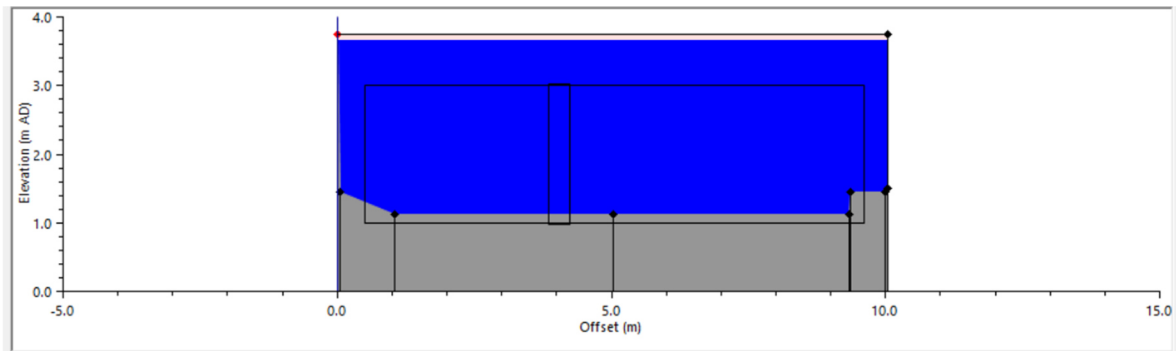
Tombinatura via Buonarroti



Tombinatura FS



Ponte Medioevale



Ponte via Nizza

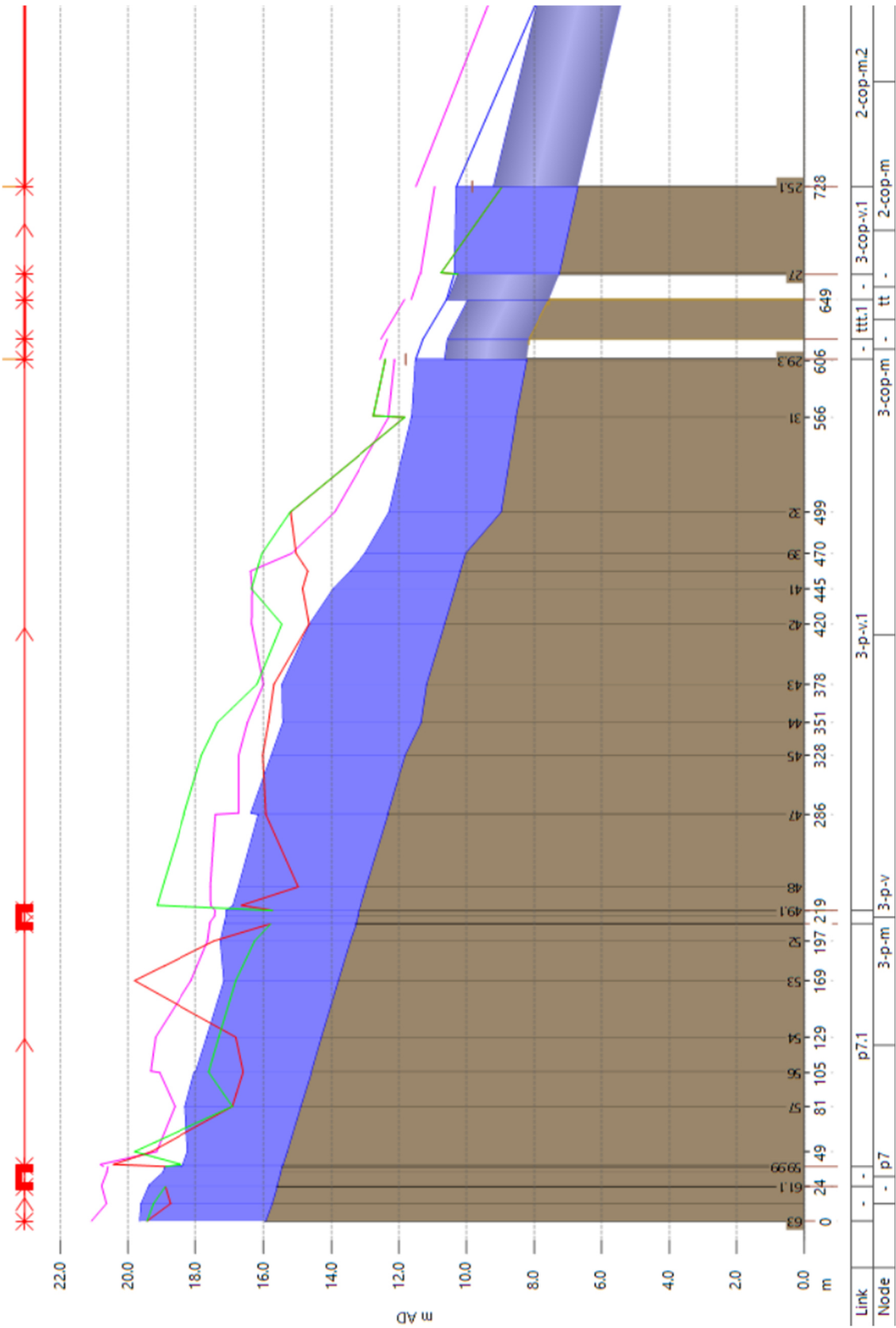
MOLINERO STATO ATTUALE

T=50 anni

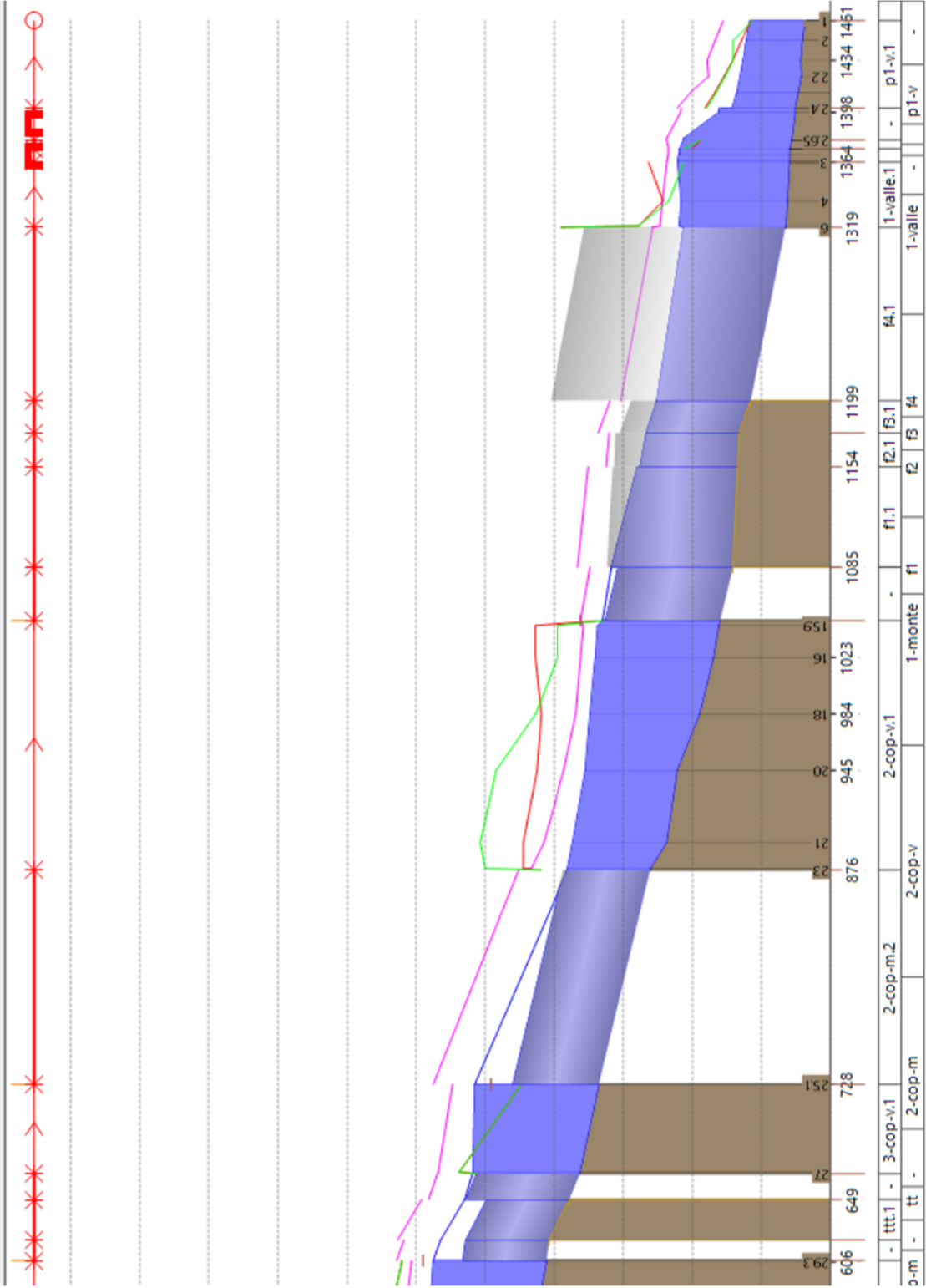
Chainage	Section key	Bed level	Section depth	Section flow	Section Froude number	Section level	Section velocity	Section total head
[m]		[m AD]	[m]	[m³/s]		[m AD]	[m/s]	[m AD]
0	63.0	15.94	2.85	80.0	1.05	18.79	4.64	19.9
12	62.0	15.75	2.94	80.0	0.86	18.69	4.08	19.5
24	61.10	15.6	2.88	80.0	0.94	18.48	4.73	19.6
38	59.99	15.47	2.48	80.0	1.12	17.95	5.50	19.5
40	59.00	15.43	2.49	80.0	1.16	17.92	5.62	19.5
49	58.00	15.31	2.50	80.0	1.03	17.81	3.55	18.5
81	57.00	14.91	2.99	78.9	0.92	17.90	1.97	18.1
105	56.00	14.6	3.03	67.3	0.83	17.63	3.77	18.3
106	55.00	14.6	2.95	66.8	0.90	17.55	4.31	18.5
129	54.00	14.31	2.89	68.3	1.04	17.20	5.18	18.6
169	53.00	13.81	2.75	69.7	1.08	16.56	4.39	17.5
197	52.00	13.46	3.19	69.3	1.10	16.65	2.62	17.0
209	51.10	13.28	3.28	73.8	0.62	16.56	2.65	16.9
219	49.10	13.2	3.31	73.8	0.53	16.51	2.35	16.8
222	49.00	13.14	3.18	73.8	0.68	16.32	3.37	16.9
235	48.00	12.98	3.17	72.7	0.75	16.15	3.86	16.9
286	47.00	12.33	3.06	74.3	1.31	15.39	5.37	16.9
287	46.00	12.33	3.05	74.3	1.03	15.38	3.18	15.9
328	45.00	11.82	3.04	74.3	1.04	14.86	4.47	15.9
351	44.00	11.35	3.22	74.3	0.86	14.57	4.37	15.5
378	43.00	11.19	3.39	74.3	0.69	14.58	3.04	15.0
420	42.00	10.66	3.23	74.4	0.93	13.89	5.21	15.3
445	41.00	10.35	2.91	74.4	1.16	13.26	6.18	15.2
458	40.00	10.2	2.59	74.4	1.38	12.79	6.93	15.2
470	39.00	10.04	2.30	74.4	1.30	12.34	6.11	14.2
499	32.00	8.99	2.57	74.4	1.18	11.56	5.48	13.1
566	31.00	8.55	1.90	75.6	1.04	10.45	4.40	11.4
567	30.00	8.55	1.89	75.7	0.99	10.44	4.25	11.4
606	29.30	8.24	1.91	75.7	0.97	10.15	4.20	11.0
607	29.20	8.24	1.90	75.7	0.98	10.14	4.20	11.0
667	27.00	7.25	2.21	75.7	1.03	9.46	4.52	10.4
668	26.00	7.25	2.20	75.7	1.59	9.45	4.55	10.4
728	25.10	6.7	2.34	75.6	1.04	9.04	4.58	9.9
876	23.000	5.22	2.00	75.5	1.13	7.22	4.88	8.4
877	22.000	5.22	1.98	75.5	1.19	7.20	4.26	8.1
895	21.000	4.75	2.31	75.5	0.79	7.06	3.69	7.8
945	20.000	4.45	2.10	75.5	1.36	6.55	4.06	7.4
984	18.000	3.8	2.44	75.4	0.94	6.24	2.93	6.7
1023	16.000	3.4	2.64	75.4	0.71	6.04	2.96	6.5
1045	15.900	3.25	2.69	75.4	0.70	5.94	2.94	6.4
1048	15.100	3.21	2.63	75.4	0.69	5.84	3.43	6.4
1319	6.000	1.3	2.42	75.3	1.14	3.72	3.96	4.5
1320	5.000	1.29	2.53	75.3	0.67	3.82	3.09	4.3
1337	4.000	1.25	2.51	75.3	1.06	3.76	3.05	4.2
1364	3.000	1.19	2.64	75.3	0.50	3.83	2.32	4.1
1373	2.700	1.18	2.60	75.3	1.52	3.78	2.36	4.1
1379	2.650	1.12	2.54	75.3	0.83	3.66	3.01	4.1
1401	2.400	1.03	1.57	75.3	1.52	2.60	5.06	3.9
1412	2.300	0.94	1.71	75.3	5.58	2.65	4.63	3.6
1423	2.200	0.85	1.53	75.3	6.64	2.38	3.84	3.1
1434	2.100	0.87	1.43	75.3	1.10	2.30	4.12	3.2
1448	2.000	0.82	1.36	75.3	1.07	2.18	3.91	3.0
1461	1.000	0.74	1.34	75.3	1.00	2.08	3.63	2.8

STATO ATTUALE

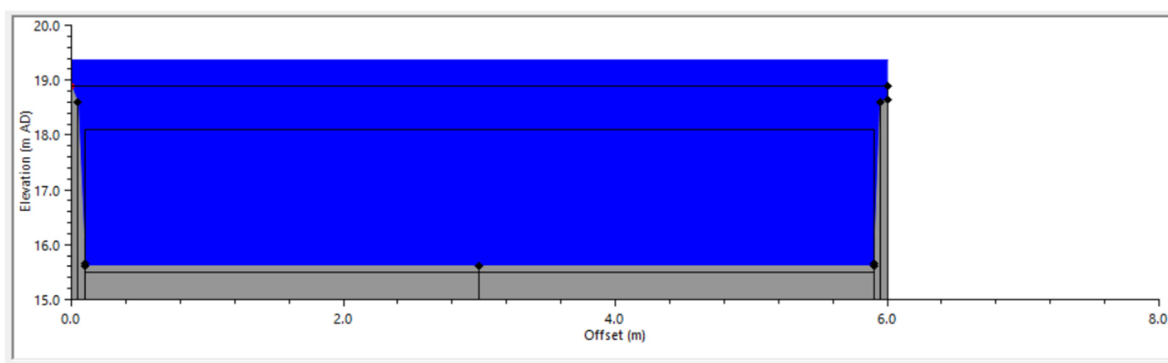
Rio Molinero T = 200 anni



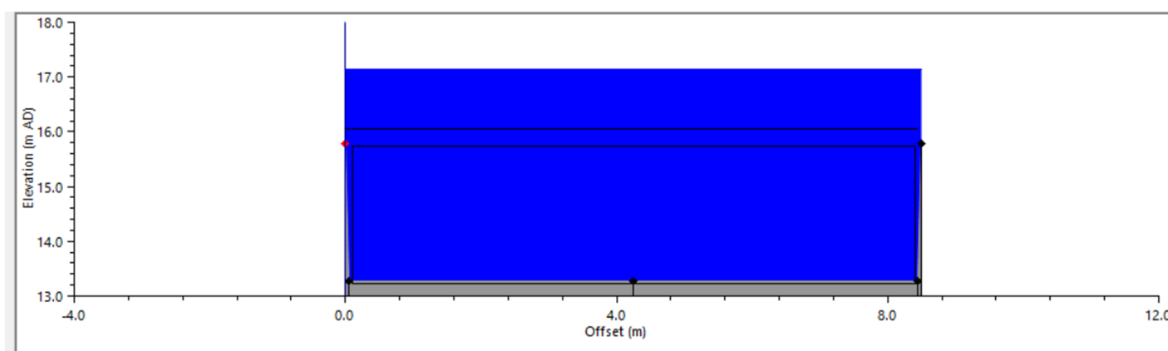
Profilo 1/2 – T200



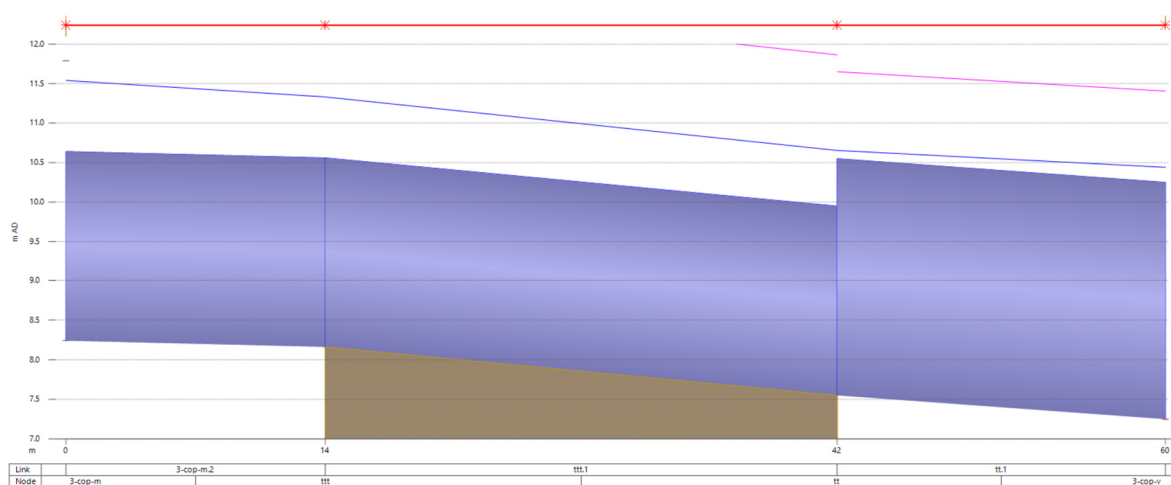
Profilo 2/2 – T200



Ponte via Molinero

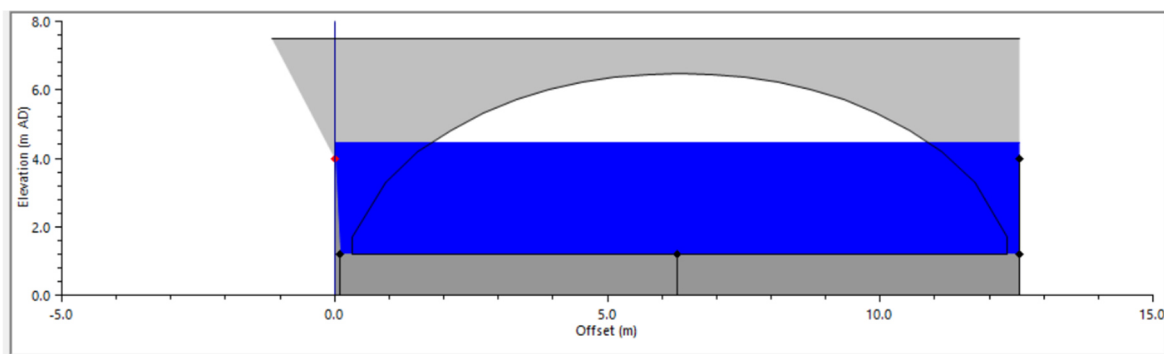


Ponte via Molinero ingresso Università

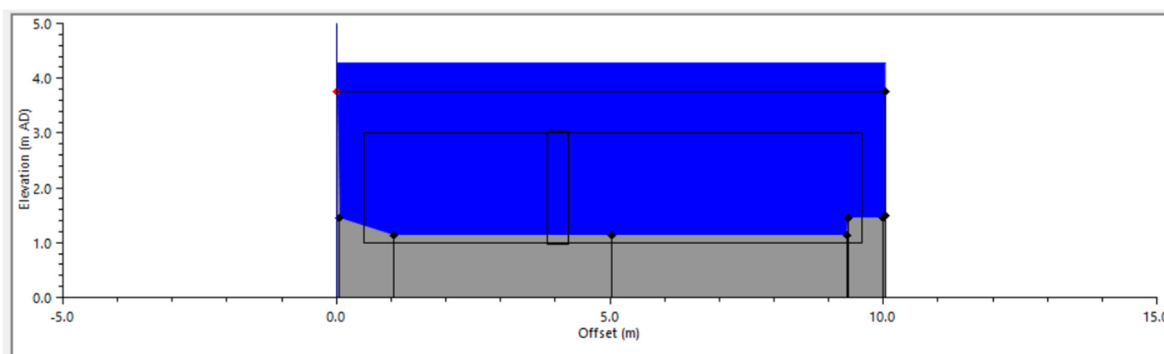


Tombinatura via Bonini

Tombinatura FS



Ponte Medioevale



Ponte via Nizza

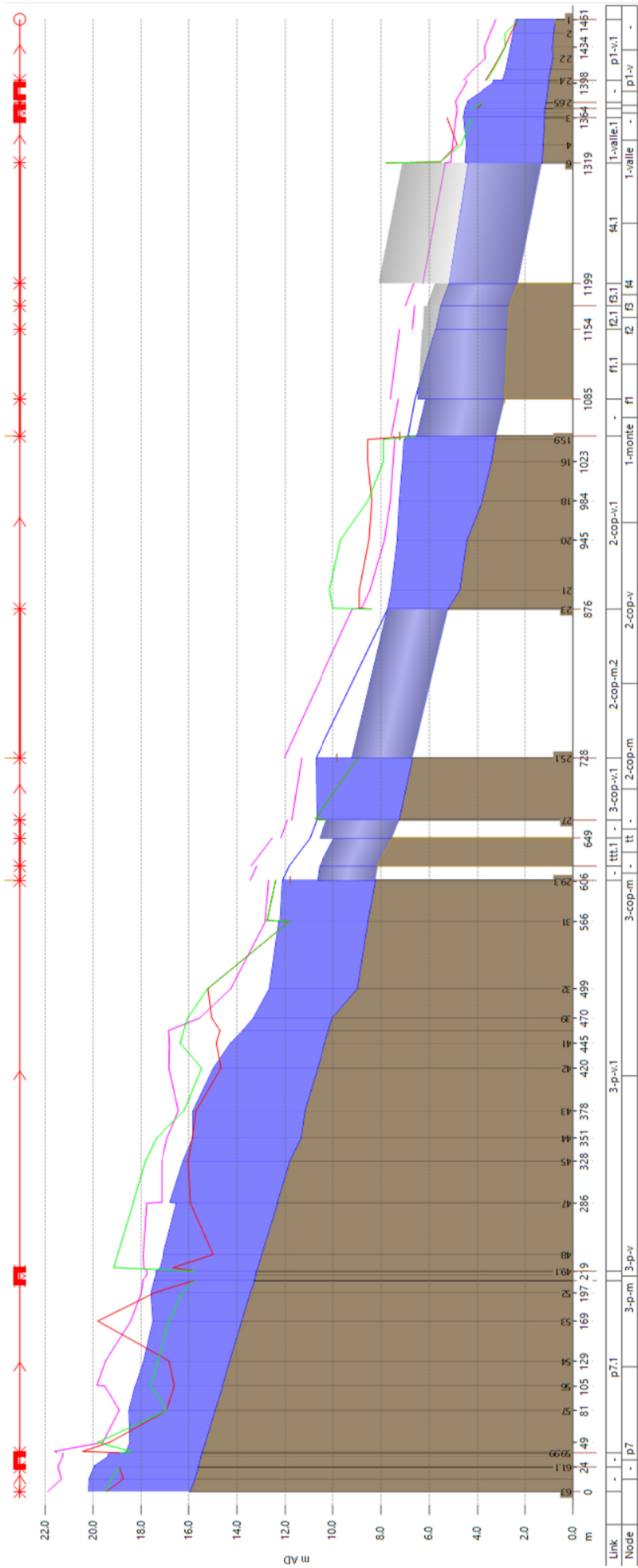
MOLINERO STATO ATTUALE

T=200 anni

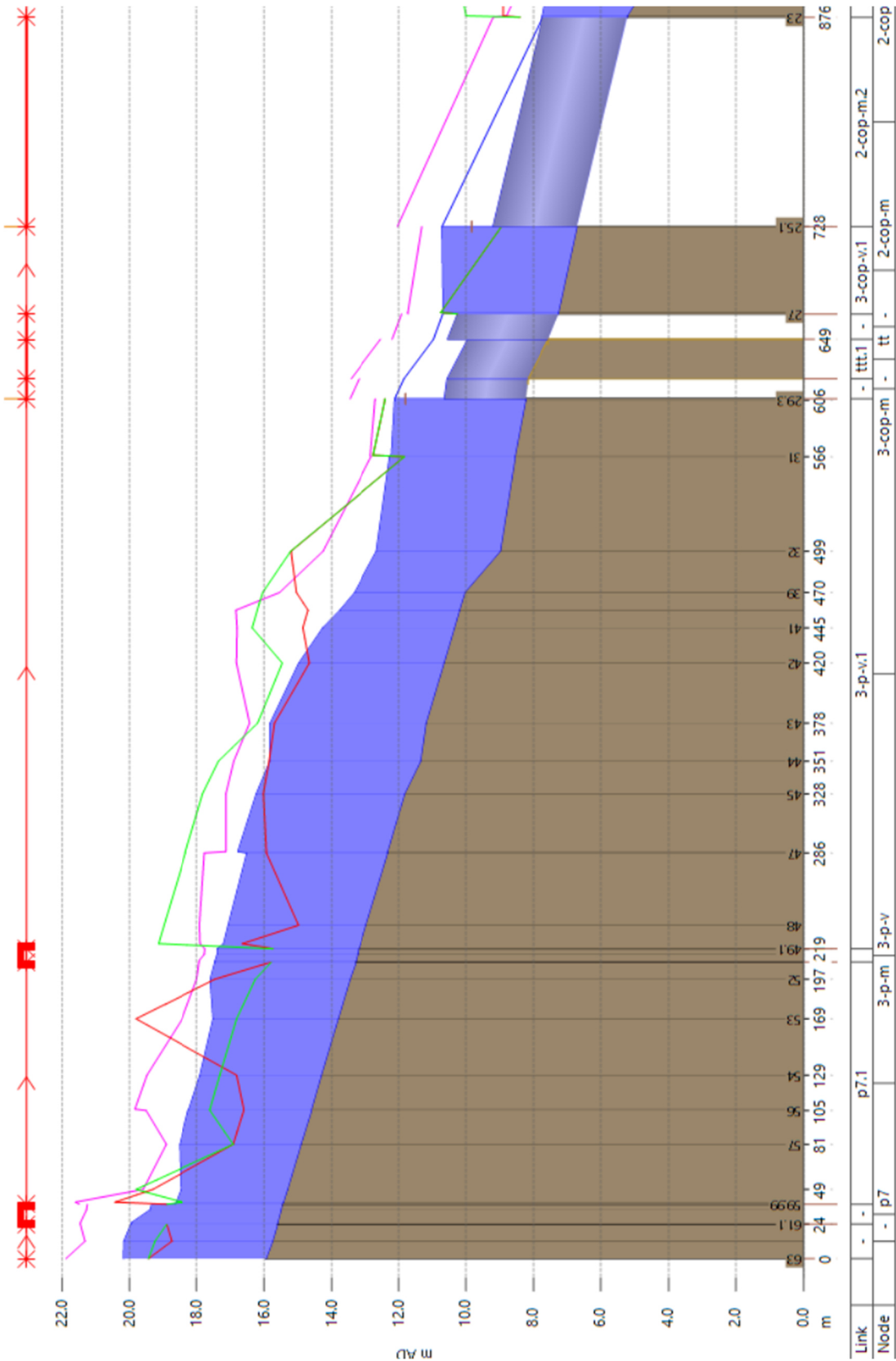
Chainage	Section key	Bed level	Section depth	Section flow	Section Froude number	Section level	Section velocity	Section total head
[m]		[m AD]	[m]	[m³/s]		[m AD]	[m/s]	[m AD]
0	63.0	15.94	3.71	120.0	1.05	19.65	5.28	21.1
12	62.0	15.75	3.86	116.9	0.86	19.61	4.49	20.6
24	61.10	15.6	3.79	116.4	0.94	19.39	5.21	20.8
38	59.99	15.47	2.94	116.4	1.27	18.41	6.76	20.7
40	59.00	15.43	2.93	116.8	1.32	18.36	6.94	20.8
49	58.00	15.31	2.92	117.8	1.03	18.23	4.28	19.2
81	57.00	14.91	3.39	115.9	0.93	18.30	2.50	18.6
105	56.00	14.6	3.43	93.0	0.84	18.03	4.51	19.1
106	55.00	14.6	3.38	92.1	0.92	17.98	5.15	19.3
129	54.00	14.31	3.35	83.8	1.04	17.66	5.49	19.2
169	53.00	13.81	3.34	84.7	1.08	17.15	4.58	18.1
197	52.00	13.46	3.80	88.8	1.08	17.26	2.77	17.6
209	51.10	13.28	3.86	95.2	0.62	17.14	2.91	17.6
219	49.10	13.2	3.88	95.2	0.53	17.08	2.59	17.4
222	49.00	13.14	3.75	93.3	0.69	16.89	3.64	17.5
235	48.00	12.98	3.75	90.5	0.75	16.73	4.08	17.6
286	47.00	12.33	3.81	88.2	1.32	16.14	5.47	17.4
287	46.00	12.33	4.03	89.0	1.03	16.36	3.20	16.7
328	45.00	11.82	3.94	94.1	1.04	15.76	4.58	16.7
351	44.00	11.35	4.07	97.5	0.86	15.42	4.56	16.5
378	43.00	11.19	4.26	101.3	0.69	15.45	3.29	16.0
420	42.00	10.66	3.98	102.0	0.94	14.64	5.78	16.3
445	41.00	10.35	3.59	102.0	1.17	13.94	6.85	16.3
458	40.00	10.2	3.24	102.0	1.38	13.44	7.59	16.4
470	39.00	10.04	2.95	102.0	1.30	12.99	6.54	15.2
499	32.00	8.99	3.29	102.0	1.19	12.28	5.75	13.9
566	31.00	8.55	3.07	106.4	1.04	11.62	4.46	12.3
567	30.00	8.55	3.06	106.8	0.99	11.61	4.30	12.3
606	29.30	8.24	3.26	108.2	0.97	11.50	4.24	12.1
607	29.20	8.24	3.26	108.2	0.98	11.50	4.24	12.1
667	27.00	7.25	3.12	108.5	1.03	10.37	4.54	11.4
668	26.00	7.25	3.10	108.7	1.60	10.35	4.57	11.4
728	25.10	6.7	3.60	99.6	1.05	10.30	4.59	10.9
876	23.000	5.22	2.39	98.4	1.13	7.61	5.30	9.0
877	22.000	5.22	2.38	98.4	1.20	7.60	4.58	8.7
895	21.000	4.75	2.70	98.4	0.81	7.45	4.09	8.3
945	20.000	4.45	2.64	98.4	1.37	7.09	4.08	7.7
984	18.000	3.8	3.16	98.4	0.94	6.96	2.97	7.4
1023	16.000	3.4	3.40	98.4	0.71	6.80	2.99	7.2
1045	15.900	3.25	3.48	98.4	0.71	6.73	2.96	7.1
1048	15.100	3.21	3.38	98.4	0.69	6.59	3.52	7.2
1319	6.000	1.3	2.95	98.4	1.16	4.25	4.24	5.2
1320	5.000	1.29	3.09	98.4	0.67	4.38	3.30	4.9
1337	4.000	1.25	3.08	98.4	1.05	4.33	3.25	4.9
1364	3.000	1.19	3.24	98.2	0.50	4.43	2.47	4.7
1373	2.700	1.18	3.19	98.2	1.51	4.37	2.50	4.7
1379	2.650	1.12	3.14	96.2	0.84	4.26	3.09	4.7
1401	2.400	1.03	1.82	96.2	1.32	2.85	5.58	4.4
1412	2.300	0.94	1.78	96.2	5.77	2.72	5.11	4.0
1423	2.200	0.85	1.77	96.2	1.02	2.62	4.24	3.5
1434	2.100	0.87	1.67	96.2	1.12	2.54	4.51	3.6
1448	2.000	0.82	1.60	96.2	1.07	2.42	4.26	3.3
1461	1.000	0.74	1.58	96.2	1.00	2.32	3.94	3.1

STATO ATTUALE

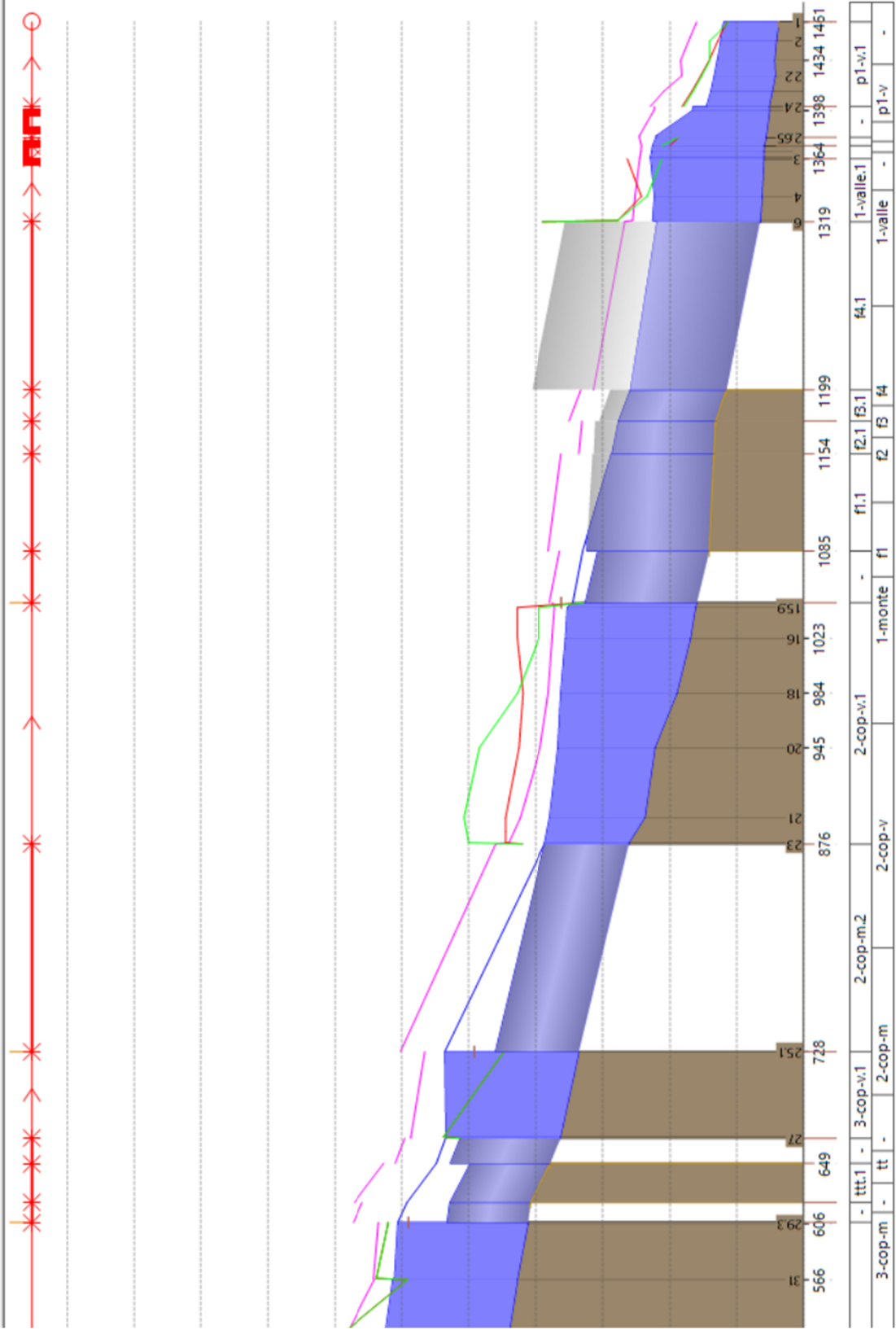
Rio Molinero T = 500 anni



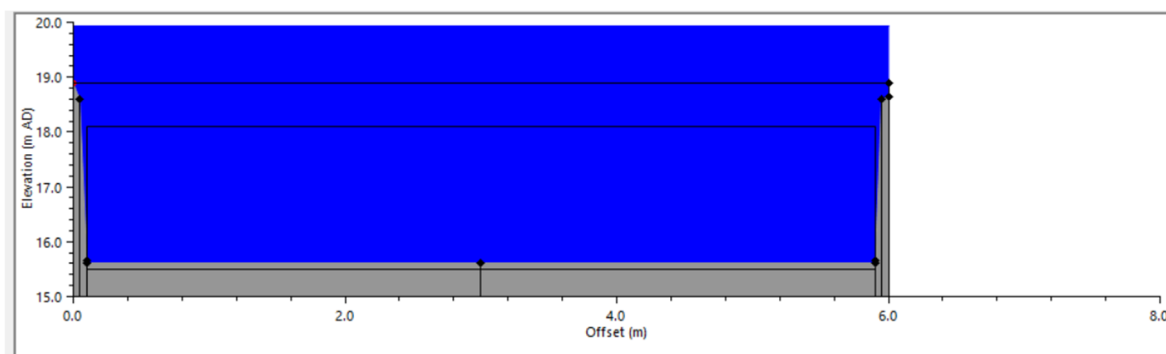
Profilo – T500



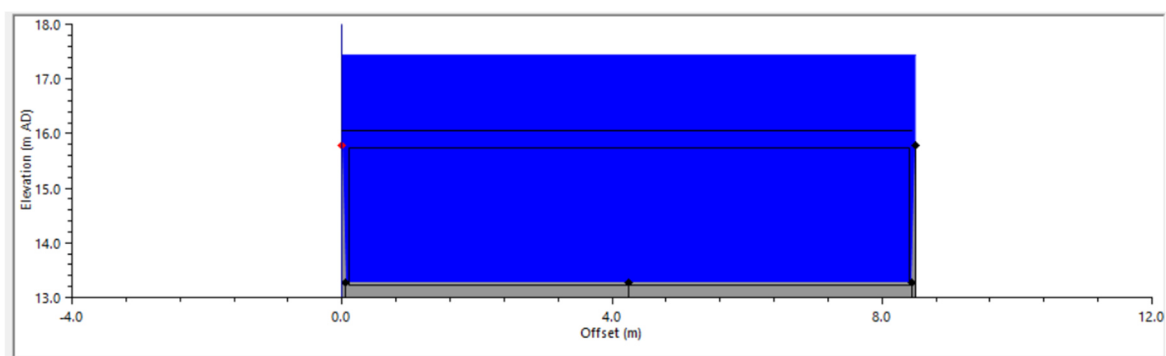
Perfil 1/2 – T500



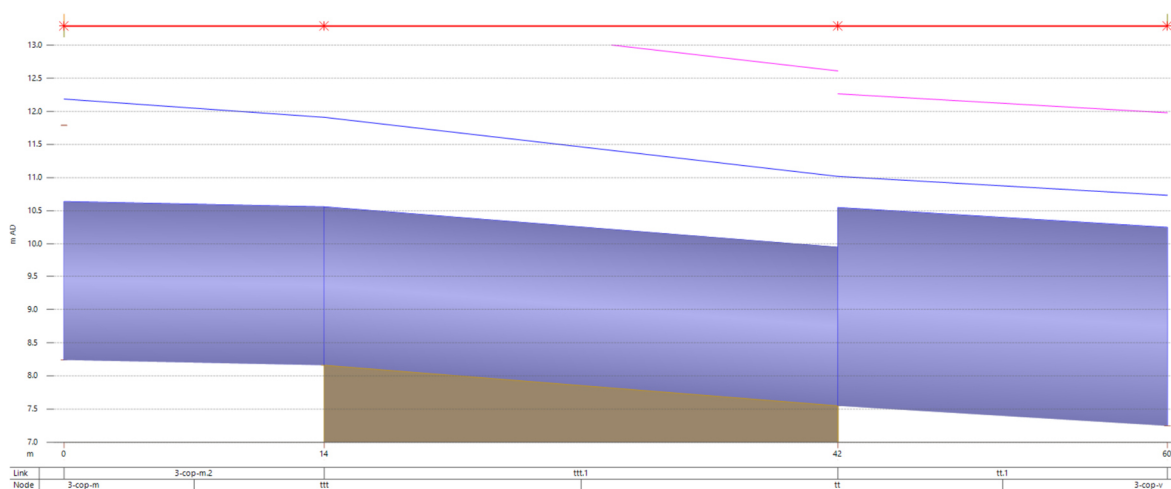
Profilo 2/2 – T500



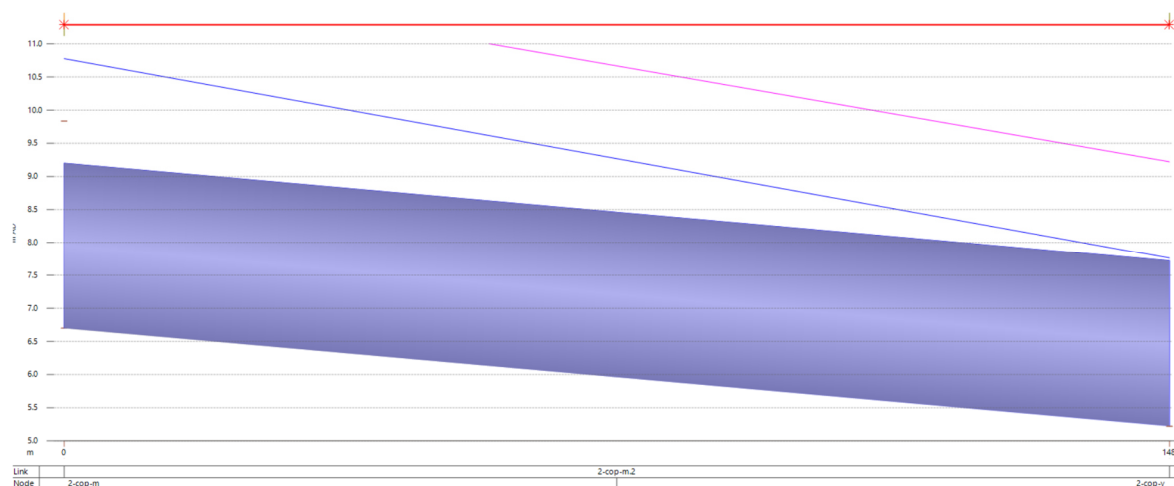
Ponte via Molinero



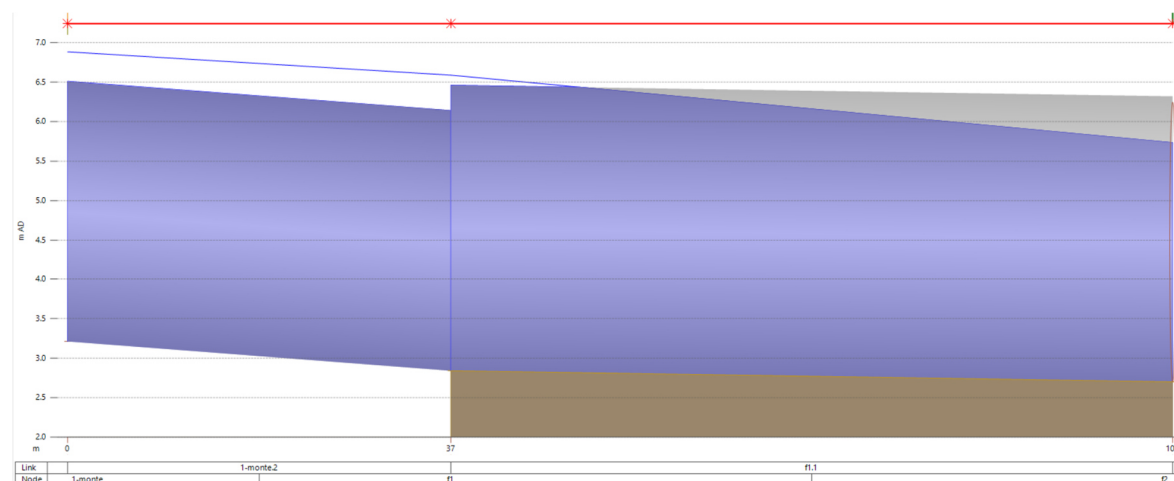
Ponte via Molinero ingresso Università



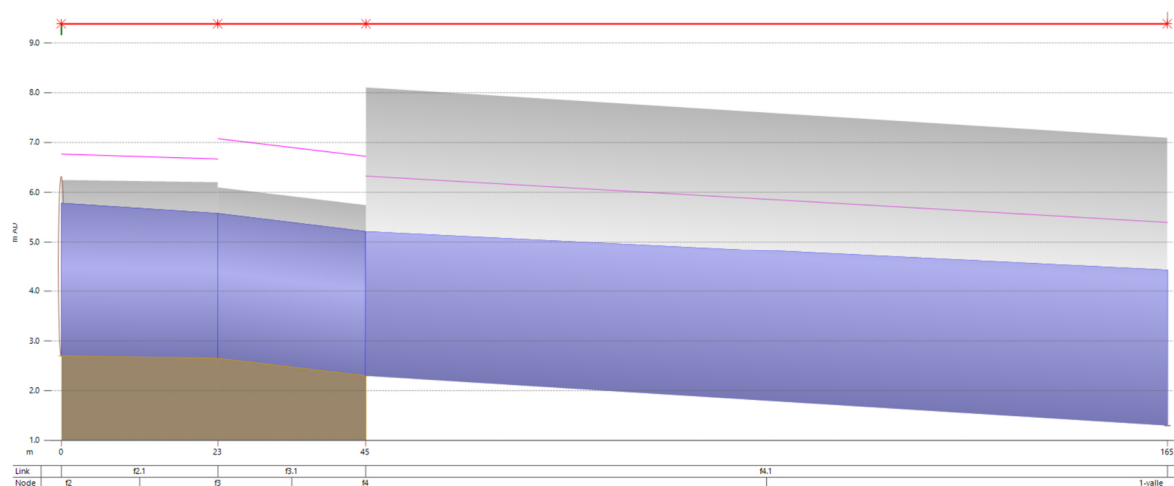
Tombinatura via Bonini



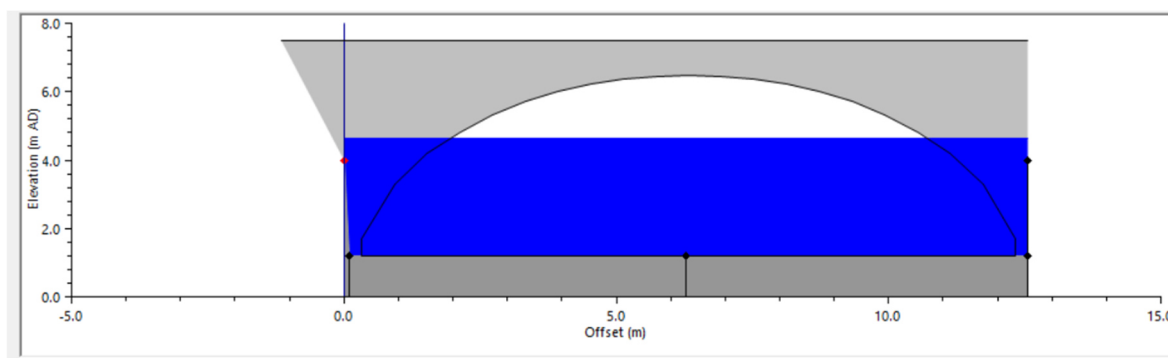
Tombinatura stadio



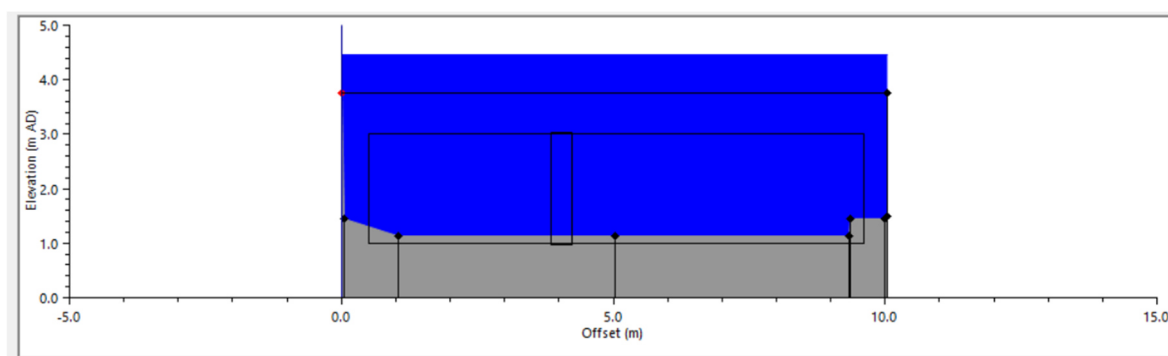
Tombinatura via Buonarroti



Tombinatura FS



Ponte Medioevale



Ponte via Nizza

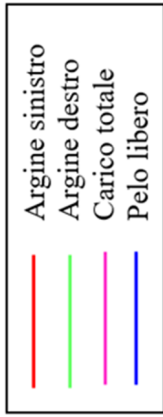
MOLINERO STATO ATTUALE

T=500 anni

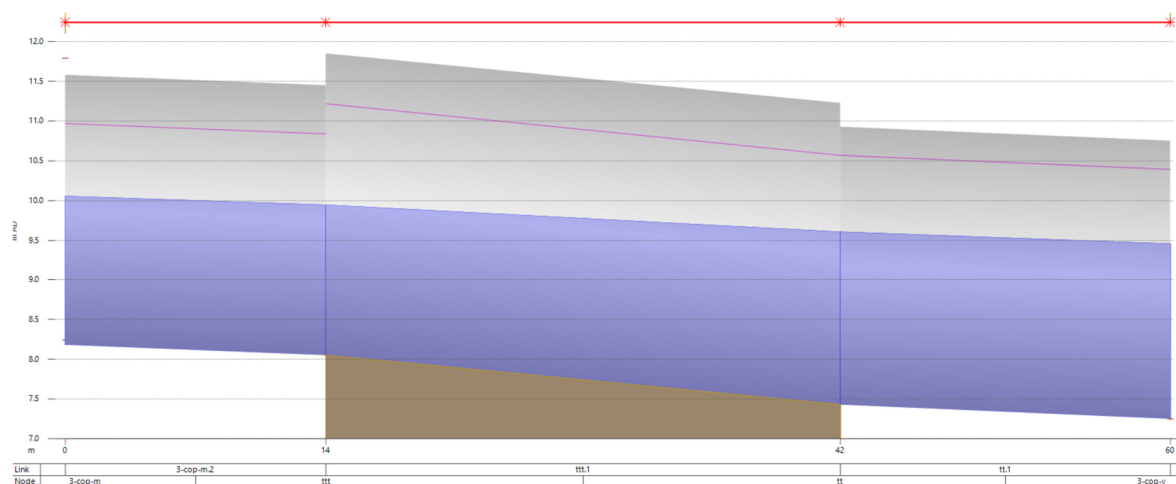
Chainage	Section key	Bed level	Section depth	Section flow	Section Froude number	Section level	Section velocity	Section total head
[m]		[m AD]	[m]	[m³/s]		[m AD]	[m/s]	[m AD]
0	63.0	15.94	4.24	150.4	1.05	20.18	5.78	21.9
12	62.0	15.75	4.42	142.4	0.86	20.17	4.76	21.3
24	61.10	15.6	4.36	139.7	0.94	19.96	5.43	21.5
38	59.99	15.47	3.19	139.7	1.34	18.66	7.45	21.5
40	59.00	15.43	3.18	140.5	1.40	18.61	7.66	21.6
49	58.00	15.31	3.15	143.4	1.04	18.46	4.72	19.6
81	57.00	14.91	3.59	140.4	0.94	18.50	2.84	18.9
105	56.00	14.6	3.65	109.9	0.87	18.25	4.98	19.5
106	55.00	14.6	3.62	108.6	0.97	18.22	5.65	19.8
129	54.00	14.31	3.58	91.7	1.04	17.89	5.62	19.5
169	53.00	13.81	3.70	91.7	1.09	17.51	4.61	18.4
197	52.00	13.46	4.13	99.9	1.07	17.59	2.86	18.0
209	51.10	13.28	4.17	108.1	0.65	17.45	3.07	17.9
219	49.10	13.2	4.18	108.1	0.54	17.38	2.74	17.8
222	49.00	13.14	4.05	105.0	0.71	17.19	3.81	17.9
235	48.00	12.98	4.08	100.7	0.75	17.06	4.21	17.9
286	47.00	12.33	4.17	97.2	1.32	16.50	5.50	17.8
287	46.00	12.33	4.44	98.8	1.03	16.77	3.21	17.1
328	45.00	11.82	4.41	101.6	1.05	16.23	4.61	17.1
351	44.00	11.35	4.47	108.5	0.86	15.82	4.59	16.9
378	43.00	11.19	4.62	116.1	0.70	15.81	3.47	16.4
420	42.00	10.66	4.31	114.9	0.94	14.97	6.02	16.8
445	41.00	10.35	3.91	114.5	1.17	14.26	7.06	16.8
458	40.00	10.2	3.56	114.5	1.38	13.76	7.78	16.8
470	39.00	10.04	3.28	114.5	1.30	13.32	6.65	15.5
499	32.00	8.99	3.66	114.5	1.19	12.65	5.80	14.3
566	31.00	8.55	3.71	121.4	1.04	12.26	4.47	12.8
567	30.00	8.55	3.66	121.8	0.99	12.21	4.31	12.8
606	29.30	8.24	3.87	124.8	0.97	12.11	4.24	12.7
607	29.20	8.24	3.87	124.8	0.98	12.11	4.25	12.7
667	27.00	7.25	3.44	123.9	1.03	10.69	4.70	11.7
668	26.00	7.25	3.42	124.3	1.63	10.67	4.74	11.7
728	25.10	6.7	4.01	107.3	1.05	10.71	4.60	11.3
876	23.000	5.22	2.51	103.9	1.15	7.73	5.38	9.2
877	22.000	5.22	2.50	104.2	1.21	7.72	4.64	8.8
895	21.000	4.75	2.82	104.9	0.81	7.57	4.18	8.5
945	20.000	4.45	2.87	104.9	1.37	7.32	4.09	7.9
984	18.000	3.8	3.44	104.8	0.94	7.24	2.97	7.6
1023	16.000	3.4	3.70	104.8	0.72	7.10	3.00	7.5
1045	15.900	3.25	3.79	104.7	0.71	7.04	2.96	7.4
1048	15.100	3.21	3.67	105.8	0.70	6.88	3.52	7.5
1319	6.000	1.3	3.08	106.1	1.16	4.38	4.38	5.4
1320	5.000	1.29	3.23	106.1	0.67	4.52	3.41	5.1
1337	4.000	1.25	3.21	106.1	1.05	4.46	3.36	5.0
1364	3.000	1.19	3.38	105.3	0.50	4.57	2.53	4.9
1373	2.700	1.18	3.34	105.3	1.51	4.52	2.56	4.9
1379	2.650	1.12	3.29	102.1	0.84	4.41	3.13	4.9
1401	2.400	1.03	1.89	102.1	1.33	2.92	5.71	4.6
1412	2.300	0.94	1.85	102.1	5.78	2.79	5.23	4.2
1423	2.200	0.85	1.84	102.1	1.02	2.69	4.34	3.6
1434	2.100	0.87	1.73	102.1	1.12	2.60	4.61	3.7
1448	2.000	0.82	1.66	102.1	1.08	2.48	4.35	3.4
1461	1.000	0.74	1.65	102.0	1.00	2.39	4.02	3.2

STATO DI PROGETTO STRALCIO 2 E 3

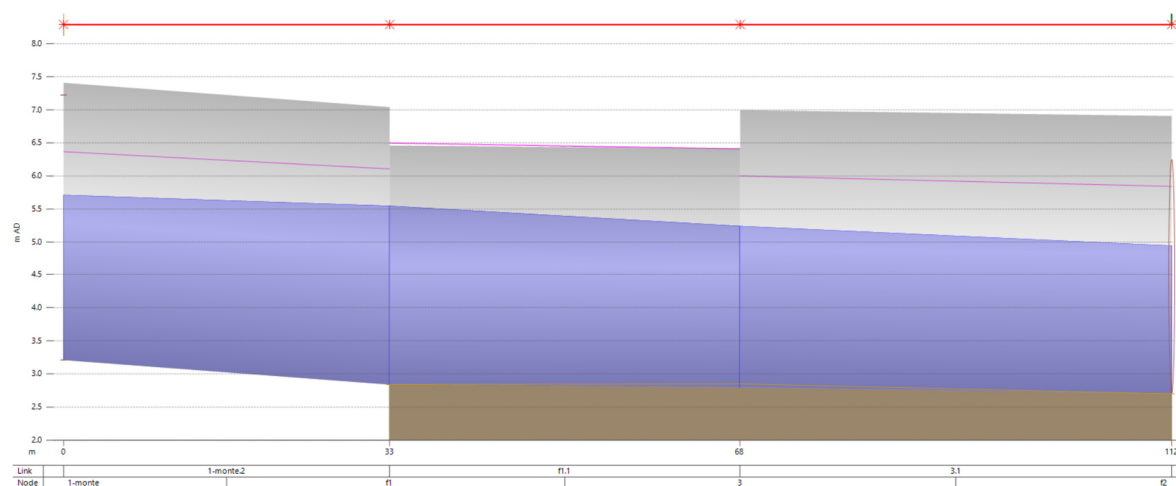
Rio Molinero T = 50 anni



Profilo – T50



Tombinatura via Bonini



Tombinatura via Buonarroti

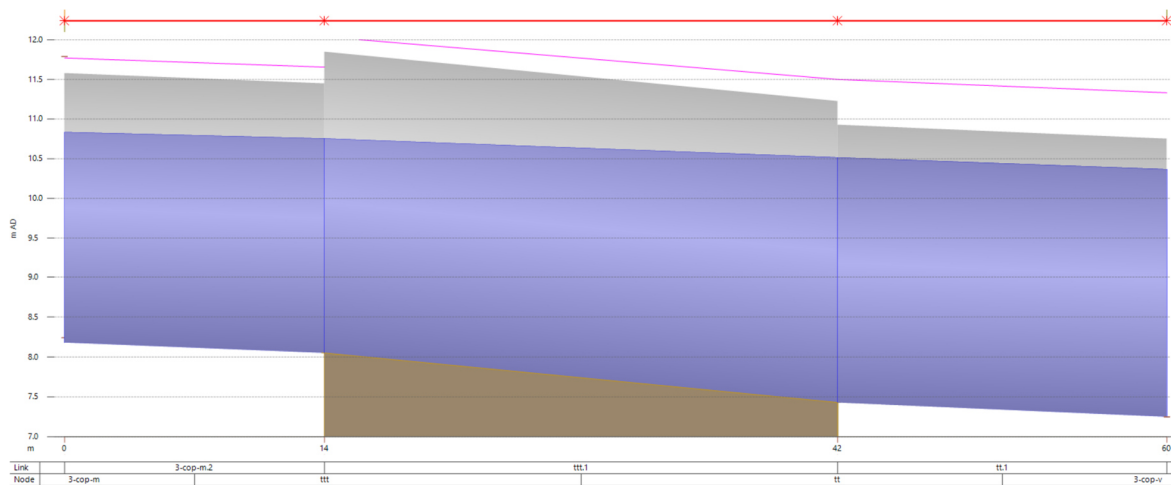
MOLINERO STATO DI PROGETTO STRALCIO 2 E 3

T=50 anni

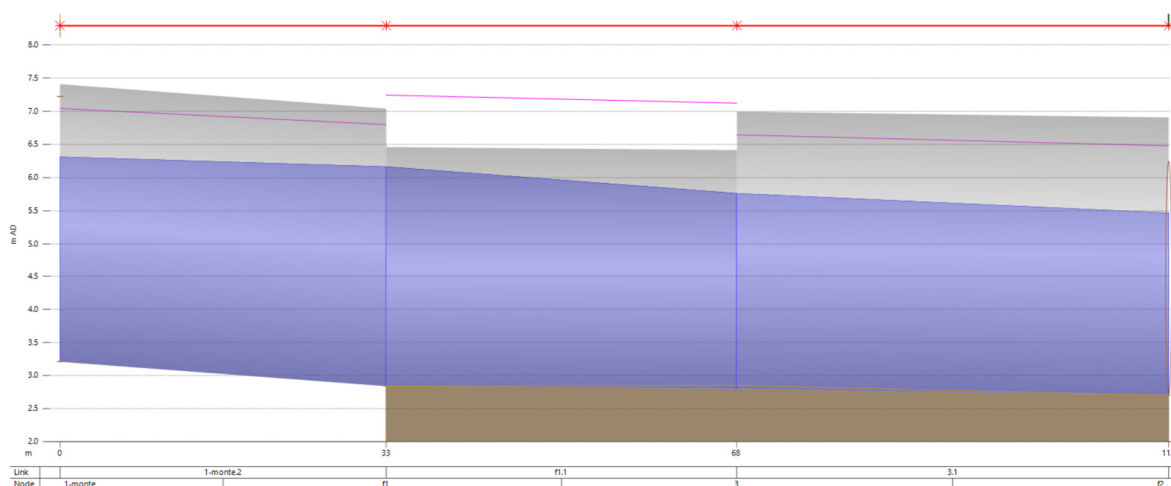
Chainage	Section key	Bed level	Section depth	Section flow	Section Froude number	Section level	Section velocity	Section total head
[m]		[m AD]	[m]	[m³/s]		[m AD]	[m/s]	[m AD]
0	63.0	15.94	2.85	80.0	1.05	18.79	4.64	19.9
12	62.0	15.75	2.94	80.0	0.86	18.69	4.08	19.5
24	61.10	15.6	2.88	80.0	0.94	18.48	4.73	19.6
38	59.99	15.47	2.48	80.0	1.12	17.95	5.50	19.5
40	59.00	15.43	2.49	80.0	1.16	17.92	5.62	19.5
49	58.00	15.31	2.50	80.0	1.03	17.81	3.55	18.5
81	57.00	14.91	2.99	78.9	0.92	17.90	1.97	18.1
105	56.00	14.6	3.03	67.3	0.83	17.63	3.77	18.3
106	55.00	14.6	2.95	66.8	0.90	17.55	4.31	18.5
129	54.00	14.31	2.89	68.3	1.04	17.20	5.18	18.6
169	53.00	13.81	2.75	69.7	1.08	16.56	4.39	17.5
197	52.00	13.46	3.19	69.3	1.10	16.65	2.62	17.0
209	51.10	13.28	3.28	73.8	0.62	16.56	2.65	16.9
219	49.10	13.2	3.31	73.8	0.53	16.51	2.35	16.8
222	49.00	13.14	3.18	73.8	0.68	16.32	3.37	16.9
235	48.00	12.98	3.17	72.7	0.75	16.15	3.86	16.9
286	47.00	12.33	3.06	74.3	1.31	15.39	5.37	16.9
287	46.00	12.33	3.05	74.3	1.03	15.38	3.18	15.9
328	45.00	11.82	3.03	74.3	1.04	14.85	4.47	15.9
351	44.00	11.35	3.22	74.3	0.86	14.57	4.37	15.5
378	43.00	11.19	3.39	74.3	0.69	14.58	3.04	15.0
420	42.00	10.66	3.23	74.4	0.93	13.89	5.21	15.3
445	41.00	10.35	2.91	74.4	1.16	13.26	6.18	15.2
458	40.00	10.2	2.59	74.4	1.38	12.79	6.93	15.2
470	39.00	10.04	2.30	74.4	1.30	12.34	6.12	14.2
499	32.00	8.99	2.57	74.4	1.18	11.56	5.49	13.1
566	31.00	8.55	1.88	75.6	6.05	10.43	4.45	11.4
567	30.00	8.55	1.87	75.7	8.10	10.42	4.29	11.4
606	29.30	8.24	1.87	75.7	1.00	10.11	4.27	11.0
607	29.20	8.24	1.87	75.7	1.00	10.11	4.28	11.0
667	27.00	7.25	2.21	75.7	1.03	9.46	4.52	10.4
668	26.00	7.25	2.20	75.7	1.34	9.45	4.55	10.4
728	25.10	6.7	2.34	75.6	1.04	9.04	4.58	9.9
876	23.000	5.22	1.99	75.5	1.13	7.21	4.90	8.4
877	22.000	5.22	1.97	75.5	1.19	7.19	4.28	8.1
895	21.000	4.75	2.29	75.5	0.80	7.04	3.72	7.7
945	20.000	4.45	2.07	75.5	1.36	6.52	4.11	7.4
984	18.000	3.8	2.37	75.5	0.88	6.17	3.05	6.6
1023	16.000	3.4	2.53	75.4	0.74	5.93	3.10	6.4
1045	15.900	3.25	2.55	75.4	0.74	5.80	3.12	6.3
1048	15.100	3.21	2.50	75.4	0.74	5.71	3.61	6.4
1319	6.000	1.3	2.42	75.3	1.14	3.72	3.96	4.5
1320	5.000	1.29	2.53	75.3	0.67	3.82	3.09	4.3
1337	4.000	1.25	2.51	75.3	1.06	3.76	3.05	4.2
1364	3.000	1.19	2.64	75.3	0.50	3.83	2.32	4.1
1373	2.700	1.18	2.60	75.3	1.52	3.78	2.36	4.1
1379	2.650	1.12	2.53	75.3	0.84	3.65	3.01	4.1
1401	2.400	1.03	1.57	75.3	1.29	2.60	5.06	3.9
1412	2.300	0.94	1.54	75.3	5.61	2.48	4.63	3.6
1423	2.200	0.85	1.53	75.3	0.99	2.38	3.84	3.1
1434	2.100	0.87	1.43	75.3	1.10	2.30	4.12	3.2
1448	2.000	0.82	1.36	75.3	1.07	2.18	3.91	3.0
1461	1.000	0.74	1.34	75.3	1.00	2.08	3.63	2.8

STATO DI PROGETTO STRALCIO 2 E 3

Rio Molinero T = 200 anni



Tombinatura via Bonini



Tombinatura via Buonarroti

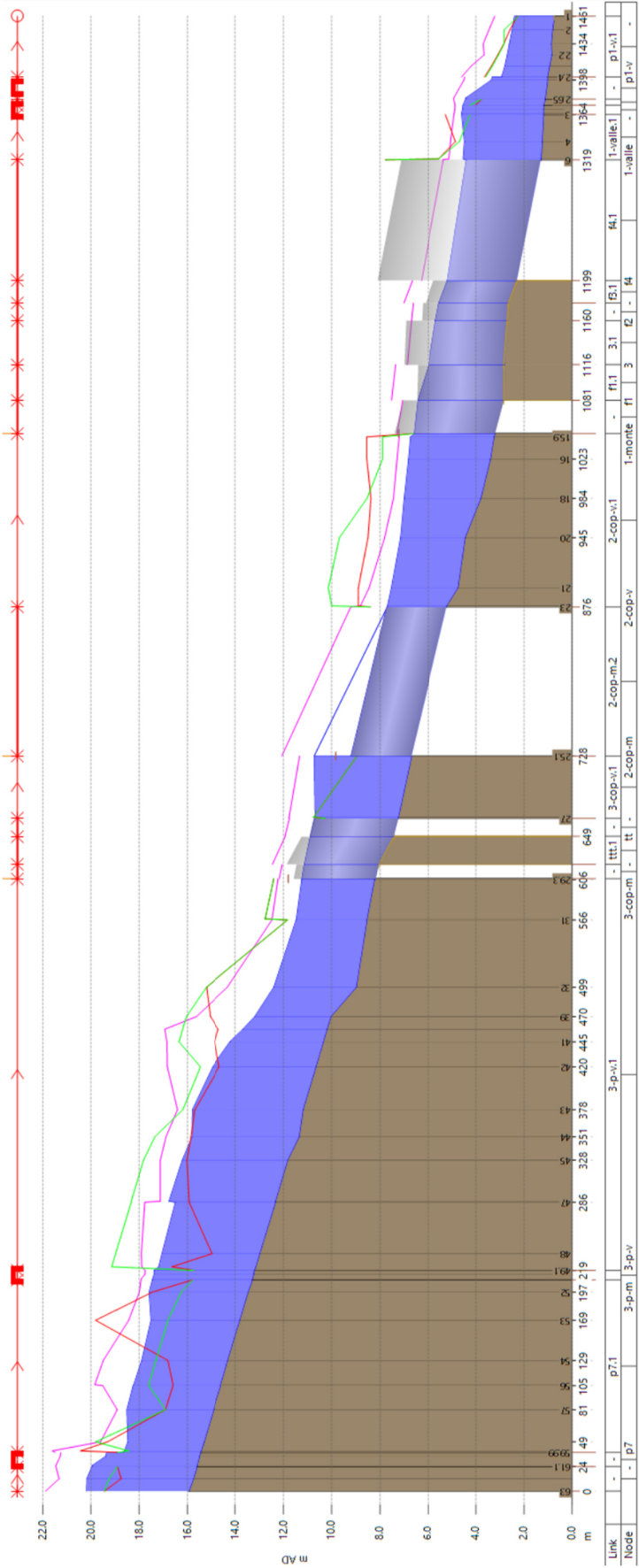
MOLINERO STATO DI PROGETTO STRALCIO 2 E 3

T=200 anni

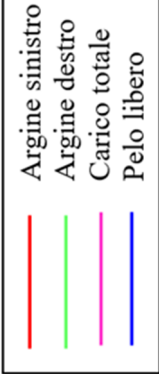
<i>Chainage</i>	<i>Section key</i>	<i>Bed level</i>	<i>Section depth</i>	<i>Section flow</i>	<i>Section Froude number</i>	<i>Section level</i>	<i>Section velocity</i>	<i>Section total head</i>
<i>[m]</i>		<i>[m AD]</i>	<i>[m]</i>	<i>[m³/s]</i>		<i>[m AD]</i>	<i>[m/s]</i>	<i>[m AD]</i>
0	63.0	15.94	3.71	120.0	1.05	19.65	5.28	21.1
12	62.0	15.75	3.86	116.9	0.86	19.61	4.49	20.6
24	61.10	15.6	3.79	116.4	0.94	19.39	5.21	20.8
38	59.99	15.47	2.94	116.4	1.27	18.41	6.76	20.7
40	59.00	15.43	2.93	116.8	1.32	18.36	6.94	20.8
49	58.00	15.31	2.92	117.9	1.03	18.23	4.28	19.2
81	57.00	14.91	3.39	115.9	0.93	18.30	2.50	18.6
105	56.00	14.6	3.43	93.0	0.84	18.03	4.51	19.1
106	55.00	14.6	3.38	92.1	0.92	17.98	5.15	19.3
129	54.00	14.31	3.35	83.8	1.04	17.66	5.49	19.2
169	53.00	13.81	3.34	84.8	1.08	17.15	4.58	18.1
197	52.00	13.46	3.80	88.8	1.08	17.26	2.77	17.6
209	51.10	13.28	3.86	95.3	0.62	17.14	2.91	17.6
219	49.10	13.2	3.88	95.2	0.53	17.08	2.59	17.4
222	49.00	13.14	3.74	93.3	0.69	16.88	3.64	17.5
235	48.00	12.98	3.74	90.5	0.75	16.72	4.09	17.6
286	47.00	12.33	3.81	88.3	1.32	16.14	5.47	17.4
287	46.00	12.33	4.02	89.2	1.03	16.35	3.20	16.7
328	45.00	11.82	3.92	94.3	1.04	15.74	4.58	16.7
351	44.00	11.35	4.05	97.6	0.86	15.40	4.58	16.5
378	43.00	11.19	4.23	101.4	0.69	15.42	3.31	16.0
420	42.00	10.66	3.96	102.1	0.94	14.62	5.82	16.3
445	41.00	10.35	3.56	102.1	1.17	13.91	6.92	16.3
458	40.00	10.2	3.19	102.1	1.39	13.39	7.71	16.4
470	39.00	10.04	2.87	102.1	1.30	12.91	6.71	15.2
499	32.00	8.99	3.13	102.1	1.19	12.12	5.99	13.9
566	31.00	8.55	2.54	106.5	6.10	11.09	4.65	12.1
567	30.00	8.55	2.53	106.9	7.99	11.08	4.51	12.1
606	29.30	8.24	2.60	108.3	1.00	10.84	4.43	11.8
607	29.20	8.24	2.59	108.3	1.00	10.83	4.43	11.8
667	27.00	7.25	3.12	108.5	1.03	10.37	4.54	11.4
668	26.00	7.25	3.10	108.7	1.34	10.35	4.57	11.4
728	25.10	6.7	3.59	99.8	1.05	10.29	4.60	10.9
876	23.000	5.22	2.38	98.7	1.13	7.60	5.35	9.1
877	22.000	5.22	2.36	98.7	1.20	7.58	4.62	8.7
895	21.000	4.75	2.67	98.7	0.82	7.42	4.14	8.3
945	20.000	4.45	2.52	98.7	1.37	6.97	4.13	7.7
984	18.000	3.8	2.95	98.7	0.89	6.75	3.14	7.2
1023	16.000	3.4	3.14	98.6	0.74	6.54	3.22	7.1
1045	15.900	3.25	3.20	98.6	0.74	6.45	3.21	6.9
1048	15.100	3.21	3.10	98.6	0.74	6.31	3.81	7.0
1319	6.000	1.3	2.96	98.6	1.17	4.26	4.25	5.2
1320	5.000	1.29	3.10	98.6	0.67	4.39	3.30	4.9
1337	4.000	1.25	3.08	98.6	1.05	4.33	3.26	4.9
1364	3.000	1.19	3.24	98.4	0.50	4.43	2.47	4.7
1373	2.700	1.18	3.20	98.4	1.51	4.38	2.50	4.7
1379	2.650	1.12	3.14	96.4	0.84	4.26	3.10	4.8
1401	2.400	1.03	1.83	96.4	1.32	2.86	5.58	4.4
1412	2.300	0.94	1.78	96.4	5.76	2.72	5.11	4.1
1423	2.200	0.85	1.78	96.4	1.02	2.63	4.24	3.5
1434	2.100	0.87	1.67	96.4	1.12	2.54	4.51	3.6
1448	2.000	0.82	1.60	96.4	1.07	2.42	4.26	3.3
1461	1.000	0.74	1.58	96.4	1.00	2.32	3.94	3.1

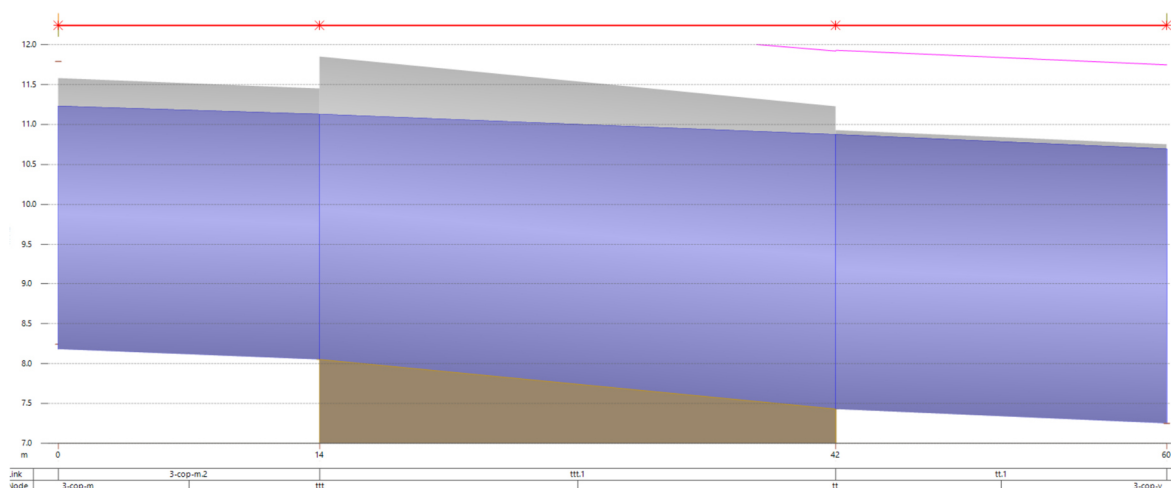
STATO DI PROGETTO STRALCIO 2 E 3

Rio Molinero T = 500 anni

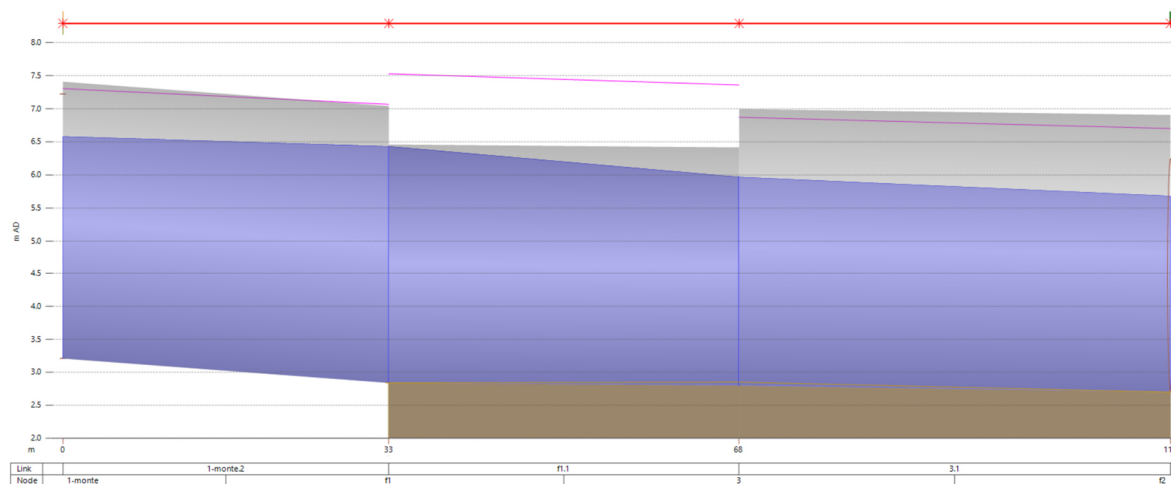


Profilo – T500





Tombinatura via Bonini



Tombinatura via Buonarroti

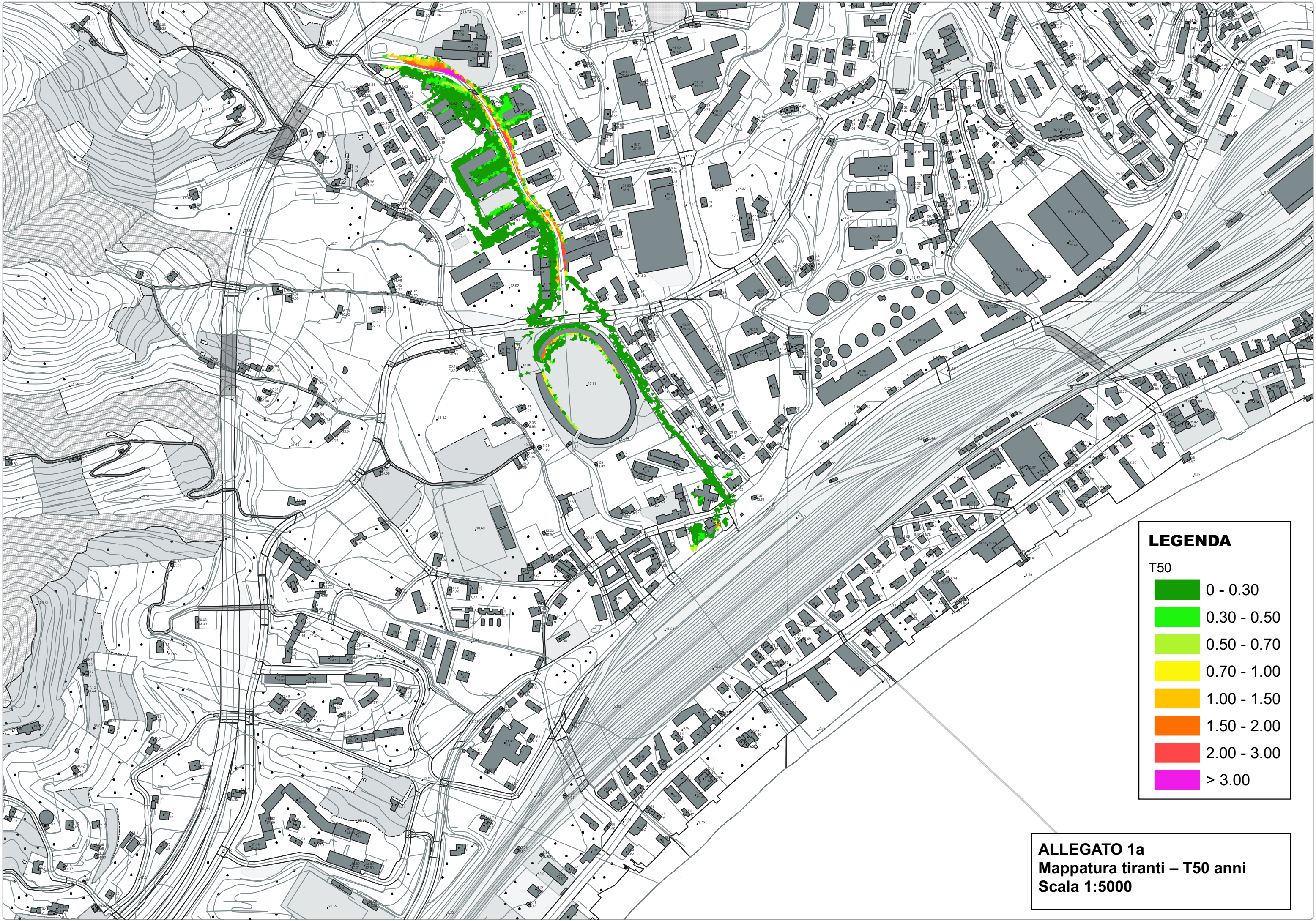
MOLINERO STATO DI PROGETTO STRALCIO 2 E 3

T=500 anni

<i>Chainage</i>	<i>Section key</i>	<i>Bed level</i>	<i>Section depth</i>	<i>Section flow</i>	<i>Section Froude number</i>	<i>Section level</i>	<i>Section velocity</i>	<i>Section total head</i>
<i>[m]</i>		<i>[m AD]</i>	<i>[m]</i>	<i>[m³/s]</i>		<i>[m AD]</i>	<i>[m/s]</i>	<i>[m AD]</i>
0	63.0	15.94	4.24	150.4	1.05	20.18	5.78	21.9
12	62.0	15.75	4.42	142.4	0.86	20.17	4.76	21.3
24	61.10	15.6	4.36	139.7	0.94	19.96	5.43	21.5
38	59.99	15.47	3.19	139.7	1.34	18.66	7.45	21.5
40	59.00	15.43	3.18	140.5	1.40	18.61	7.66	21.6
49	58.00	15.31	3.16	143.5	1.04	18.47	4.73	19.6
81	57.00	14.91	3.60	140.4	0.94	18.51	2.84	18.9
105	56.00	14.6	3.65	109.9	0.87	18.25	4.99	19.5
106	55.00	14.6	3.62	108.6	0.97	18.22	5.65	19.8
129	54.00	14.31	3.58	91.8	1.04	17.89	5.62	19.5
169	53.00	13.81	3.70	91.8	1.09	17.51	4.61	18.4
197	52.00	13.46	4.13	100.0	1.07	17.59	2.87	18.0
209	51.10	13.28	4.17	108.3	0.65	17.45	3.07	17.9
219	49.10	13.2	4.18	108.2	0.54	17.38	2.74	17.8
222	49.00	13.14	4.05	105.1	0.71	17.19	3.81	17.9
235	48.00	12.98	4.07	100.9	0.75	17.05	4.20	17.9
286	47.00	12.33	4.17	97.3	1.32	16.50	5.50	17.8
287	46.00	12.33	4.43	98.9	1.03	16.76	3.21	17.1
328	45.00	11.82	4.39	102.0	1.05	16.21	4.61	17.1
351	44.00	11.35	4.45	108.7	0.86	15.80	4.63	16.9
378	43.00	11.19	4.60	116.3	0.70	15.79	3.49	16.4
420	42.00	10.66	4.28	115.6	0.94	14.94	6.09	16.8
445	41.00	10.35	3.85	115.3	1.18	14.20	7.21	16.9
458	40.00	10.2	3.47	115.3	1.39	13.67	8.02	16.9
470	39.00	10.04	3.14	115.3	1.30	13.18	6.94	15.6
499	32.00	8.99	3.40	115.3	1.20	12.39	6.18	14.3
566	31.00	8.55	2.92	122.1	6.08	11.47	4.66	12.5
567	30.00	8.55	2.91	122.6	8.06	11.46	4.58	12.5
606	29.30	8.24	2.99	125.6	1.00	11.23	4.55	12.2
607	29.20	8.24	2.99	125.6	1.00	11.23	4.55	12.2
667	27.00	7.25	3.44	125.7	1.03	10.69	4.74	11.8
668	26.00	7.25	3.43	126.1	1.33	10.68	4.79	11.8
728	25.10	6.7	4.02	108.0	1.05	10.72	4.60	11.3
876	23.000	5.22	2.48	104.6	1.15	7.70	5.45	9.2
877	22.000	5.22	2.47	104.9	1.21	7.69	4.70	8.8
895	21.000	4.75	2.78	105.5	0.83	7.53	4.26	8.5
945	20.000	4.45	2.70	105.5	1.37	7.15	4.14	7.8
984	18.000	3.8	3.20	105.5	0.89	7.00	3.14	7.4
1023	16.000	3.4	3.42	105.4	0.74	6.82	3.22	7.3
1045	15.900	3.25	3.49	105.4	0.74	6.74	3.21	7.2
1048	15.100	3.21	3.37	106.5	0.74	6.58	3.82	7.3
1319	6.000	1.3	3.09	106.7	1.17	4.39	4.39	5.4
1320	5.000	1.29	3.24	106.7	0.67	4.53	3.42	5.1
1337	4.000	1.25	3.22	106.7	1.05	4.47	3.37	5.1
1364	3.000	1.19	3.39	105.8	0.50	4.58	2.53	4.9
1373	2.700	1.18	3.35	105.8	1.51	4.53	2.57	4.9
1379	2.650	1.12	3.30	102.5	0.84	4.42	3.13	4.9
1401	2.400	1.03	1.90	102.5	1.33	2.93	5.72	4.6
1412	2.300	0.94	1.85	102.5	5.77	2.79	5.24	4.2
1423	2.200	0.85	1.84	102.5	1.02	2.69	4.35	3.7
1434	2.100	0.87	1.73	102.5	1.12	2.60	4.62	3.7
1448	2.000	0.82	1.67	102.5	1.08	2.49	4.36	3.5
1461	1.000	0.74	1.65	102.4	1.00	2.39	4.02	3.2

ALLEGATO B

Risultati verifiche idrauliche bidimensionali

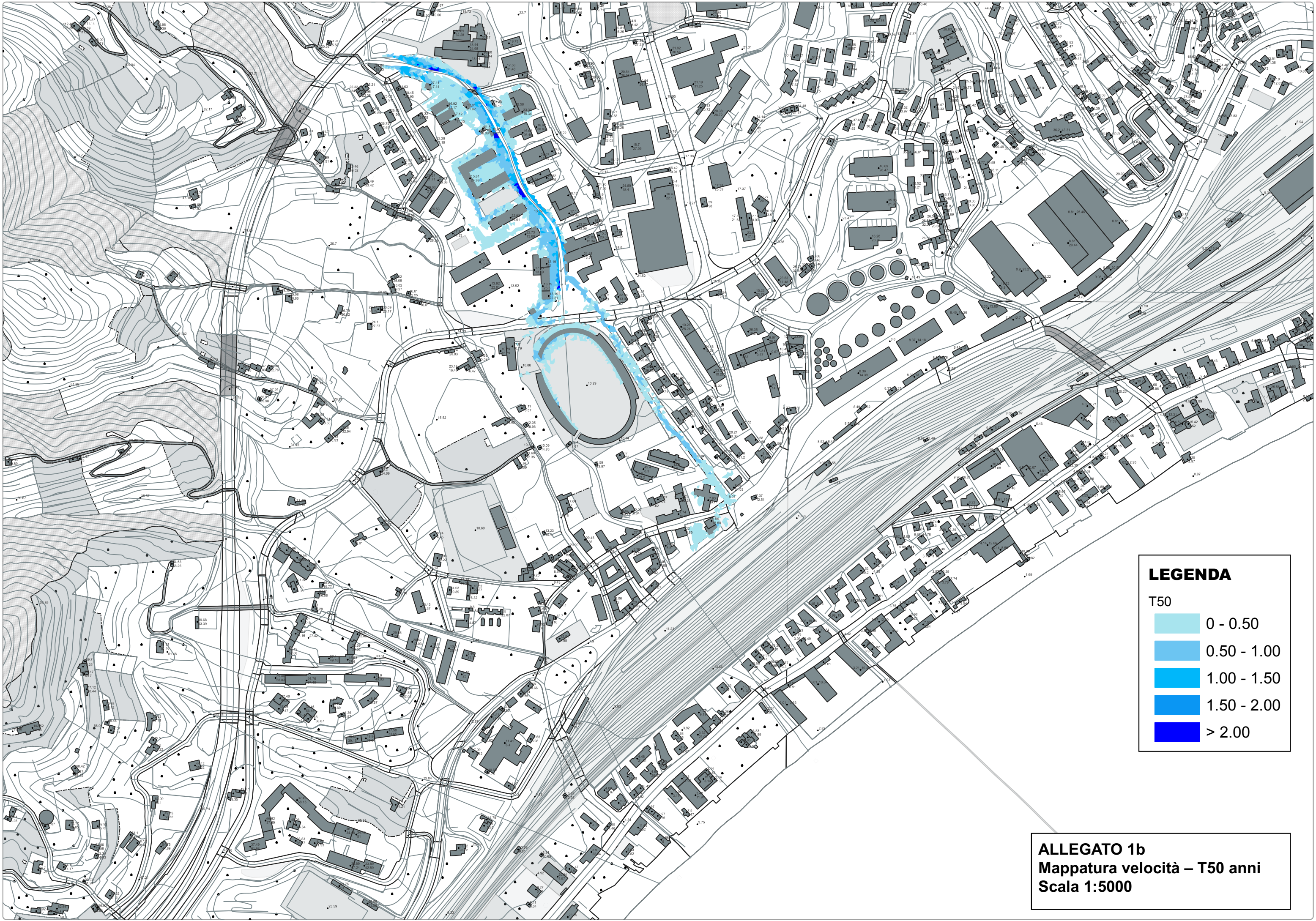


LEGENDA

T50

- 0 - 0.30
- 0.30 - 0.50
- 0.50 - 0.70
- 0.70 - 1.00
- 1.00 - 1.50
- 1.50 - 2.00
- 2.00 - 3.00
- > 3.00

ALLEGATO 1a
Mappatura tiranti – T50 anni
Scala 1:5000



LEGENDA

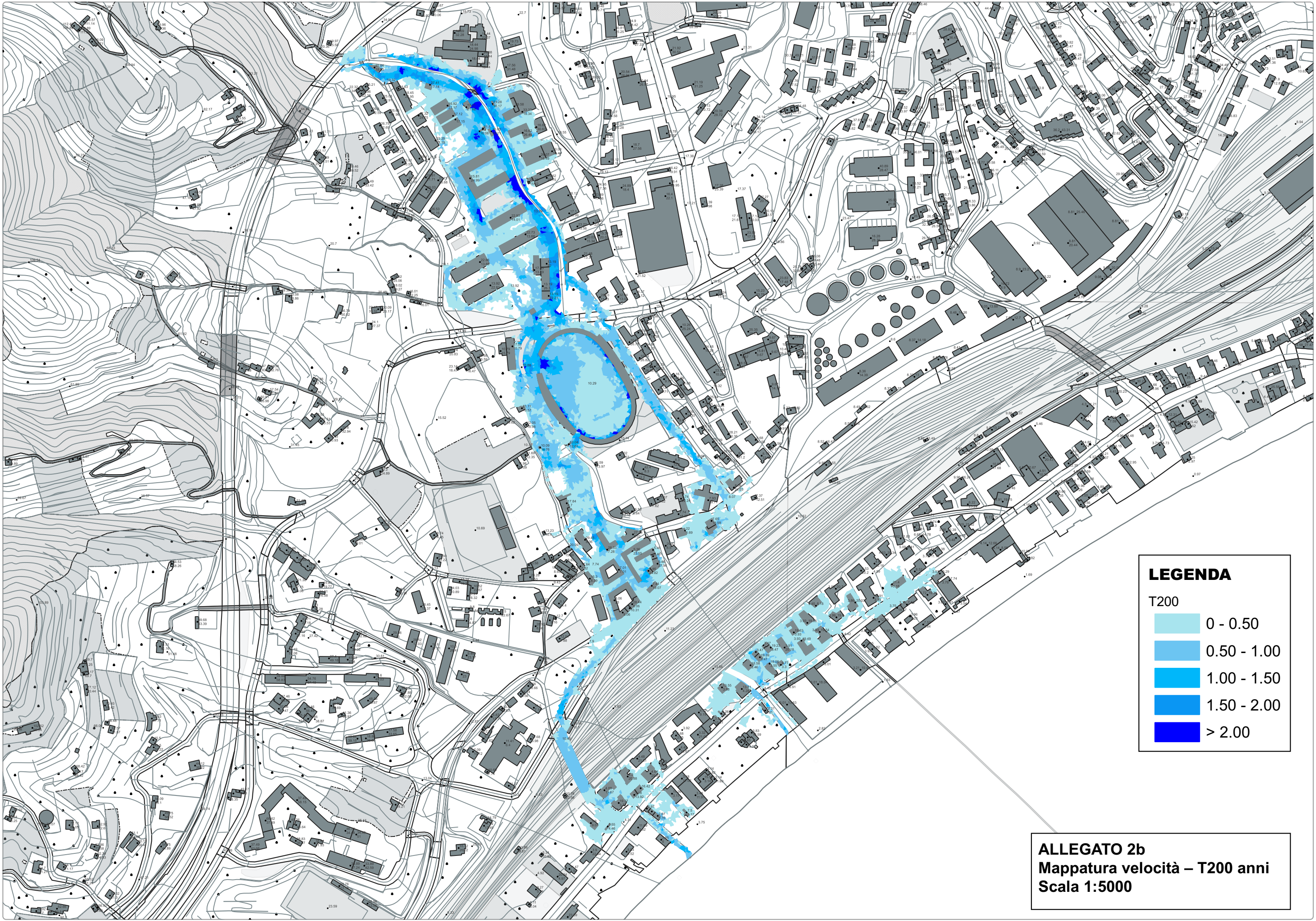
T50

	0 - 0.50
	0.50 - 1.00
	1.00 - 1.50
	1.50 - 2.00
	> 2.00

ALLEGATO 1b
Mappatura velocità – T50 anni
Scala 1:5000



ALLEGATO 2a
Mappatura tiranti – T200 anni
Scala 1:5000

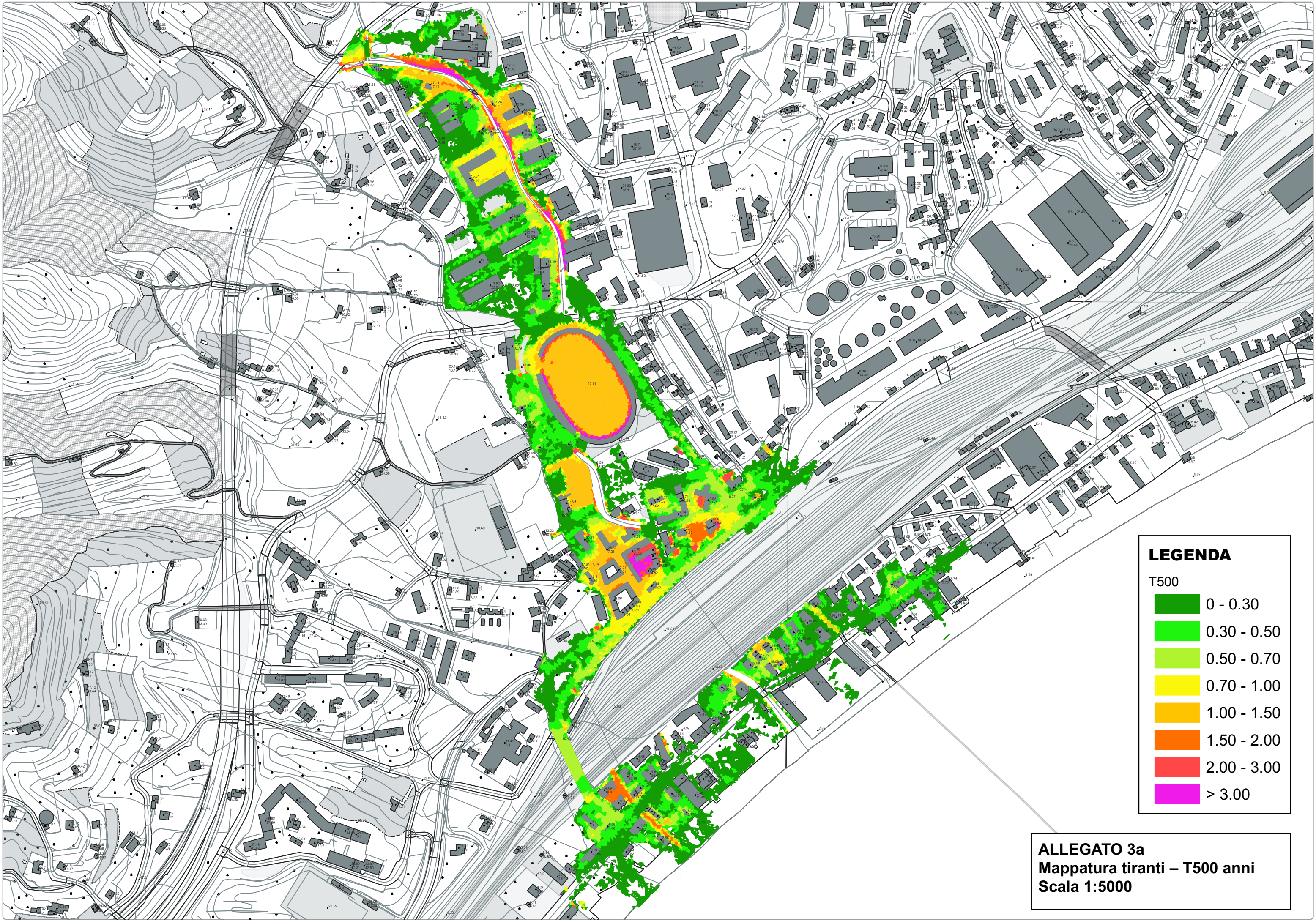


LEGENDA

T200

	0 - 0.50
	0.50 - 1.00
	1.00 - 1.50
	1.50 - 2.00
	> 2.00

ALLEGATO 2b
Mappatura velocità – T200 anni
Scala 1:5000

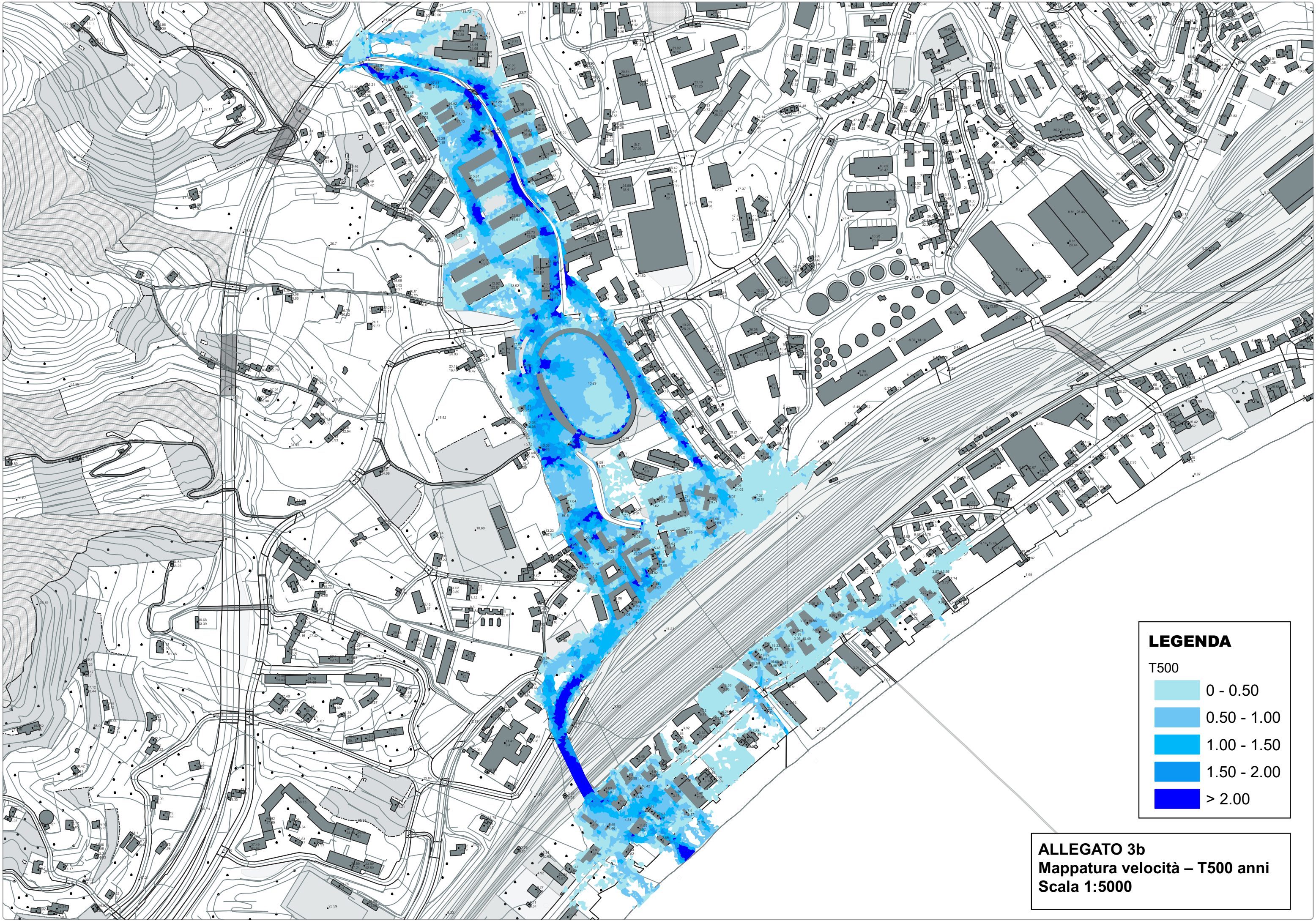
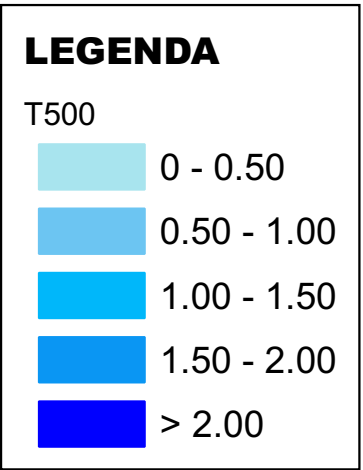


LEGENDA

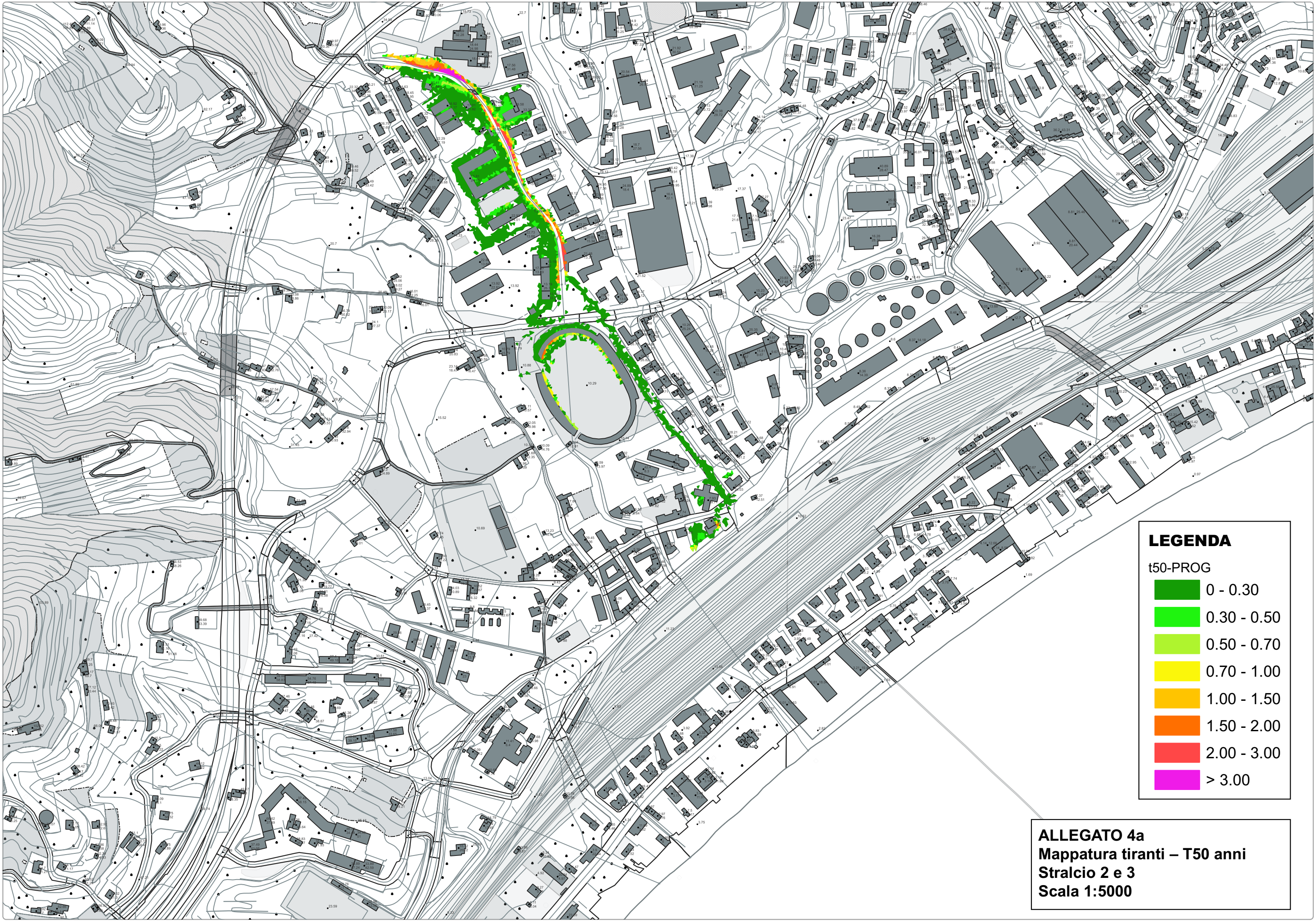
T500

	0 - 0.30
	0.30 - 0.50
	0.50 - 0.70
	0.70 - 1.00
	1.00 - 1.50
	1.50 - 2.00
	2.00 - 3.00
	> 3.00

ALLEGATO 3a
Mappatura tiranti – T500 anni
Scala 1:5000



ALLEGATO 3b
Mappatura velocità – T500 anni
Scala 1:5000

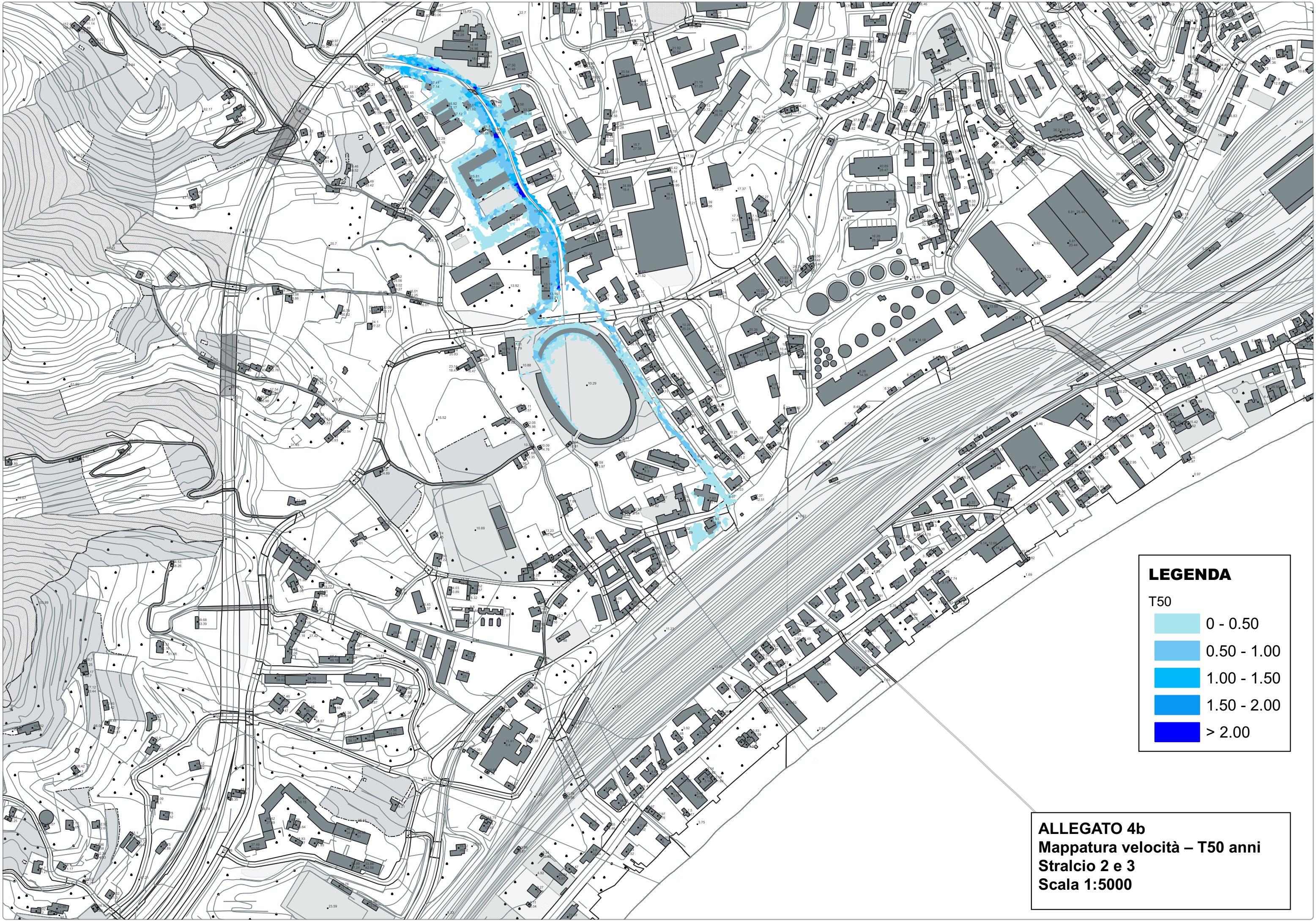


LEGENDA

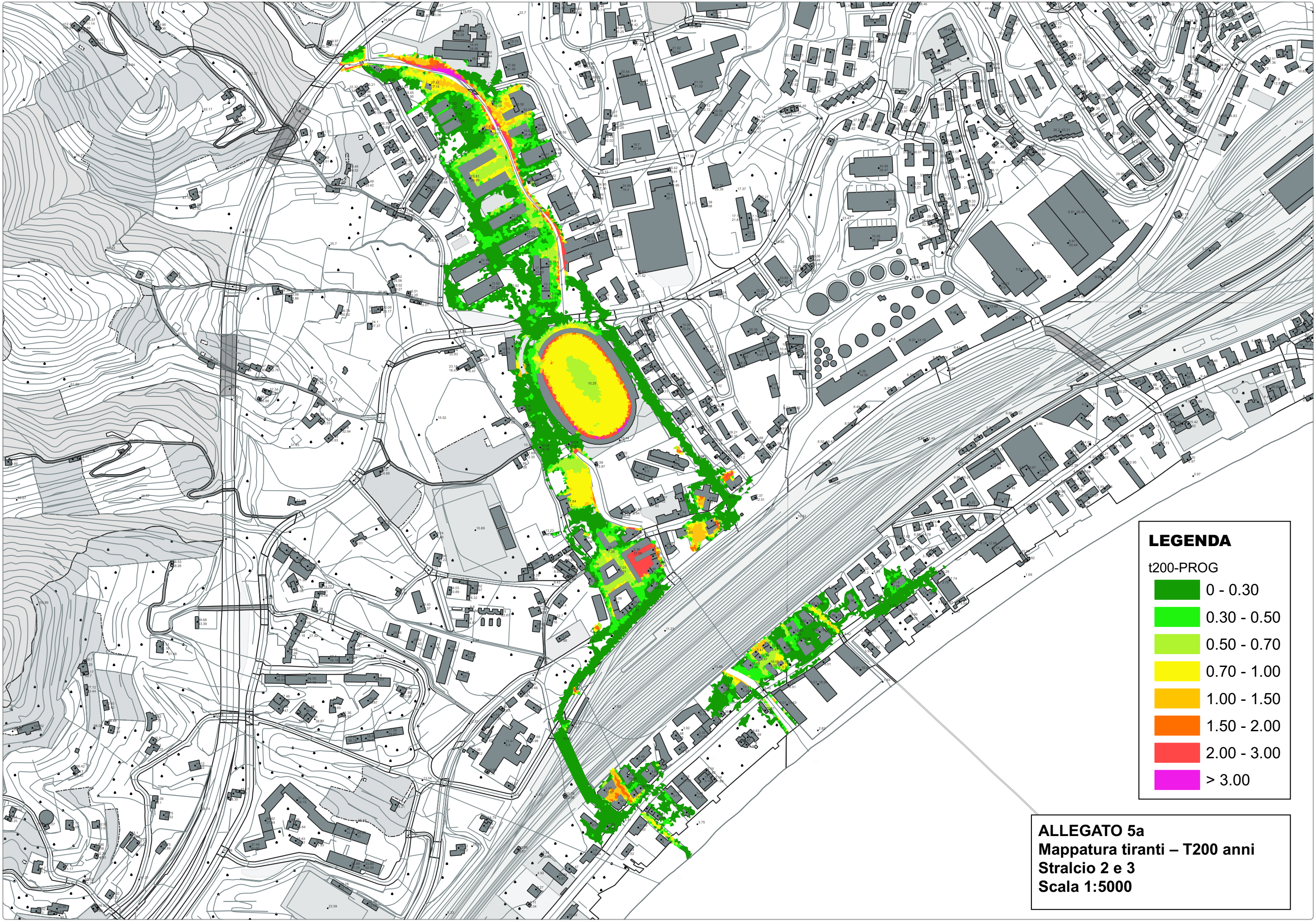
t50-PROG

	0 - 0.30
	0.30 - 0.50
	0.50 - 0.70
	0.70 - 1.00
	1.00 - 1.50
	1.50 - 2.00
	2.00 - 3.00
	> 3.00

ALLEGATO 4a
Mappatura tiranti – T50 anni
Stralcio 2 e 3
Scala 1:5000



ALLEGATO 4b
Mappatura velocità – T50 anni
Stralcio 2 e 3
Scala 1:5000

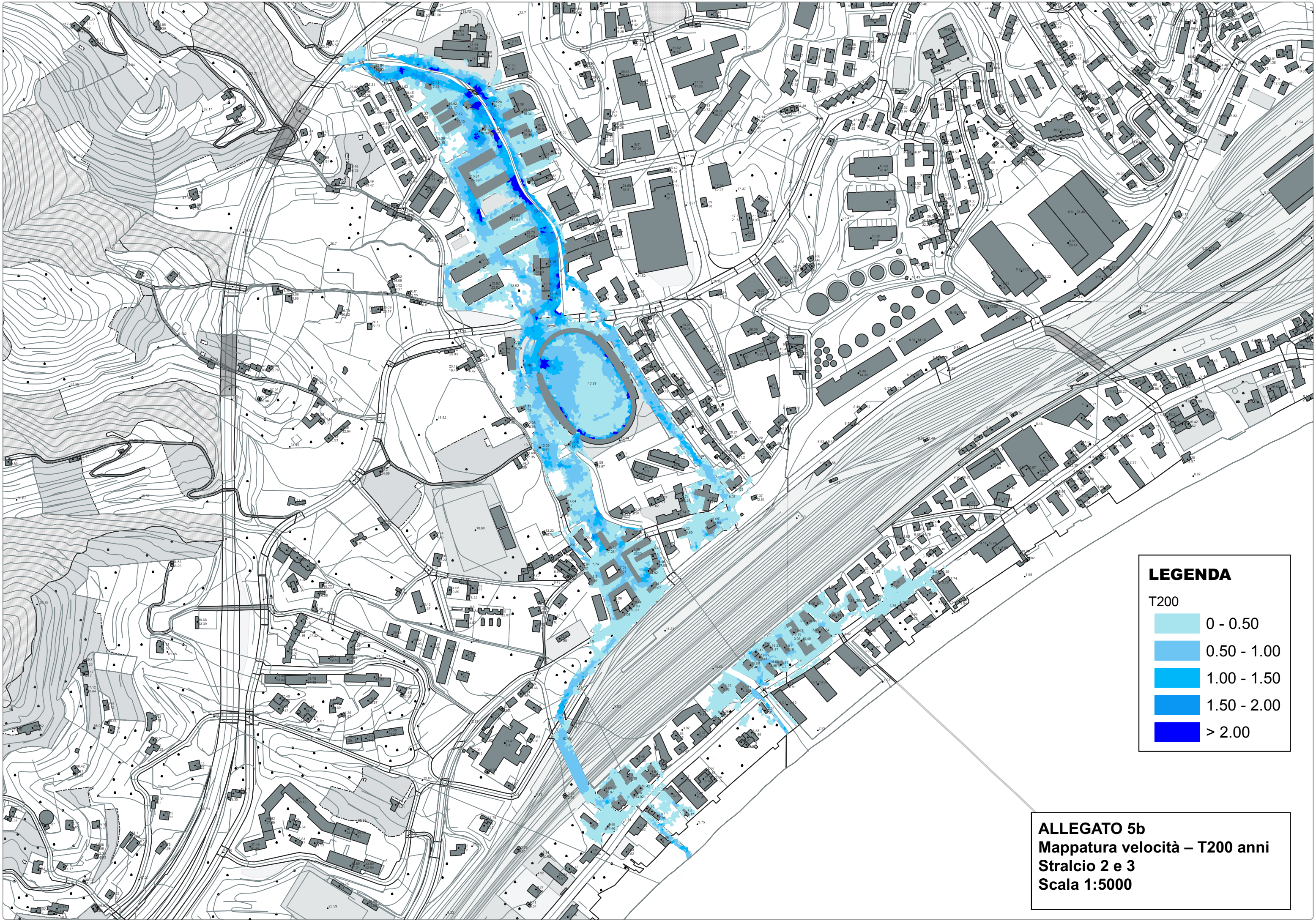


LEGENDA

t200-PROG

0 - 0.30
0.30 - 0.50
0.50 - 0.70
0.70 - 1.00
1.00 - 1.50
1.50 - 2.00
2.00 - 3.00
> 3.00

ALLEGATO 5a
Mappatura tiranti – T200 anni
Stralcio 2 e 3
Scala 1:5000

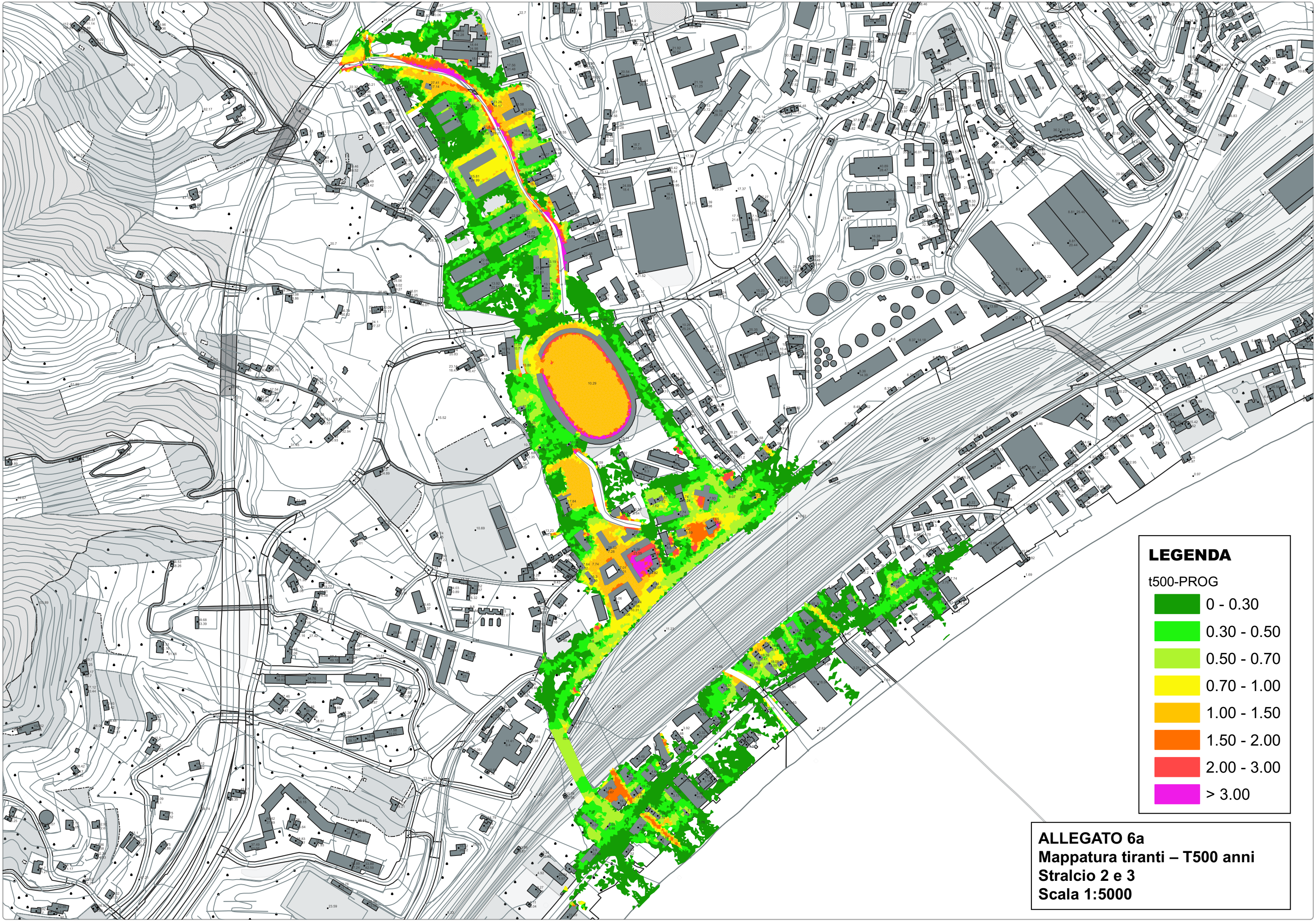


LEGENDA

T200

	0 - 0.50
	0.50 - 1.00
	1.00 - 1.50
	1.50 - 2.00
	> 2.00

ALLEGATO 5b
Mappatura velocità – T200 anni
Stralcio 2 e 3
Scala 1:5000

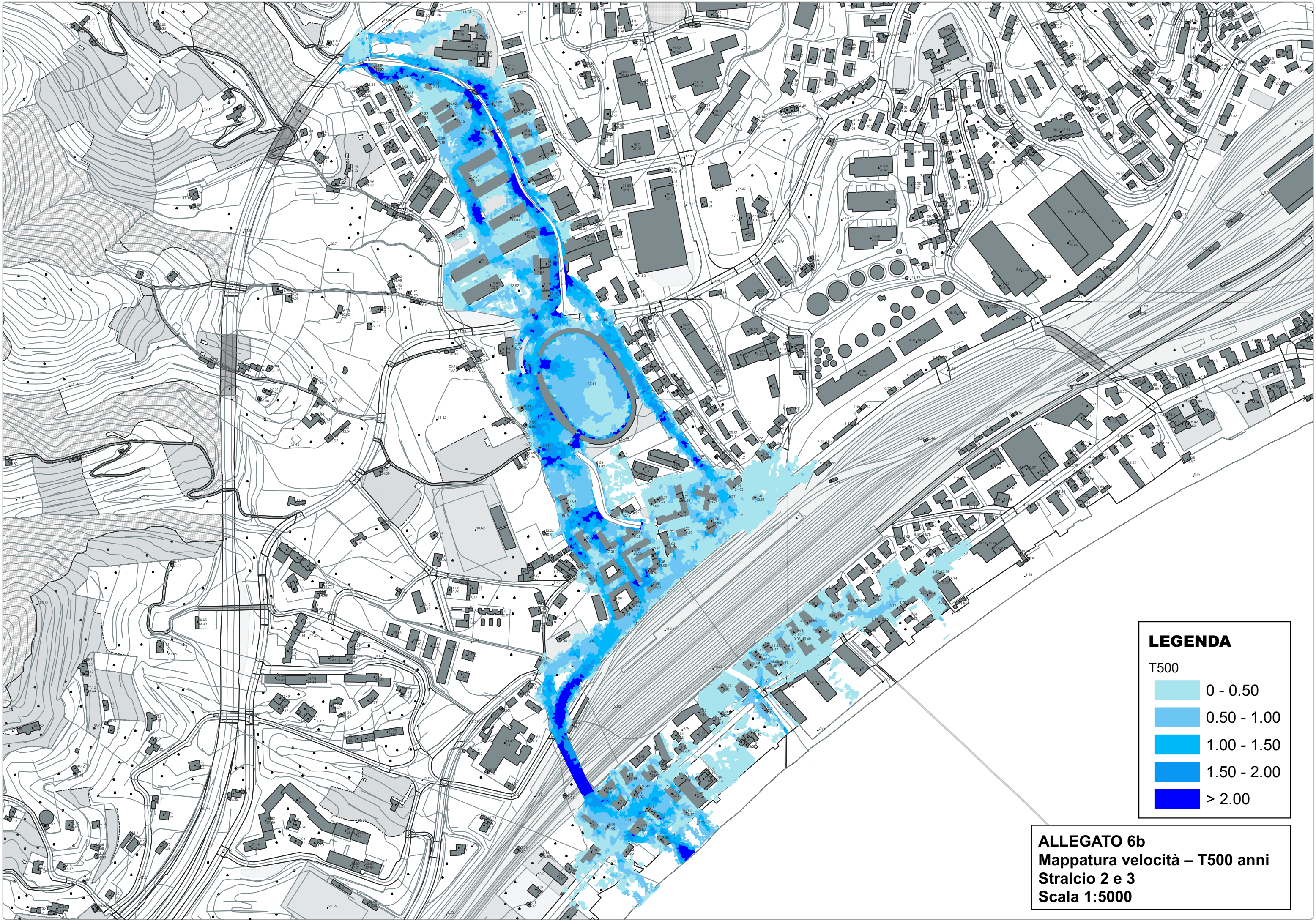


LEGENDA

t500-PROG

- 0 - 0.30
- 0.30 - 0.50
- 0.50 - 0.70
- 0.70 - 1.00
- 1.00 - 1.50
- 1.50 - 2.00
- 2.00 - 3.00
- > 3.00

ALLEGATO 6a
Mappatura tiranti – T500 anni
Stralcio 2 e 3
Scala 1:5000



LEGENDA

T500

0 - 0.50
0.50 - 1.00
1.00 - 1.50
1.50 - 2.00
> 2.00

ALLEGATO 6b
Mappatura velocità – T500 anni
Stralcio 2 e 3
Scala 1:5000

APPENDICE 1

Software di calcolo Hec-Ras

Il software di calcolo *Hec-Ras* della US Army Corps of Engineers consente il calcolo dell'andamento dei profili di rigurgito in moto permanente gradualmente variato in alvei naturali o canali artificiali e la valutazione degli effetti sulla corrente dovuti all'interazione con ponti, tombinature, briglie, stramazzi, aree golenali ecc.,

La determinazione del profilo teorico è ottenuta tramite l'applicazione del cosiddetto *Standard step method* che si basa sulla semplice equazione mono-dimensionale del contenuto energetico della corrente:

$$H_1 - H_2 = h_f + h_e$$

dove $H_1[m]$ ed $H_2[m]$ sono i carichi totali della corrente nelle sezioni di monte e di valle del tronco d'alveo considerato, $h_f[m]$ sono le perdite di carico dovute all'attrito del fondo e delle sponde, mentre $h_e[m]$ è un termine che tiene conto degli effetti dovuti alla non cilindricità della corrente.

In particolare h_f dipende principalmente dalla scabrezza del tratto d'alveo considerato ed è esprimibile come:

$$h_f = j_f \cdot L$$

con j_f pendenza motrice nel tratto di lunghezza $L[m]$.

Il calcolo di j_f è effettuabile con diverse formulazioni, in funzione della pendenza motrice J in corrispondenza delle sezioni d'inizio e fine di ciascun tratto.

Il calcolo del termine J nella singola sezione è effettuato mediante la:

$$J = \left[\frac{Q}{K} \right]^2$$

dove $Q[m^3/s]$ è la portata di calcolo e K (denominato *conveyance*) è ricavabile attraverso la seguente espressione:

$$K = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}}$$

dove $A[m^2]$ l'area della sezione liquida, $R[m]$ il raggio idraulico e $n[m^{-1/3} s]$ è il parametro rappresentativo della scabrezza del fondo e delle sponde di Manning.

Il valore del coefficiente n è determinato secondo la procedura sviluppata da Cowan selezionando le caratteristiche più rilevanti ai fini della quantificazione dell'indice di resistenza.

Il termine h_e dipende invece dalla variazione del carico cinetico della corrente tra le sezioni 1 e 2 dovuta al cambio di geometria delle sezioni stesse ed è a sua volta esprimibile come:

$$h_e = \beta \cdot \left| \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2 \cdot g} - \alpha_2 \cdot \frac{V_2^2}{2 \cdot g} \right|$$

dove β è un coefficiente di contrazione o espansione dipendente dalle condizioni geometriche del tratto considerato, V_1 e V_2 [m/s] sono i valori delle velocità medie agli estremi del tronco e α_1 e α_2 sono i coefficienti correttivi dell'energia cinetica.

Il modello consente di suddividere la sezione in più zone in cui assegnare un valore diverso del parametro n di scabrezza; in particolare è possibile individuare tre zone principali: quella centrale dell'alveo inciso (denominata *main channel*) e due zone laterali golenali (denominate *right and left overbanks*).

Il programma consente la simulazione del deflusso attraverso ponti e tombinature (*bridge and culvert*) mediante la loro schematizzazione geometrica (impalcato, pile, setti, ecc.).

La procedura di calcolo utilizzata consente di simulare il deflusso a pelo libero al di sotto dell'impalcato, il deflusso in pressione al di sotto dell'impalcato e la combinazione del deflusso in pressione e del deflusso con scavalco dell'impalcato stesso (funzionamento a stramazzo).

Per il deflusso a pelo libero il modello consente la scelta fra diversi metodi di calcolo quali il metodo del bilancio energetico (*Standard step method*), il metodo dei momenti (*Momentum Balance*), la formula di Yarnell per correnti lente.

Il funzionamento in pressione è simulato mediante la formulazione propria dell'efflusso da luce:

$$Q = C \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

dove Q [m³/s] è la portata defluita attraverso la luce di area A [m²], H [m] è il dislivello tra il carico totale di monte ed il pelo libero a valle e C è il cosiddetto coefficiente di efflusso.

Il programma prevede la messa in pressione della struttura quando, secondo la scelta dell'utente, il carico totale o la quota del pelo libero risultano superiori alla quota dell'intradosso dell'impalcato.

Il funzionamento a stramazzo è simulato attraverso la formulazione standard:

$$Q = C \cdot L \cdot H^{\frac{3}{2}}$$

dove Q [m³/s] è la portata defluita sulla soglia di larghezza L [m] e H [m] è il dislivello tra il carico totale di monte e la quota della soglia e C è il coefficiente di efflusso, variabile in funzione del tipo di stramazzo e del carico sopra la soglia.

Nel caso di funzionamento combinato di moto in pressione con scavalamento del ponte (stramazzo) l'entità delle portate stramazzeanti e defluenti al di sotto dell'impalcato viene determinata attraverso una procedura iterativa combinando le equazioni che regolano i due fenomeni.

Il modello consente inoltre il calcolo del funzionamento in pressione di coperture, scatolari, tombinature e della portata esondata lungo le sponde nei tratti a cielo aperto quando il livello superi le quote di sommità arginale (*lateral structure*).

Nel rispetto dell'equazione di continuità il programma fornisce in quest'ultimo caso per ciascuna configurazione di portata imposta da monte l'entità delle portate esondate per ciascuno stramazzo laterale e la portata residua di valle, con i rispettivi livelli.

APPENDICE 2

Software di calcolo Infoworks ICM

A1. GENERALITA'

Il codice di calcolo InfoWorks ICM di HR Wallingford - Innovyze nasce per consentire la modellazione numerica integrata di alvei fluviali, reticoli di bonifica e fognature urbane.

Il modulo InfoWorks ICM costituisce un sistema di calcolo a moto vario monodimensionale e bidimensionale che utilizza la metodologia dei volumi finiti.

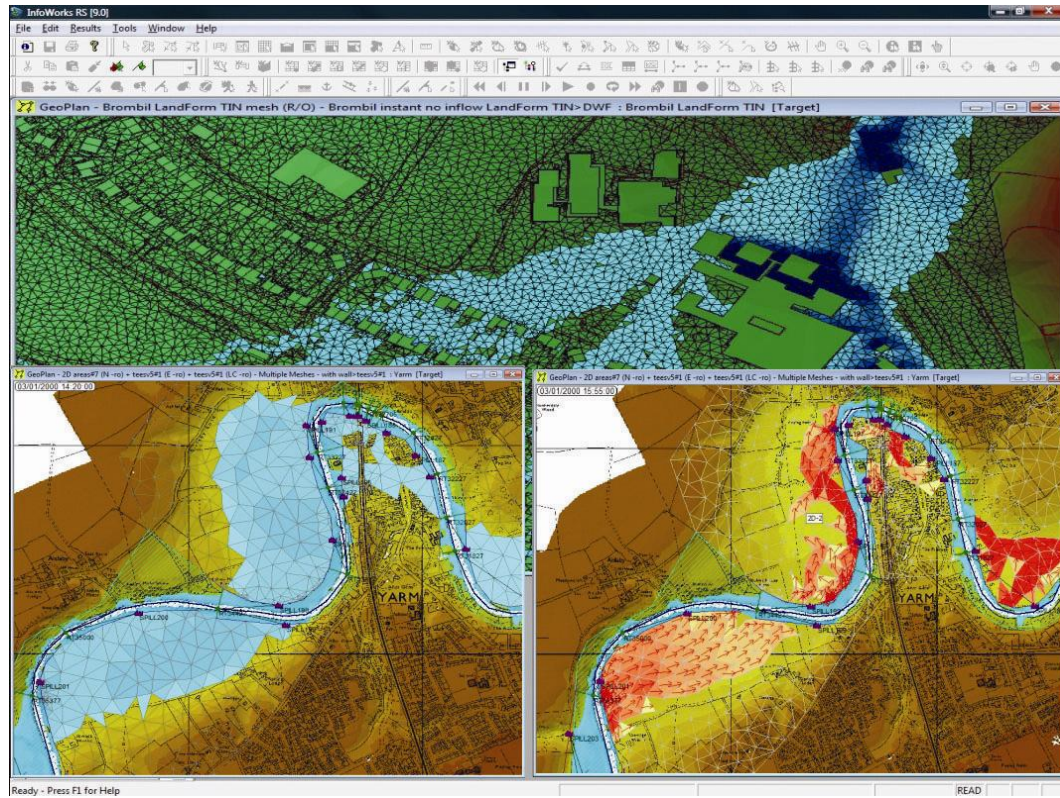
Il software consente di rappresentare in modo completo e accurato tutte le situazioni reali dei corsi d'acqua anche quando sono presenti complesse interferenze con reticoli fognari e/o di bonifica.

All'interno di un'unica interfaccia utente si possono rappresentare sezioni fluviali aperte con approccio monodimensionale, domini bidimensionali, reti di drenaggio chiuse e tutti i manufatti speciali presenti in ambito fluviale o fognario (ponti, soglie, sollevamenti, scaricatori di piena ecc).

Le aste fluviali possono essere rappresentate, secondo le preferenze dell'utente, o con un dominio interamente 2D (comprendente sia l'alveo inciso che le golene) che con modellazione mista (generalmente 1D per l'alveo inciso e 2D per le zone di espansione golenali).

E' ovviamente anche possibile modellare le aste fluviali con tradizionali rappresentazioni 1D.

Per quanto riguarda invece la rappresentazione di reti di drenaggio urbano la tecnica oramai consolidata è quella di rappresentare il reticolo interrato con elementi 1D e l'eventuale esondazione con domini 2D.



A2. APPROCCIO NUMERICO PER LA COMPONENTE 1D

A2.1 Equazioni di governo

Il moto idraulico all'interno degli elementi monodimensionali che lavorano a pelo libero (sia le tratte fluviali aperte o tubazioni) vengono risolte con l'integrazione delle equazioni di De Saint Venant (conservazione della massa e della quantità di moto).

Le equazioni sono le seguenti:

Continuità (conservazione della massa):

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

Moto (conservazione della quantità di moto):

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

dove:

lq eventuale portata in ingresso (lateral inflow)

$A[m^2]$ area della sezione liquida

$Q[m^3/s]$ portata

$x[m]$ ascissa lungo l'asse del singolo tratto

$t[s]$ tempo

$g[m/s^2]$ costante gravitazionale

$H[m]$ carico piezometrico dato da $z+h$

$z[m]$ quota di scorrimento

$h[m]$ livello idrico

$S_f [m/m]$ pendenza motrice definita come: $S_f = \frac{Q \cdot |Q|}{K^2}$

dove K è un termine denominato "conveyance" definito, in accordo con l'equazione di Manning:

$$K^2 = \frac{A^2 \cdot R^{\frac{4}{3}}}{n^2} \quad \text{e} \quad R = \frac{A}{P}$$

dove:

$R[m]$ raggio idraulico

$P[m]$ *perimetro bagnato*

n *coefficiente di scabrezza di Manning*

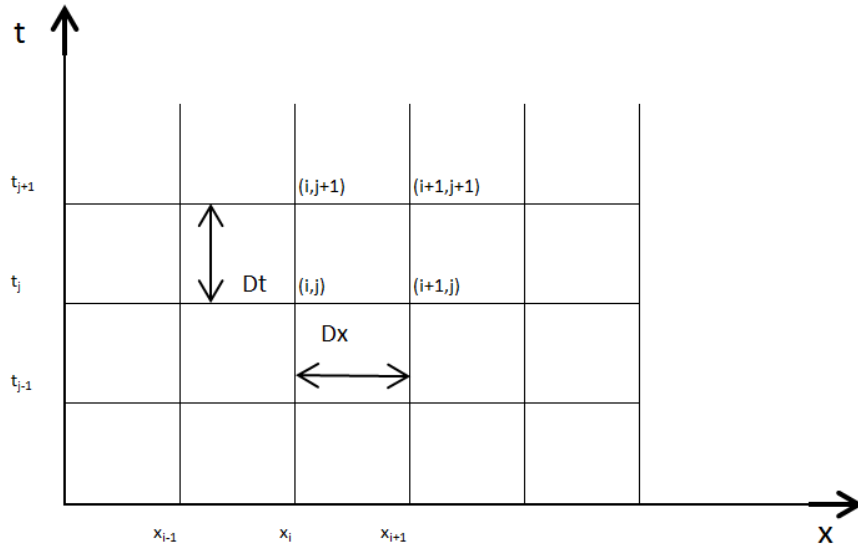
Per la definizione della conveyance il programma consente l'utilizzo di diverse formulazioni oltre a quella di Manning, quali ad esempio Colebrook-White e Strickler. Ai fini della loro integrazione queste equazioni vengono opportunamente semplificate e linearizzate in modo tale che il sistema di equazioni possa essere risolto con la teoria delle matrici. Lo schema di linearizzazione usato da InfoWorks è quello dei 4 punti di Priessmann e il risolutore adottato è quello di Newton-Raphson.

InfoWorks simula anche situazioni di condotte in pressione (senza problemi nella transizione da uno stato all'altro) mediante la tecnica dello *s/ot* per il quale si ipotizza la presenza di una piccola fessura alla sommità della condotta e fino al piano campagna. In tal modo il motore di calcolo non incontra nessuna discontinuità nella transizione da moto a gravità a quello in pressione (per tubi in cui invece permane costantemente il moto in pressione, come le condotte di mandata, è possibile utilizzare un sistema di equazioni più appropriato che elimina l'artificio dello *s/ot*).

La metodologia di calcolo in moto vario tiene conto anche dei volumi in gioco e quindi delle attenuazioni dell'onda di piena quando questa riempie dei volumi disponibili in alveo o in vere e proprie vasche di espansione opportunamente rappresentate nel modello (effetto di laminazione).

A2.3 Discretizzazione delle equazioni di governo

Ai fini della discretizzazione delle equazioni di de Saint Venant, InfoWorks utilizza lo schema implicito di Preissmann riportato nella figura seguente:



Il valore della funzione f o delle sue derivate continue nel tempo e nello spazio può essere discretizzato come segue:

$$f(x,t) = \frac{1}{2} \cdot \left[\vartheta \cdot \left(f_{i+1}^{j+1} + f_i^{j+1} \right) + (1-\vartheta) \cdot \left(f_{i+1}^j + f_i^j \right) \right]$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{1}{Dx} \cdot \left[\vartheta \cdot \left(f_{i+1}^{j+1} - f_i^{j+1} \right) + (1-\vartheta) \cdot \left(f_{i+1}^j - f_i^j \right) \right]$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{1}{2 \cdot Dt} \cdot \left[\left(f_{i+1}^{j+1} - f_{i+1}^j \right) + \left(f_i^{j+1} - f_i^j \right) \right]$$

Dove:

ϑ è un coefficiente che varia da 0.5 a 1

f_i^j è il valore della funzione f valutata al punto (x_i, t_j)

In base a tali assunti entrambe le equazioni di De Saint Venant possono essere trasformate nella forma lineare:

$$a \cdot Q_i^{j+1} + b \cdot H_i^{j+1} + c \cdot Q_{i+1}^{j+1} + d \cdot H_{i+1}^{j+1} = e$$

I valori a , b , c , d ed e sono calcolati per ciascuna iterazione e ciascun nodo del canale aperto e dipendono dalle variabili calcolate all'iterazione precedente. La matrice dei coefficienti che comprende gran parte dei valori di a, b, c, d , ed e viene invertita per risolvere il set di differenti equazioni simultanee per Q ed H alle iterazioni successive.

A2.4 Condizioni al contorno

Condizioni esterne

Le condizioni al contorno sono costituite da una relazione portata-tempo, livello-tempo o livello-portata (scala di deflusso). Al fine di una corretta risoluzione delle equazioni (stabilità di calcolo) risultano più significative le seguenti condizioni:

- idrogramma delle portate a monte e curva dei livelli a valle
- idrogramma delle portate a monte e scala di deflusso a valle

Condizioni interne

Nello schema monodimensionale di un corso d'acqua i singoli tratti sono separati da condizioni interne che possono essere sezioni di controllo, serbatoi, perdite concentrate o nodi (biforcazioni o confluenze).

Tali condizioni impongono la determinazione di una relazione tra livelli e portate.

Sezioni di controllo

Una gran varietà di strutture può essere usata come sezione di controllo in canali aperti, ciascuna delle quali impone una differente relazione tra portata e livello. Per il moto a pelo libero la forma generale dell'equazione risulta:

$$Q = a \cdot h^b$$

dove:

h è la profondità dell'acqua

a è un coefficiente dipendente dal tipo di sezione di controllo (structure)

b è un coefficiente generalmente maggiore o uguale a 1.5 per gli stramazzi e maggiore o uguale a 0.5 per efflusso sotto luci a battente

InfoWorks è in grado di modellare una serie di tipologie di stramazzo usando equazioni empiriche o semiempiriche ricavate dalla letteratura. Tali strutture possono essere simulate nelle condizioni di assenza di portata (es. paratoia chiusa), oppure con flusso libero o rigurgitato.

La paratoia mobile può essere simulata per diverse condizioni di flusso come quelle di stramazzo, quando è totalmente chiusa e sormontabile dall'acqua, o di luce di fondo con efflusso libero o rigurgitato quando è parzialmente aperta, o per la combinazione di entrambe le condizioni. Il programma consente di regolare automaticamente l'apertura di una paratoia durante la simulazione nei modi seguenti:

- secondo una funzione del tempo prestabilita;
- in funzione dei livelli del pelo libero a monte o a valle.

I tipi di paratoia mobile disponibili in InfoWorks sono quelle verticali o radiali.

Il modello consente inoltre di impostare per le sezioni di controllo una generica scala di deflusso al di fuori delle equazioni standard associate ad una determinata struttura.

Serbatoi

I serbatoi sono definiti come aree più o meno vaste di immagazzinamento ove la superficie dell'acqua risulta orizzontale, senza alcun effetto dinamico.

Il calcolo delle portate entranti e uscenti è legato alla variazione del carico piezometrico come segue (in forma semplificata):

$$\frac{h_{new} - h_{old}}{Dt} = \frac{Q_{net}}{A}$$

Con h_{new} e h_{old} livelli negli istanti successivo e precedente, Dt passo temporale, Q_{net} differenza tra portata entrante e portata uscente e A area del serbatoio.

Il modulo serbatoio unito alla modalità di deflusso laterale consentono la schematizzazione e la risoluzione di sistemi naturali complessi con funzionamento a pelo libero.

Perdite localizzate

Le perdite di carico concentrate causate da una repentina variazione delle condizioni geometriche quali ad esempio un brusco restringimento o allargamento delle sezioni di deflusso sono schematizzate mediante l'applicazione dell'equazione di Bernoulli che lega le perdite al carico cinetico di monte:

$$DH = k \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

dove k è un coefficiente empirico funzione del tipo di variazione.

I ponti sono simulati usando il metodo dell'US Bureau of Public Road (US BPR Bridge) oppure l'Arch Bridge Method sviluppato da HR Wallingford.

Nodi (biforcazioni e confluenze)

In InfoWorks i nodi (junctions) vengono risolti imponendo l'uguaglianza dei carichi e la conservazione della massa (equilibrio tra portate entranti e uscenti) applicando la legge di Kirchhoff alle portate.

A3. APPROCCIO NUMERICO DELLA COMPONENTE 2D

Le principali caratteristiche della componente 2D sono:

- formulazione del volume limitato (finite volume)
- risoluzione numerica basata sullo schema di Godunov e sulla soluzione di Riemann (Shockcapturing scheme)
- uso di una maglia non strutturata (unstructured mesh)

A3.1 Equazioni di governo

Il modello usato per la rappresentazione matematica del flusso 2D è basato sull'equazione delle acque basse (Shallow Water Equation), relativa cioè all'altezza media che si ricava dalle equazioni di Navier – Stokes:

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

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

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

Dove:

h *altezza dell'acqua*

u e v *velocità nelle direzioni x e y*

$S_{0,x}$ e $S_{0,y}$ *pendenze dell'alveo nelle direzioni x e y*

$S_{f,x}$ e $S_{f,y}$ *gli attriti nelle direzioni x e y*

q_{1D} *portata per unità di area*

u_{1D} e v_{1D} *componenti di velocità della portata q_{1D} nelle direzioni x e y*

Tale formulazione dell'equazione è discretizzata utilizzando un sistema di primo ordine esplicito del volume finito.

La gestione della cella bagnata ed asciutta è eseguita utilizzando come criterio una profondità di soglia ed impostando la velocità a zero se la profondità ricade sotto tale valore di soglia.

Tale criterio evita la generazione di elevate velocità artificiali in aree bagnate e/o asciutte.

Il valore di default per la profondità di soglia è 1mm.

Questo algoritmo può essere utilizzato teoricamente sia con maglie strutturate (rettangolari) che non strutturate (triangolari) ed è adatto per rappresentare flussi rapidamente variabili, nonché correnti veloci e lente.

In InfoWorks si utilizzano le maglie non strutturate perché sono molto più flessibili e di facile utilizzo quando si vogliono rappresentare forme e ostacoli complessi presenti nel dominio.

La descrizione di un flusso localizzato in ambito urbano è ottenuta senza modificare il modello matematico che è sempre basato sulla risoluzione dell'equazioni in acqua bassa (SWE).

A3.2 Produzione della maglia 2D

All'interno del software sono presenti tutti gli strumenti necessari per costruire le magliature dei domini 2D da simulare.

Ogni maglia, di forma triangolare, costituisce l'unità del calcolo bidimensionale.

Una volta creato il dominio 2D di calcolo, è possibile assegnare i seguenti parametri relativi alla maglia:

- *Area (m^2)*: l'area del poligono viene calcolata automaticamente sulla base della geometria definita in planimetria.
- *Massima Area Triangolo (Maximum Triangle Area)*: questo valore molto importante definisce la superficie massima che può assumere ogni singola maglia triangolare durante il processo automatico di magliatura (diminuendo questo valore si infittisce la magliatura).
- *Area minima elementi (Minimum Element Area)*: durante la simulazione, per evitare un inutile appesantimento del calcolo, vengono aggregati in un'unica cella di calcolo gli elementi triangolari contigui di area molto piccola (fino a che la somma delle aree dei triangoli aggregati non raggiunge quella indicata in questo campo).
- *Magliatura dipendente dal terreno*: consente di creare una magliatura nella quale, all'interno di ogni triangolo, la variazione di quota tra i tre vertici non superi un valore definito dall'utente. Utilizzando questa opzione è possibile

infittire la magliatura in zone nelle quali si hanno notevoli pendenze del terreno ed allargarla in zone pianeggianti.

- *Massima variazione altezza (m)*: Consente all'utente di specificare la massima variazione di quota consentita tra i vertici dei triangoli che verranno generati nel processo di magliatura.
- *Angolo Minimo (Minimum Angle)*: durante il processo di magliatura evita la creazione di triangoli di forma molto irregolare e cunei troppo stretti.
- *Scabrezza Manning (Roughness)*: la scabrezza è attribuita a tutti triangoli che vengono creati durante il processo di magliatura. Il programma consente di modificare localmente tale valore generando delle zone di magliatura a differente scabrezza.

Si possono prevedere diversi gradi di dettaglio per varie zone con opportuni raffinamenti del dominio, impostare diverse zone di scabrezza, fissare delle breakline, definire ostacoli poligonali e lineari (edifici, muri ecc).

L'effetto della presenza di edifici o ostacoli è simulata mediante l'introduzione di pareti impermeabili o porose che richiede una precisa calibrazione della rete in ambiente urbano.

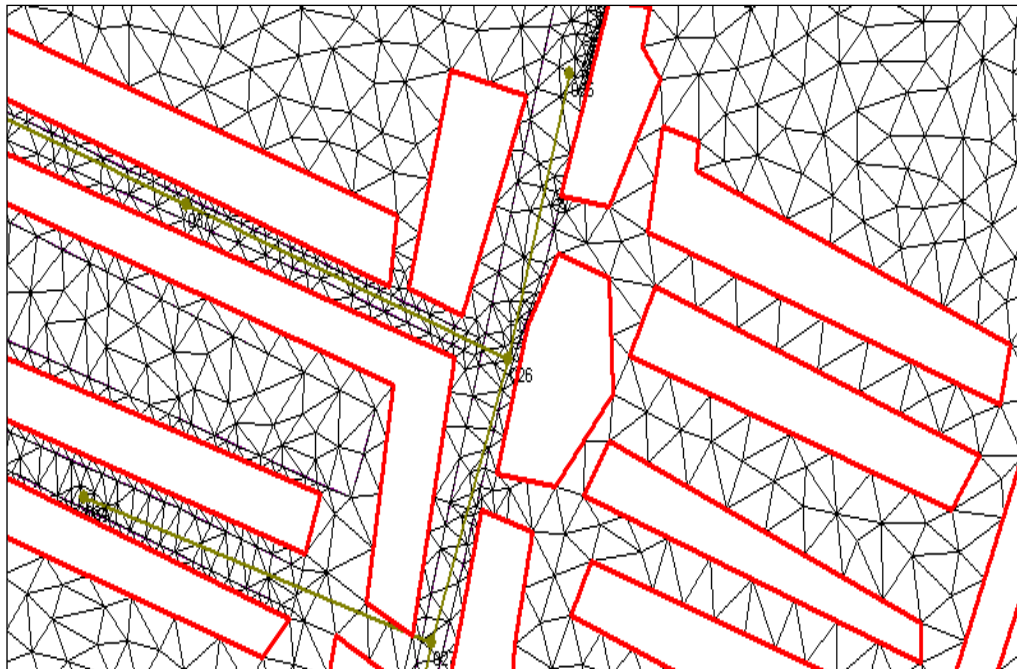


Fig. A2.1 Esempio di maglia non strutturata con edifici in ambito urbano

All'interno del dominio di magliatura, il software permette di considerare eventuali aree a maggiore o minore capacità di invaso dei blocchi introducendo il concetto di

porosità degli edifici ossia il fatto che le aree occupate dagli edifici assorbano o meno parte dei volumi esondati durante il processo di allagamento.

A3.3 Condizioni al contorno e parametri di simulazione

Condizioni al contorno della maglia

Le condizioni al contorno sono costituite da input idraulico-idrologico (idrogramma, ietogramma) in ingresso al sistema e da condizioni sul perimetro del dominio di calcolo.

In particolare le condizioni al contorno sul perimetro del dominio di calcolo sono le seguenti:

- *Vertical wall*: indica una barriera verticale impermeabile infinitamente alta dove non è presente flusso d'acqua né in ingresso né in uscita dal dominio 2D. Questa è l'unica opzione che trattiene l'acqua all'interno del poligono 2D qualora in simulazione si determini presenza d'acqua al suo perimetro.
- *Critical condition*: presenta due possibilità: se il livello dell'acqua nell'elemento di confine del poligono 2D è superiore al livello del segmento che si affaccia sul confine, la portata in uscita dal poligono viene calcolata utilizzando l'equazione di una soglia a parete spessa senza perdite di energia; se il livello dell'acqua nell'elemento di confine è inferiore al livello di facciata del segmento di confine, questo è considerato un muro verticale impermeabile;
- *Supercritical condition*: presenta due possibilità: se la portata nell'elemento di confine è supercritica ($Froude > 1$) e diretta verso l'esterno del poligono, la portata uscente dal poligono viene considerata supercritica (veloce) e calcolata utilizzando altezza idrica e velocità dell'elemento di confine, indipendentemente dalla quota segmento di confine; se le condizioni del flusso non sono supercritiche o il flusso è diretto verso l'interno del poligono, il confine viene considerato un muro verticale impermeabile. Questa opzione è utile nelle aree in cui è noto che il flusso è uscente dal poligono 2D senza alcun effetto di rigurgito all'interno del poligono stesso;
- *Dry*: prevede che il confine del poligono sia considerato come circondato da una fossa senza fondo, l'acqua che raggiunge la sponda del poligono esce dal poligono e viene persa dalla simulazione senza alcuna considerazione idraulica;
- *Normal condition*: si assume che la pendenza del terreno bilanci le forze d'attrito (flusso normale o uniforme). L'altezza e la velocità vengono mantenute costanti quando l'acqua raggiunge il confine, in modo che l'acqua possa fluire al di fuori del poligono senza perdite di carico.

Parametri di simulazione della maglia

Il software consente la modifica dei seguenti parametri della simulazione 2D:

- *Timestep*: definisce il passo temporale di integrazione utilizzato durante il calcolo.
- *Moltiplicatore del timestep ordinario*: è un moltiplicatore del timestep che consente di definire il timestep di salvataggio dei risultati. E' consigliato non utilizzare timestep di salvataggio molto ridotti al fine di ridurre le dimensioni del file dei risultati.
- *Durata simulazione*: consente all'utente di decidere quanto far durare la simulazione.
- *Depth*: rappresenta la soglia che discrimina una maglia triangolare asciutta da una bagnata. Gli elementi della magliatura con un'altezza d'acqua inferiore a questo valore vengono considerati asciutti e un'altezza pari a zero viene restituita come risultato. Negli elementi con altezza d'acqua inferiore a questa soglia viene considerata solamente la conservazione della massa. Il valore tipico per questo campo è di 0.001 m.
- *Momentum*: rappresenta la soglia utilizzata per determinare se considerare o meno il momento in una maglia triangolare. Il moto dell'acqua non viene calcolato per gli elementi della magliatura in cui l'altezza dell'acqua è al di sotto di questo valore; solo la conservazione della massa viene considerata in questo caso. Valori tipici per questo campo sono 0.001 - 0.01 m, il valore di default è 0.001 m.
- *Velocity*: per le maglie triangolari in cui la velocità calcolata dell'acqua risulta inferiore a questo valore, viene impostata una velocità pari a zero per il calcolo del momento. Il valore tipico per questo campo è 0 m/s.
- *Timestep Stability Control*: garantisce che il timestep interno utilizzato dal motore di calcolo 2D ricada entro il range di stabilità fornito dalla condizione di Courant Friedrichs Lewy (CFL). Sono validi valori compresi tra 0 e 1; valore tipico 0.95.
- *Maximum Velocity*: soglia di velocità che limita le velocità che possono essere raggiunte in una maglia durante una simulazione 2D. Per gli elementi della magliatura in cui la velocità calcolata risulta superiore a questo valore, verrà impostata una velocità pari alla massima qui specificata. Questo aiuta a ridurre eventuali instabilità dovute alle alte velocità corrispondenti ad altezze d'acqua ridotte, il che rappresenta una situazione non realistica. Un valore tipico per questo campo è 10 m/s.

- *Theta*: rappresenta un fattore di peso per il parametro semi-implicito. Attribuisce un peso alle parti esplicite e semi-implicite dello schema numerico. Al crescere di questo valore, aumenta il peso dato alla parte semi-implicita. Sono validi valori compresi tra 0 e 1; valore tipico 0.9
- *Ignore rain falling on dry elements*: ignora la pioggia che cade sugli elementi asciutti della magliatura; si utilizza per rendere più rapida la simulazione quando vengono utilizzati poligoni di pioggia (2D rainfall polygons).
- *Adjust element ground levels adjacent to spills*: modifica automaticamente la quota delle maglie triangolari adiacenti agli spill, dove necessario; si utilizza per evitare le instabilità che si verificano quando la quota degli spill risulta inferiore alla quota delle maglie su cui gli spill insistono.

A4. INTERAZIONE DELLA COMPONENTE 1D-2D

Il modello di simulazione consente un immediato collegamento di diverse componenti di modello mono e bidimensionale. Si possono utilizzare per esempio:

- *linee spondali*: rappresentano un confine ideale tra l'alveo inciso modellato con elementi 1D e la golena rappresentata da un dominio 2D, le linee spondali vengono rappresentate con delle polilinee per le quali viene definita una quota Z variabile sul suo percorso. Le linee spondali sono utilizzate essenzialmente come sfiori laterali tra alveo inciso e zona di golena 2D.
- *sfiori frontali*: si utilizzano quando si desidera interrompere un modello 1D di un fiume e trasferire tutto l'idrogramma di portata sul dominio 2D (o viceversa).
- *nodi*: sono degli elementi puntiformi dove può avvenire lo scambio di portata tra 1D e 2D, per esempio questa tecnica è appropriata quando di rappresentano le esondazioni provenienti dai pozzetti di fognatura su un dominio bidimensionale.

A5. INTERFACCIA DEL SOFTWARE

InfoWorks ICM ha un'interfaccia di ultima generazione in grado di interagire con diversi programmi e fonti disponibili sul mercato.

In tal modo si riescono a importare ed integrare dati provenienti da vari formati per costituire un modello geometrico del sistema da studiare.

In particolare, il software supporta:

- Dati in formato AutoCAD (2D e 3D)
- Dati in formato TIN di ArcView
- Dati in formato shape (SHP) o Geodatabase
- Rilievi topografici con coordinate x,y e z
- Dati in formato tabulare (XLS, ASC, TXT e altri)
- Dati in formato Database (Access, Oracle e altri)
- Dati in formato HEC-RAS

InfoWorks ICM sfrutta un'architettura basata su un Database centralizzato dove vengono salvati tutti i progetti. Il sistema gestisce accessi multipli, anche contestuali.

APPENDICE 3

**Calcolo dell'idrogramma di piena
secondo i criteri della DGR 357/2008**

Di seguito si riporta una descrizione delle procedure per la determinazione dell'idrogramma corrispondente all'evento tipico secondo le procedure previste dalla linee guida DGR 3571/2008 *Criteri di verifica e valutazione delle portate al colmo e degli idrogrammi di piena nei bacini idrografici liguri*.

La metodologia di calcolo fa riferimento al *metodo indiretto dell'evento idrometeorologico critico* finalizzata alla valutazione dell'idrogramma di riferimento condizionato dal valore della portata al colmo di progetto, assunta, come da normativa, pari al valore della portata indice.

Il metodo di valutazione dell'idrogramma di riferimento consiste in sintesi nel ricercare l'idrogramma di piena equivalente che fornisca la portata massima al colmo pari alla portata indice.

Tale problema è risolvibile a partire dalle curve di probabilità pluviometrica dell'area in esame nella forma $h(T) = a(T) \cdot t^n$ nell'ipotesi di invarianza di scala, per cui si assume che l'esponente caratteristico n rappresenti l'impronta climatica degli eventi pluviali estremi dell'area in esame.

L'ipotesi implica che la portata T -ennale di progetto $Q(T)$ sia prodotta da una precipitazione $h = a(*) \cdot t^n$ dove n è l'esponente caratteristico del bacino in esame, $a(*)$ rappresenta il valore di a che con il metodo dell'evento critico produce una portata pari a $Q(T)$ e che, in genere, è differente dal valore di $a(T)$ proprio della linea segnalatrice T -ennale.

Nella formulazione del metodo a è esprimibile come $a(T) = w_T a_i$, dove w_T è il fattore di crescita funzione del tempo di ritorno (T) e a_i è un valore costante caratteristico della stazione pluviometrica considerata corrispondente al valore indice di precipitazione (*pioggia indice*).

Nell'Appendice II della DGR sopra menzionata sono riportati il valore della pioggia indice a_i ed i parametri caratteristici di una serie di stazioni della Regione Liguria per il versante Padano e quello tirrenico, necessari per la determinazione del fattore di crescita w_T .

Assunto un modello afflussi-deflussi di riferimento, il problema si riduce alla ricerca di tutte le possibili coppie di valori a e t che producono una portata al colmo $Q(T)$ e, tra queste, la coppia $\{a(*), t_{CR}\}$ che ha il minimo valore di a .

Il modello di trasformazione afflussi-deflussi adottato è costituito da una prima parte di trasformazione della pioggia di progetto in volume specifico di ruscellamento, basato sull'interpretazione Hortoniana (non lineare) del processo di assorbimento e da una

seconda parte caratterizzata da un modello lineare di formazione della piena attraverso la rete idrografica basato sul modello di Nash.

Il calcolo della precipitazione efficace al fine dello scorrimento superficiale è stato effettuato depurando gli ietogrammi precedentemente individuati dalle perdite per infiltrazione e per immagazzinamento nelle depressioni superficiali.

Si è adottato il metodo di depurazione della pioggia noto come *Curve Number* proposto dal Soil Conservation Service basato sul modello Hortoniano di descrizione del fenomeno dell'assorbimento.

Come noto tale procedura consente di calcolare il volume di pioggia defluito nella sezione di chiusura sulla base dell'espressione:

$$h_n = \frac{(h_r - I_a)^2}{h_r - I_a + S}$$

dove $h_n [mm]$ è il volume specifico complessivamente defluito durante l'evento, $h_r [mm]$ è il volume specifico affluito, $S [mm]$ è il potenziale specifico massimo di assorbimento del terreno, cioè il volume immagazzinabile a saturazione nello stesso, mentre $I_a [mm]$ rappresenta la quota parte del volume affluito che si infiltra prima che il deflusso abbia inizio.

La determinazione di S viene effettuata sulla base della relazione:

$$S = 254 \cdot \left(\frac{100}{CN} - 1 \right)$$

Dove CN è un parametro adimensionale variabile da 1 a 100 che esprime la capacità di ritenzione del bacino in funzione del tipo di terreno e dell'uso del suolo.

La sua determinazione è ottenuta in base al grado di umidità del terreno prima dell'evento meteorico esaminato, alla tipologia pedologica e all'uso del suolo.

Il suo valore è compreso tra 0 e 100 ed è diffusamente tabulato specialmente nella letteratura scientifica americana come frutto dell'analisi di molti esempi applicativi.

Nell'applicazione del metodo sono previste tre classi del grado di umidità del terreno in funzione dell'altezza di pioggia caduta nei 5 giorni precedenti l'evento esaminato: molto asciutto (I), standard (II) e molto umido (III).

La classificazione dei tipi di suolo è funzione delle caratteristiche di permeabilità secondo la suddivisione proposta dal Soil Conservation Service che prevede quattro

classi caratterizzate rispettivamente da potenzialità di deflusso scarsa (A), moderatamente bassa (B), moderatamente alta (C) e molto alta (D).

La suddivisione in base al tipo di copertura o uso del suolo comprende invece terreni coltivati con e senza trattamento di conservazione, terreni da pascolo in buone o cattive condizioni, praterie, terreni boscosi o forestati con diverse tipologie di sottobosco, spazi aperti con prati rasati o parchi con diverse percentuali di copertura erbosa, aree commerciali, distretti industriali, aree residenziali, strade, parcheggi ecc.

Quale valore di I_a si è adottata la relazione suggerita dal Soil Conservation Service $I_a = 0.2 \cdot S$.

L'idrogramma unitario è stato calcolato con il modello di Nash che simula il comportamento del bacino con una cascata di n serbatoi posti in serie; l'IUH del modello assume la forma:

$$I(t) = \frac{1}{K \cdot (n-1)!} \cdot \left(\frac{t}{K}\right)^{n-1} \cdot e^{-\frac{t}{K}}$$

dove k è la costante caratteristica dei serbatoi e n il numero degli stessi. Nel caso in esame si è assunto: $n = 3$ e $K = 0.5 \cdot t_c / (n-1)$, con t_c tempo di corrivazione del bacino.

Una volta disponibili gli ietogrammi di progetto e l'idrogramma unitario, sono stati calcolati gli idrogrammi di piena per ciascuna sezione considerata attraverso l'integrale di convoluzione:

$$Q(t) = S \cdot \int_0^t I(t-u) \cdot p(u) \cdot du$$

il quale, noti lo ietogramma di riferimento e l'idrogramma unitario istantaneo del bacino in esame, permette di legare la portata uscente $Q(t)$ all'intensità della pioggia netta $p(t)$.