



## MODELLAZIONE NUMERICA BIDIMENSIONALE DEL TRATTO DI CONFLUENZA FIUMI BORMIDA E TANARO IN COMUNE DI ALESSANDRIA

---

### **Relazione generale**

---



**Idrostudi S.r.l.**

**Ing. Davide Russo**

Trieste, giugno 2010

**Indice:**

PREMESSA .....	3
INTRODUZIONE .....	3
DESCRIZIONE DELLA ZONA DI STUDIO .....	4
MESH DI CALCOLO .....	5
MODELLO NUMERICO .....	9
DEFINIZIONE DELLE CONDIZIONI AL CONTORNO E SIMULAZIONI NUMERICHE .....	10
VALIDAZIONE DEL MODELLO NUMERICO .....	11
SIMULAZIONI NUMERICHE E ANALISI DEI RISULTATI.....	14
CONCLUSIONI.....	19
APPENDICE.....	20
BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE .....	52

APPENDICE: Sezioni

**ALLEGATI:**

Stato di fatto – TR 200 anni Tanaro

Tav. 1.A – Livelli idrici

Tav. 1.B – Livelli idrici

Tav. 1.C – Livelli idrici

Tav. 2.A – Velocità

Tav. 2.B – Velocità

Tav. 2.C – Velocità

Stato di progetto – TR 200 anni Tanaro

Tav. 3.A – Livelli idrici

Tav. 3.B – Livelli idrici

Tav. 3.C – Livelli idrici

Tav. 4.A – Velocità

Tav. 4.B – Velocità

Tav. 4.C – Velocità

Stato di fatto – TR 200 anni Bormida

Tav. 5.A – Livelli idrici

Tav. 5.B – Livelli idrici

Tav. 5.C – Livelli idrici

## Premessa

L'AIPO ha conferito alla società Idrostudi Srl l'incarico di consulenza tecnico-scientifica per la "Modellazione numerica bidimensionale del tratto di confluenza tra i fiumi Bormida e Tanaro in comune di Alessandria" con contratto dd. 11.06.2010 N. Rep. 86.

L'obiettivo del presente lavoro è quello di valutare, attraverso una modellazione numerica di tipo bidimensionale, l'andamento del campo di velocità e la distribuzione dei livelli idrici per portate associate a tempi di ritorno di 200 anni in corrispondenza del nodo idraulico fiumi Tanaro – Bormida. In particolare lo studio si propone di valutare le quote da imporre alle arginature in progetto a difesa della città di Alessandria e di valutare il funzionamento del sistema di argini golenali che caratterizza la zona della confluenza.

La presente relazione espone dunque le procedure adottate, l'analisi dei dati forniti dall'AIPO, le simulazioni numeriche eseguite ed i risultati ottenuti unitamente ad alcuni commenti.

## Introduzione

Il presente lavoro si inserisce nell'ambito degli interventi di ri calibrazione delle arginature in corrispondenza della confluenza dei fiumi Tanaro – Bormida.

L'Autorità di Bacino del Po in relazione all'evento del novembre 1994 ha sottolineato l'inadeguatezza della capacità di portata del nodo idraulico costituito dalla confluenza del fiume Tanaro e Bormida a valle della città di Alessandria.

Gli studi condotti dall'Autorità di Bacino del fiume Po all'indomani del succitato evento alluvionale, che portò in seguito ai cedimenti e sormonti arginali l'allagamento degli abitati in sinistra idraulica e del quartiere degli Orti e della località Albereto in destra idrografica, individuarono diverse condizioni di criticità e rischio idrogeologico.

Il Piano Stralcio delle Fasce Fluviali (adottato dal Comitato istituzionale in data 11/12/1997 ed approvato dal Presidente del Consiglio dei Ministri in data 24/07/1998) ha quindi previsto la definizione di un assetto morfologico ed idraulico di progetto da realizzarsi con diversi interventi, tra i quali la realizzazione di un sistema di arginature a carattere continuo che assicuri il mantenimento della massima capacità di espansione nelle aree golenali.

Ciò premesso, di particolare interesse risulta l'accurata valutazione dei livelli idrici che si instaurano nei fiumi in esame al fine di individuare con maggior precisione le zone caratterizzate da sistemi arginali inadeguati con particolare riferimento alla zona compresa tra la città di Alessandria e la confluenza tra i Fiumi Tanaro e Bormida (Fig. 1).

E' da osservare che i livelli idrici che si instaurano in questa zona risultano fortemente condizionati dal funzionamento idraulico del nodo Tanaro – Bormida, del quale è, pertanto, necessario effettuare uno studio ad hoc che sia in grado di descrivere i fenomeni idrodinamici che si instaurano nella confluenza.

Allo scopo risultano particolarmente utili i modelli numerici di tipo bidimensionale che, in tali condizioni, permettono di ottenere con un certo grado di accuratezza le grandezze idrauliche di interesse in funzione delle condizioni al contorno imposte: portate a monte e livelli a valle.

Attraverso un modello matematico di tipo bidimensionale sono quindi stati valutati i livelli idrici ed il campo di velocità relativi a portate con tempo di ritorno pari a 200 anni sia per il fiume Tanaro che per il Bormida. Lo studio ha consentito, inoltre, di studiare più in dettaglio il funzionamento del nodo idraulico mettendo in evidenza il funzionamento dei diversi ordini di argini golenali.

A completamento dello studio è stata effettuata anche una simulazione che tiene conto delle arginature rialzate al fine di valutare l'eventuale incremento dei livelli idrici indotto dall'intervento.

## Descrizione della zona di studio

Il territorio oggetto del presente studio si estende per circa 4 km a valle della confluenza tra il Fiume Tanaro ed il Fiume Bormida e per circa 8 km a monte su entrambi i corsi d'acqua, in corrispondenza della città di Alessandria. In Fig. 1 è riportata la zona interessata dalla modellazione matematica.

Il tratto di Fiume Tanaro oggetto dello studio presenta le tipiche caratteristiche di un corso d'acqua di pianura, caratterizzato da un andamento monocursale marcatamente meandriforme e da modeste pendenze medie che si attestano nell'ordine dello 0.45 %. Il Fiume Bormida, nel tratto studiato, presenta una pendenza media pari a circa lo 0.6% e si configura con un andamento planimetrico pressoché rettilineo, avendo abbandonato la tendenza meandriforme poco a monte dell'area analizzata.

Il Fiume Tanaro, nella parte iniziale del tratto di studio e, precisamente, in corrispondenza della città di Alessandria, è caratterizzato da un alveo inciso di larghezza variabile, compresa tra i 60 e i 120 m, delimitato da arginature. In questo tratto si osserva anche la presenza di un salto di fondo superiore ai 3 m di altezza, e di tre ponti e precisamente, da monte a valle: il ponte ferroviario, il ponte di via Tiziano Vecellio e il ponte Cittadella. A valle della città, il corso d'acqua, delimitato in sinistra idraulica dal rilevato autostradale ed in destra da quello della SR 10, è caratterizzato dalla presenza di zone di espansione golenale di larghezza variabile, adibite per lo più ad uso agricolo.

A valle del centro abitato di Alessandria si osservano tre ulteriori attraversamenti: il ponte della strada regionale SR 10, il ponte della Strada Carlo Forlanini e il ponte dell'autostrada A21.

Sul Fiume Bormida, all'altezza di Alessandria, è presente il ponte della strada regionale SR10 e più a valle quello dell'autostrada A21. Anche il Bormida si presenta con un alveo di magra e delle zone di espansione golenale di larghezza variabile adibite per lo più ad uso agricolo, delimitate da arginature sia in destra che in sinistra idraulica. In questo tratto la sezione del Bormida presenta una larghezza variabile tra i 50 ed i 100 m circa.

Con particolar riferimento alla zona della confluenza, si osserva la presenza di un sistema di arginature minori all'interno delle zone golenali che ne condizionano le dinamiche di allagamento.

A valle della confluenza il Tanaro continua il suo corso con un andamento meandriforme delimitato da arginature sia in destra che in sinistra.

In Fig. 1 è mostrata la zona di studio e le sezioni di riferimento per la restituzione grafica dei risultati ottenuti con le simulazioni numeriche.

Nella figura sono mostrate inoltre le sezioni che saranno utilizzate per l'analisi dei risultati e per la definizione dei livelli idrici raggiunti con le diverse condizioni al contorno considerate.

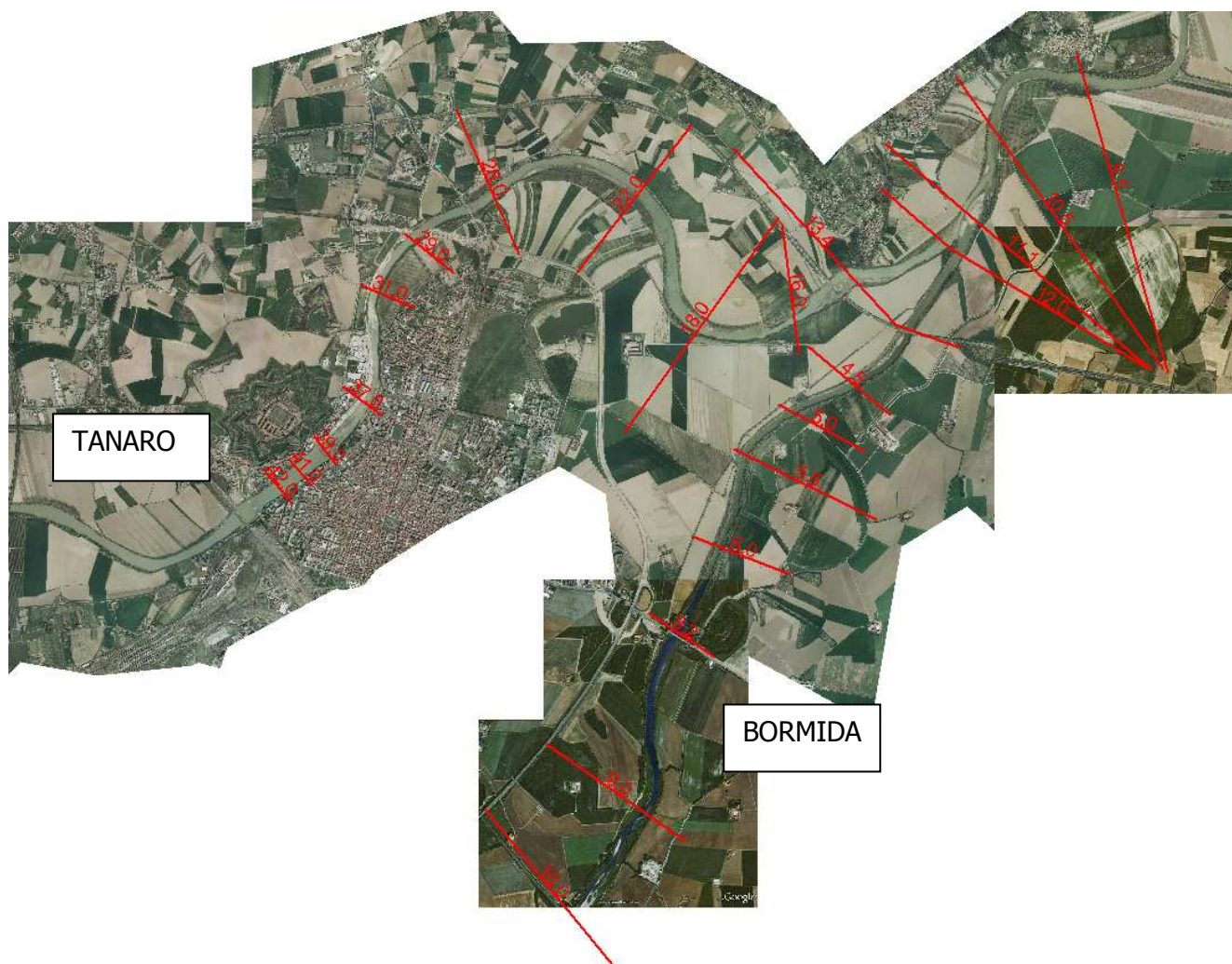


Fig. 1 – Planimetria generale dell'area di studio con indicazione delle sezioni di restituzione dei risultati.

## Mesh di calcolo

L'esecuzione di un modello numerico bidimensionale si basa su una accurata descrizione della geomorfologia della zona interessata.

Nel caso specifico, per descrivere il tratto di fiume oggetto dell'analisi è stato utilizzato un DTM fornito dallo stesso Committente ottenuto da un rilievo laser che ricopriva quasi interamente la zona di interesse. In aggiunta sono stati utilizzati dei rilievi topografici da terra delle arginature e dell'alveo di magra dei due corsi d'acqua al fine di descrivere in modo più accurato il profilo arginale esistente e la morfologia del fondo alveo. Nelle zone non coperte da DTM ci si avvalsi delle sezioni topografiche esistenti integrate per la parte golenale con la carta tecnica regionale del Piemonte.

Va precisato, che le sole sezioni trasversali a disposizione non erano sufficienti a generare una mesh di calcolo tale da permettere un'adeguata descrizione della morfologia dell'alveo; per questo motivo è stato necessario interpolarli in modo opportuno.

In questo modo è stato possibile ottenere una *mesh* ad elementi triangolari a tre nodi con lati di lunghezza variabile tra i 5 m ed i 60-70 m in dipendenza dei gradienti locali plano-altimetrici del fondo alveo e di velocità. Le dimensioni così assegnate permettono una descrizione sufficientemente accurata del campo di velocità e della distribuzione dei tiranti e rendono i risultati indipendenti dalla dimensione della *mesh*.



La *mesh* così definita ed utilizzata nella simulazione numerica è costituita da, mediamente, 32000 nodi e 63000 elementi (Fig. 2).

Al fine di descrivere la scabrezza del fondo, parametro fondamentale per la risoluzione del campo di moto, la geometria è stata suddivisa in diverse zone rappresentanti, rispettivamente, l'alveo di magra e le zone golenali; tali zone sono state individuate con precisione grazie all'utilizzo delle foto aeree



Fig. 2: Mesh di calcolo

In Fig. 3 è mostrata l'area complessiva modellata. Quest'area risulta ben più estesa rispetto all'area di studio. Tale estensione è congruente con le condizioni al contorno da assegnare al modello in modo da rendere la soluzione del modello indipendente dalla malcerta conoscenza del livello idrico da imporre al contorno di valle del modello.



Per questo motivo la condizione al contorno di valle è stata posta ad una distanza pari a circa 3 km dall'area di studio, in modo da rendere indipendente la distribuzione dei livelli idrici nell'area di interesse dalle approssimazioni insite nell'assegnazione dei tiranti idrici lungo la sezione di contorno a valle.

Le sezioni di chiusura di monte lungo i Fiumi Tanaro e Bormida sono state scelte in corrispondenza dell'attraversamento della linea ferroviaria.

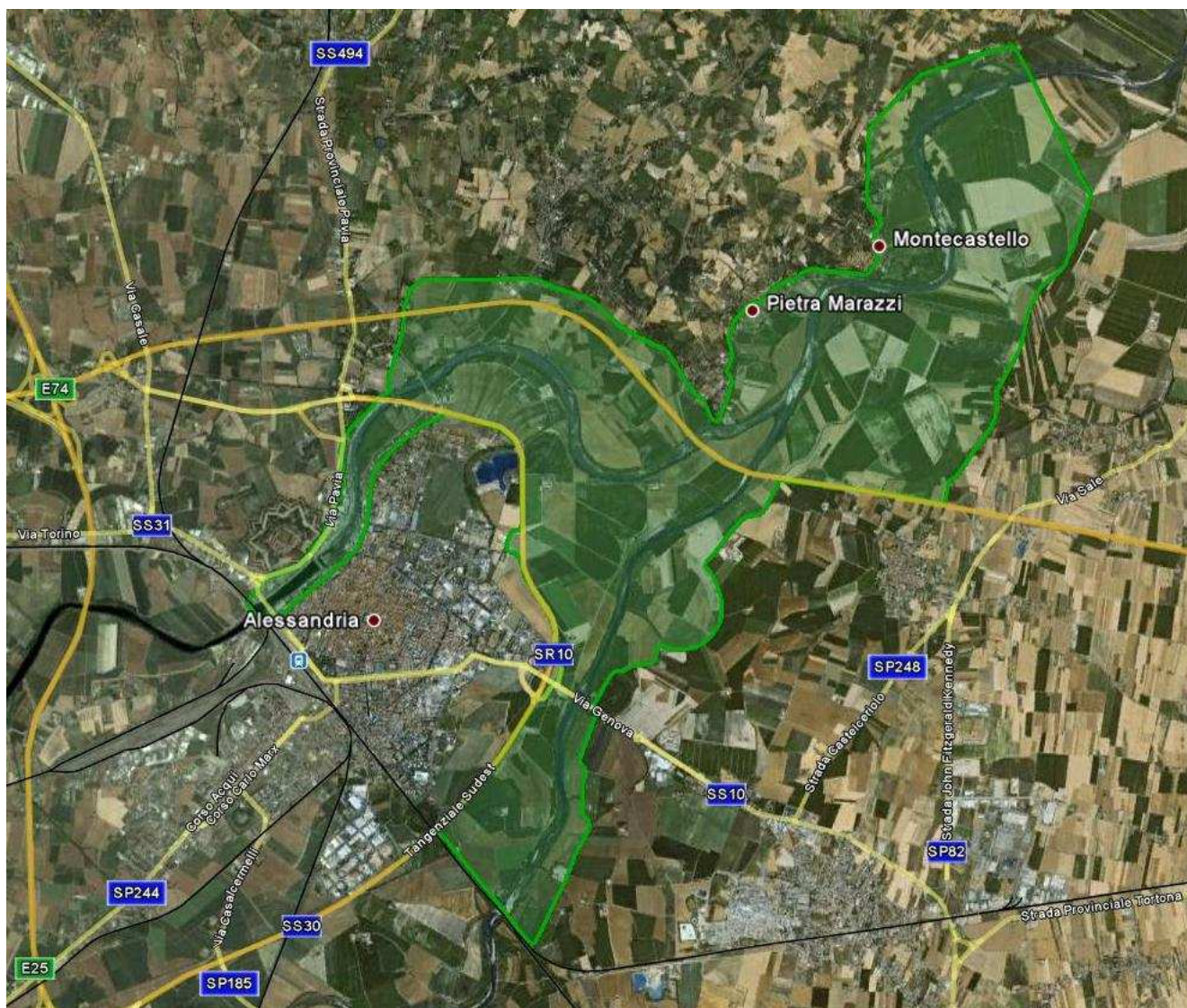


Fig. 3: Inquadramento della zona interessata dalla modellazione numerica bidimensionale

Al fine di valutare gli effetti sui livelli idrici e sulla distribuzione delle velocità degli interventi di ricalibrazione delle arginature, oltre alla mesh rappresentante lo stato di fatto è stata sviluppata quella dello stato di progetto. In particolare, sono state rialzate le arginature in corrispondenza della città di Alessandria sia in destra che in sinistra idraulica, come indicato in Fig. 4, dove sono riportati gli interventi programmati.



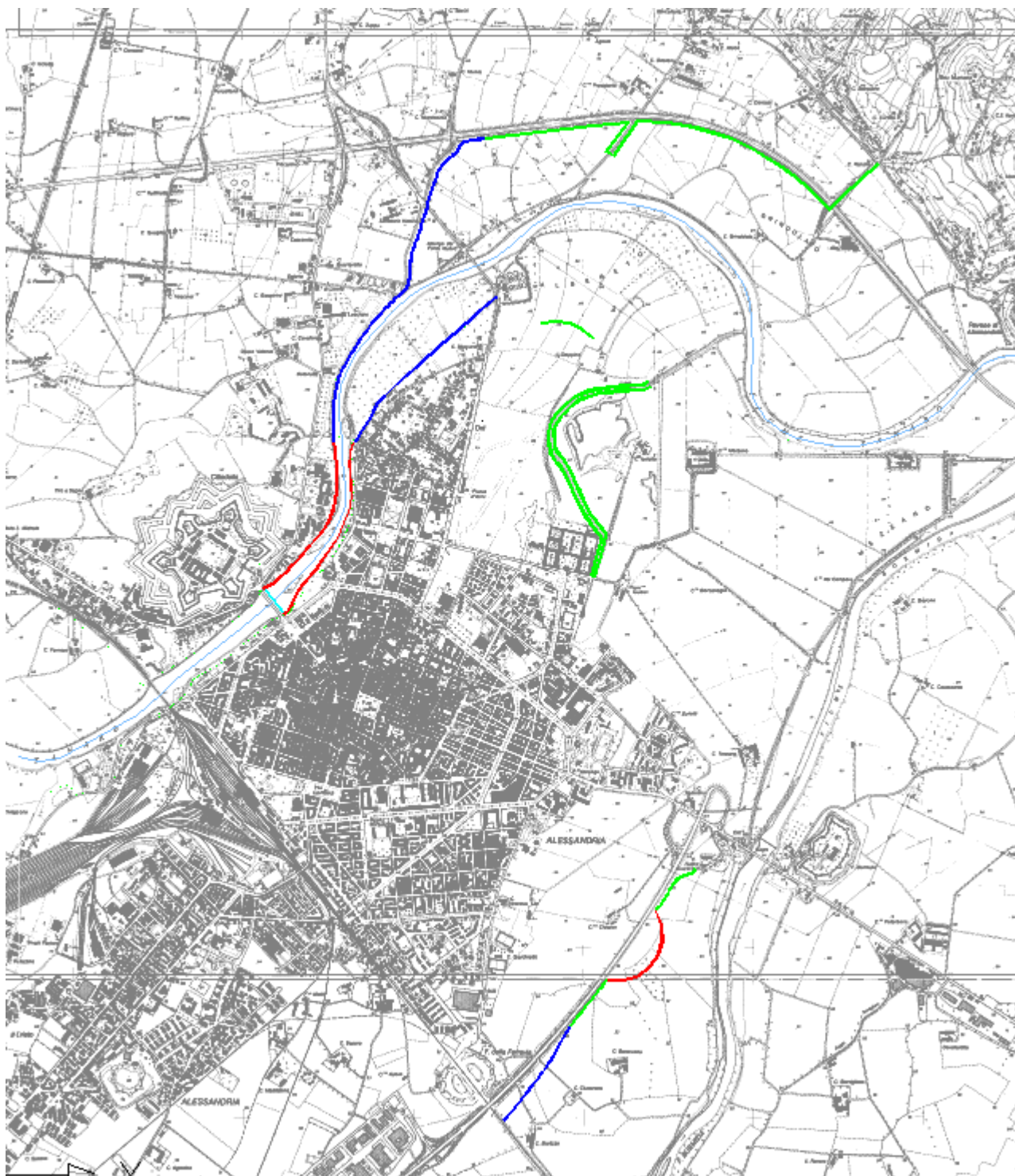


Fig. 4: Zone interessate dall'innalzamento arginale previsto in progetto

## Modello numerico

Il modello numerico utilizzato per valutare il campo di moto è di tipo bidimensionale basato sulla risoluzione delle equazioni di continuità e quantità di moto mediate lungo la verticale ossia:

$$\begin{aligned}\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} &= \frac{1}{\rho h} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} &= \frac{1}{\rho h} \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial x} - \frac{\tau_{by}}{\rho h}\end{aligned}\quad (\text{Eq. 1})$$

dove:  $h$  rappresenta il tirante,  $u$  e  $v$  le componenti della velocità lungo le direzioni  $x$  ed  $y$ ,  $t$  il tempo,  $g$  l'accelerazione di gravità,  $\eta$  la quota del livello idrico,  $\rho$  la densità,  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{yy}$ ,  $\tau_{xy}$  e  $\tau_{yx}$  gli tensioni di *Reynolds* mentre  $\tau_{bx}$  e  $\tau_{by}$  rappresentano le tensioni tangenziali di parete

Le tensioni tangenziali alla parete sono calcolate nel seguente modo:

$$\begin{aligned}\tau_{bx} &= \rho c_f u |\vec{V}| \\ \tau_{by} &= \rho c_f v |\vec{V}|\end{aligned}\quad (\text{Eq.2})$$

dove:  $|\vec{V}|$  è il modulo del vettore velocità,  $c_f = g n^2 / h^{1/3}$  e  $n$  il numero di *Manning* rappresentante la scabrezza del fondo.

Le tensioni di *Reynolds*, invece, sono modellate adottando l'ipotesi di *Boussinesq*, ossia:

$$\begin{aligned}\tau_{xx} &= 2\rho \nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \\ \tau_{yx} = \tau_{xy} &= \rho \nu_t \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \tau_{yy} &= 2\rho \nu_t \frac{\partial v}{\partial y}\end{aligned}\quad (\text{Eq.3})$$

dove  $\nu_t$  rappresenta la viscosità turbolenta.

Il sistema di equazioni così descritto è risolto mediante la tecnica degli elementi finiti mediante discretizzazione del dominio di calcolo con elementi triangolari opportune dimensioni variabili nel campo di moto, in grado di interpretare le caratteristiche peculiari del campo di moto stesso.

La chiusura del sistema di equazioni (Eq.1) necessita l'assegnazione di due insiemi di parametri: la viscosità turbolenta ( $\nu_t$ ) e la scabrezza del fondo ( $n$  di *Manning*).

È evidente l'importanza di una corretta assegnazione di tali parametri per una accurata rappresentazione del campo di moto; a tale merito diversi sono i lavori presenti in letteratura, fra i quali si citano: Zanichelli, Caroni e Fiorotto, *J.Hydr.Eng.*, 2002, Rodi, *Turbulence models and their application in hydraulics—A state of the art review*, IAHR, 1993, Shiono e Knight, *JFM*, 1991, Magistrato per il Po, Studio SIMPO, 1980, King e Norton, *Finite elements in water resources II*, 1978 e Chow, *Open channel hydraulics*, 1959.

## Definizione delle condizioni al contorno e simulazioni numeriche

Le simulazioni numeriche sono state condotte imponendo in corrispondenza delle due sezioni di chiusura a monte le portate in ingresso sul Fiume Tanaro e sul Fiume Bormida.

In tabella 1 sono riportate le due diverse condizioni al contorno imposte a monte, espresse in termini di portate.

	TR200 (Tanaro) [m <sup>3</sup> /s]	TR 200 (Bormida) [m <sup>3</sup> /s]
F. Tanaro (monte confluenza)	3500	3640
F. Bormida (monte confluenza)	1900	1760
F. Tanaro (valle confluenza)	5400	5400

Tabella 1: Portate utilizzate come condizioni al contorno a monte

Le portate relative al TR 200 (Tanaro) sono state desunte dallo studio realizzato dall'Università di Genova secondo il quale la portata due centennale sul Tanaro a monte della confluenza è pari a 3500 m<sup>3</sup>/s mentre a valle della confluenza 5400 m<sup>3</sup>/s.

Le portate relative al TR 200 (Bormida) sono state invece desunte dallo studio dell'Autorità di Bacino del Po secondo il quale a monte della confluenza si hanno circa 3640 m<sup>3</sup>/s ed a valle sempre 5400 m<sup>3</sup>/s.

Nell'ambito del presente studio sono quindi state effettuate tre simulazioni numeriche differenti: due sono state effettuate con la geometria dello stato di fatto per entrambe le condizioni di portata indicate nella tabella 1 mentre la terza è stata effettuata con la geometria dello stato di progetto solamente per la prima condizione di portata mostrata in tabella 1.

La condizione al contorno di valle è stata desunta da un modello numerico monodimensionale che si estende fino alla confluenza con il Fiume Po dove è disponibile una scala di deflusso utilizzata come condizione al contorno.

Al fine di rendere indipendente la distribuzione dei livelli idrici nell'area di interesse dalle approssimazioni insite nell'assegnazione dei tiranti idrici lungo la sezione di chiusura a valle, la condizione al contorno di valle è stata posta ad una distanza pari a circa 3-4 km dall'inizio dell'area di studio.

Con l'obiettivo di valutare la distribuzione dei livelli idrici e della velocità, sono state eseguite delle simulazioni numeriche in condizioni di moto permanente. Tale scelta, in favore di sicurezza con riferimento ai massimi tiranti idrici, trova una giustificazione nel fatto che i tempi di persistenza delle onde di piena risultano mediamente superiori al tempo di propagazione.

La Fig. 5 riportata l'andamento nel tempo dei livelli registrati sul Tanaro presso Montecastello in occasione dell'evento di piena verificatosi nell'aprile del 2009. Dall'analisi della figura si osserva che la persistenza del colmo si può stimare nell'ordine del giorno. Il tempo di propagazione dell'onda di piena lungo il tratto di interesse compreso tra la città di Alessandria e di Montecastello, con una lunghezza complessiva misurata lungo l'asta del fiume pari a circa 11 km, risulta invece dell'ordine dell'ora.

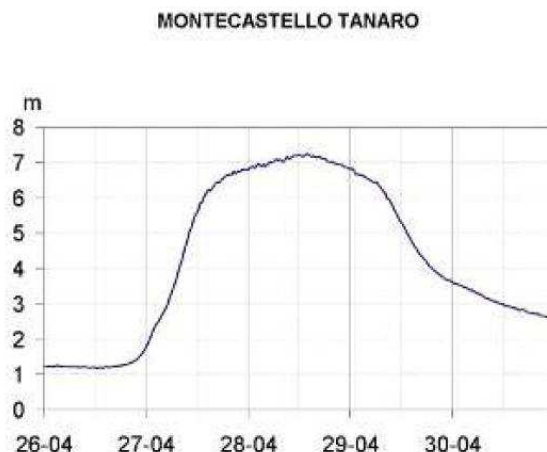


Fig. 5: Livelli registrati presso la stazione idrometrica di Montecastello lungo il Tanaro durante l'evento di aprile 2009

Le simulazioni in condizioni di moto permanente, infine, consentono di svincolarsi da una particolare forma di onda di piena ottenendo, in favore di sicurezza, delle valutazioni con valenza più generale, non vincolate da un particolare evento di piena.

### Validazione del modello numerico

La validazione del modello numerico implementato è stata effettuata sulla base dell'evento verificatosi nell'aprile del 2009. In questa occasione sono state effettuate delle picchettature dei livelli raggiunti nella zona di interesse.

L'attendibilità dei risultati di un modello numerico è, in generale, strettamente correlata ad una corretta stima dei coefficienti di taratura. Nel caso specifico di primaria importanza risulta la valutazione del coefficiente di scabrezza la cui valutazione non può essere fatta con il solo riferimento allo stato dell'alveo (granulometria, stato del suolo, vegetazione, ostacoli, ecc), ma deve anche considerare le dissipazioni legate a strutture idrodinamiche coerenti generate da variazioni piano altimetriche del corso d'acqua di più difficile definizione.

La valutazione del coefficiente di scabrezza da adottare è stata basata inizialmente facendo riferimento all'analisi granulometrica effettuata dai tecnici dell'AIPO stessa nella zona di interesse. L'analisi ha messo in evidenza i valori riportati nella tabella 2.

sez.	D <sub>90</sub> (mm)	D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>16</sub> (mm)
29	29.8	15.1	0.5
9	41.1	0.9	0.3

Tabella 2: Analisi granulometrica



Sulla base dei valori riportati una prima stima del coefficiente di scabrezza (secondo Gaukler – Strickler) può essere ottenuta mediante la nota formulazione:

$$K_s = 26/d_{90}^{1/6}$$

dalla quale, assumendo un  $d_{90}$  pari a 0.041 m, si ottiene un  $k_s$  pari a  $44 \text{ m}^{1/3} / \text{s}$ .

Come già osservato, nella valutazione del coefficiente di scabrezza e' necessario considerare anche tutti quei fenomeni localizzati legati alla geometria dell'alveo responsabili della dissipazione di energia che un modello 2 D non è in grado di simulare.

Per questo motivo, è stato assunto, cautelativamente, un coefficiente di scabrezza all'interno dell'alveo di magra pari a  $35 \text{ m}^{1/3} / \text{s}$ .

Dall'analisi delle orto foto disponibili si desume che le zone golenali sono caratterizzate per lo più dalla presenza di campi coltivati intervallati da abitazioni, strade campestri, canali, ecc..Di conseguenza, in questo caso, sono stati assunti valori di scabrezza variabili tra i 10 ed i  $25 \text{ m}^{1/3} / \text{s}$  a seconda delle caratteristiche delle singole zone.

La validazione del modello numerico è stata quindi effettuata mediante confronto tra il livelli misurati e quelli calcolati per il medesimo evento.

Nelle Fig. 6 e 7 sono riportati in rosso i livelli idrici misurati durante l'evento verificatosi nell'aprile del 2009 mentre in violetto sono riportati i livelli idrici calcolati per il medesimo evento.

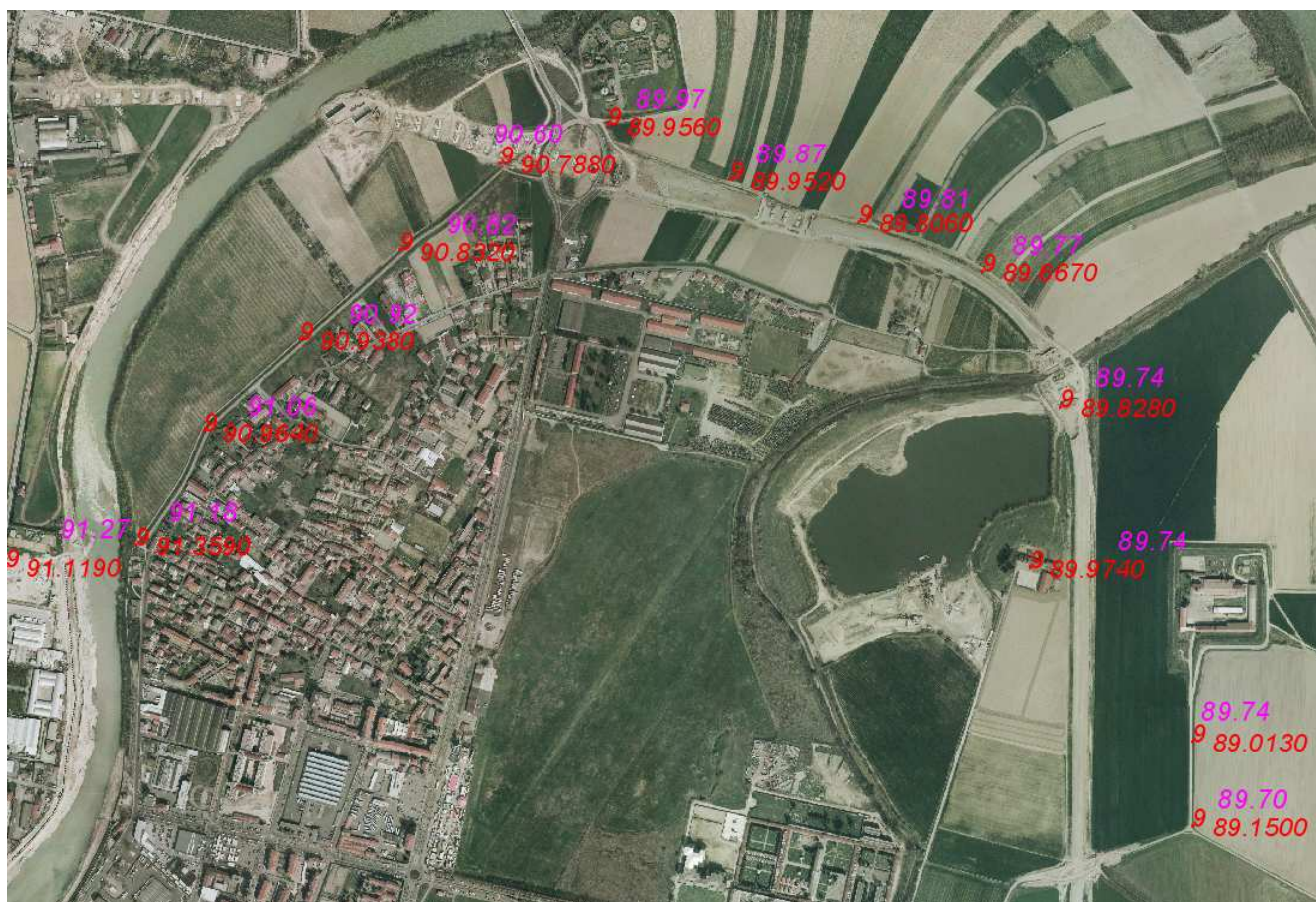


Fig. 6: Livelli misurati lungo il Tanaro durante l'evento di piena dell'aprile 2009

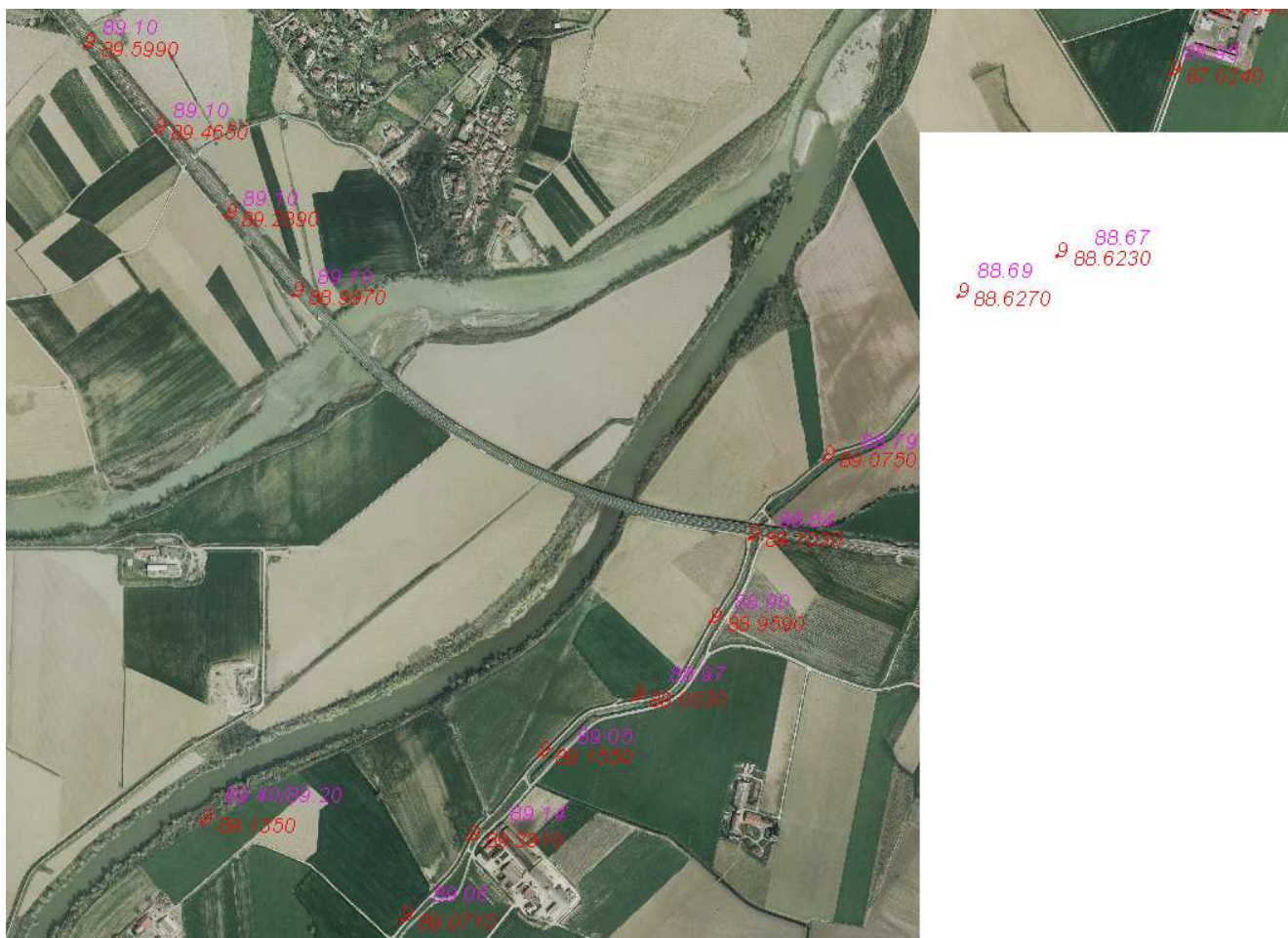


Fig. 7: Livelli misurati lungo il Bormida durante l'evento di piena dell'aprile 2009

Dall'analisi delle figure si evidenzia come vi sia una buona corrispondenza tra i valori misurati e quelli calcolati. Si osservano infatti differenze contenute nell'ordine dei 10-20 cm, accettabili considerando sia le inevitabili incertezze che si hanno nei picchettamenti dei livelli di piena sia le approssimazioni che è necessario introdurre nei modelli numerici.



## Simulazioni numeriche e analisi dei risultati

Costruita la mesh di calcolo, definiti i parametri ed imposte le condizioni al contorno si sono integrate, numericamente, le eq. 1 - 3.

Complessivamente sono state condotte tre simulazioni distinte. Due sono caratterizzate da identiche condizioni al contorno ed in particolare la TR 200 (Tanaro), (vedi Tabella 1) ma geometrie diverse, corrispondenti una allo stato di fatto ed una a quello di progetto. La terza simulazione ha riguardato la condizione dello stato di fatto ma con la condizione al contorno TR 200 (Bormida), (vedi Tabella 1).

I risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche sono riportati nelle tavole grafiche allegate: in esse sono rappresentati rispettivamente i livelli idrici e le velocità nelle zone oggetto dello studio.

Per una maggior comprensione del fenomeno, specialmente ai fini della corretta progettazione delle opere, si riporta l'andamento dei livelli idrici e delle velocità anche in corrispondenza delle sezioni indicate nella planimetria riportata in Fig. 1; queste permettono di definire con maggior dettaglio il grado di insufficienza delle arginature.

### Stato di fatto: piena Tr 200 (Tanaro)

Attraverso la simulazione nelle condizioni attuali del corso d'acqua, è stato possibile sia mettere in evidenza i punti di criticità esistenti che valutare in prima approssimazione, mediante confronto, gli effetti degli interventi progettuali.

I livelli idrici che si instaurano lungo il Fiume Tanaro in corrispondenza della città di Alessandria superano il livello delle arginature sia in destra che in sinistra idraulica come messo in evidenza in Fig. 8, dove sono ben messe in evidenza le zone soggette ad allagamento che interessano la città di Alessandria stessa.



Fig. 7: Livelli misurati lungo il Fiume Bormida durante l'evento di piena dell'aprile 2009

Le zone di sormonto arginale è ben messa in evidenza nelle sezioni sotto riportate, con particolare riferimento alle sezioni 39-37-31-29 (vedi Allegato).

Procedendo verso valle si osserva che in corrispondenza del rilevato autostradale (in sinistra idraulica), non sono sempre rispettati adeguati franchi (1m) con particolare riferimento alle sezioni 22 e 26 (vedi Allegato).

Procedendo l'analisi verso valle, si osserva, in corrispondenza della confluenza, un allagamento generalizzato delle aree di espansione golenale.

Come ben messo in evidenza in Fig 8, che riporta l'andamento dei livelli idrici che si instaurano in corrispondenza della confluenza, si osserva la presenza di argini minori all'interno delle aree golenali che, presentando alcuni punti di discontinuità vengano localmente sormontati allagando le aree alle spalle.



Fig. 8: Livelli calcolati in corrispondenza della confluenza – SDF TR 200 Tanaro

La presenza di tali discontinuità è ben messa in evidenza in Fig. 9 dove è riportato il campo di velocità nella zona della confluenza. Dall'immagine si osservano dei punti localizzati di sormonto che danno origine all'allagamento delle aree a monte. Si osserva, inoltre, che tali arginature non si estendono per tutta l'area golenale ma si interrompono in corrispondenza di un caseggiato.





Fig. 9: Livelli calcolati in corrispondenza della confluenza – SDF TR 200 Tanaro

Per quanto riguarda il Bormida, con queste condizioni di portata (pari a  $1760 \text{ m}^3/\text{s}$ ), non si segnalano particolari criticità, essendo i livelli idrici sempre al disotto della sommità arginale.

Le velocità che si instaurano nei due corsi d'acqua si attestano tra i 2.5 e i 3.5 m/s all'interno dell'alveo di magra, per scendere a valori compresi tra 0.5 m/s e 0 m/s nelle zone di espansione golenale.

#### Stato di progetto: piena Tr 200 anni (Tanaro)

La geometria dello stato di progetto prevede l'innalzamento delle arginature in corrispondenza della città di Alessandria come riportato in Fig. 4. In questo modo è possibile verificare eventuali innalzamenti dei livelli idrici che si potrebbero verificare in conseguenza a tali interventi.

Dall'analisi delle sezioni non si osservano particolari differenze dei livelli idrici rispetto alla situazione dello stato di fatto. Ciò trova giustificazione nel fatto che il volume d'acqua immagazzinato nelle aree di espansione non è tale da dar luogo ad un effetto di laminazione significativo delle onde di piena.

Sensibili variazioni si osservano invece nei valori delle velocità che si attestano su valori massimi superiori di circa il 10% rispetto allo stato di fatto, specialmente con particolare riferimento all'alveo.

#### Stato di fatto: piena Tr 200 anni (Bormida)

Le simulazioni effettuate con la portata due centennale sul fiume Bormida non mettono in evidenza particolari punti di criticità, come messo in evidenza in Fig. 10 dove sono riportati i livelli idrici nel tratto di monte del Bormida.



Fig. 10: Livelli calcolati sul tratto di monte del Bormida – SDF TR 200 Bormida

In particolare si osserva, come messo in evidenza nelle sezioni 9, 1\_agg, 2\_agg monte e 2\_agg valle, che con riferimento alle arginature recentemente rialzate in sinistra idraulica a monte dell'attraversamento della SR 10, sono rispettati i franchi arginali.

In corrispondenza della confluenza, poco a monte dell'attraversamento autostradale, come messo in evidenza in Fig. 11, si osserva la presenza di un argine golenale in sinistra, in grado di contenere i tiranti idrici all'interno del corso d'acqua, sebbene le zone a monte vengano allagate comunque ad opera del Fiume Tanaro.





Fig. 11: Livelli calcolati sul tratto di monte del Bormida – SDF TR 200 Bormida

A valle della confluenza, non essendo mutata la portata complessiva, non si riscontrano particolari differenze rispetto alla simulazione dello stato di fatto con TR 200 sul Tanaro.

Per quanto riguarda le velocità, anche in questo caso sull'alveo di magra si attestano sull'ordine di 2.5 – 3.5 m/s.

## Conclusioni

Nel presente lavoro sono state effettuate delle simulazioni numeriche bidimensionali del nodo idraulico Tanaro-Bormida. Lo scopo dello studio è quello di valutare l'andamento dei livelli idrici che si instaurano per diverse condizioni di portata al fine di definire le quote da assegnare alle arginature con adeguato franco idraulico.

In particolare sono state studiate due portate diverse: una con un tempo di ritorno di 200 anni sul Fiume Tanaro e l'altra con un tempo di ritorno di 200 anni sul fiume Bormida. Al fine di valutare gli effetti sui livelli idrici degli interventi di calibratura arginale in progetto è stata effettuata una ulteriore simulazione con tempo di ritorno di 200 anni sul Tanaro ma con la geometria dello stato di progetto.

L'analisi dei risultati dello stato di fatto del tratto di fiume Tanaro oggetto dello studio, mettono in evidenza alcuni punti di criticità legati alla distribuzione dei livelli idrici; i tiranti che si instaurano in prossimità della città di Alessandria si attestano infatti su valori localmente superiori al livello del rilevato arginale sia in destra che in sinistra dando origine ad allagamenti nella città stessa.

Anche nelle zone più a valle, dove il rilevato dell'autostrada funge anche da argine, si osservano delle insufficienze arginali in sinistra idraulica, non essendo rispettati adeguati franchi.

Nelle zone in corrispondenza della confluenza, si osservano allagamenti generalizzati delle zone di espansione golenale, anche nelle aree difese da arginature secondarie che presentando dei punti di discontinuità, vengono sormontati e in alcuni casi aggirati dalla corrente allagando le zone alle spalle.

Non si evincono particolari criticità nella simulazione caratterizzata da portate con un tempo di ritorno di 200 anni sul Bormida, risultando le arginature (parte delle quali oggetto di recenti ricalibrature) adeguate ai livelli idrici che si instaurano.

In fine, dal confronto tra le due simulazioni caratterizzate da portate con tempo di ritorno di 200 anni sul Tanaro non emergono sostanziali differenze nella distribuzione dei livelli idrici a causa dell'innalzamento delle arginature.

E' da porre, comunque, particolare attenzione ai problemi di sormonto delle arginature che localmente potrebbero verificarsi con queste condizioni di portata, in grado di provocare il cedimento delle stesse e quindi situazioni di allagamento non indagate nel presente studio.

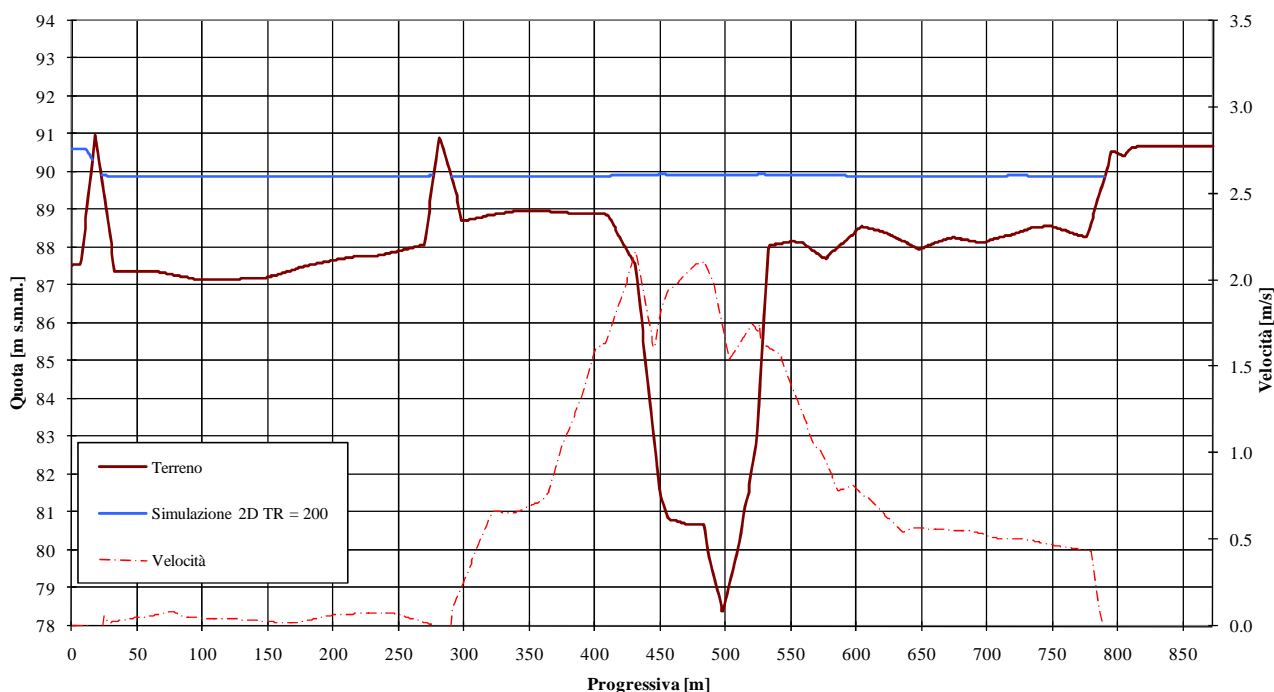


## **APPENDICE**

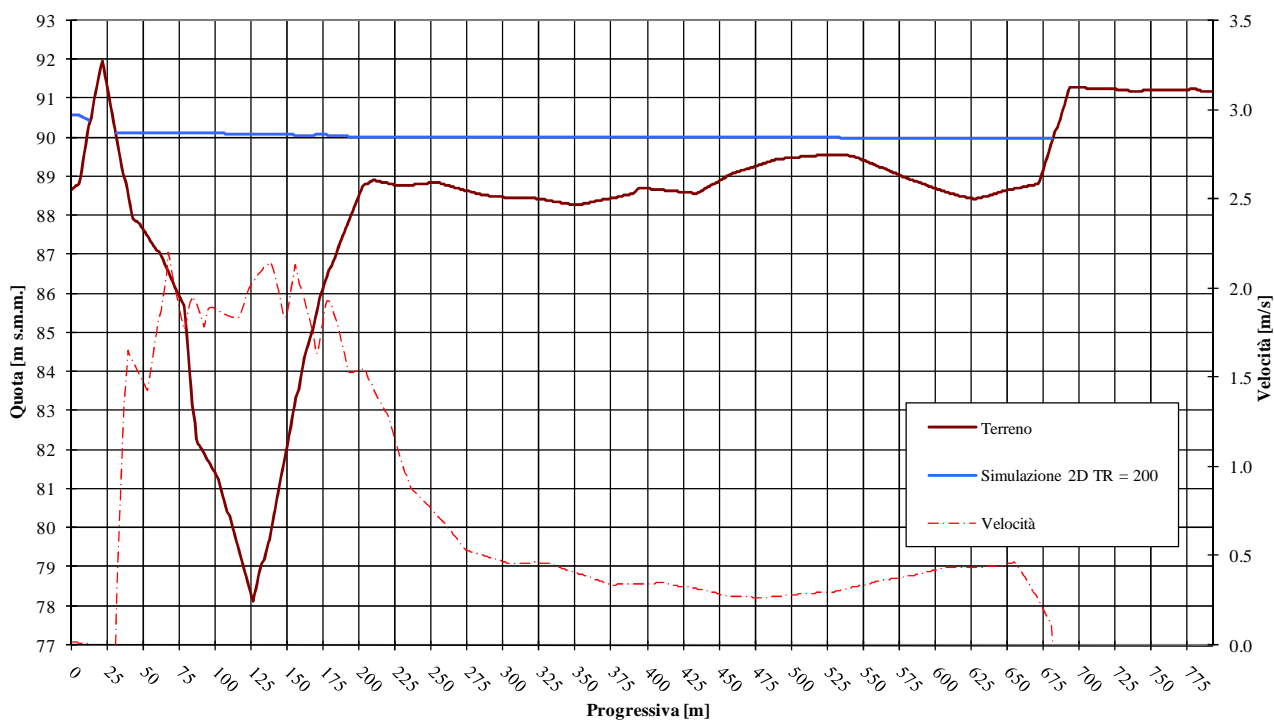
---

SEZIONI STATO DI FATTO - TR 200 TANARO

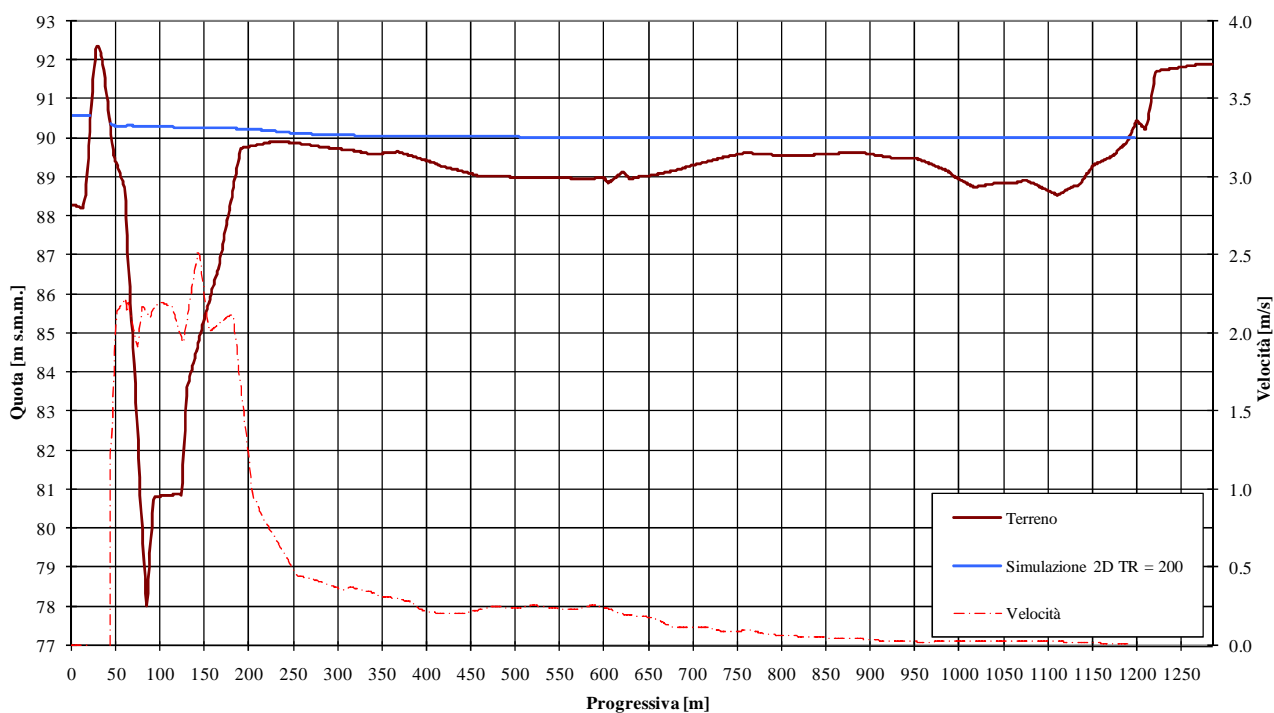
**Stato di fatto - Fiume Bormida - Tr = 200 anni - Sezione 4.5**



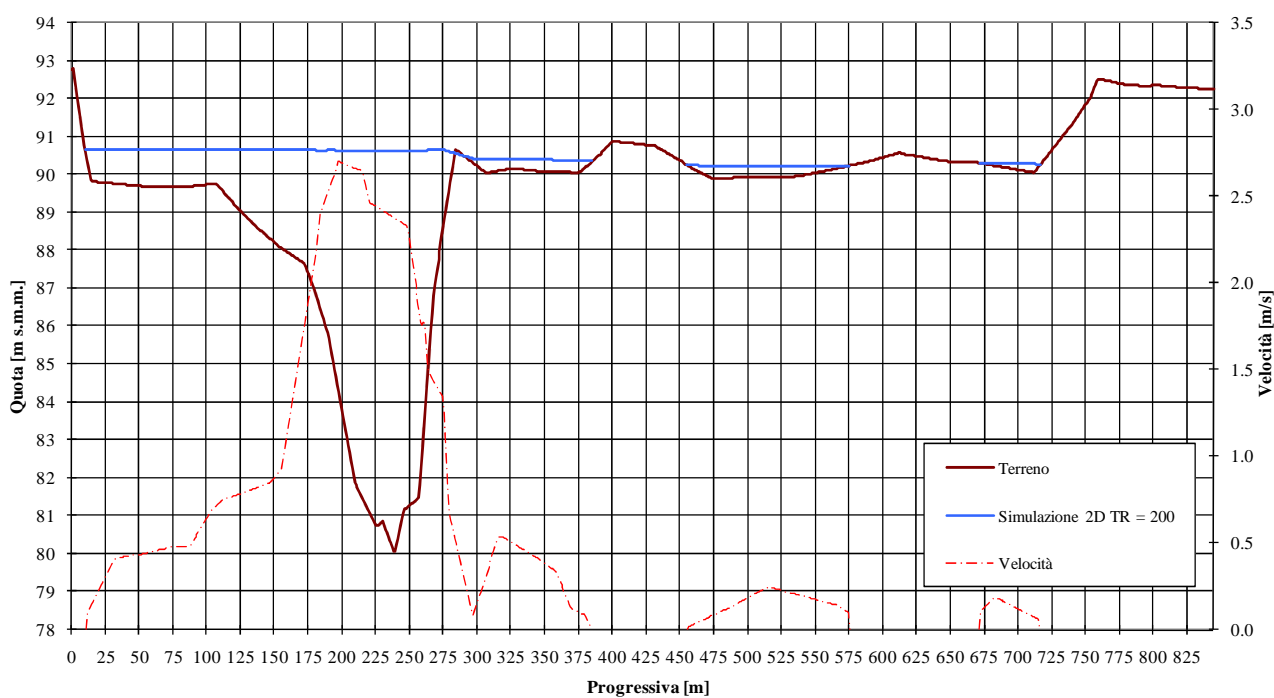
**Stato di fatto - Fiume Bormida - Tr = 200 anni - Sezione 5**



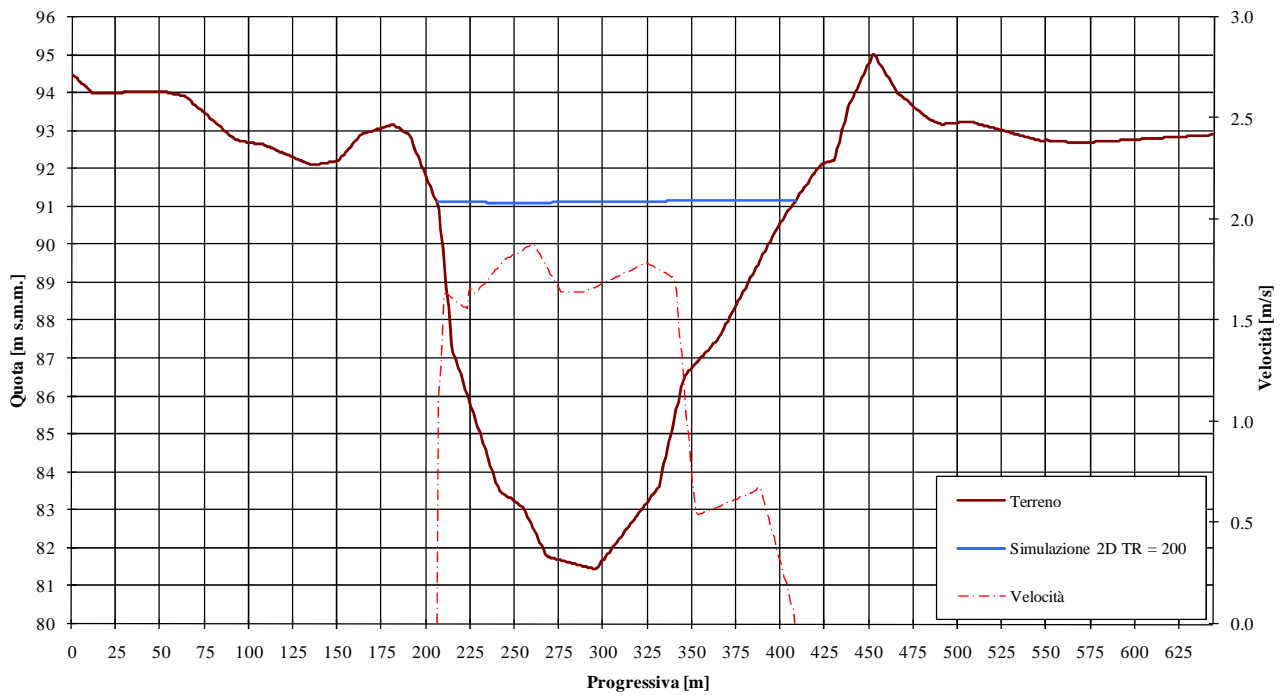
### Stato di fatto - Fiume Bormida - Tr = 200 anni - Sezione 5.5



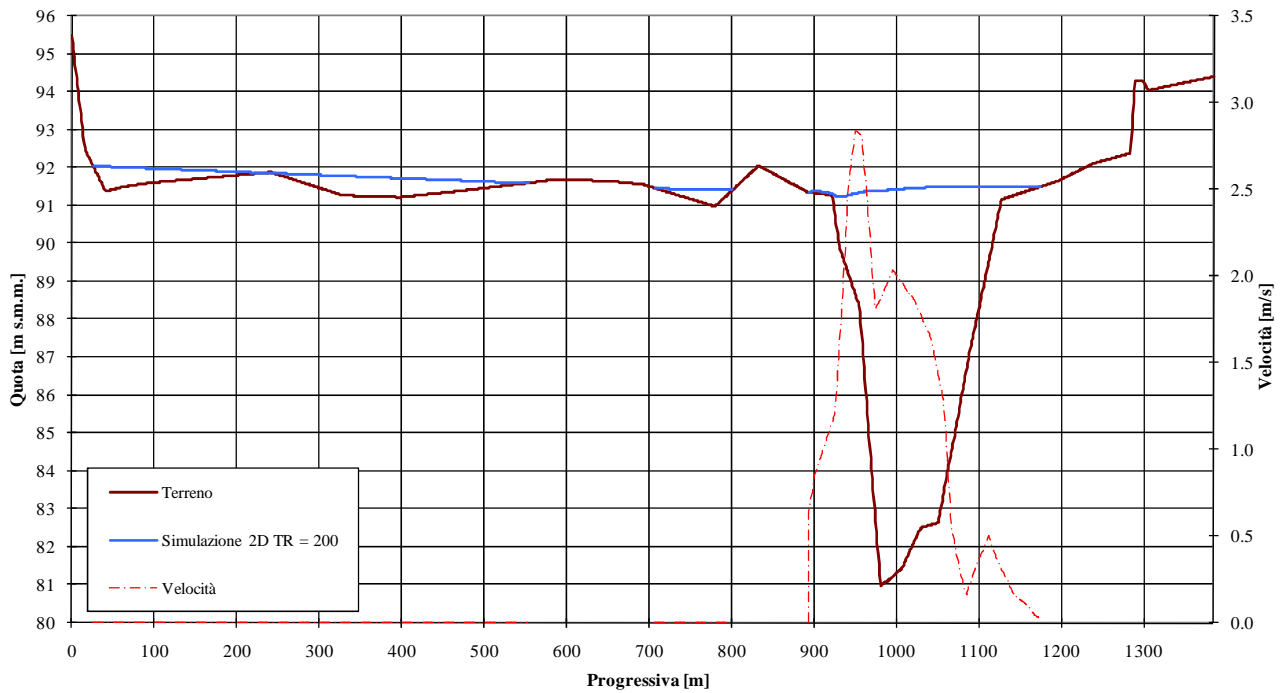
### Stato di fatto - Fiume Bormida - Tr = 200 anni - Sezione 6



### Stato di fatto - Fiume Bormida - Tr = 200 anni - Sezione 8.2

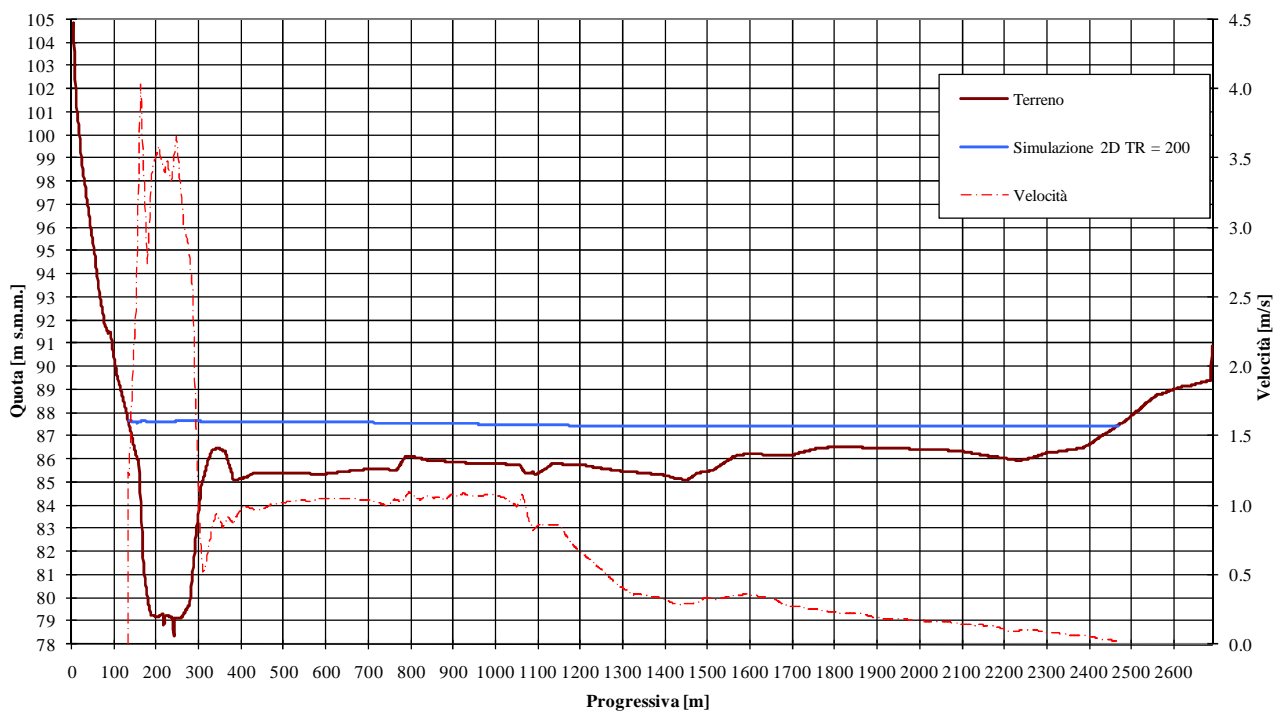


### Stato di fatto - Fiume Bormida - Tr = 200 anni - Sezione 9

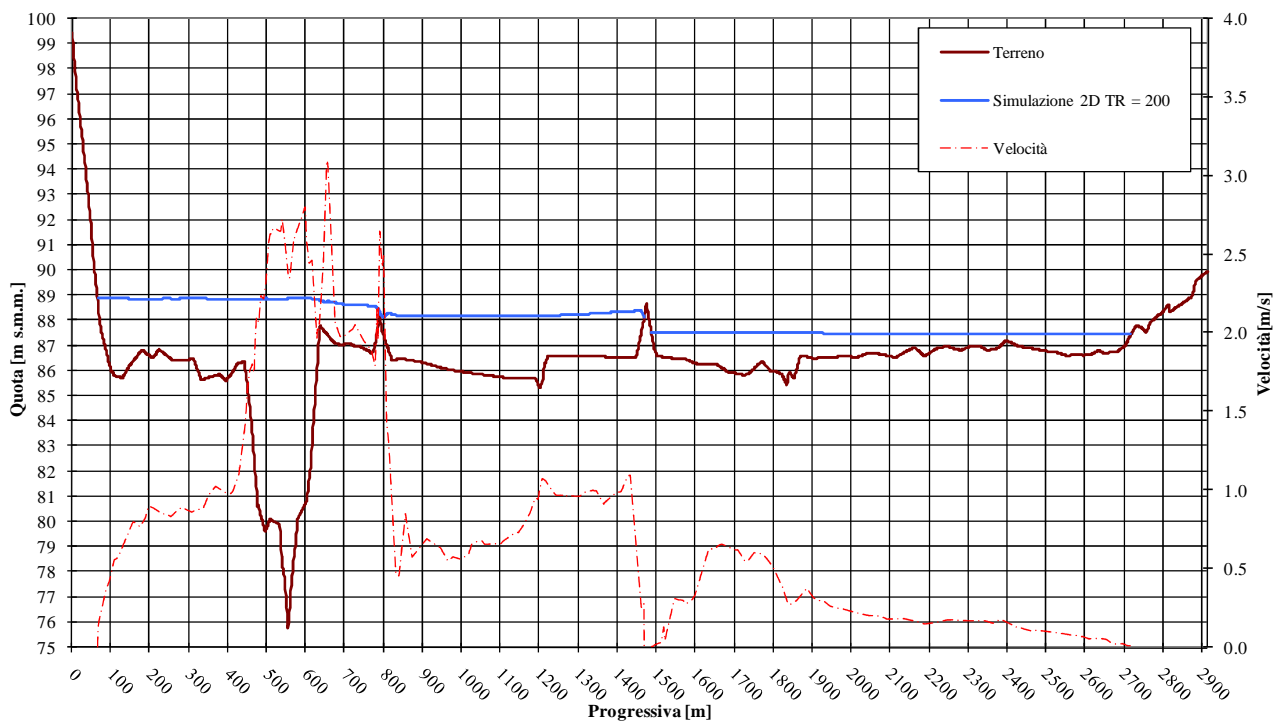




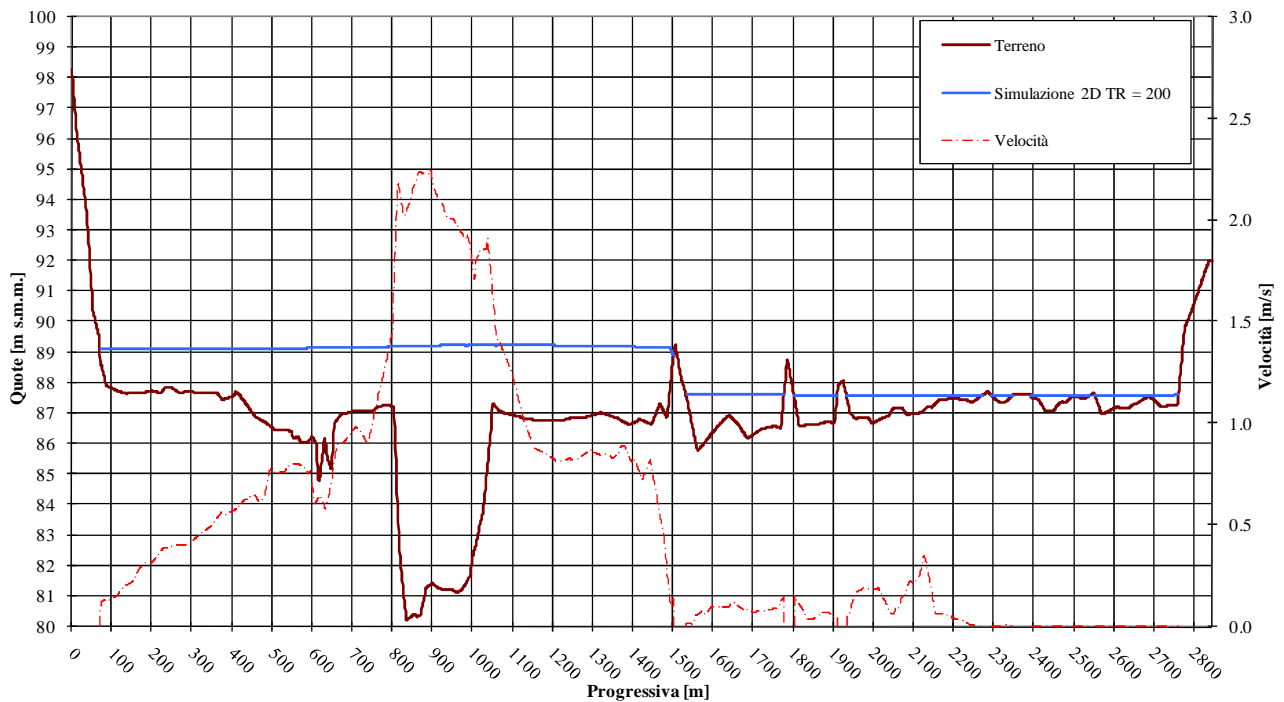
### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 9.5



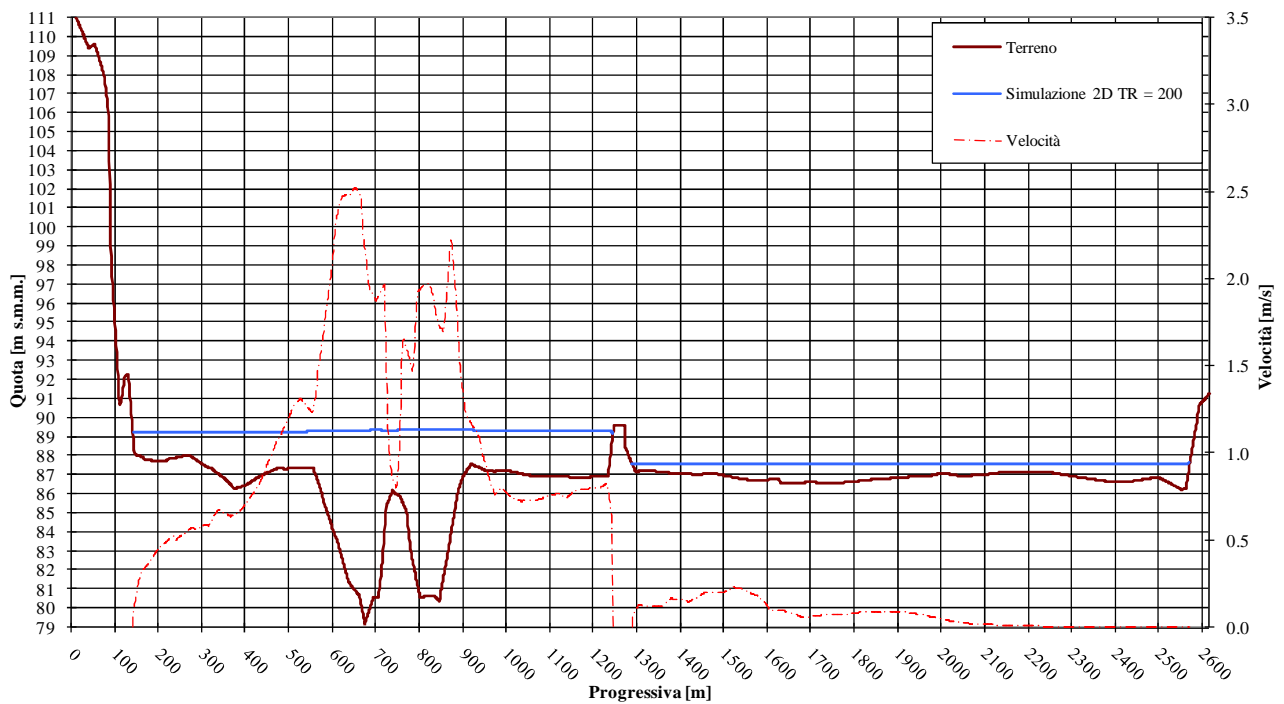
### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 10.5



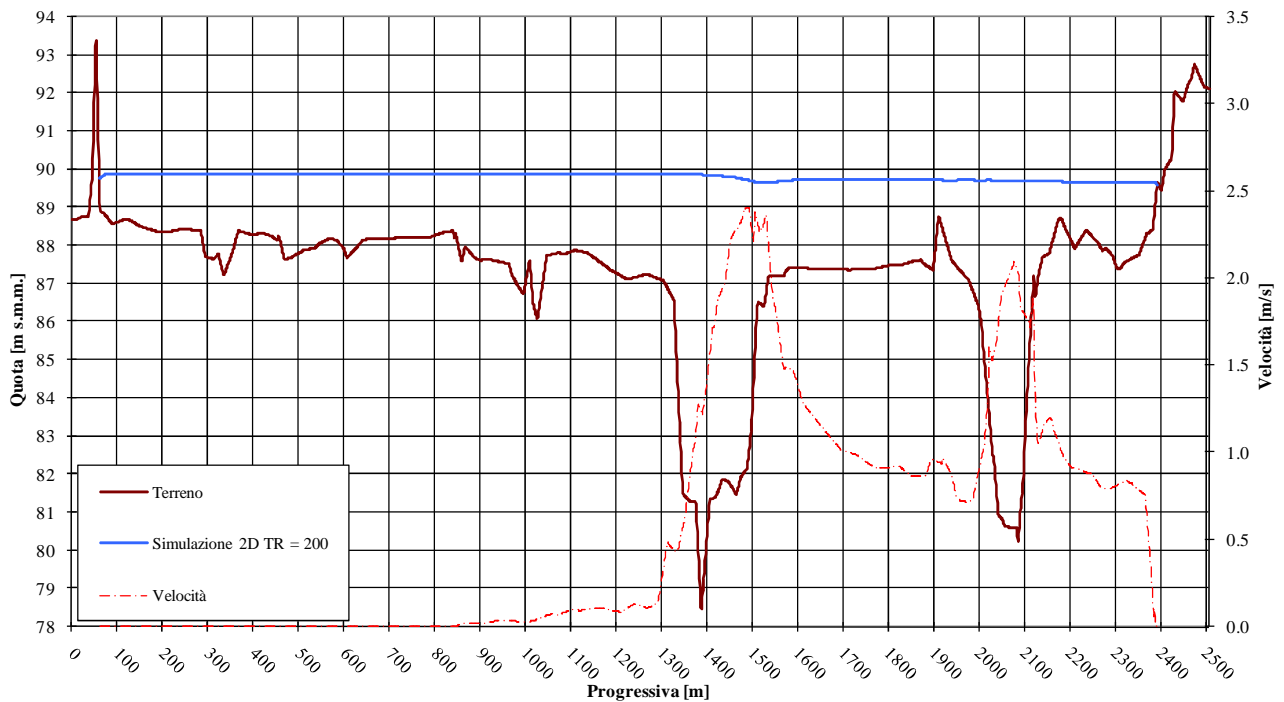
### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 11.1



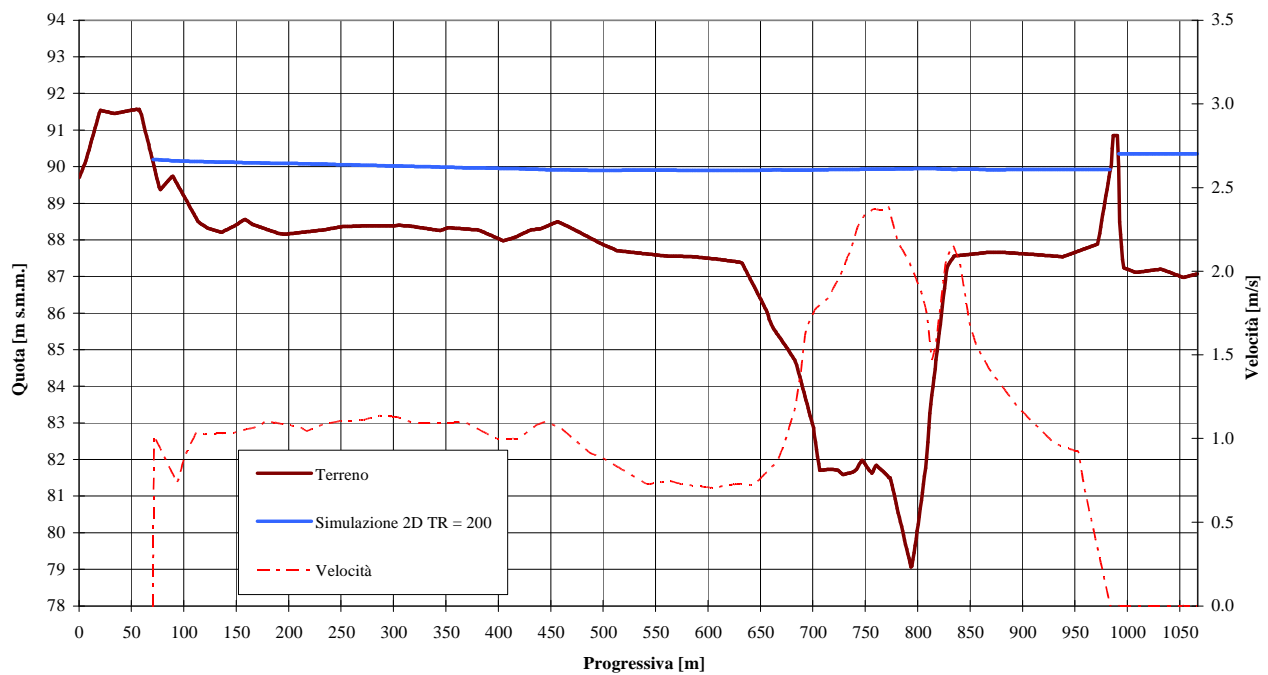
### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 12



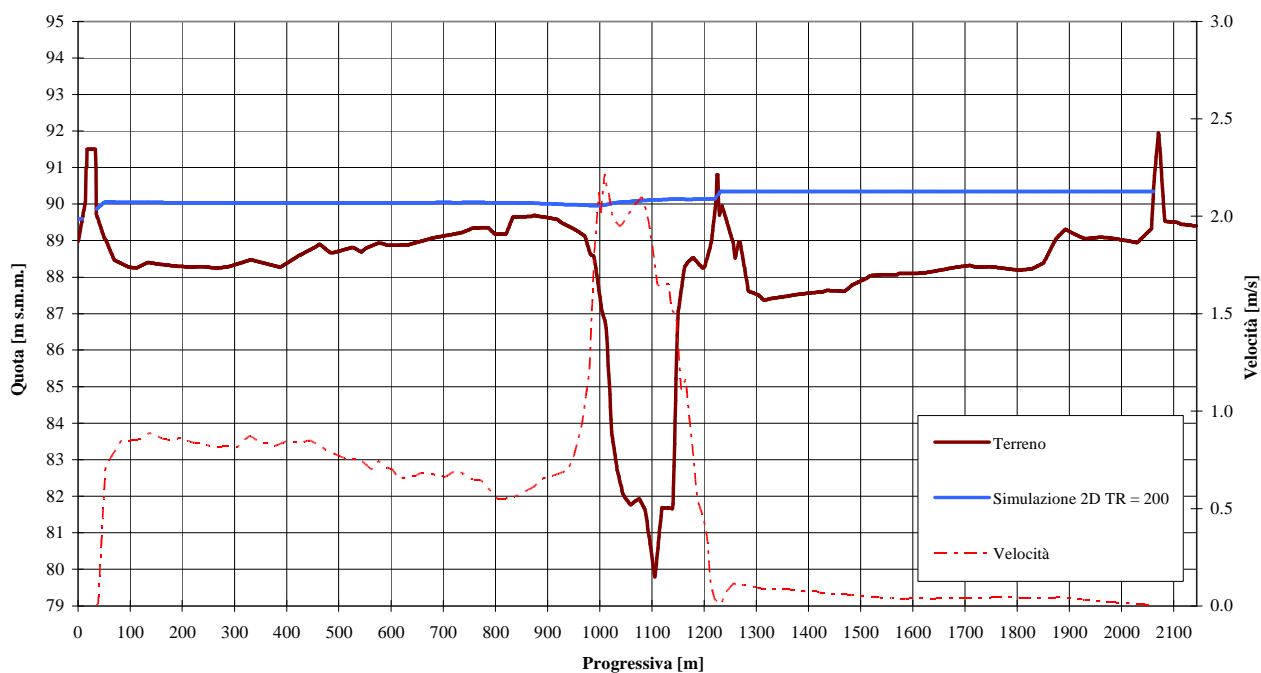
### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 13.4



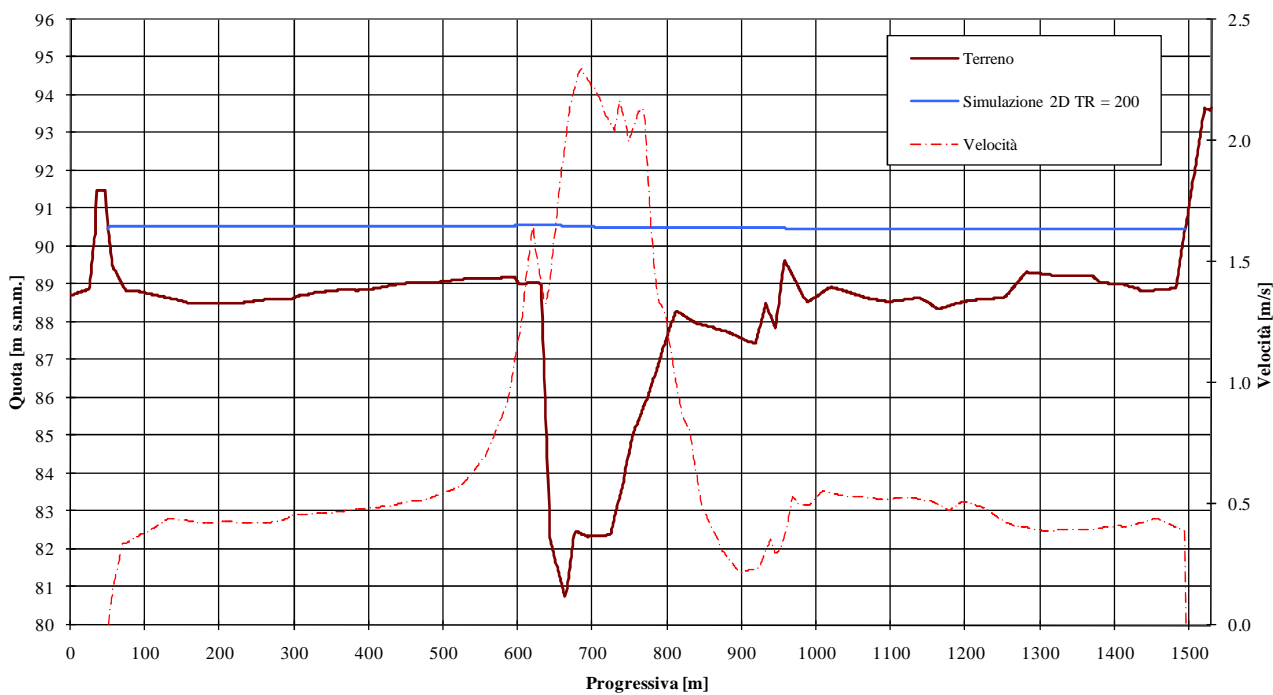
### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 16



### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 18

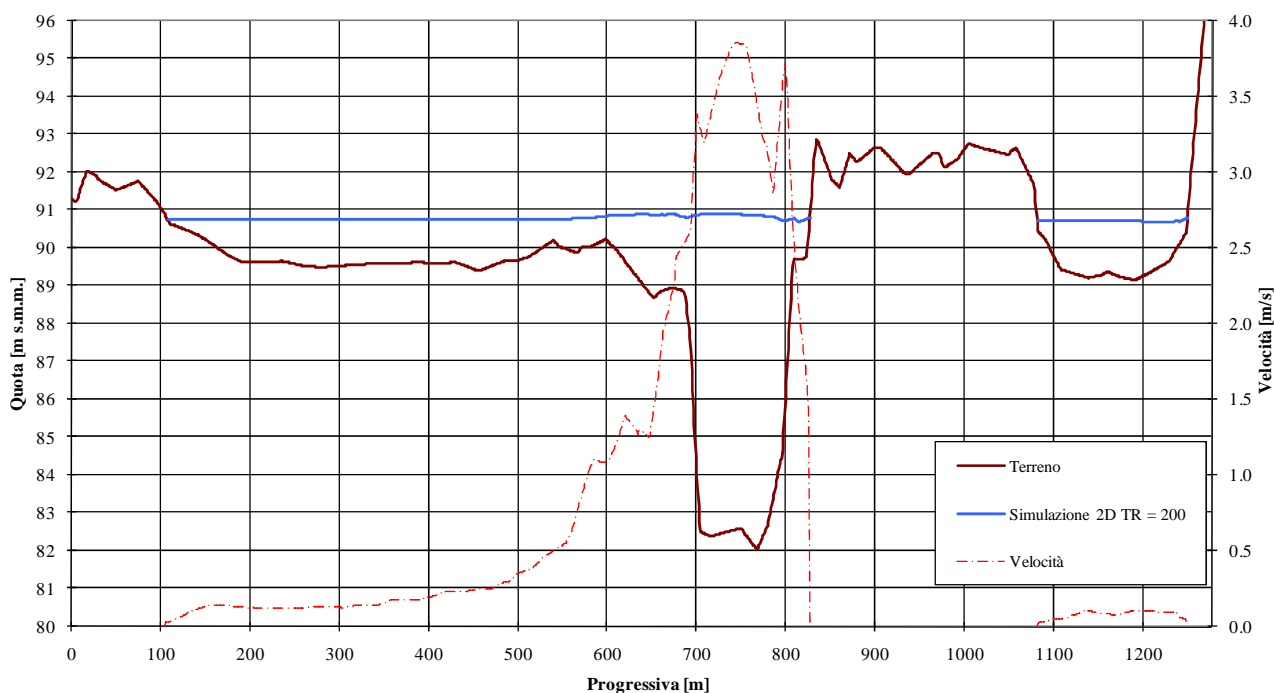


### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 22

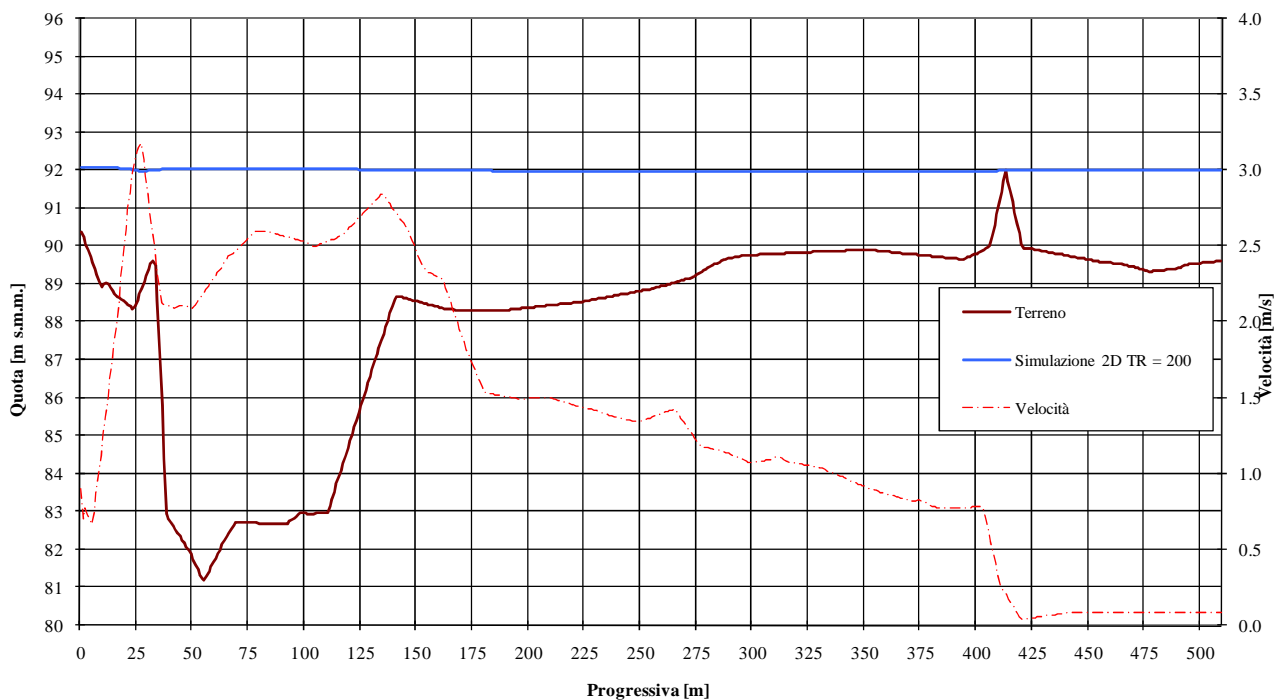




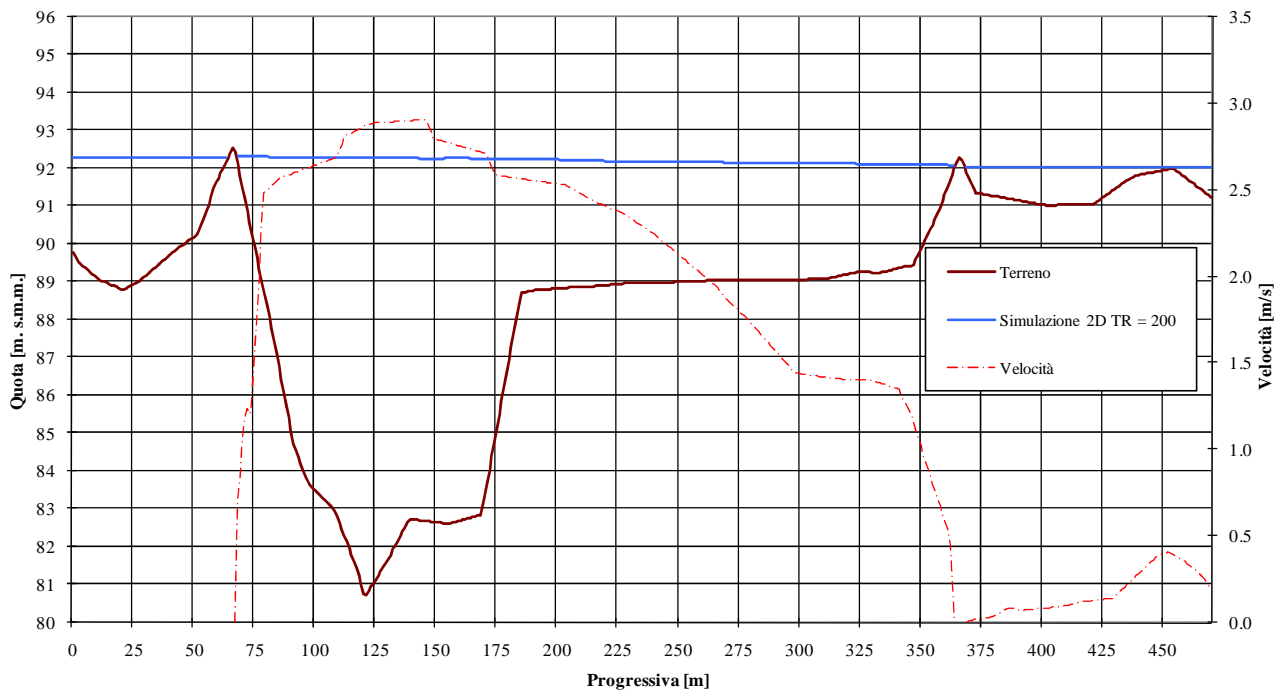
### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 26



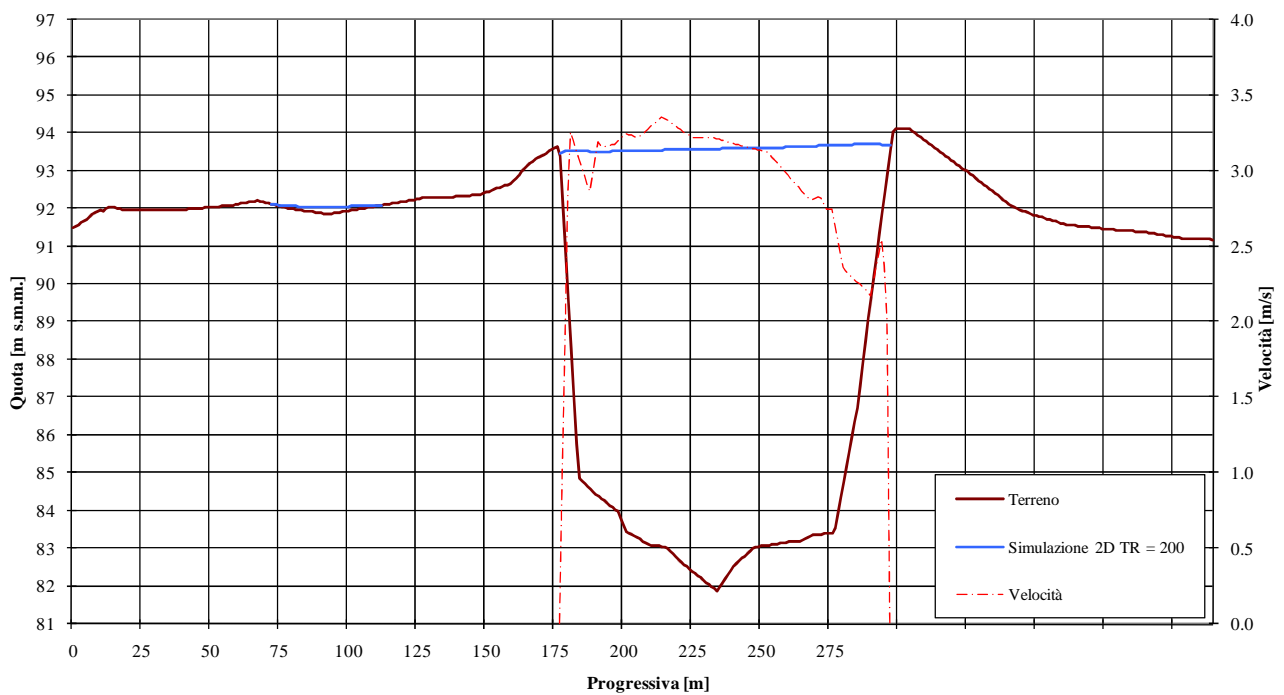
### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 29



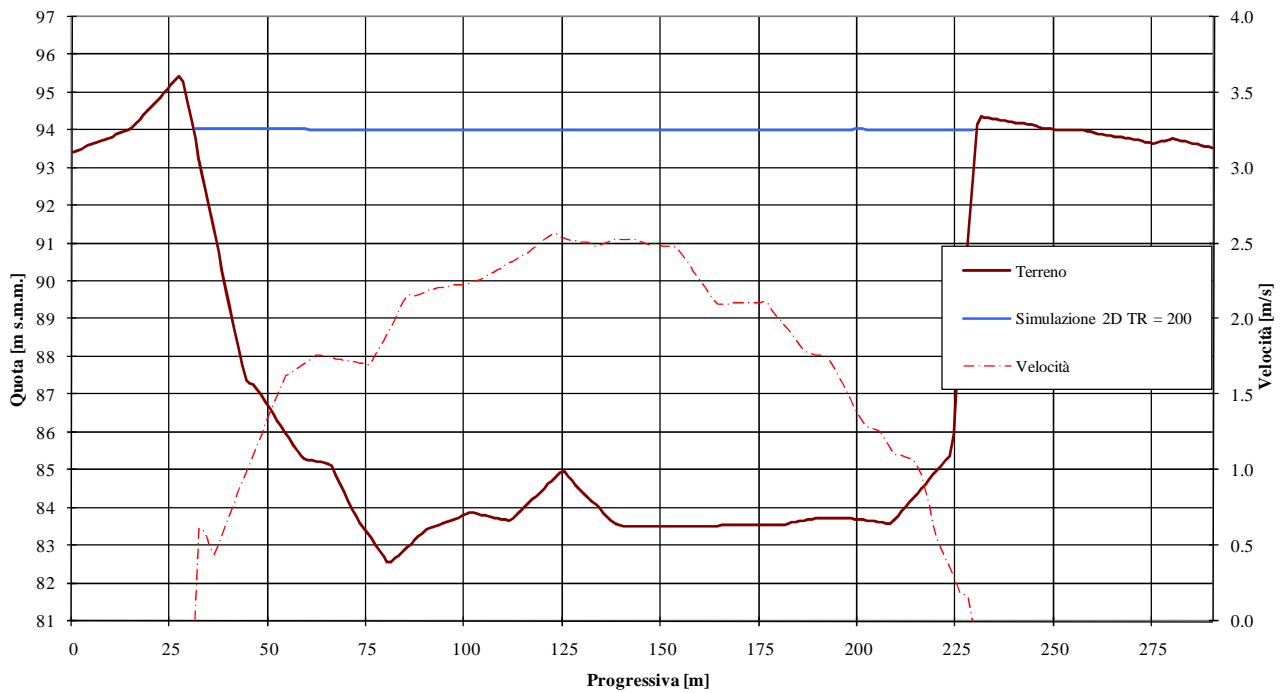
### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 31



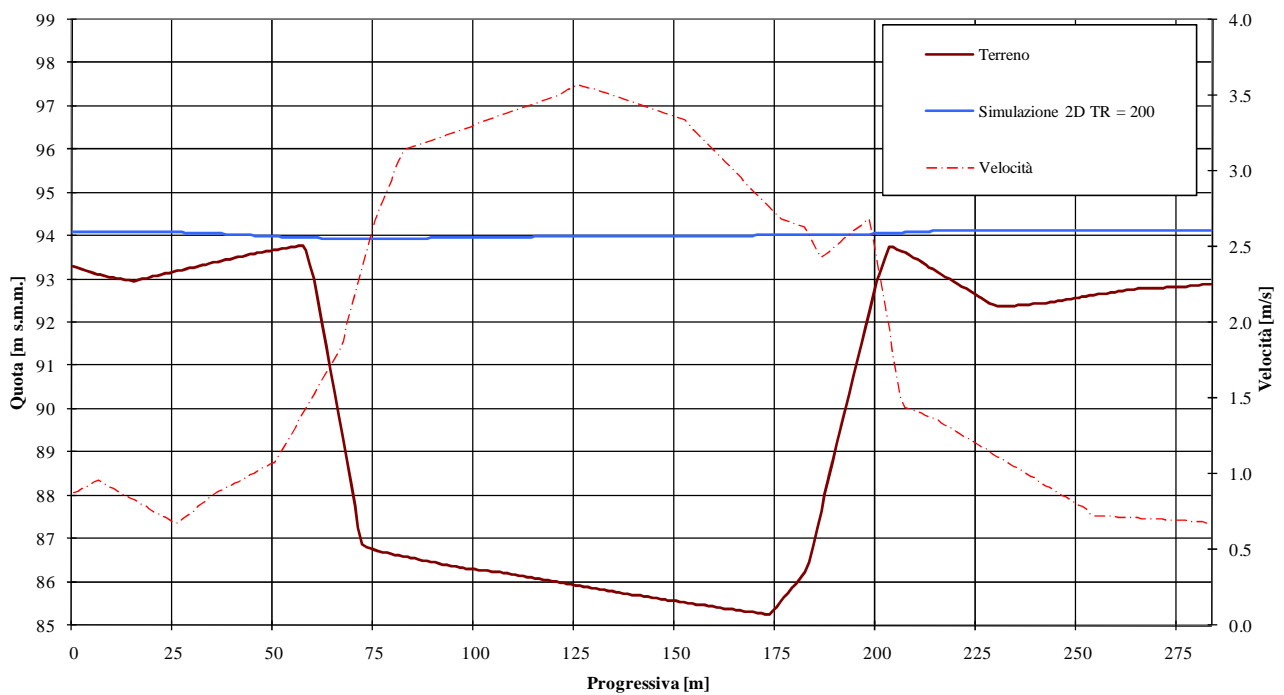
### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 37



### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 39

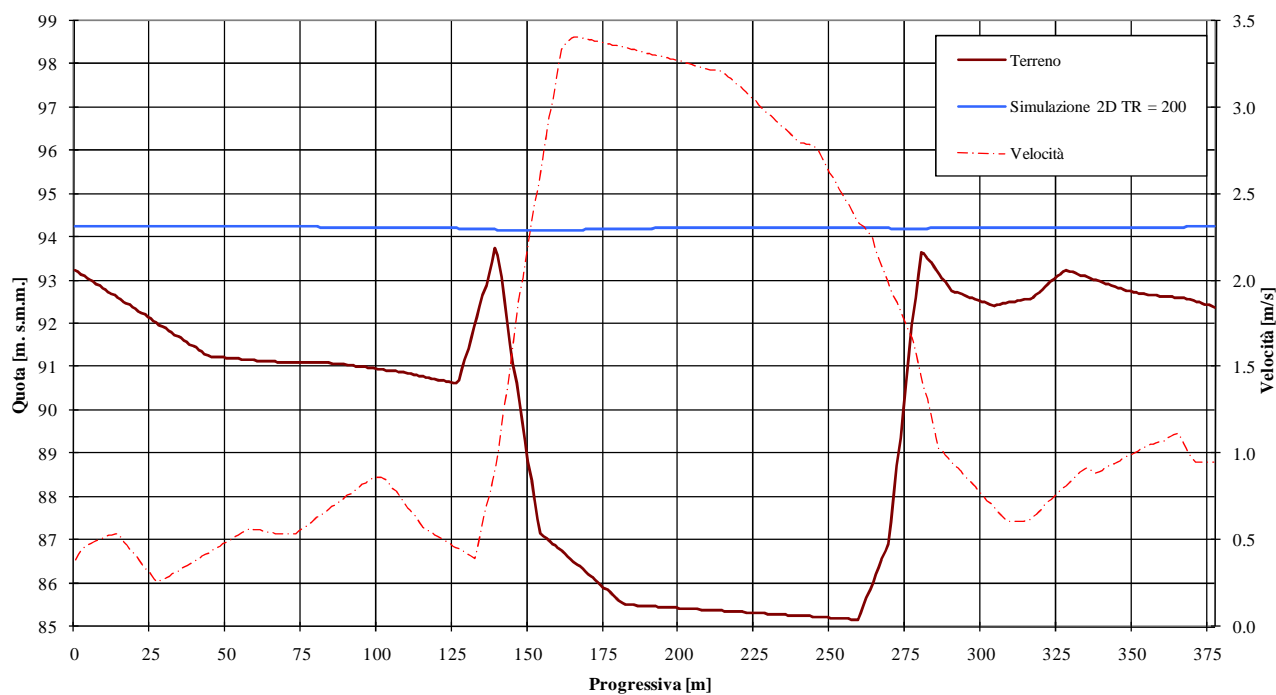


### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 41



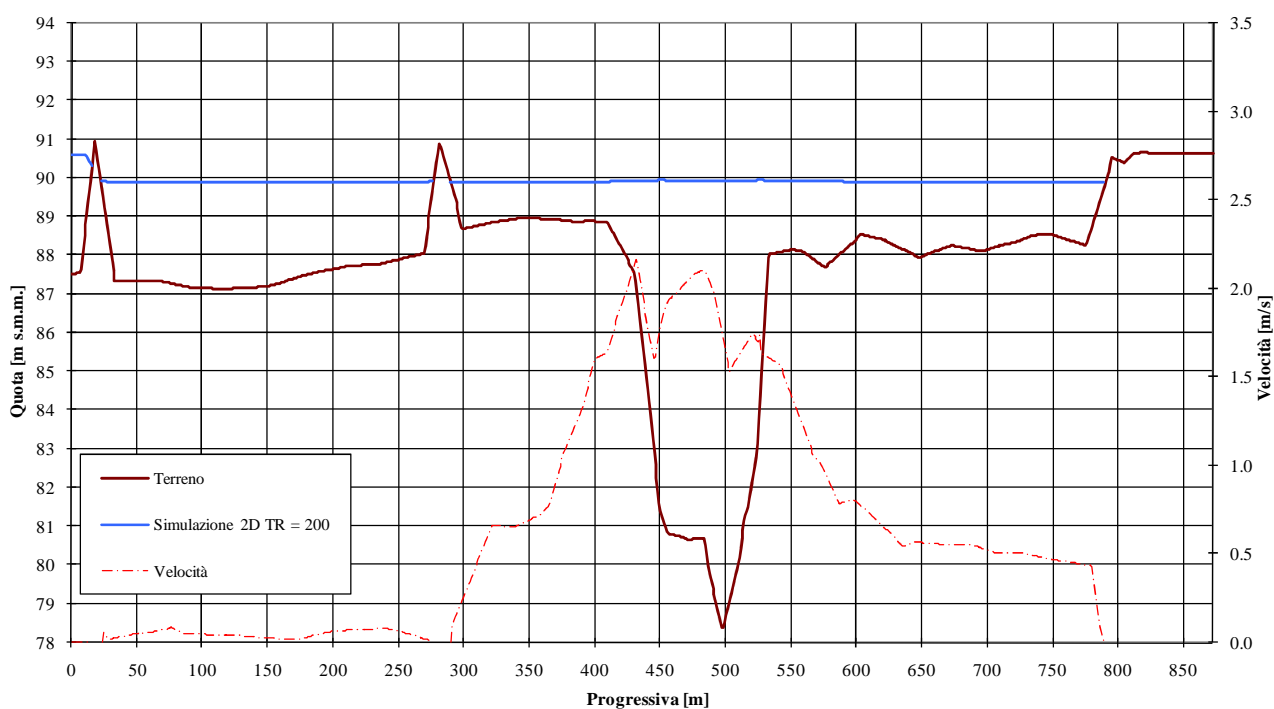


## Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 42

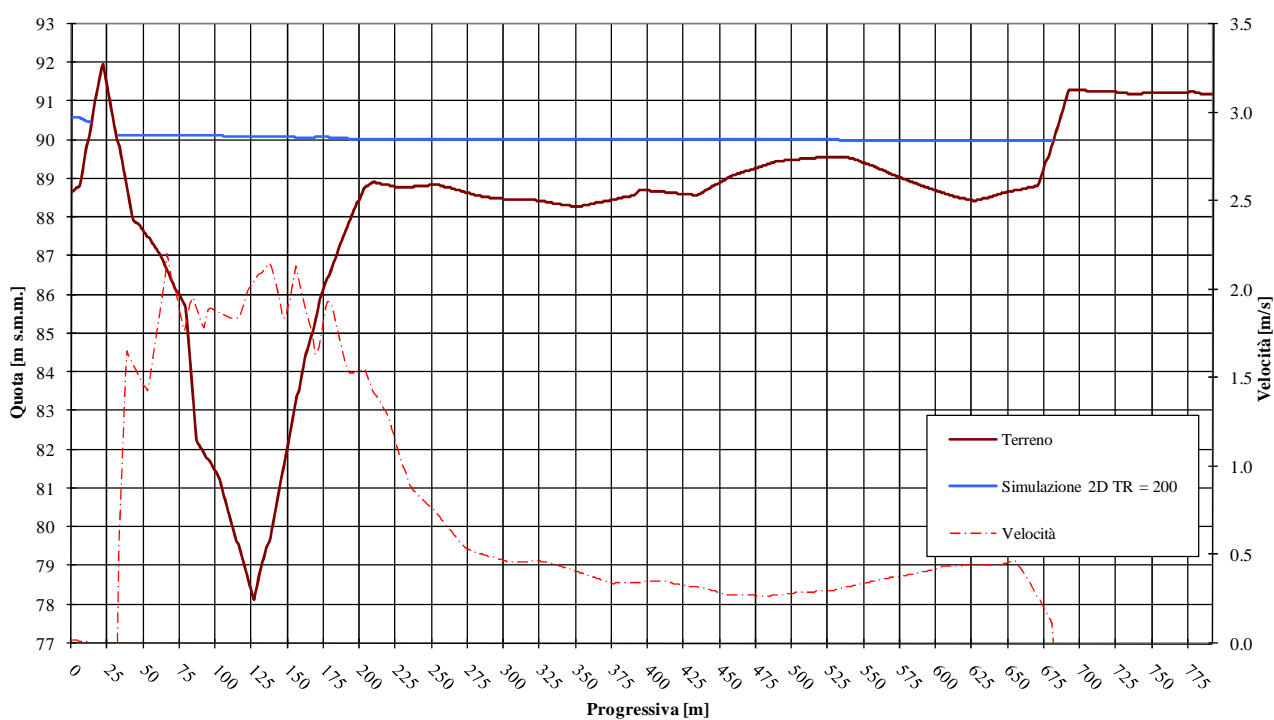


SEZIONI STATO DI PROGETTO - TR 200 TANARO

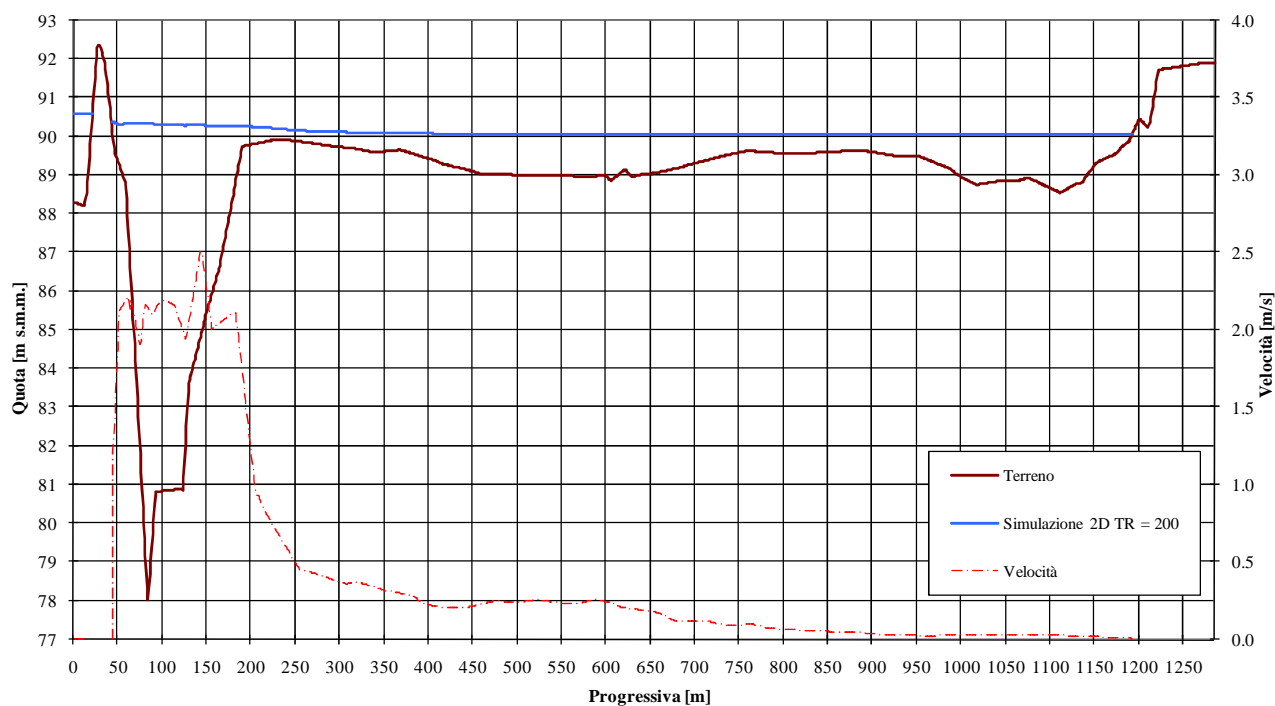
**Stato di progetto - Fiume Bormida - Tr = 200 anni - Sezione 4.5**



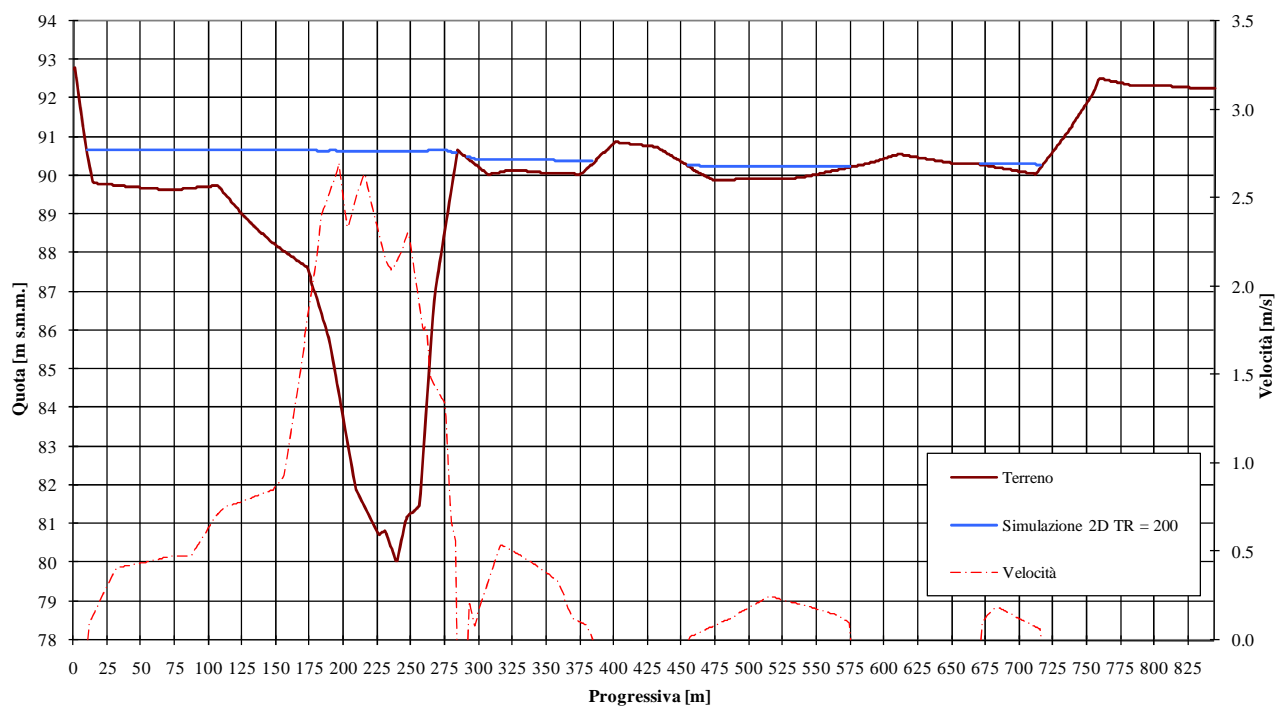
**Stato di progetto - Fiume Bormida - Tr = 200 anni - Sezione 5**



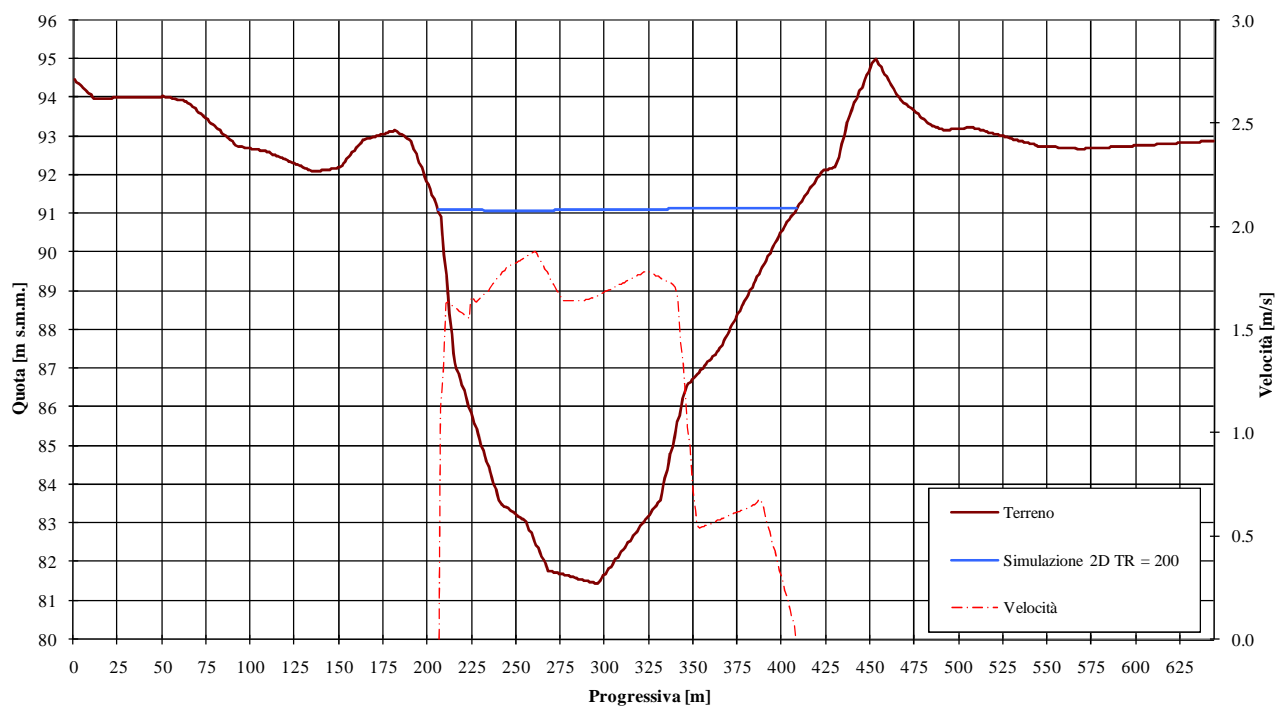
### Stato di progetto - Fiume Bormida - Tr = 200 anni - Sezione 5.5



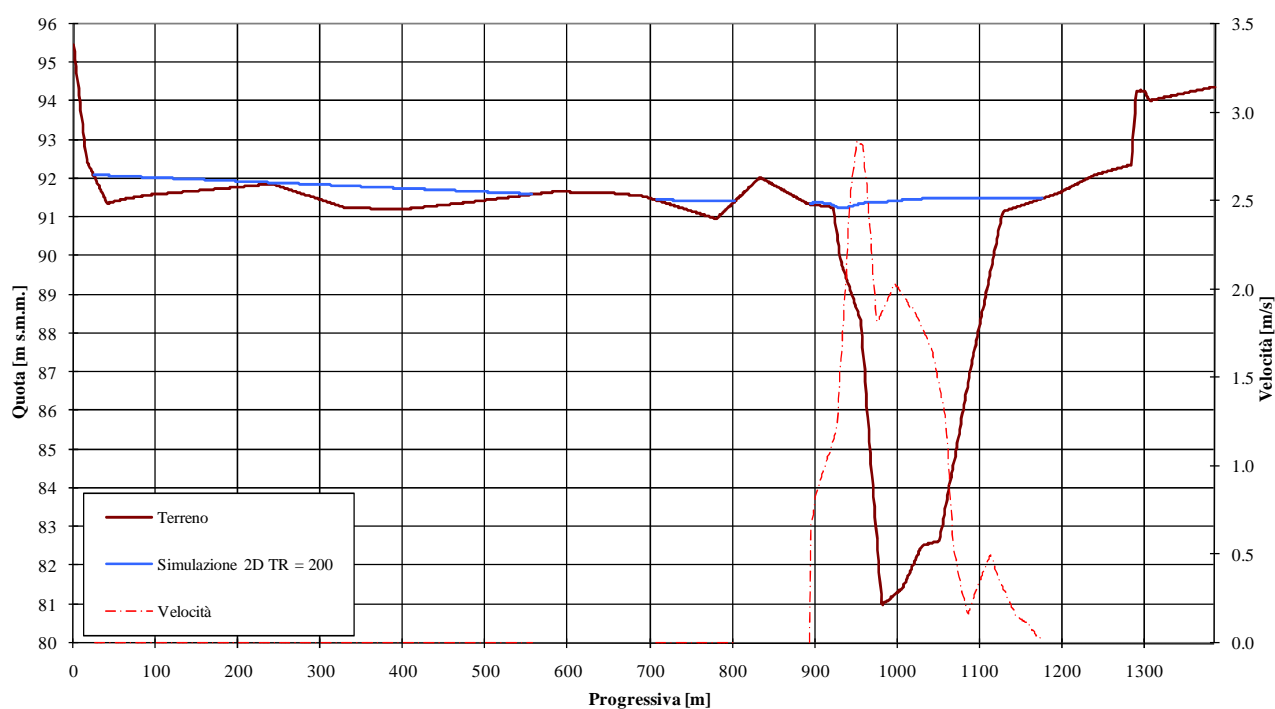
### Stato di progetto - Fiume Bormida - Tr = 200 anni - Sezione 6



### Stato di progetto - Fiume Bormida - Tr = 200 anni - Sezione 8.2

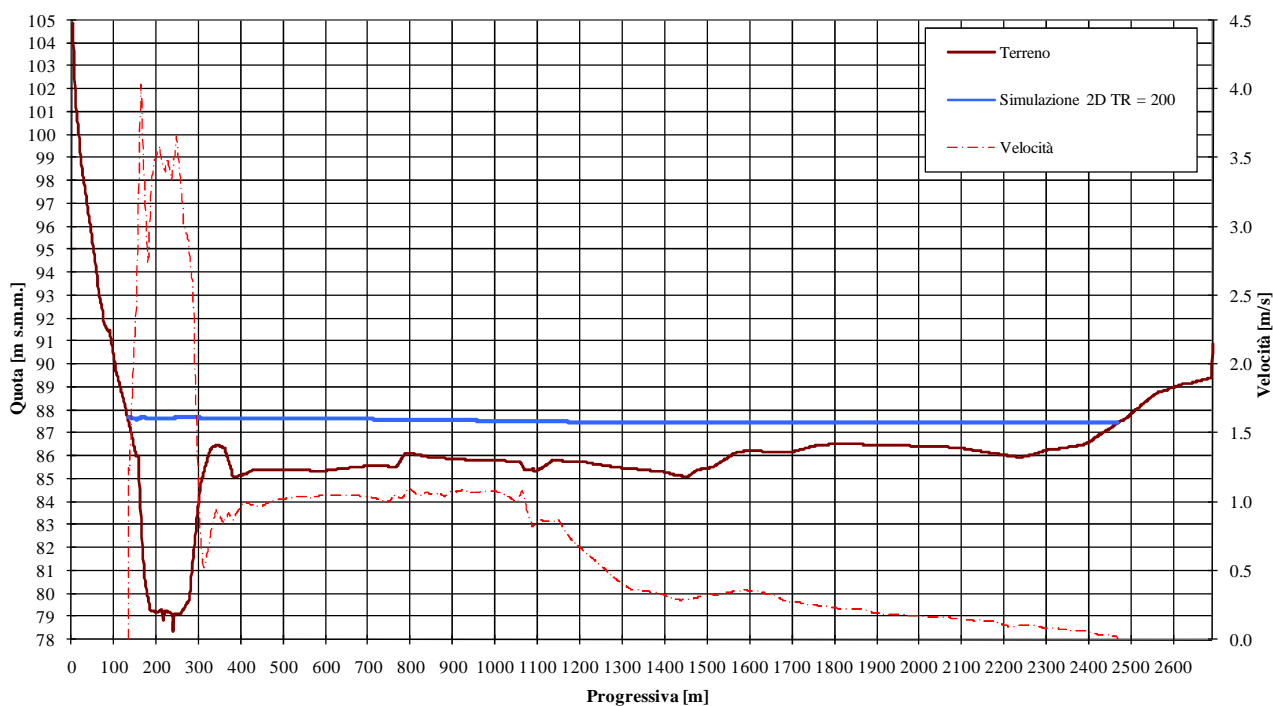


### Stato di progetto - Fiume Bormida - Tr = 200 anni - Sezione 9

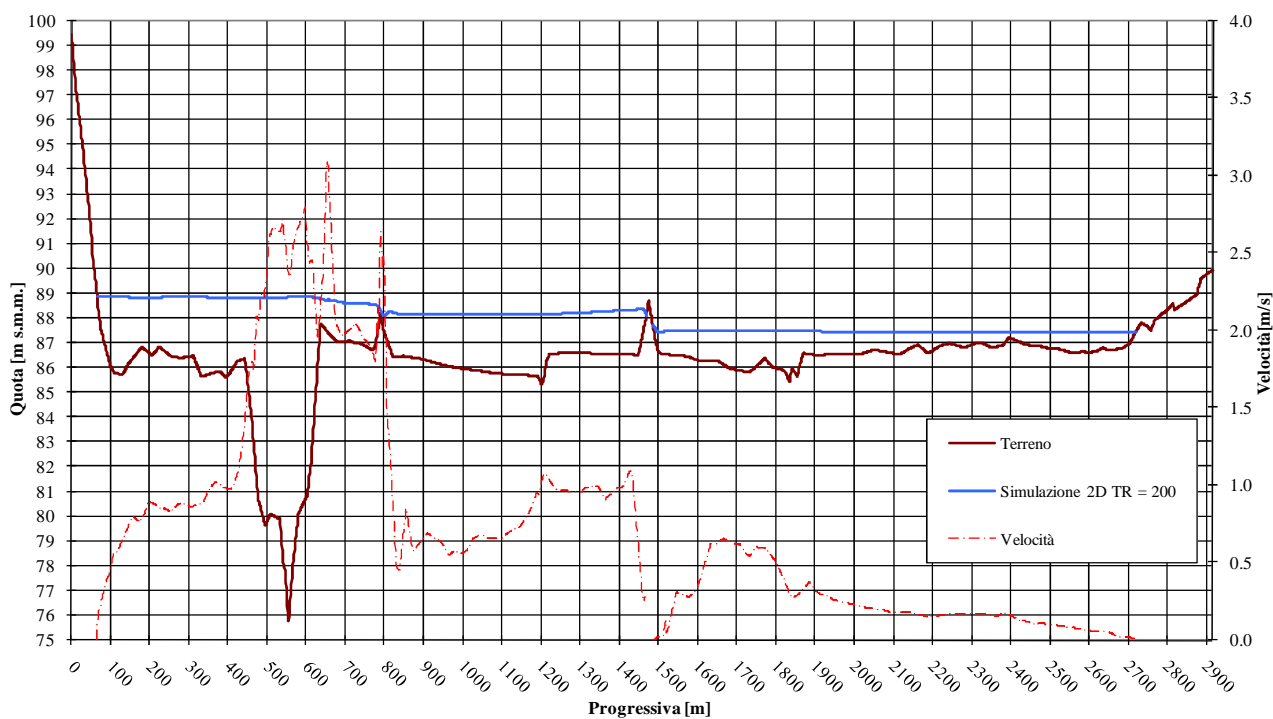




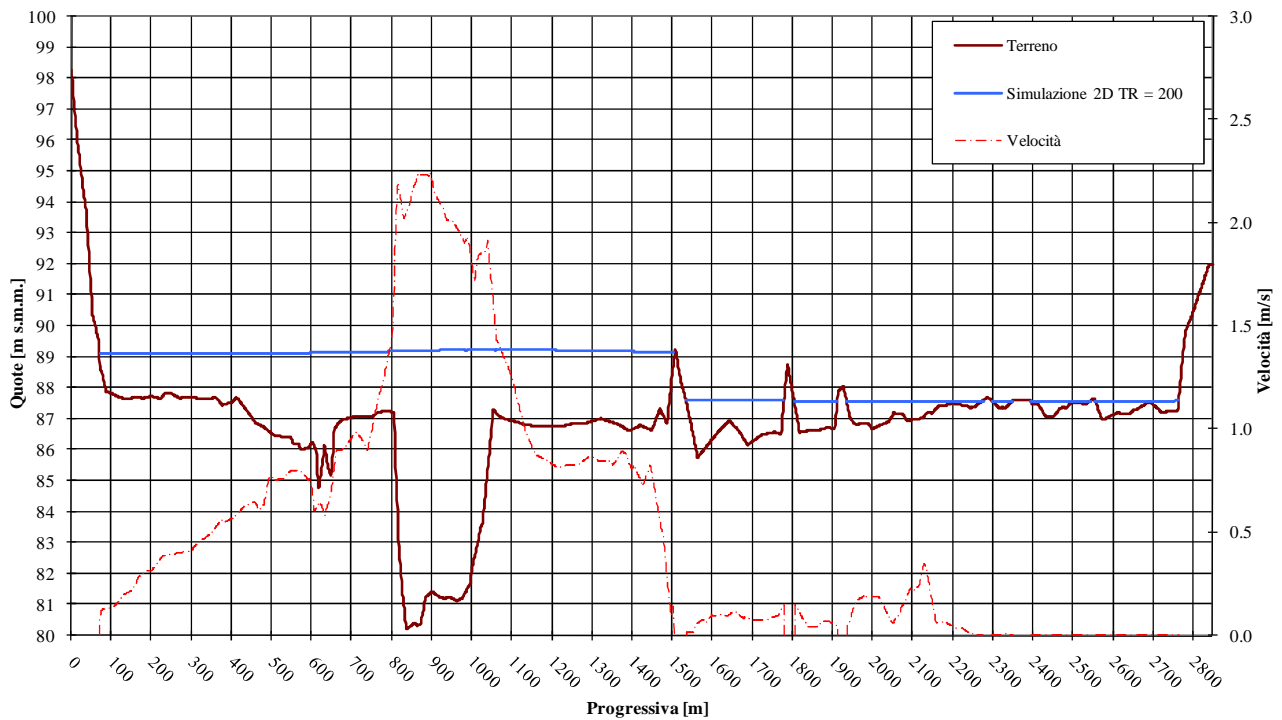
### Stato di progetto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 9.5



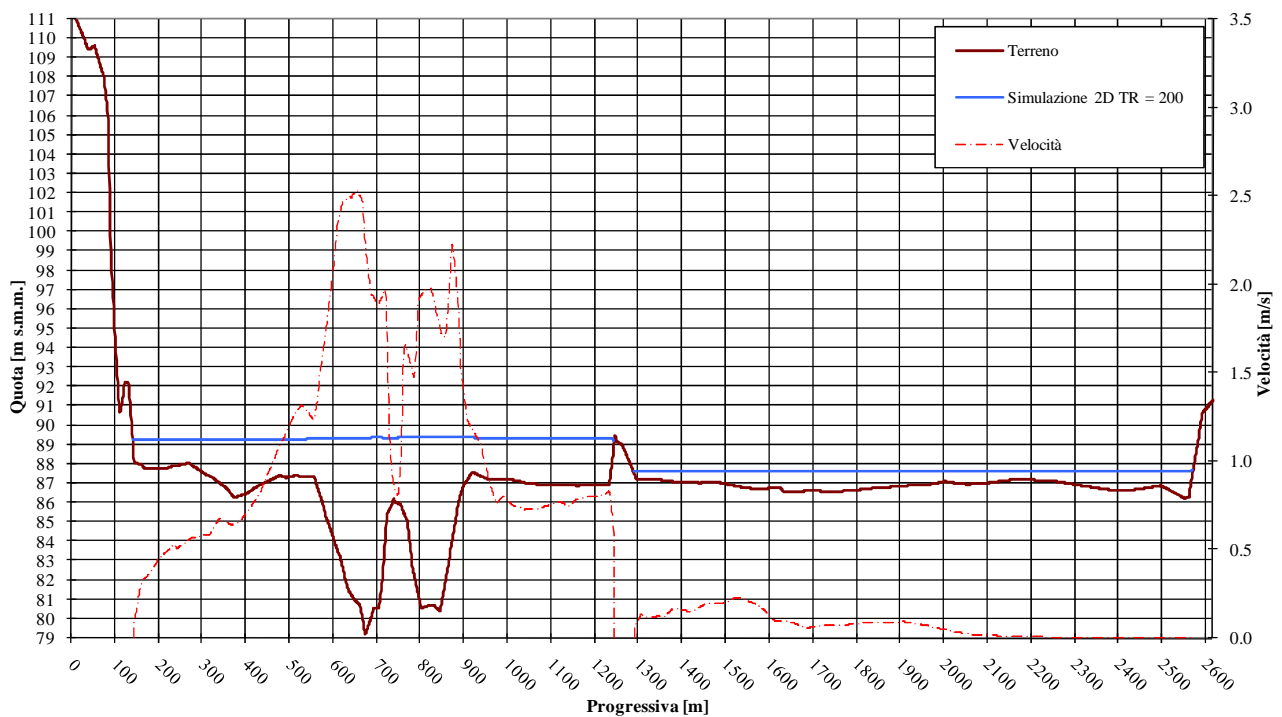
### Stato di progetto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 10.5



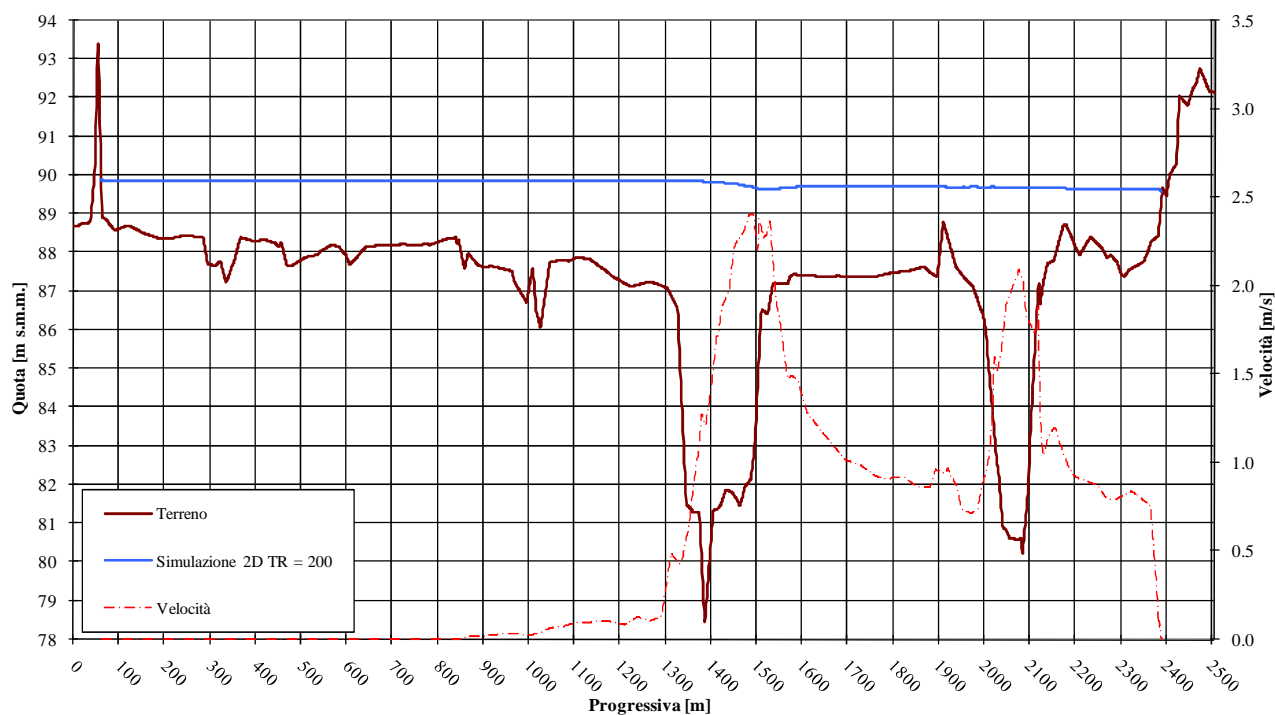
### Stato di progetto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 11.1



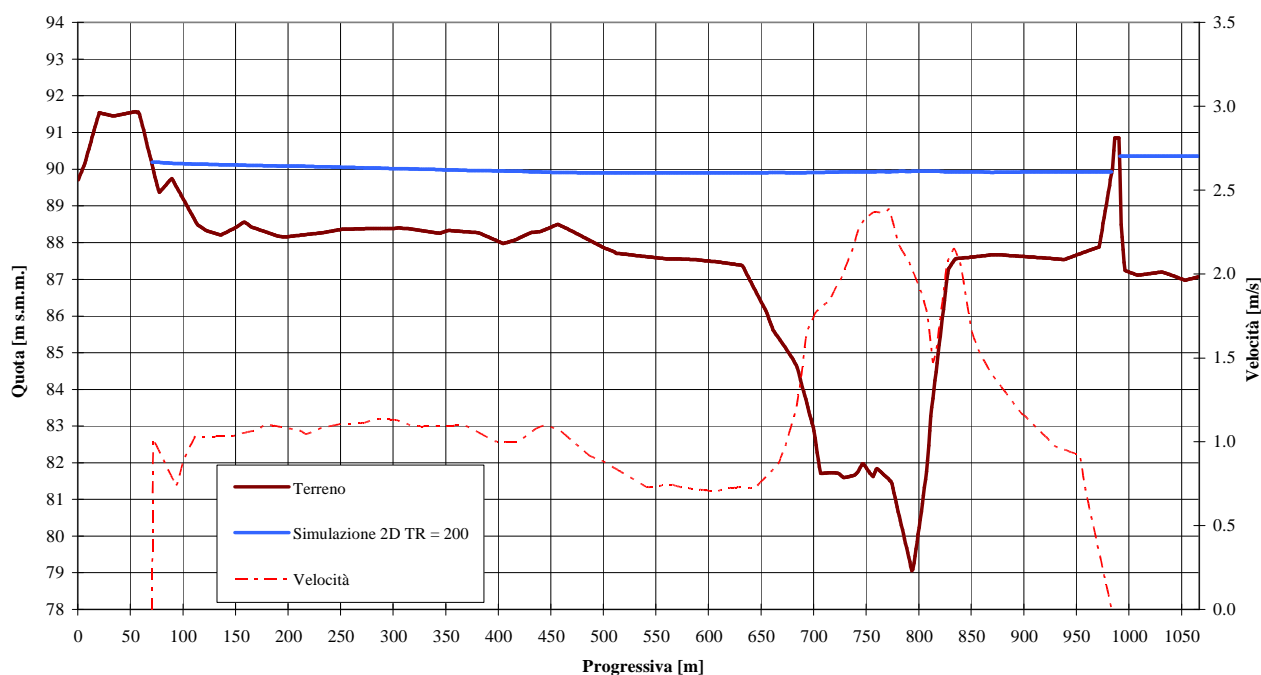
### Stato di progetto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 12



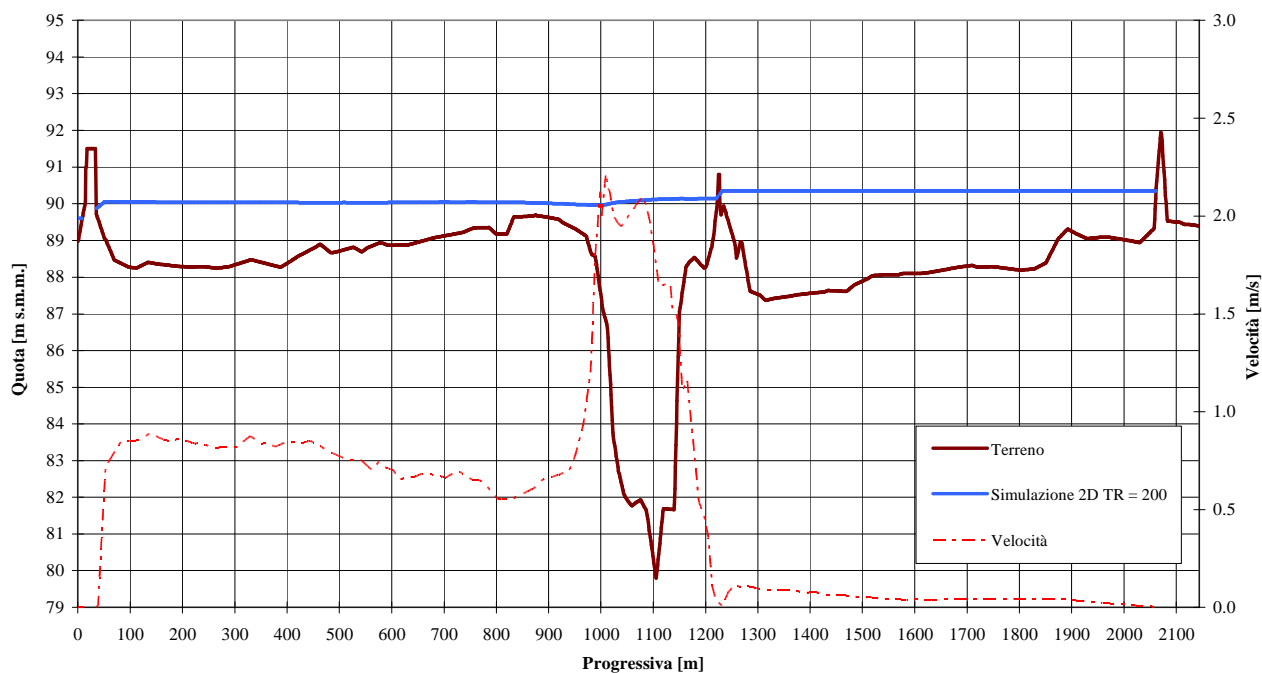
### Stato di progetto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 13.4



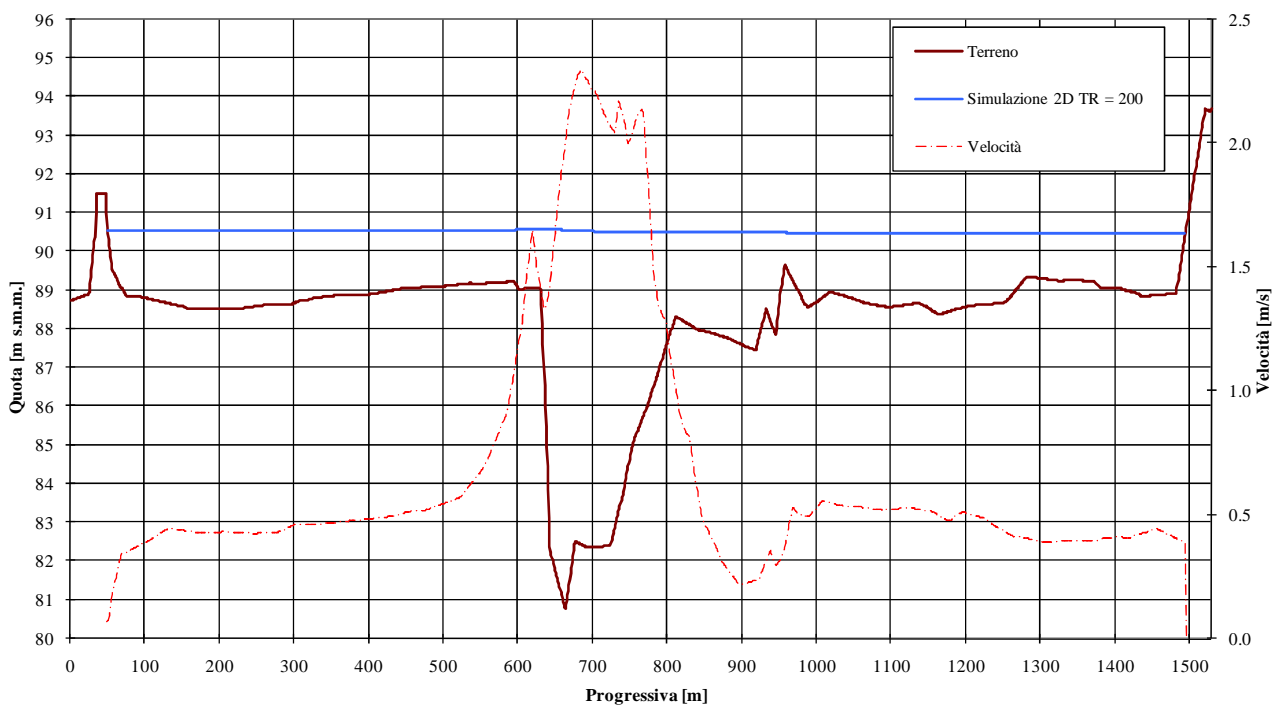
### Stato di progetto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 16



### Stato di progetto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 18

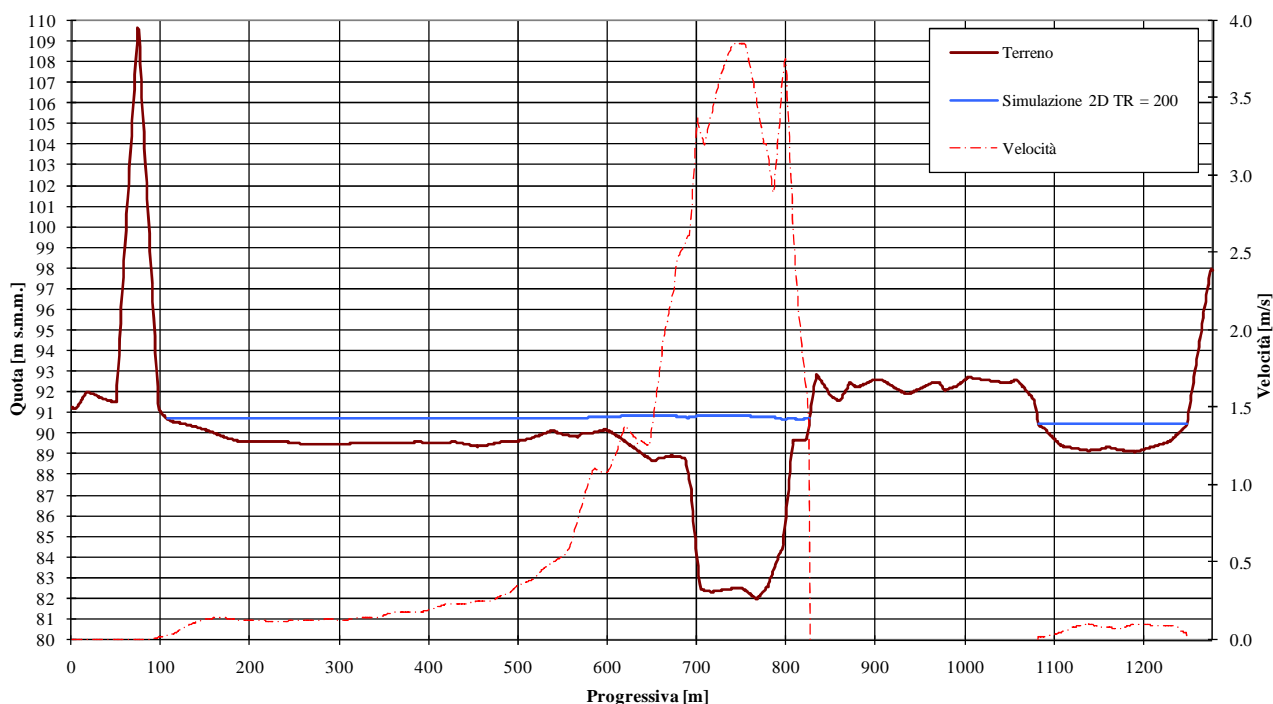


### Stato di progetto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 22

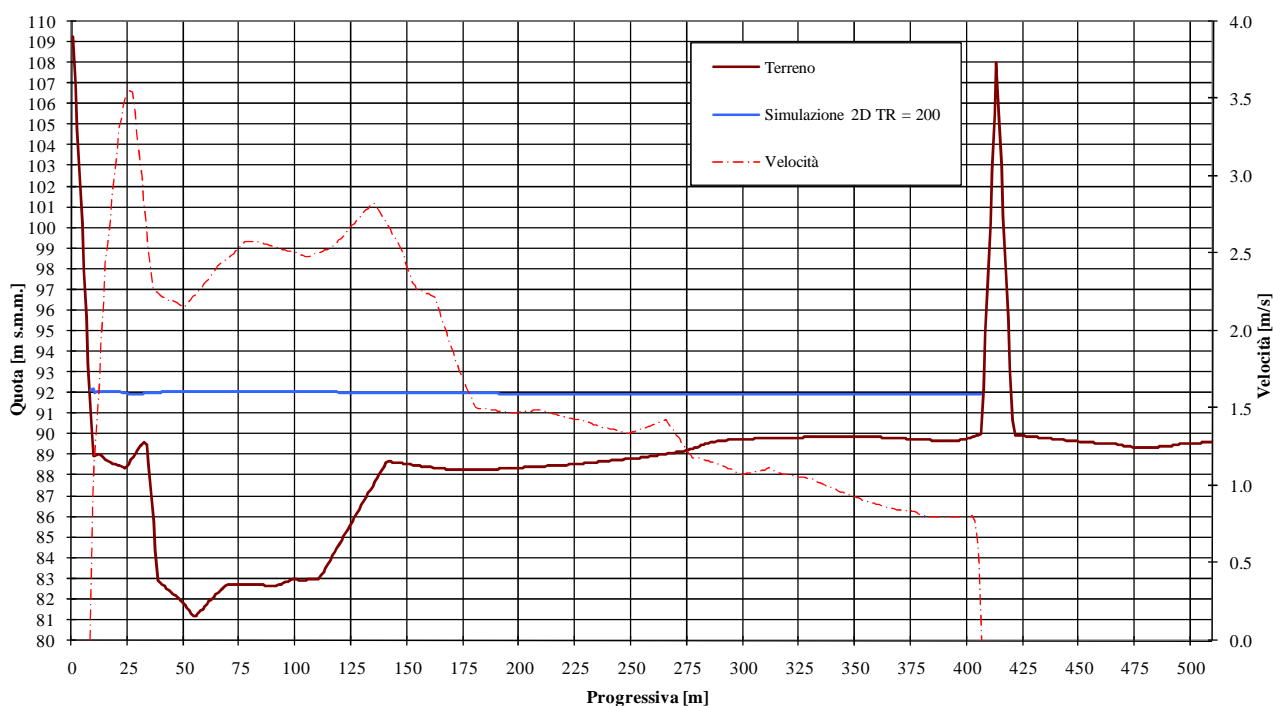




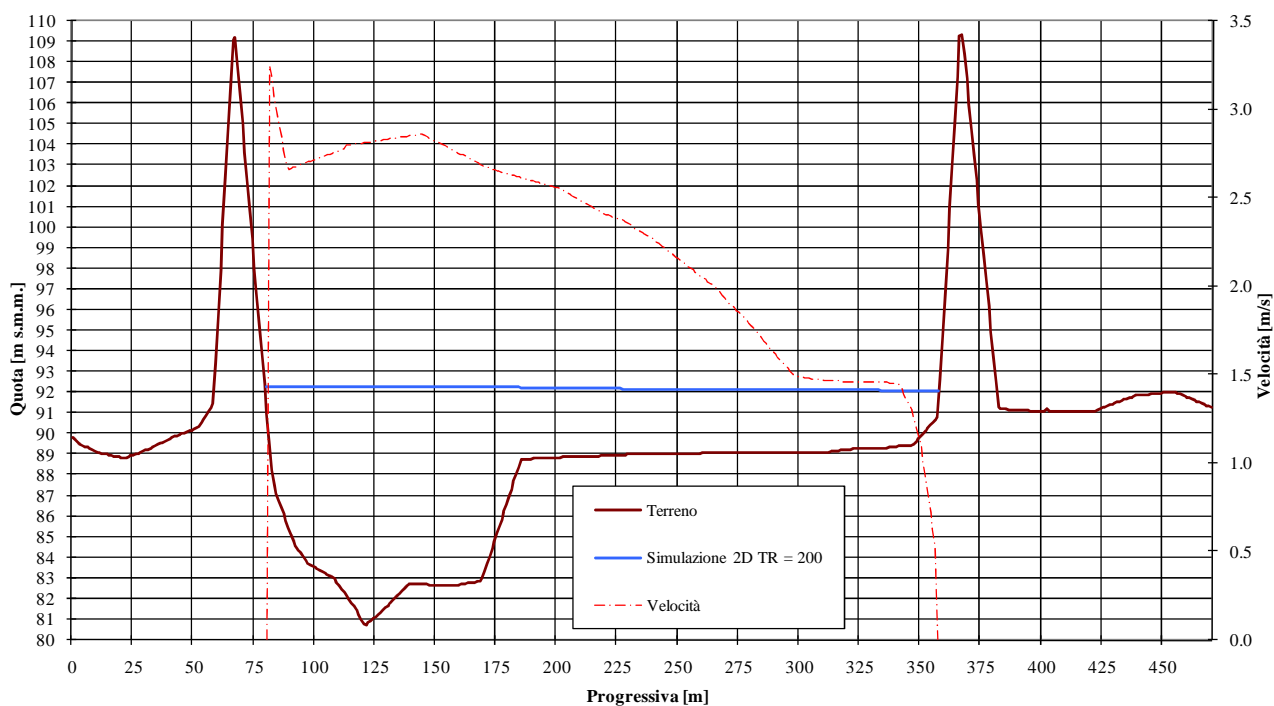
### Stato di progetto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 26



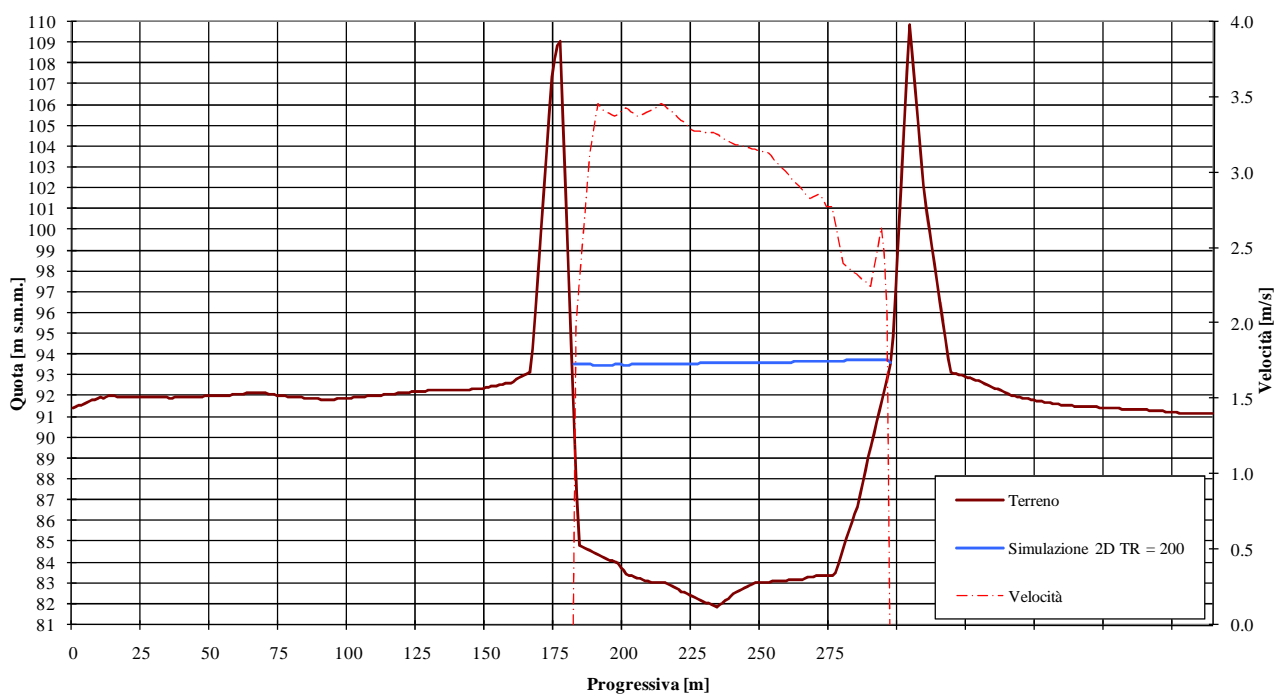
### Stato di progetto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 29



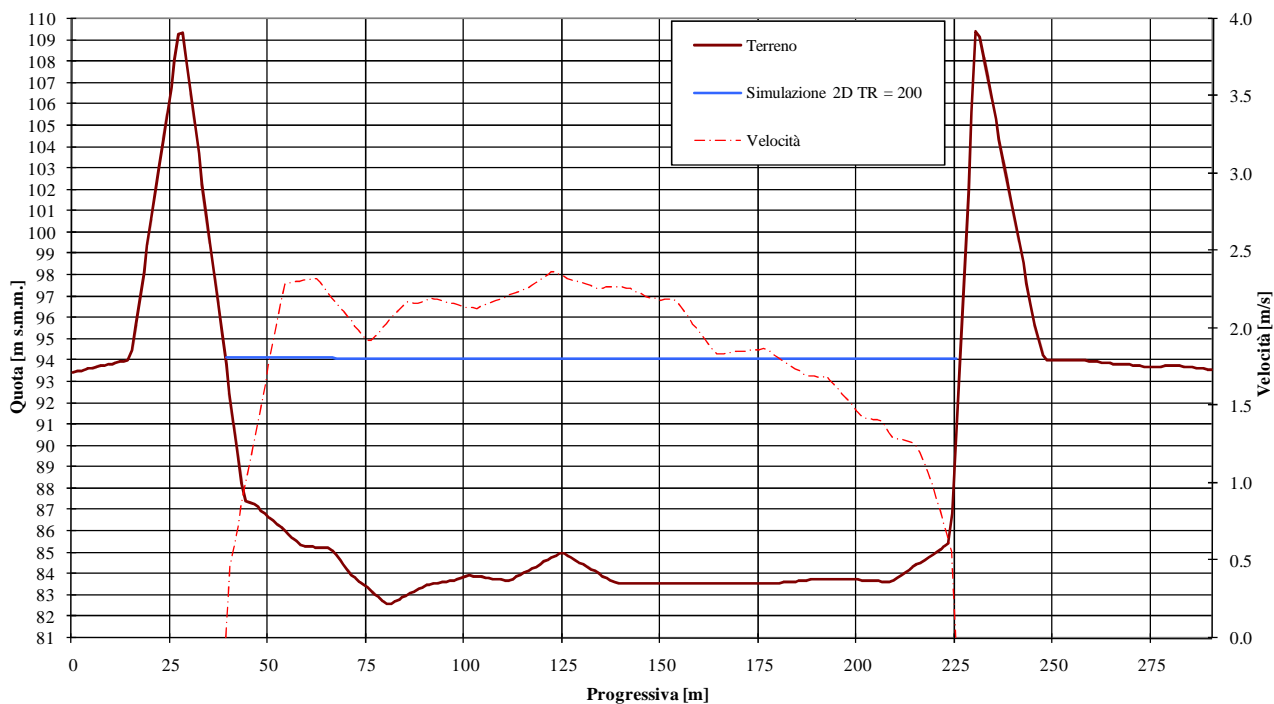
### Stato di progetto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 31



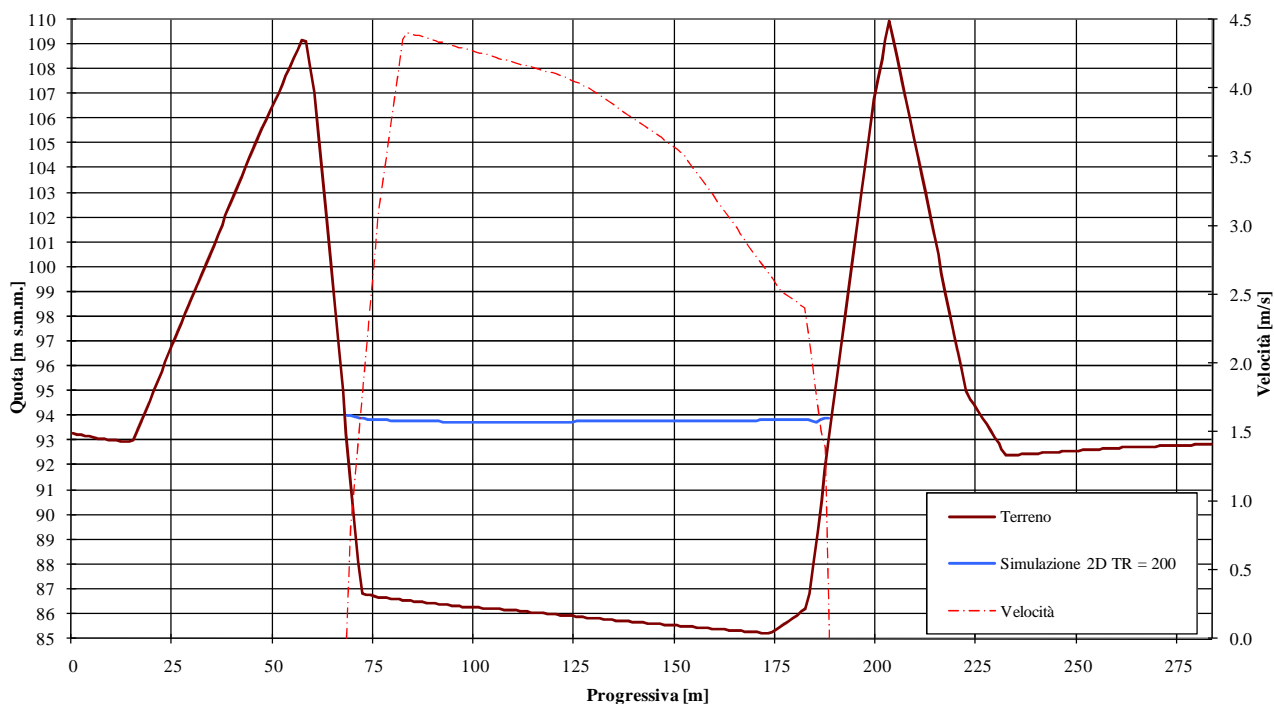
### Stato di progetto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 37



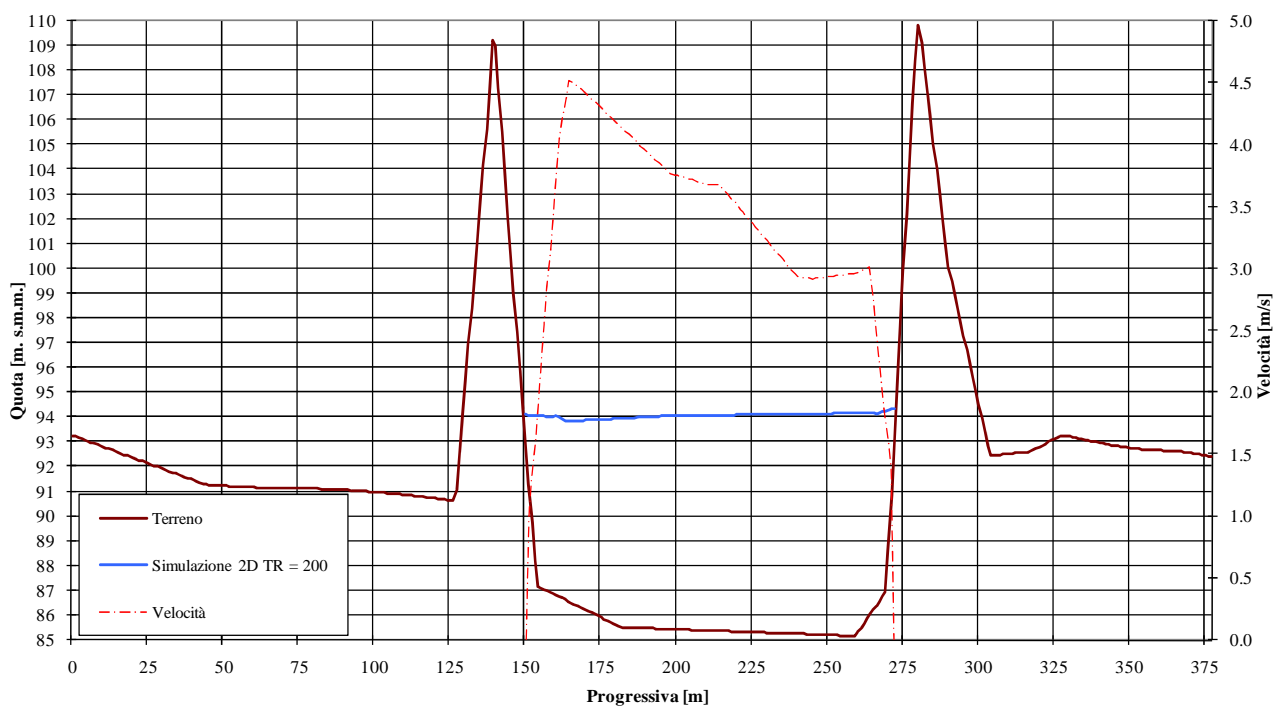
### Stato di progetto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 39



### Stato di progetto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 41



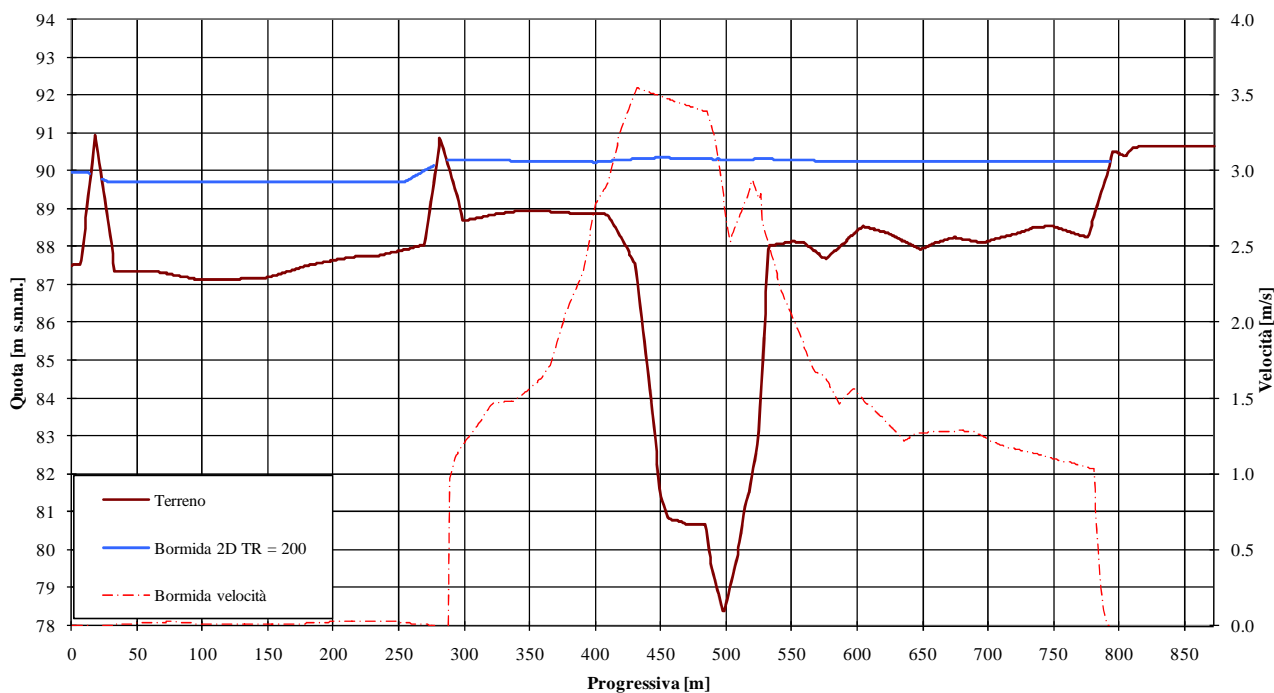
## Stato di progetto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni - Sezione 42



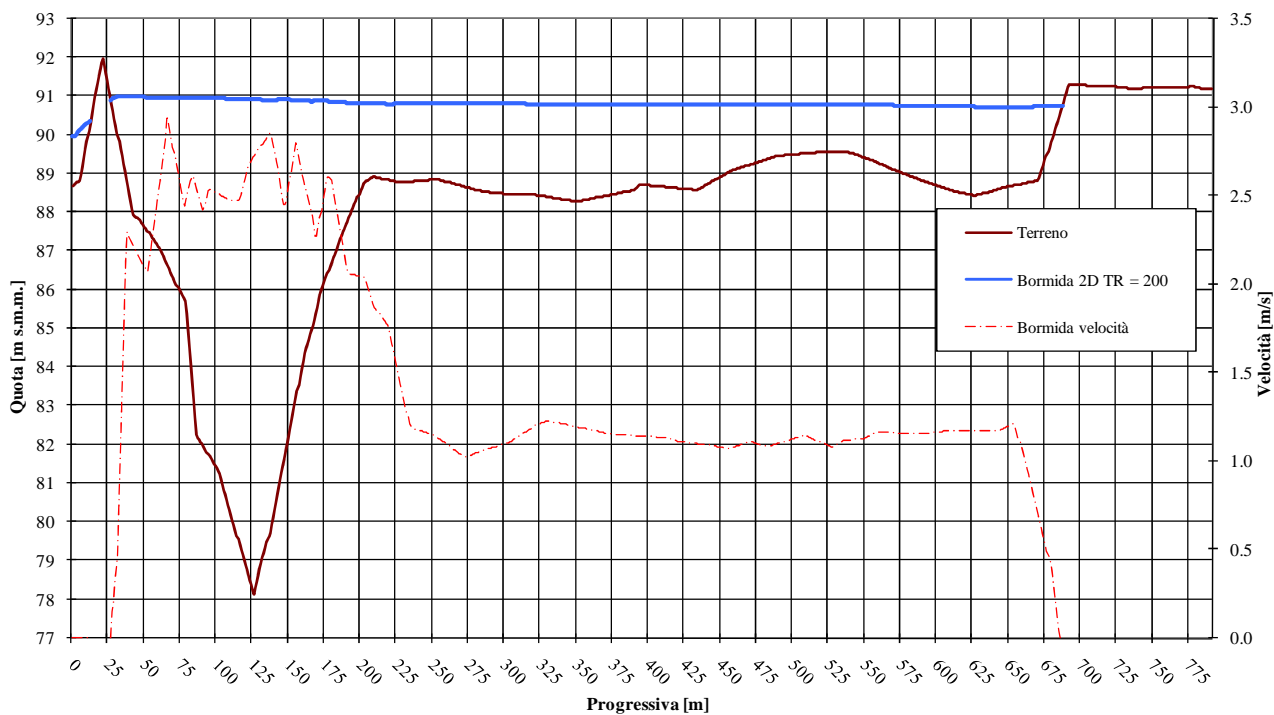
SEZIONI STATO DI FATTO - TR 200 BORMIDA



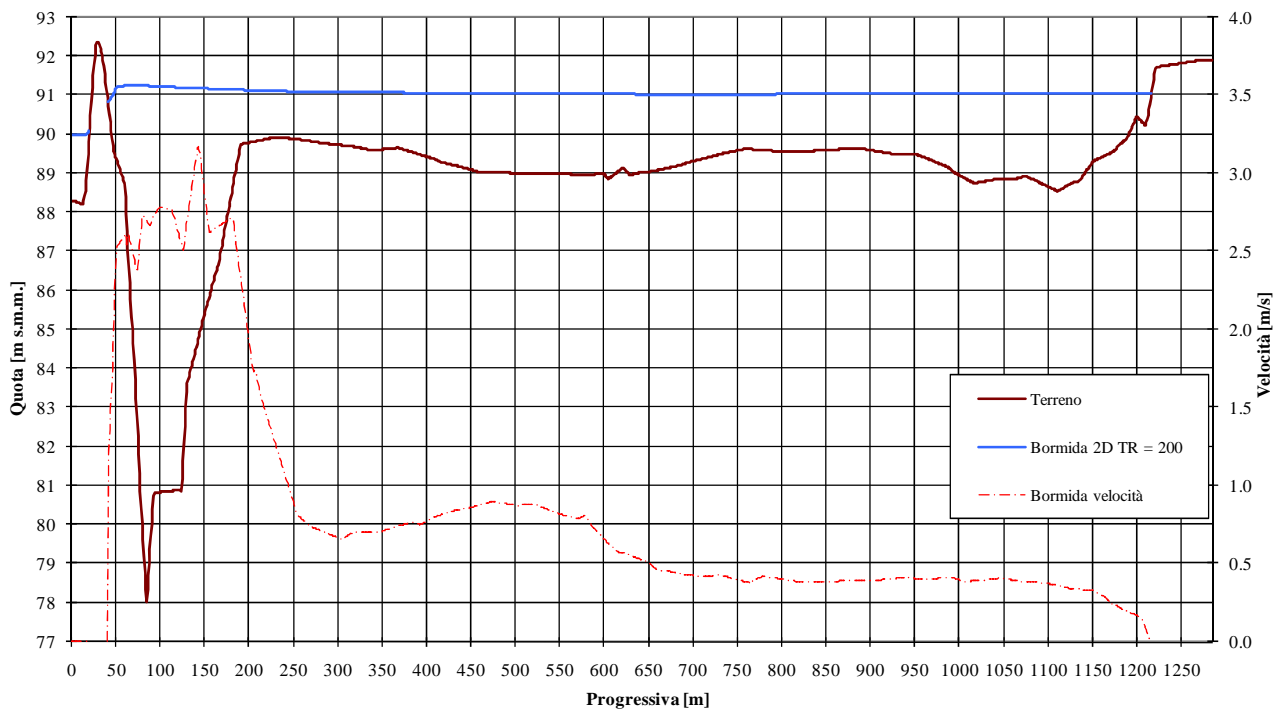
### Stato di fatto - Fiume Bormida - Tr = 200 anni sul Bormida - Sezione 4.5



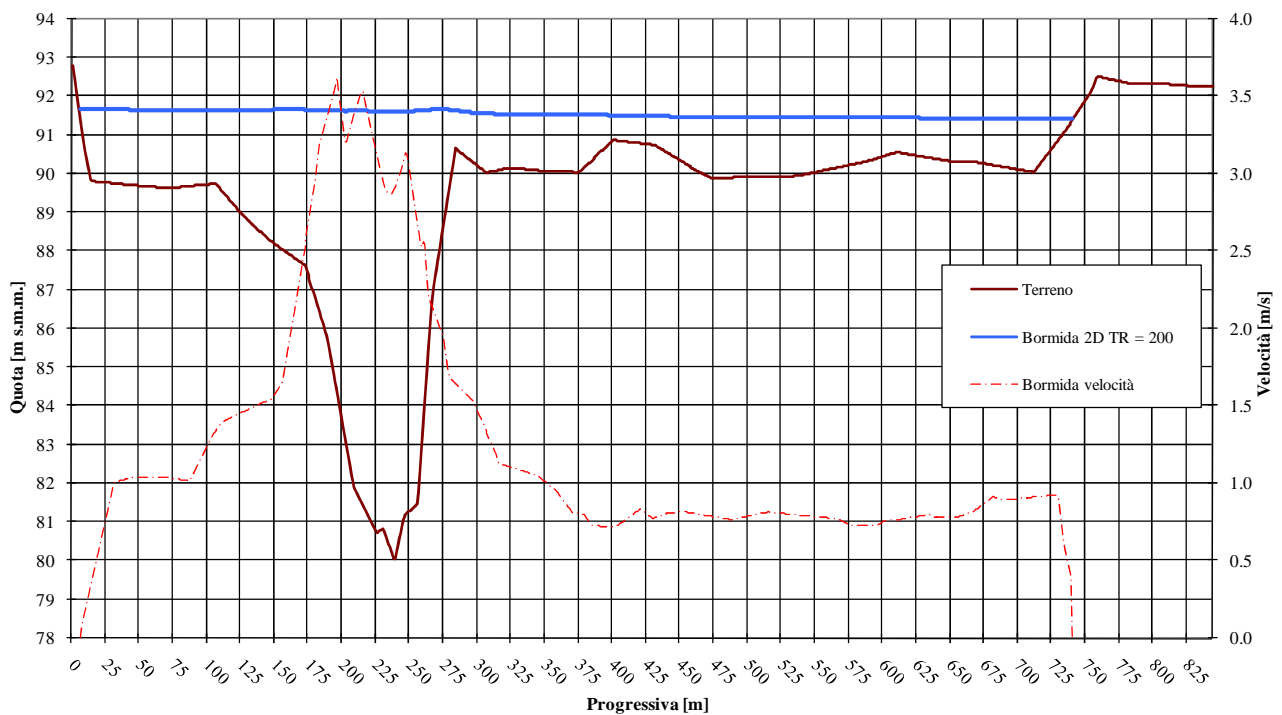
### Stato di fatto - Fiume Bormida - Tr = 200 anni sul Bormida - Sezione 5



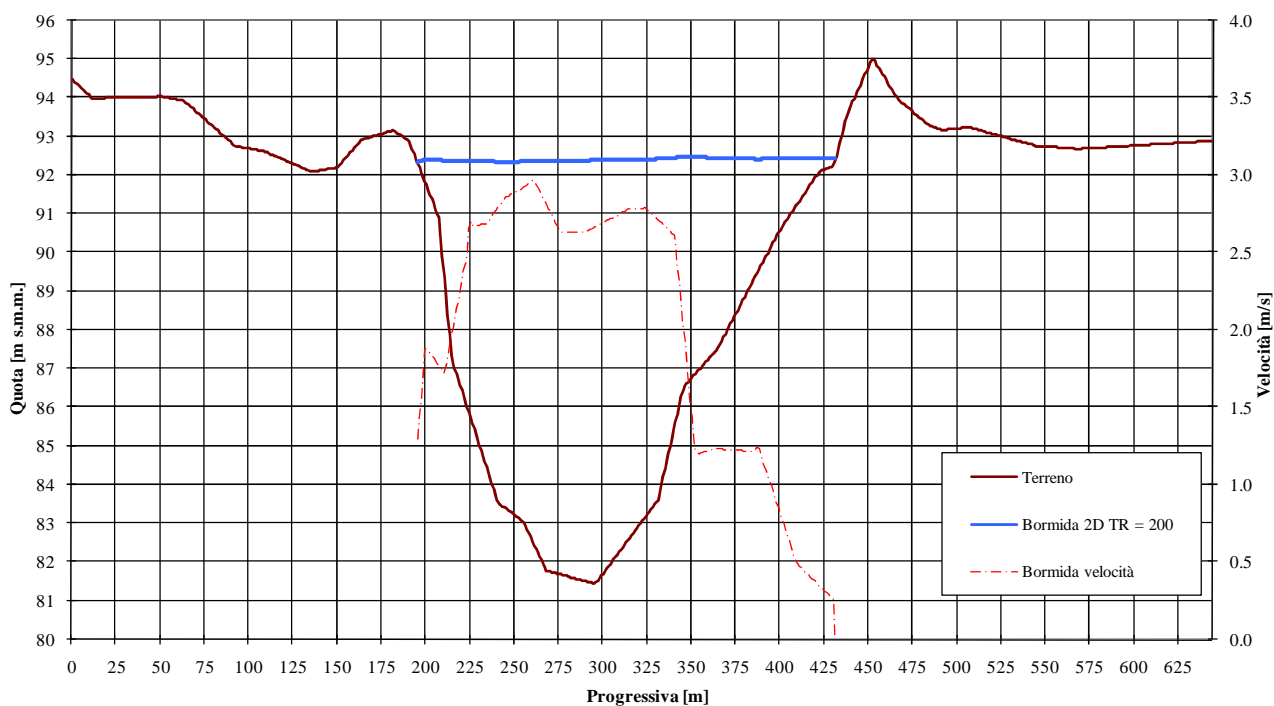
### Stato di fatto - Fiume Bormida - Tr = 200 anni sul Bormida - Sezione 5.5



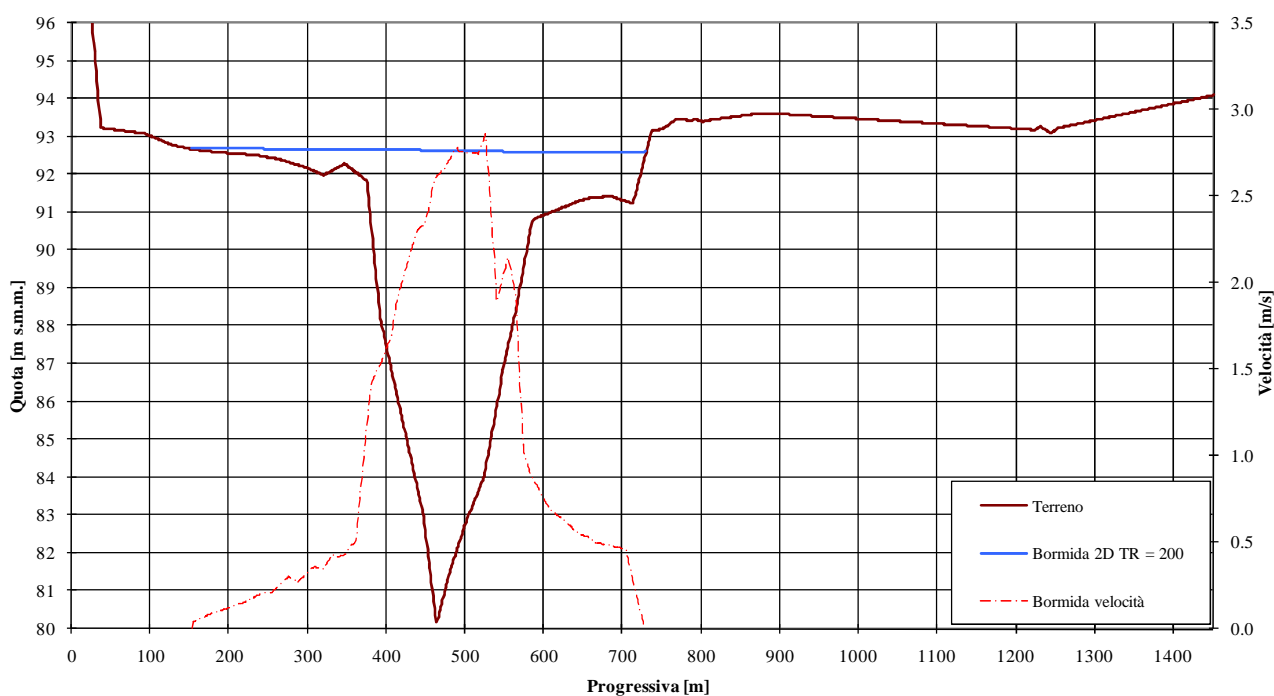
### Stato di fatto - Fiume Bormida - Tr = 200 anni sul Bormida - Sezione 6



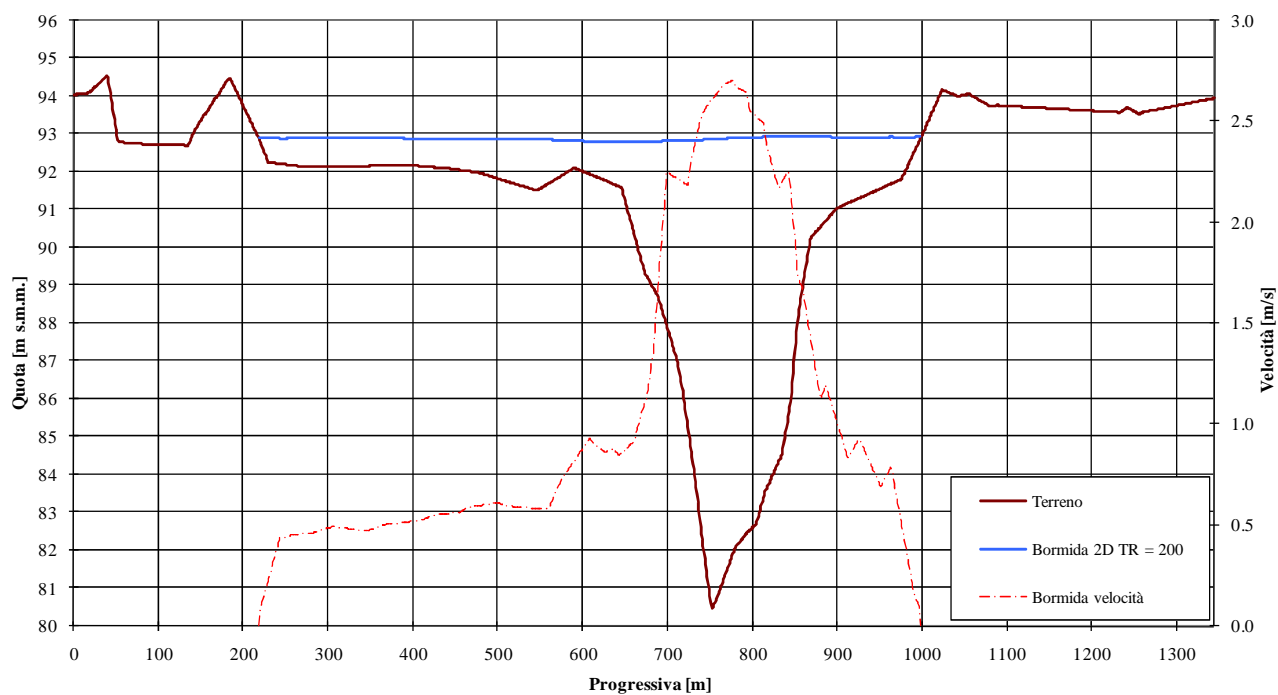
### Stato di fatto - Fiume Bormida - Tr = 200 anni sul Bormida - Sezione 8.2



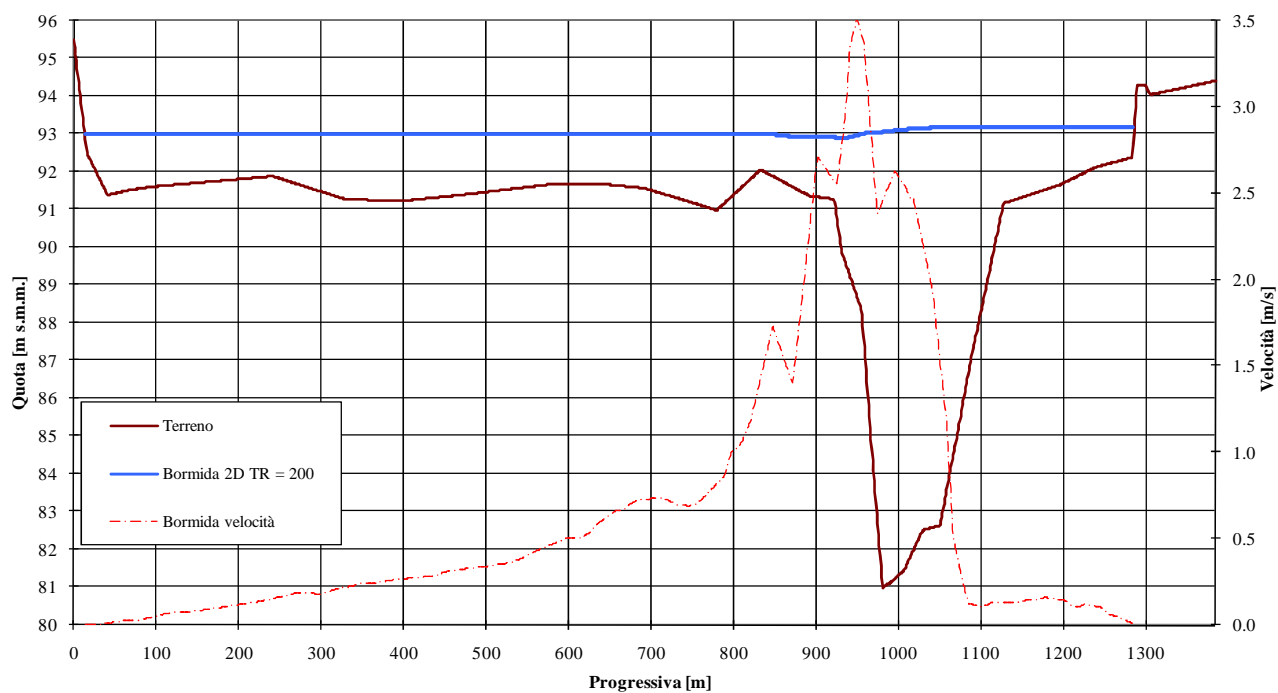
### Stato di fatto - Tr = 200 anni sul Bormida - Fiume Bormida - Sezione 2\_agg valle



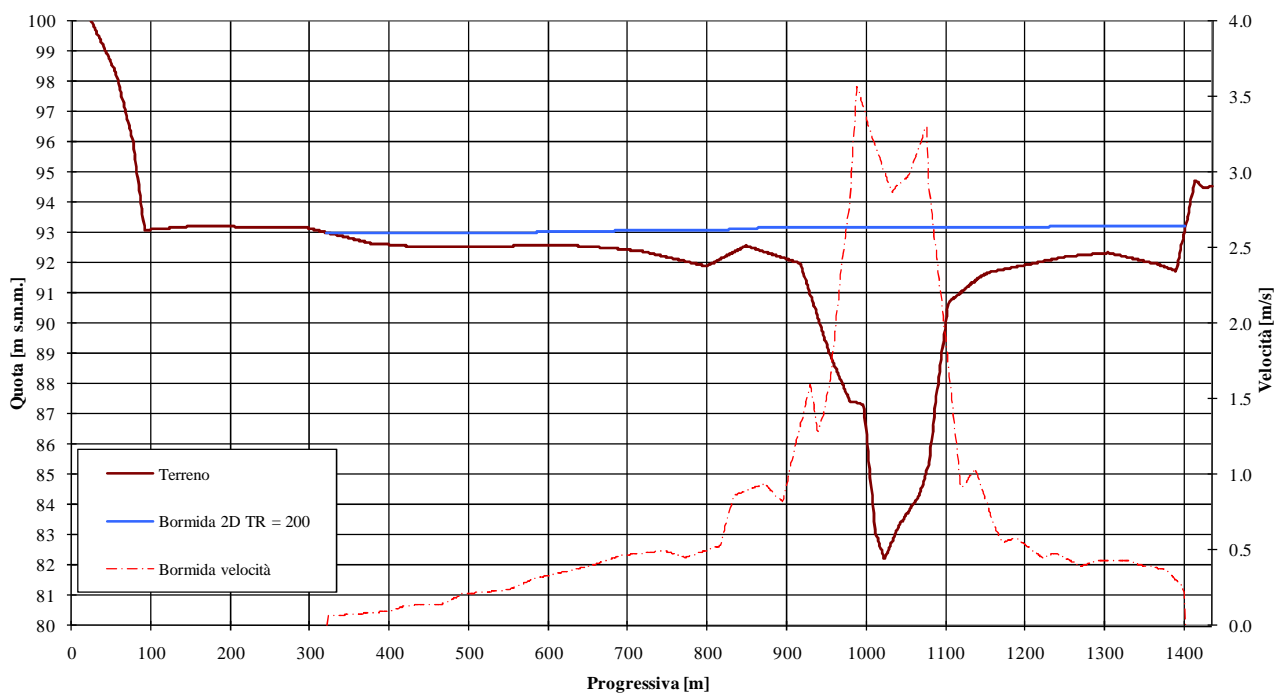
**Stato di fatto - Tr = 200 anni sul Bormida - Fiume Bormida - Sezione 2\_agg monte**



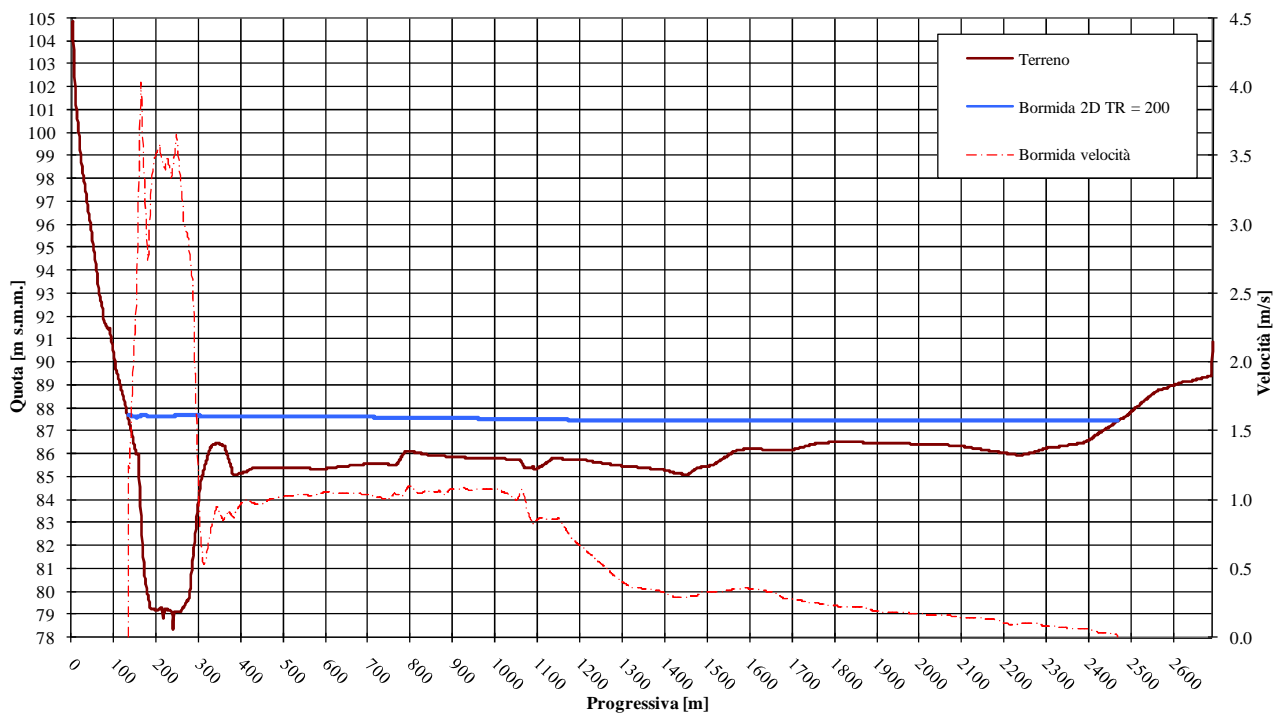
**Stato di fatto - Fiume Bormida - Tr = 200 anni sul Bormida - Sezione 9**



### Stato di fatto - Tr = 200 anni sul Bormida - Fiume Bormida - Sezione 1\_agg

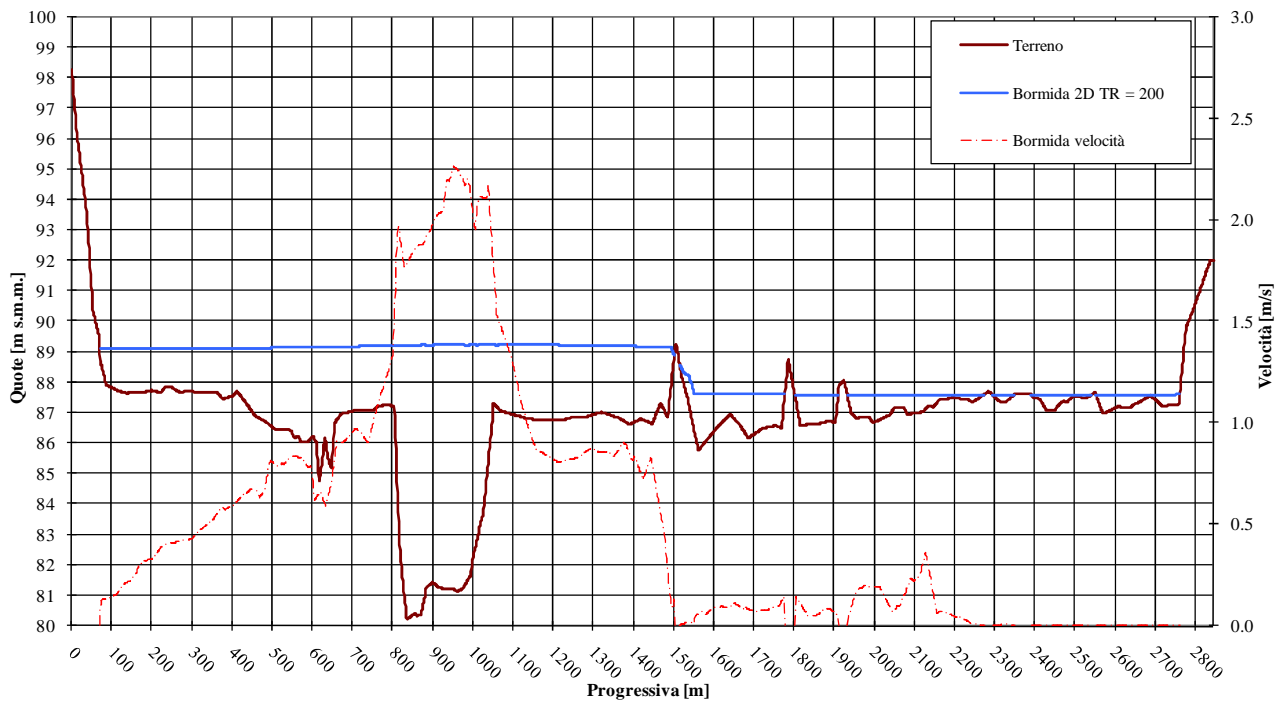


### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni sul Bormida - Sezione 9.5

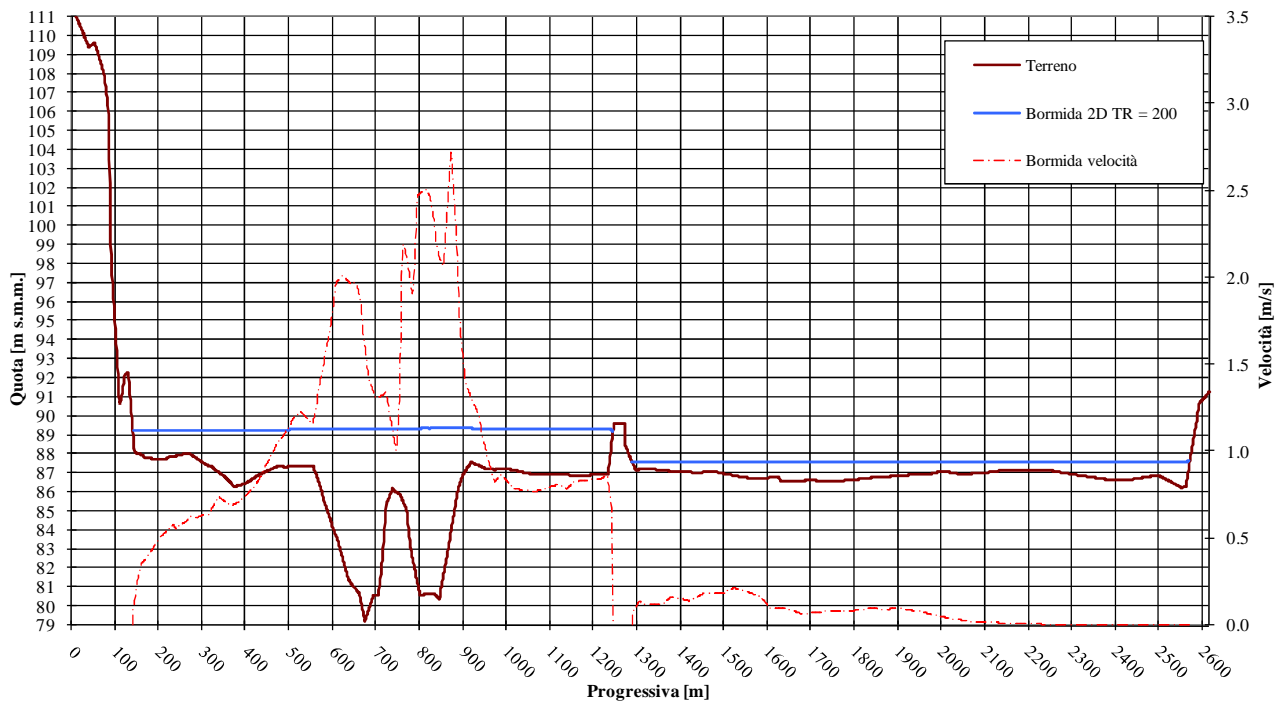




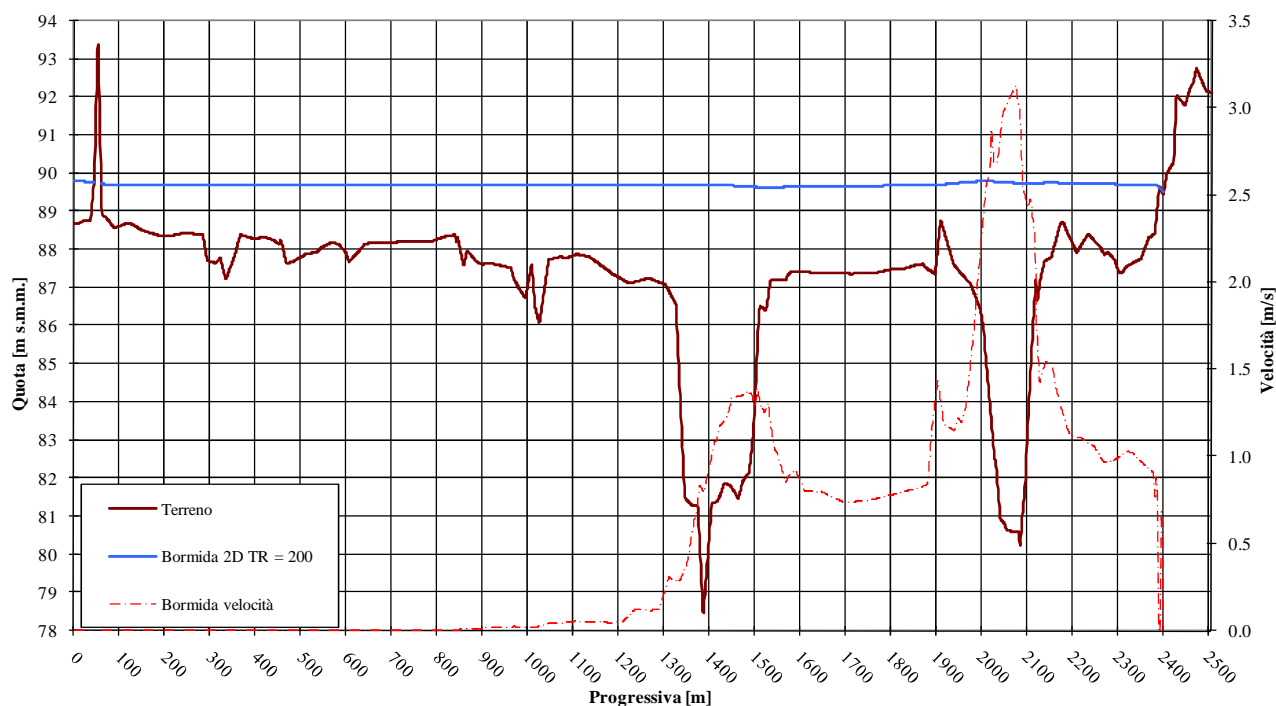
### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni sul Bormida - Sezione 11.1



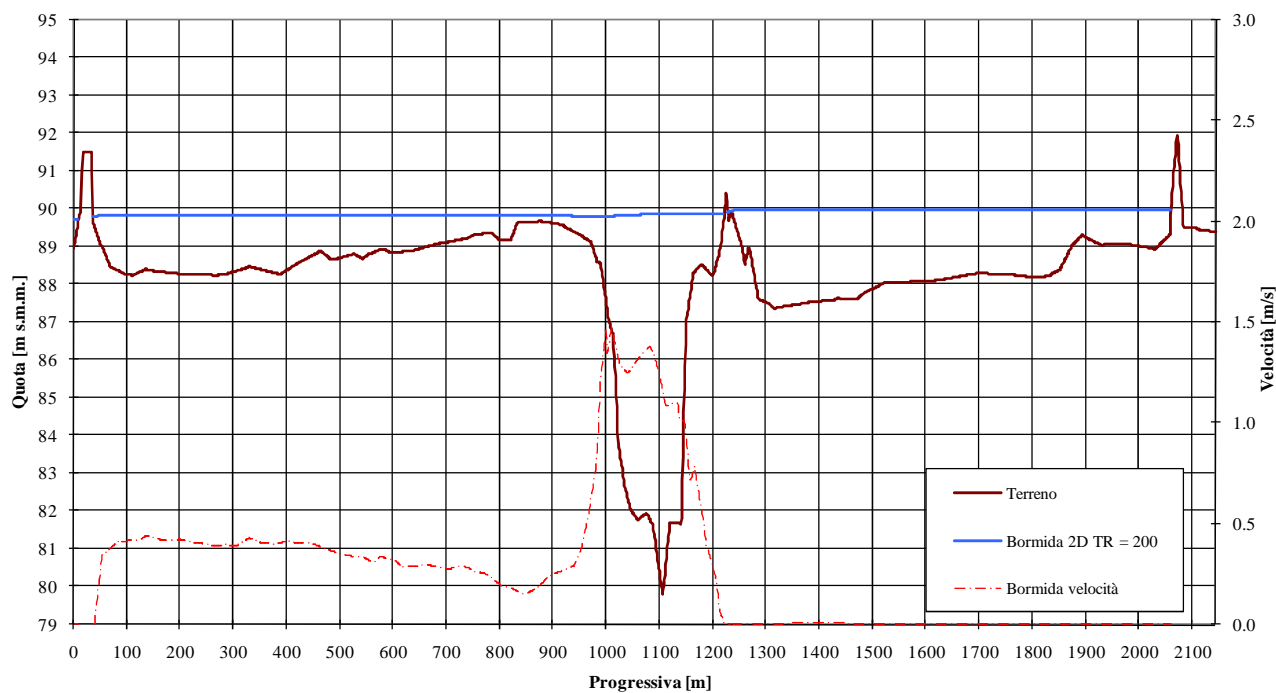
### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni sul Bormida - Sezione 12



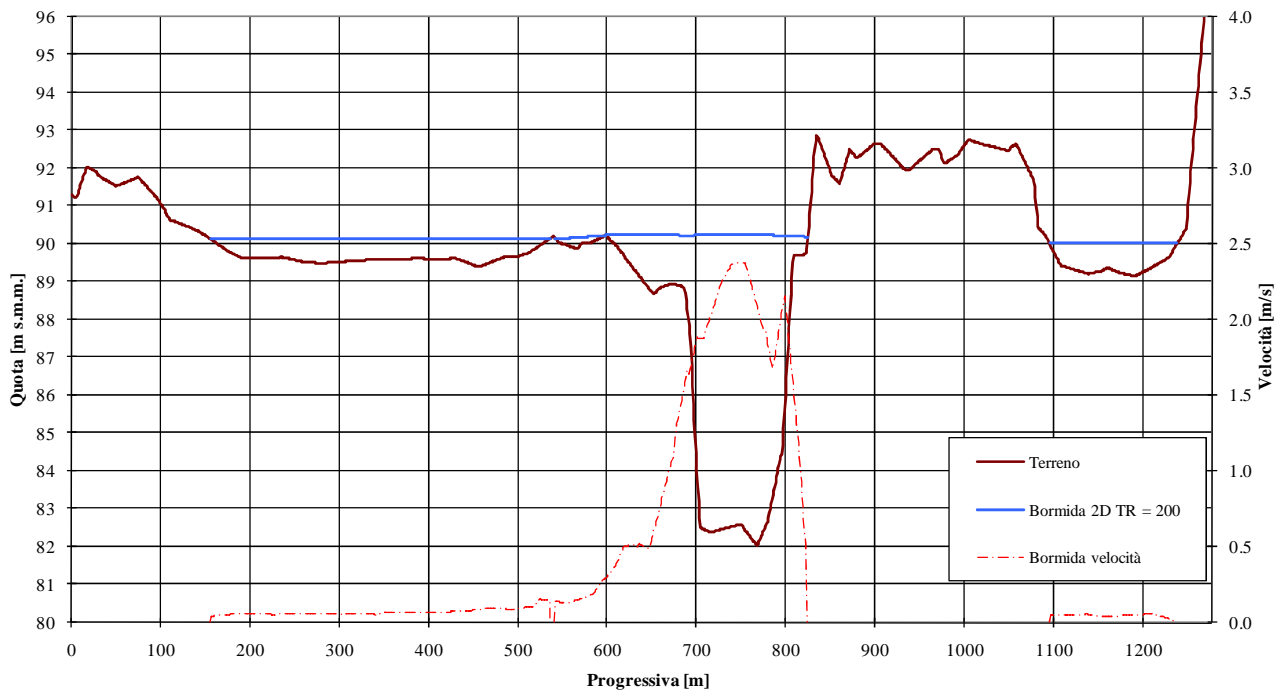
### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni sul Bormida - Sezione 13.4



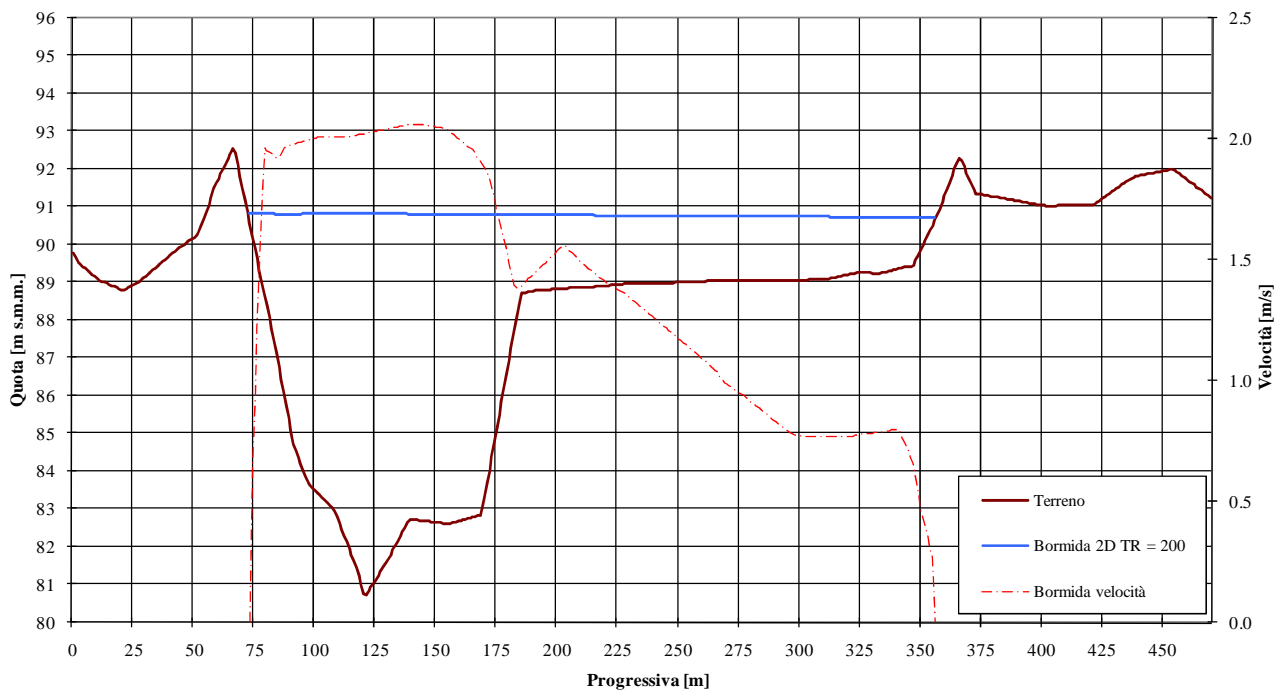
### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni sul Bormida - Sezione 18



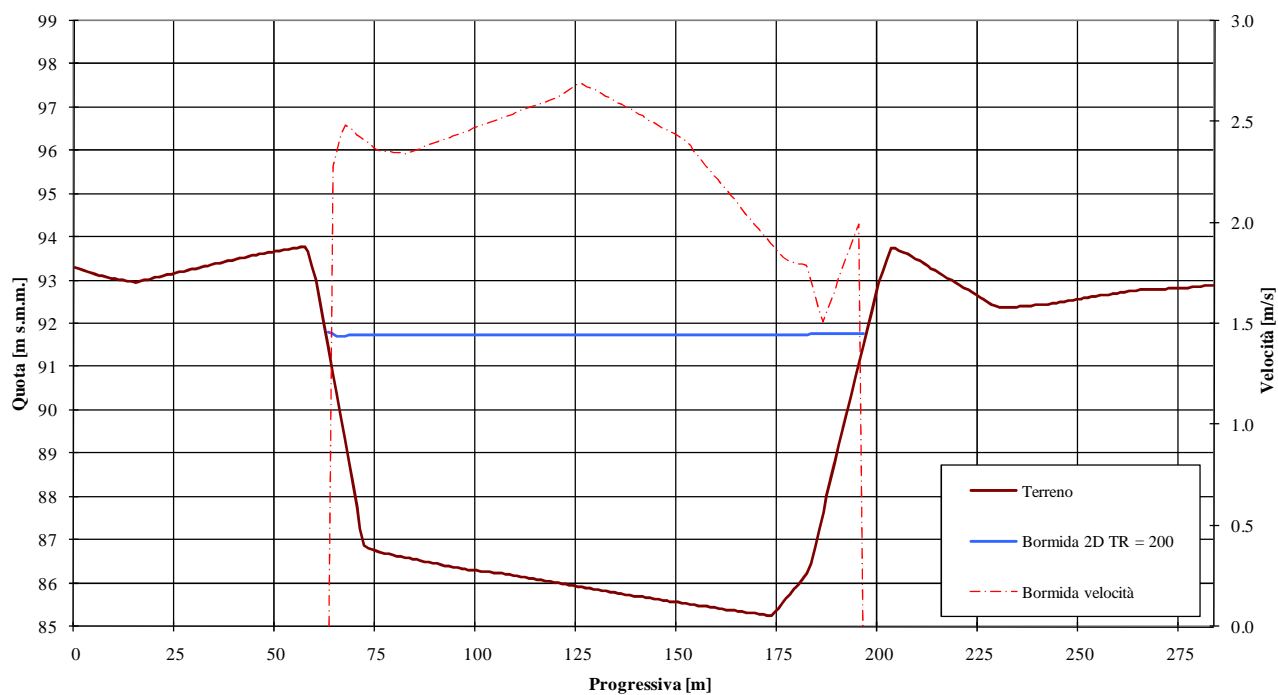
### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni sul Bormida - Sezione 26



### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni sul Bormida - Sezione 31



### Stato di fatto - Fiume Tanaro - Tr = 200 anni sul Bormida - Sezione 41



---

## Bibliografia essenziale

Chow V. T. (1959). Open Channel Hydraulics. *McGraw-Hill, New York*.

Falcomer L., Fiorotto V. e Cartagine P. (1999) Sulla sistemazione del nodo idraulico Tagliamento-Cavrato, *atti del convegno Giornate di Studio su La difesa del Territorio, Trieste 23-24 settembre 1999*

King I. P., and Norton W. R. (1978). "Recent application of RMA's finite element models for twodimensional hydrodynamic and water quality". *Finite elements in Water Resources II, Pentech Press, London, 2.81-2.99*.

Rodi W. (1993), "Turbulence models and their application in hydraulics - A state of the art Review". *International Association for Hydraulic Research*.

Shion K., and Knight D. W. (1991). "Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel". *J. Fluid. Mech.*, 222, 617-646.

Zanichelli G., Caroni e Fiorotto V.(2004) On parameter selection in 2D numerical modeling of a River bifurcation, *ASCE Journal of hydraulics engineering, vol. 130 n.3*

---