



**CITTA' DI TORINO**

**INSTALLAZIONE TEMPORANEA  
 DI RUOTA PANORAMICA IN SPONDA AL FIUME PO**



**ANALISI PRELIMINARE  
 DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA**

**Relazione tecnica**

3906 - 0 1 - 0 0 1 0 0 . DOC

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

<b>00</b>	<b>LUG. 24</b>	<b>M. CARGNELUTTI</b>	<b>L. DUTTO</b>	<b>L. DUTTO</b>	
REV.	DATA	REDAZIONE	VERIFICA	AUTORIZZAZIONE	MODIFICHE



## INDICE

1.	PREMESSA	1
2.	ASSETTO IDRAULICO DA PIANIFICAZIONE VIGENTE	2
3.	AREA DI STUDIO E DATI GEOMETRICI DI INPUT	5
	3.1 Descrizione di sintesi del tratto fluviale in studio	5
	3.2 Dati geometrici e topografici	8
4.	ANALISI IDROLOGICA	10
5.	ANALISI IDRAULICA	11
	5.1 Approccio metodologico	11
	5.2 Allestimento del modello	11
	5.3 Calibrazione del modello idrodinamico	15
	5.4 RISULTATI DEGLI SCENARI DI SIMULAZIONE	19
6.	CONCLUSIONI	36

ALLEGATO 1 - Descrizione del codice di calcolo MIKE21 - HD



## 1. PREMESSA

Il Comune di Torino sta sviluppando la progettazione dell'installazione temporanea di una ruota panoramica in corrispondenza dei Giardini Ginzburg, sulla sponda destra del fiume Po nel tratto compreso tra il ponte Umberto I e la traversa Michelotti, come rappresentato in Figura 1.

Poiché l'area di prevista installazione ricade nelle perimetrazioni di pericolosità idraulica del PGRA, nonché parzialmente all'interno della fascia B del PAI, risulta necessario procedere a una verifica di compatibilità idraulica del manufatto, oggetto della presente relazione.

In particolare, è stato indagato l'assetto idraulico del tratto cittadino del fiume, determinando con l'ausilio di un modello numerico bidimensionale i campi di moto (altezze d'acqua, velocità) che si instaurano in corrispondenza del deflusso di portate di piena gravosa. Le distribuzioni di tali parametri idraulici permettono di condurre le verifiche sull'eventuale interferenza in condizioni di piena (TR20 e TR200 anni) delle opere in progetto, nonché di verificare la sicurezza delle stesse rispetto a possibili danneggiamenti ad opera della piena.

Per descrivere correttamente le dinamiche di esondazione e propagazione delle correnti di piena, il dominio di calcolo del modello allestito si estende per un ampio tratto a monte rispetto all'area di diretto interesse; il limite di studio di valle è invece costituito dallo sbarramento della traversa Michelotti.

Nel seguito sono descritte le attività svolte per l'allestimento del modello e le analisi idrodinamiche, con presentazione dei principali risultati ottenuti.

Pur trattandosi di un'installazione di tipo temporaneo, considerando l'importante carico antropico (danno potenziale) generabile per il richiamo turistico del manufatto, oltre al valore economico dello stesso, si è ritenuto adeguato sviluppare la verifica di compatibilità idraulica assumendo come riferimento l'evento di piena associato a un tempo di ritorno duecentennale, come se si trattasse di un'opera definitiva.



Figura 1 – Inquadramento su vista aerea dell'area di intervento (rettangolo bianco). Fonte immagine: Google Earth.

## 2. ASSETTO IDRAULICO DA PIANIFICAZIONE VIGENTE

L'assetto idraulico dell'asta del fiume Po e i vincoli di tipo idraulico che ne derivano sul territorio sono definiti dai seguenti riferimenti normativi:

- Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI), adottato dall'Autorità di Bacino del Fiume Po (AdBPo) e approvato con il DPCM 24 maggio 2001, recepito dal PRGC del Comune di Torino con la Variante 100 approvata con il D.G.R. N. 21-9903 del 27/10/2008, che individua le Fasce fluviali A, B e C lungo l'asta del Po.
- *Piano di Gestione del Rischio Alluvioni del distretto idrografico padano (PGR)*, predisposto ai sensi dell'art.7 della Direttiva 2007/60/CE e dell'art.7 del D.lgs.49/2010, adottato dal Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino del Fiume Po con Deliberazione n. 4 del 17 dicembre 2015, approvato con D.P.C.M. 27 ottobre 2016, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 30 in data 6 febbraio 2017. Aggiornato per il sessennio 2021-2027 con delibera adottata in data 20 dicembre 2021 dalla Conferenza Istituzionale permanente dell'AdBPo.
- *Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica*, emanata dall'Autorità di Bacino del Fiume Po ai sensi dell'art.10 delle Norme di Attuazione del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico, con gli aggiornamenti prodotti dal documento "*Profili di piena dei corsi d'acqua del reticolo principale - marzo 2016*" approvato con il PGR.
- Direttiva 1 del PAI: *Direttiva per la riduzione del rischio idraulico degli impianti di trattamento delle acque reflue e delle operazioni di smaltimento e recupero dei rifiuti ubicati nelle fasce fluviali "A" e "B" e nelle aree in dissesto idrogeologico "Ee" e "Eb"*;
- Direttiva 4 del PAI - *Direttiva contenente i criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico all'interno delle fasce "A" e "B"*.
- Deliberazione 07/12/2016 n. 5 dell'Autorità di Bacino del Fiume Po "*Variante alle Norme di Attuazione del PAI e del PAI Delta*".

Il vigente PGR ha aggiornato e integrato la mappatura delle aree potenzialmente allagabili presente nel PAI, rappresentandole nelle mappe di pericolosità e distinguendole nei seguenti scenari:

- aree **P3** (H nella cartografia) ad alta pericolosità, o aree potenzialmente interessate da alluvioni frequenti (tempi di ritorno compresi tra 10 e 20 anni);
- aree **P2** (M nella cartografia) a media pericolosità, o aree potenzialmente interessate da alluvioni poco frequenti (tempi di ritorno compresi tra 100 e 200 anni);
- aree **P1** (L nella cartografia) a bassa pericolosità, o aree potenzialmente interessate da alluvioni rare (tempo di ritorno di riferimento di 500 anni).

Nella Figura 2 si riportano le perimetrazioni definite dal PGR delle aree di pericolosità per l'asta del Po nel tratto oggetto di analisi.

In Figura 3 si fornisce un dettaglio di tali aree in prossimità della zona in cui si prevede la realizzazione del basamento della ruota panoramica.

All'immagine sono sovrapposte anche le Fasce Fluviali del PAI e la traccia schematica del basamento delle opere in progetto. Nella successiva Figura 4 è riportato un ingrandimento della figura precedente in corrispondenza delle opere in progetto.

Il basamento risulta a cavallo del limite della Fascia B del PAI e interamente incluso nell'area di pericolosità P2 del PGR.



Figura 2 - Fasce di pericolosità idraulica per il tratto di Po oggetto di analisi mediante modello idrodinamico.



Figura 3 - Fasce di pericolosità idraulica e Fasce fluviali: dettaglio nel tratto più prossimo alle opere in progetto.





Figura 4 - Fasce di pericolosità idraulica e Fasce fluviali: ingrandimento in corrispondenza del basamento di fondazione delle opere in progetto.

### 3. AREA DI STUDIO E DATI GEOMETRICI DI INPUT

#### 3.1 Descrizione di sintesi del tratto fluviale in studio

Il tratto fluviale oggetto di analisi idraulica si estende tra monte del ponte di corso Bramante e la traversa Michelotti a valle del ponte della Gran Madre di Dio (ponte Vittorio Emanuele I); la sua lunghezza complessiva è pari a circa 3,15 km.

Il fiume Po nell'ambito di studio si sviluppa in direzione Sud - Nord ed è delimitato a carattere quasi continuo da opere di contenimento dei livelli in destra e sinistra costituite da muri; localmente sono presenti opere in alveo costituite da difese spondali in massi che proteggono tratti d'alveo non arginati e quindi soggetti a sormonto in occasione di eventi di piena gravosi.

Nella Figura 5 è riportata una corografia dell'area in esame con individuazione della superficie coperta dal modello numerico 2D messo a punto per le analisi oggetto del presente studio.

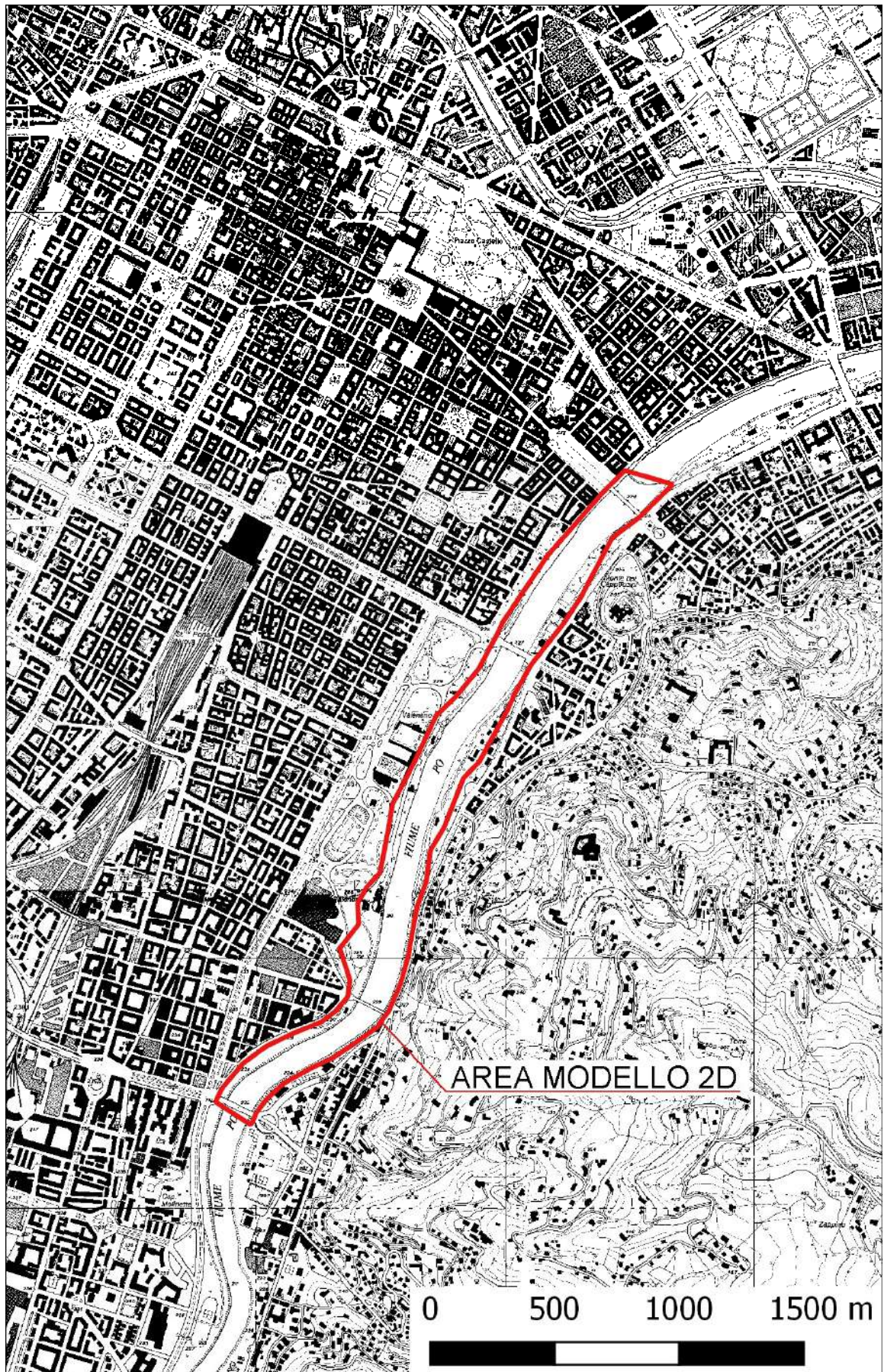


Figura 5 – Corografia dell'area in esame con individuazione della superficie coperta da modello 2D.

Dal punto di vista geomorfologico l'assetto del tratto è fissato dai vincoli imposti dai muri di contenimento laterali che ne impediscono qualsiasi possibile deviazione o spostamento; il profilo di fondo è invece fissato dalla presenza della traversa Michelotti.

Quest'ultima ha anche funzione di regolazione idraulica del tratto in esame, imponendo in condizioni idrologiche ordinarie un livello idrico a monte costante, mantenuto grazie alle regolazioni rese possibili da un elemento di ritenuta mobile ("gommoni") che sormonta la soglia fissa. Al crescere dei deflussi, fino al raggiungimento di stati di piena, il "gommoni" gradualmente e automaticamente si abbassa bilanciando il sovrizzo dovuto allo sfioro della maggior portata, fino ad abbattersi completamente in condizioni di piena.

La traversa è dotata di un passaggio di risalita per l'ittiofauna in sponda sinistra, con gaveta fissa, e di una paratoia piana sghiaiatrice in destra, che tipicamente viene aperta dai tecnici del Comune in occasione degli eventi di piena di maggiore gravosità, per favorire lo smaltimento delle portate in ingresso senza eccessivo innalzamento dei livelli a monte.

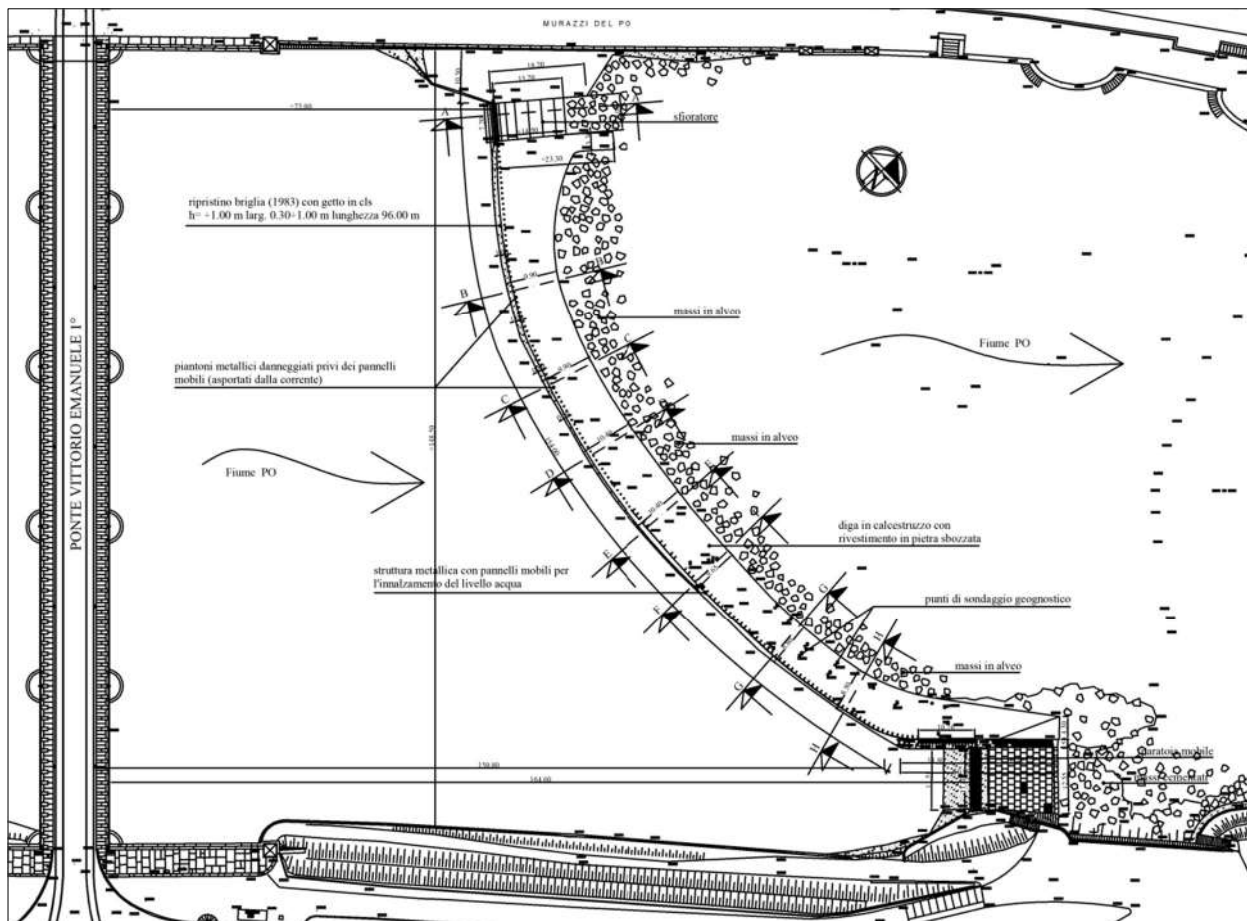


Figura 6 – Planimetria di rilievo della traversa Michelotti, predisposta dal Comune di Torino (anno 2006).

Nell'ambito cittadino il Po è interferito dagli attraversamenti e dalle opere trasversali all'alveo di seguito elencati, in ordine da monte verso valle, che sono stati descritti dal sistema modellistico realizzato per gli elementi di interesse:

- il ponte Balbis (corso Bramante) all'altezza dell'ospedale Le Molinette;
- il ponte Isabella (corso Dante Alighieri);
- il ponte Umberto I (corso Vittorio Emanuele II);
- il ponte Vittorio Emanuele I (che congiunge piazza Vittorio Emanuele a piazza della gran Madre di Dio);
- la traversa Michelotti.

### 3.2 Dati geometrici e topografici

La geometria del fiume Po, per quanto attiene le finalità di allestimento del modello numerico con schema bidimensionale utilizzato per il presente studio, è stata messa a punto in modo da definire nel dettaglio sia la porzione incisa del corso d'acqua sia gli ambiti esterni alle sommità spondali, in modo da determinare con precisione la morfologia dei fondali dell'alveo e le aree potenzialmente allagabili localizzate in adiacenza delle sponde.

Per ottenere una batimetria di calcolo utile a rappresentare nel modello gli elementi sopra indicati si sono integrate diverse informazioni geometriche, di seguito descritte.

- Rilievi topografico-batimetrici relativamente recenti (aprile 2017 e novembre 2020) riguardanti prevalentemente l'alveo inciso del corso d'acqua, per descrivere con elevato dettaglio la geometria dei fondali e di significativi tratti di sponda, sia caratterizzate dalla presenza di opere di contenimento dei livelli idrici (murazzi) che da elementi morfologici naturali.
- Il DTM (modello digitale del terreno) a maglia di dimensioni 0,8x1,1 m derivante dal rilievo LiDAR predisposto dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM), restituito in coordinate geografiche proiettate nel sistema di riferimento UTM 32 WGS84, e agganciato in quota alla rete di caposaldi IGM. Questa base topografica è in grado di descrivere con adeguato dettaglio la geometria al contorno relativa alle aree esterne all'alveo inciso del Po.
- Il rilievo di tutti manufatti di attraversamento e delle opere idrauliche interferenti con le aste fluviali in esame, derivate in prima battuta dalle sezioni topografiche AIPO (risalenti per il Po al 1999), verificate con il rilievo delle opere di sostegno in alveo (pile) e di alcuni punti di controllo sull'estradosso della struttura (rilievo HYDRODATA 2020).

Il modello batimetrico 2D così ottenuto, elaborato tramite l'ausilio di un software GIS, è rappresentato nella Figura 7.

Si precisa come tale modello derivi da quello già allestito per le analisi idrauliche e di compatibilità idraulica, svolte per conto del Comune di Torino, nell'ambito del progetto di fattibilità e del progetto definitivo *per rendere navigabile il fiume Po in ambito urbano al fine di istituire un servizio di navigazione fluviale* (HYDRODATA, 2022-2023).

La ruota panoramica di prevista installazione sarà installata su una piattaforma di geometria circa rettangolare in pianta, con dimensioni circa pari a 25 m in senso longitudinale al fiume e 20 m in senso trasversale. L'altezza media di tale piattaforma rispetto al piano campagna è prevista dell'ordine del metro. Nella porzione centrale della piattaforma vi sarà la struttura in elevazione di sostegno della ruota; per l'insieme ruota/struttura si è considerato un ingombro trasversale di 5 m.

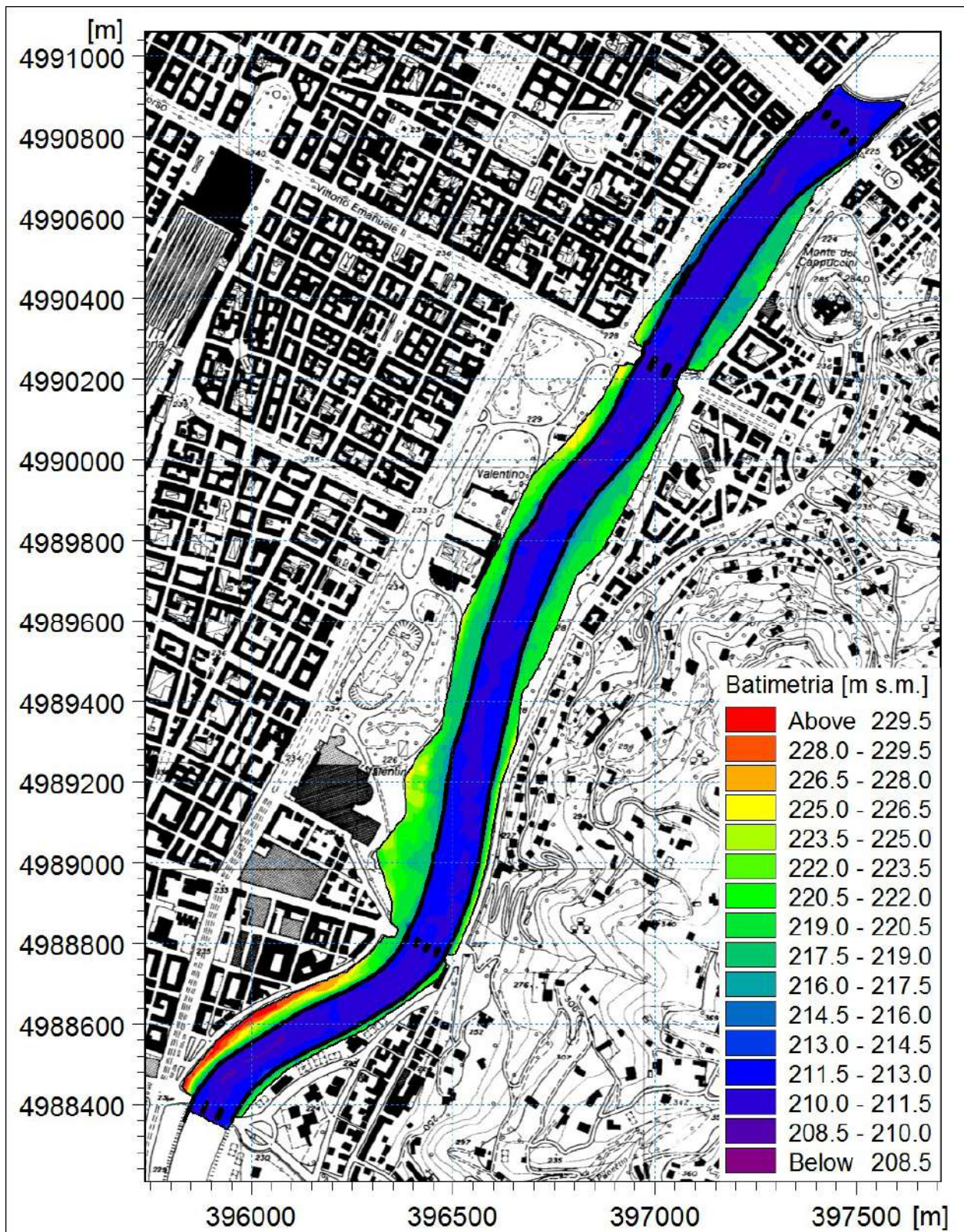


Figura 7 – Corografia del tratto fluviale in esame con rappresentazione della batimetria di rilievo del modello numerico 2D.

#### 4. ANALISI IDROLOGICA

L'analisi idrologica svolta è finalizzata a caratterizzare con valori di portata rappresentativi gli stati idrologici di piena del Po.

Per le portate di piena si è fatto riferimento ai valori indicati dalla pianificazione vigente per i tempi di ritorno di 20 e di 200 anni, e in particolare ai seguenti documenti:

- *Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica e s.m.i.*, emanata dall'Autorità di Bacino del Fiume Po ai sensi dell'art.10 delle Norme di Attuazione del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI);
- *Profili di piena dei corsi d'acqua del reticolo principale - marzo 2016*, approvato con il PGRA.

Le informazioni per i tratti di interesse definite in tali documenti sono riportate nella Tabella 1 e nella Tabella 2.

Per quanto riguarda l'asta del Po, il PGRA rappresenta un aggiornamento della Direttiva sulla piena di progetto e, rispetto a questa, riporta portate a tempo di ritorno assegnato caratterizzate da valori al colmo maggiori, seppur di poco.

Bacino	Corso d'acqua	Sezione			Superficie km <sup>2</sup>	Q20 m <sup>3</sup> /s	Q100 m <sup>3</sup> /s	Q200 m <sup>3</sup> /s	Q500 m <sup>3</sup> /s	Idrometro Denominazione
		Progr.(km)	Cod.	Denomin.						
Alto Po	Po	29.700	325	Gambasca	214	370	540	650	760	
Alto Po	Po	53.787	311	Villafranca Piemonte	670	900	1100	1300	1460	
Alto Po	Po	72.000	300	Lombriasco	3500	1550	2100	2320	2630	
Alto Po	Po	90.100	287	La Loggia	3820	1600	2150	2400	2720	
Alto Po	Po	98.051	281	Moncalieri	4885	1730	2350	2600	2950	Po a Moncalieri
Alto Po	Po	118.464	255	San Mauro	7408	2600	3600	4000	4600	Po a San Mauro

Tabella 1 - Portate per tempo di ritorno assegnato per il fiume Po nel tratto in Studio determinate nella Direttiva Piena di progetto del PAI.

Bacino	Corso d'acqua	Sezione			Superficie km <sup>2</sup>	Q20 m <sup>3</sup> /s	Q ott 2000 m <sup>3</sup> /s	Q200 m <sup>3</sup> /s	Q500 m <sup>3</sup> /s	Idrometro Denominazione
		Progr.( km)	Cod.	Denomin.						
Po	Po	29.700	325	Gambasca	214	370	-	650	760	
Po	Po	53.787	311	Villafranca Piemonte	670	900	-	1300	1460	
Po	Po	72.000	300	Lombriasco	3500	1550	-	2320	2630	
Po	Po	90.100	287	La Loggia	3820	1600	-	2400	2720	
Po	Po	98.051	281	Moncalieri	4885	1750	-	2700	3100	Po a Moncalieri
Po	Po	118.464	255	San Mauro	7408	2800	-	4300	4800	Po a San Mauro

Tabella 2 - Portate per tempo di ritorno assegnato per il fiume Po nel tratto in Studio determinate nel PGRA.

In particolare, sono stati analizzati i deflussi di piena caratterizzati dal tempo di ritorno di 200 anni (portata al colmo pari a 2700 m<sup>3</sup>/s), valore di riferimento per il dimensionamento delle strutture. È stato inoltre simulato, come generalmente richiesto da AIPO, l'evento di piena con tempo di ritorno 20 anni (portata al colmo pari a 1750 m<sup>3</sup>/s), per analizzare l'effettiva estensione della fascia di pericolosità P3 nei pressi delle opere in progetto.

## 5. ANALISI IDRAULICA

### 5.1 Approccio metodologico

Le simulazioni condotte con schematizzazione bidimensionale sono state finalizzate alla determinazione del comportamento idrodinamico in piena in termini di massimi livelli idrici, direzioni di flusso e velocità nel tratto di Po in studio.

Nel contesto in esame si è voluto anche indagare se l'apertura della paratoia sghiaiatrice della traversa Michelotti possa portare a significativi benefici nella gestione della piena dal punto di vista prettamente idraulico (in termini cioè di riduzione dei livelli di piena a monte, prescindendo da altre tematiche quali ad esempio la movimentazione di sedimento depositatosi a monte dello sbarramento).

Gli scenari idrodinamici simulati sono i seguenti:

- deflusso della portata di piena per tempo di ritorno 200 anni nell'ipotesi di paratoia piana in sponda destra della traversa Michelotti chiusa;
- deflusso della portata di piena per tempo di ritorno 200 anni nell'ipotesi di paratoia piana in sponda destra della traversa Michelotti aperta;
- deflusso della portata di piena per tempo di ritorno 20 anni nell'ipotesi di paratoia piana in sponda destra della traversa Michelotti chiusa.

Per lo studio è stato utilizzato il codice di calcolo MIKE 21 del DHI nella versione FM (Flexible Mesh), ai volumi finiti, brevemente descritto in allegato. Esso consente di adottare una risoluzione spaziale variabile in funzione delle diverse aree fluviali. In particolare, è stato impiegato il modulo HD (idrodinamico).

### 5.2 Allestimento del modello

Il modello è esteso dal ponte di Corso Bramante fino alla traversa Michelotti, per uno sviluppo in asse all'alveo di circa 3.150 m. Nella Figura 7 è rappresentata la batimetria del modello idrodinamico 2D ottenuta mediante interpolazione spaziale dei punti del rilievo batimetrico di dettaglio in alveo e dei punti quotati del DTM LIDAR.

L'area oggetto di studio è stata schematizzata mediante una griglia di calcolo (mesh) a maglie triangolari, dove ad ogni cella del dominio è stata associata una quota del fondo interpolata sulla base dei rilievi batimetrici disponibili. I limiti dell'area di calcolo sono stati fatti coincidere indicativamente con l'estensione della Fascia B.

L'area di studio modellata in modalità bidimensionale è raffigurata nella Figura 8 che mostra anche la mesh nella sua totalità, costituita da 37.288 elementi e 19.239 nodi.

Si precisa come tale modello derivi da quello già allestito per le analisi idrauliche e di compatibilità idraulica, svolte per conto del Comune di Torino, nell'ambito del progetto di fattibilità e del progetto definitivo *per rendere navigabile il fiume Po in ambito urbano al fine di istituire un servizio di navigazione fluviale* (HYDRODATA, 2022-2023), modificato per l'inserimento del nuovo manufatto e per la modifica della traversa finalizzata a considerare l'apertura della paratoia.

Nella Figura 9 è rappresentato un particolare della mesh nella zona prossima alle opere in progetto, nell'estremità di valle del tratto in esame. Il basamento della ruota panoramica, essendo sopraelevato di circa un metro rispetto al piano campagna è stato opportunamente escluso dalla mesh. Nella figura risulta in particolare evidente come nel modello siano stati inseriti in dettaglio gli attraversamenti stradali esistenti: infittendo opportunamente la mesh sono state inserite le geometrie delle pile dei ponti che creano un ostacolo locale al deflusso della corrente.

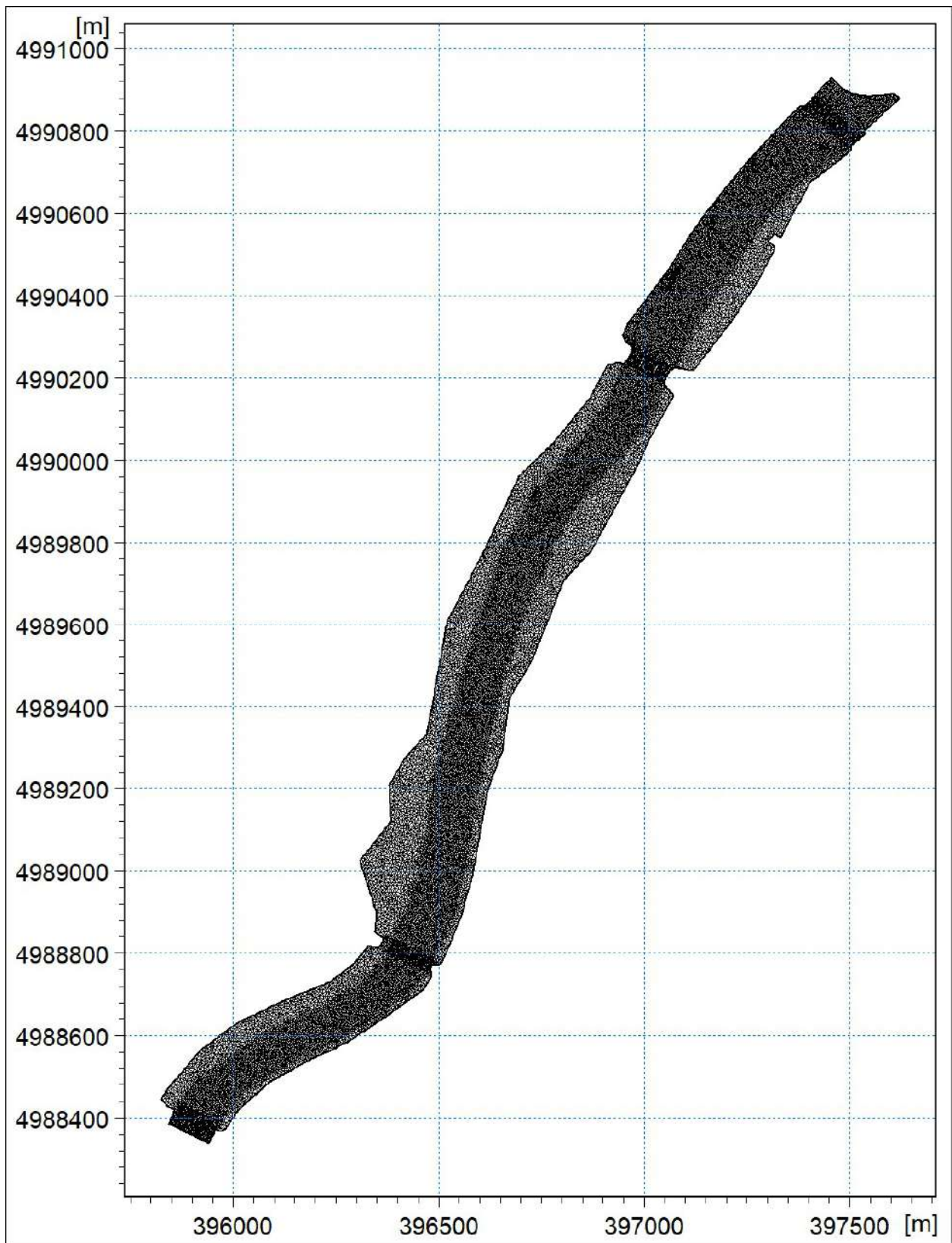
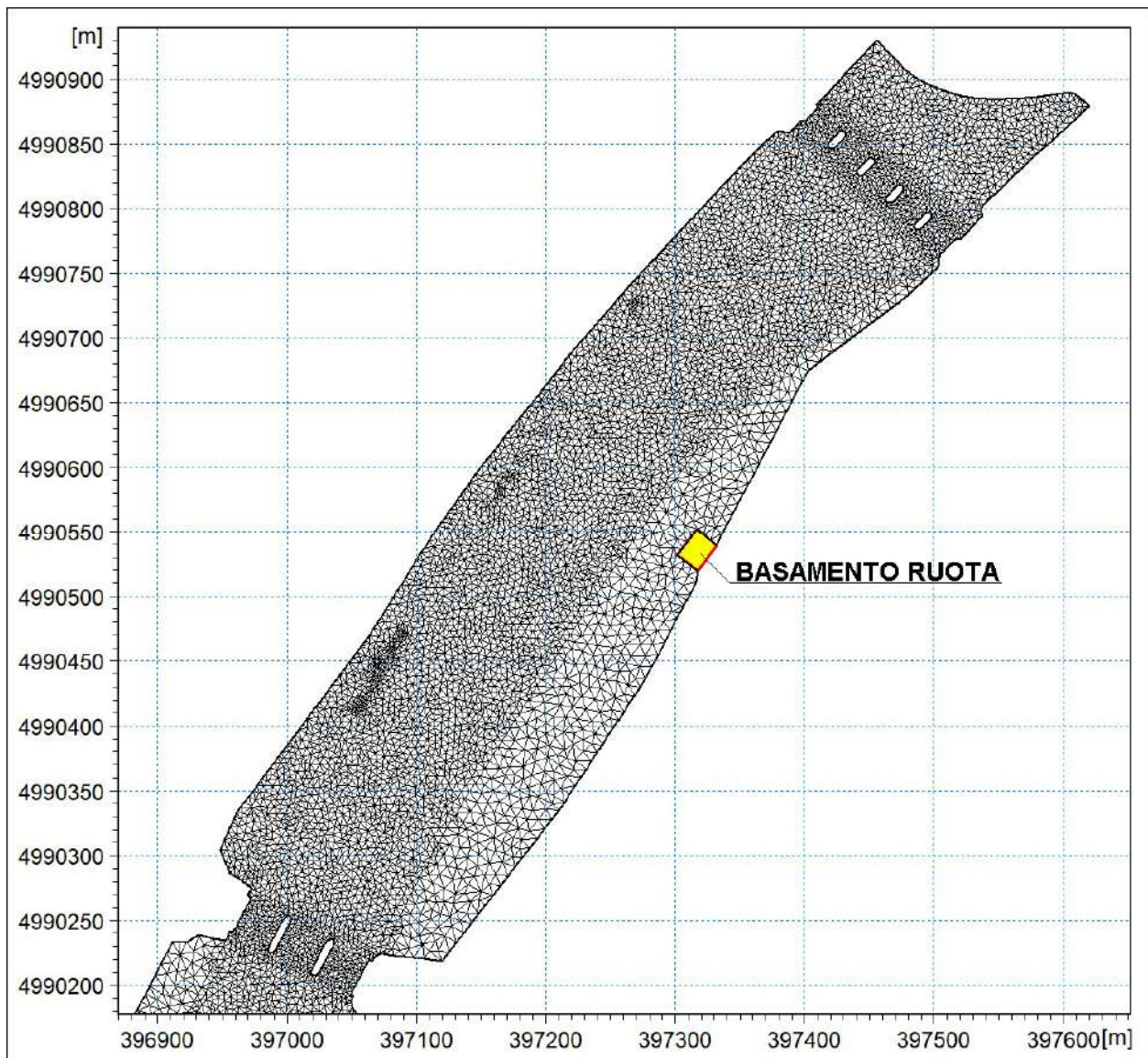


Figura 8 - Reticolo di calcolo a elementi triangolari del modello 2D.





**Figura 9 - Ingrandimento nella zona di interesse del reticolo di calcolo a elementi triangolari del modello 2D.**

Poiché il modello adotta un metodo di calcolo esplicito, i passi di tempo di integrazione sono determinati in automatico imponendo che, per ragioni di stabilità numerica, il numero di Courant della corrente si mantenga inferiore a 0,8.

La viscosità turbolenta è legata alla non uniforme distribuzione del campo delle velocità e viene simulata nel modello tramite il coefficiente di “eddy viscosity”. Nel caso in esame esso è stato calcolato in automatico nel modello mediante la formulazione di Smagorinsky, adottando un coefficiente  $cs=0,28$ .

La scabrezza rappresenta, all'interno delle equazioni del moto, il parametro che regola le perdite di energia distribuite per attrito sul fondo di scorrimento e sulle sponde dell'alveo attivo. In un modello bidimensionale i coefficienti di scabrezza da considerare si ottengono incrementando opportunamente di circa un 20÷30% quelli comunemente impiegati nei modelli monodimensionali, per tenere conto del fatto che in un modello 2D sono già in tutto o almeno in gran parte direttamente considerati nelle equazioni del moto gli effetti di resistenza indotti dalle condizioni di moto non-monodimensionali (turbolenza, moti vorticosi, sinuosità dell'alveo ecc.) che nell'ambito di un modello monodimensionale devono essere globalmente inclusi in un valore inferiore del coefficiente di scabrezza.

Per l'alveo del Po, considerato il fatto che nel modello 1D allestito per la calibrazione (vedi capitolo 5.3) si è assunto un coefficiente di scabrezza di Strickler pari a 30-32  $m^{1/3}/s$ , nel presente modello 2D si è adottato un valore medio pari a 40  $m^{1/3}/s$  per l'alveo inciso e pari a 30-35  $m^{1/3}/s$  per le aree golenali e di sponda (vedi Figura 10).

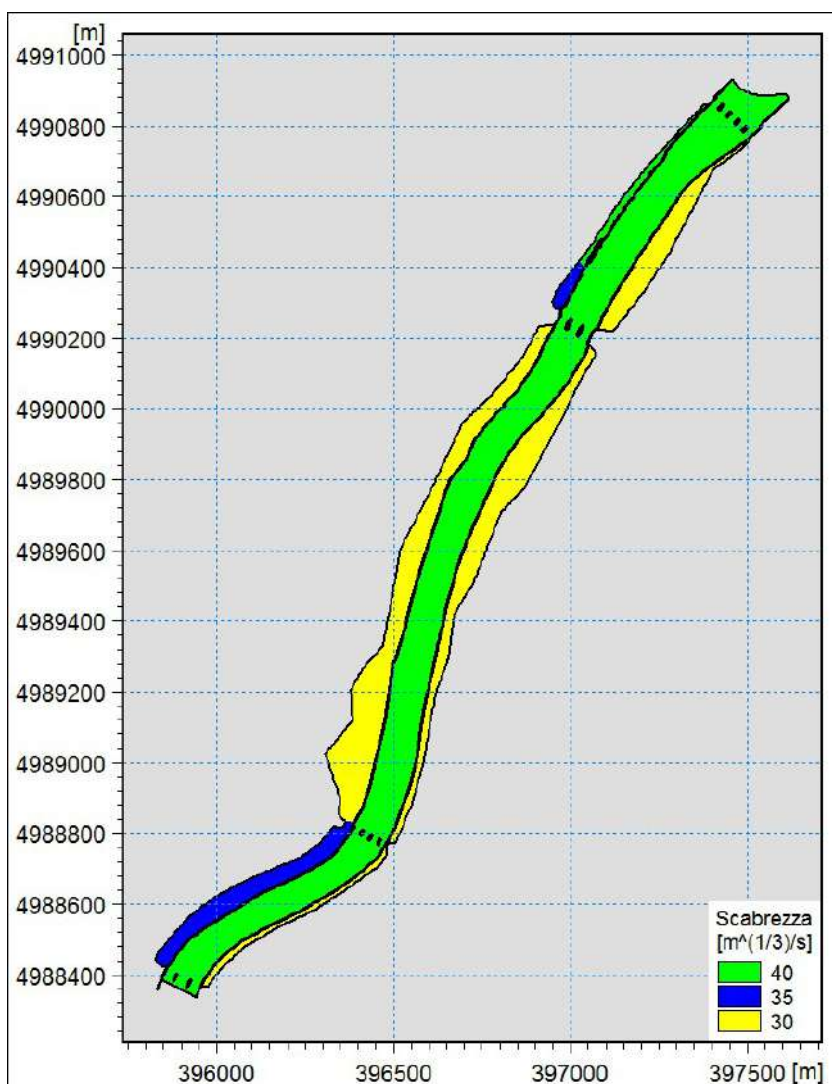


Figura 10 - Distribuzione dei coefficienti di scabrezza.

Le condizioni al contorno sono di seguito descritte.

Per lo scenario di piena con TR=200 anni si sono assunti:

- portata al colmo in entrata a monte pari a 2.700  $m^3/s$ ;
- livello idrico di valle derivante da simulazione di taratura eseguita con modello monodimensionale esteso per l'intero tratto di Po cittadino (vedi capitolo 5.3), la quale tiene conto dell'idrodinamica dell'alveo a valle che rigurgita parzialmente il salto della traversa: imposto un livello al colmo ad una quota assoluta di 217,17 m s.m.

Per lo scenario di piena con TR=20 anni si sono assunti:

- portata al colmo in entrata a monte pari a 1.750  $m^3/s$ ;
- livello idrico di valle derivante da simulazione di taratura eseguita con modello monodimensionale esteso per l'intero tratto di Po cittadino (vedi capitolo 5.3), la quale tiene conto dell'idrodinamica dell'alveo a valle

che rigurgita parzialmente il salto della traversa: imposto un livello al colmo ad una quota assoluta di 215,85 m s.m.

### **5.3 Calibrazione del modello idrodinamico**

Nell'ambito di uno studio<sup>1</sup> pregresso svolto da Hydrodata S.p.A. nel 2018 è stata svolta un'analisi modellistica dell'idrodinamica del gravoso evento di piena occorso nei giorni 24-25-26 novembre 2016.

La rappresentazione modellistica, con schema monodimensionale (Figura 11), ha consentito un'analisi dell'evento a larga scala, permettendo di studiare le modalità di propagazione degli idrogrammi di piena del Po e degli affluenti più prossimi al tratto di interesse (Chisola e Sangone), ricostruendo le condizioni idrodinamiche in alveo. Il modello è stato calibrato sulla base delle registrazioni degli idrometri del sistema di monitoraggio regionale presenti nel tratto di studio.

I risultati di questo modello sono stati utilizzati per tarare la modellistica 2D sviluppata nel presente studio (analogamente a quanto già svolto nell'ambito della pregressa progettazione svolta per conto del Comune per il ripristino di un servizio di navigazione fluviale nel tratto cittadino).

L'analisi a scala di asta fluviale è stata condotta analizzando la propagazione e la trasformazione degli idrogrammi delle onde in transito verso valle, nei tratti fluviali compresi tra le stazioni idrometriche di misura a monte della città di Torino (sul Chisola in corrispondenza del ponte della SS.20, sul Sangone in corrispondenza del ponte di corso Stupinigi e sul Po in corrispondenza della SP.122 a Carignano) e il ponte di corso Regina Margherita su cui è installata un'ulteriore stazione idrometrica (cfr. Figura 12, Figura 13, Figura 14 e Figura 15).

---

<sup>1</sup> GTT S.p.A. - Perizia tecnica relativa agli effetti dell'evento di piena del fiume Po del novembre 2016. Hydrodata, 2018.

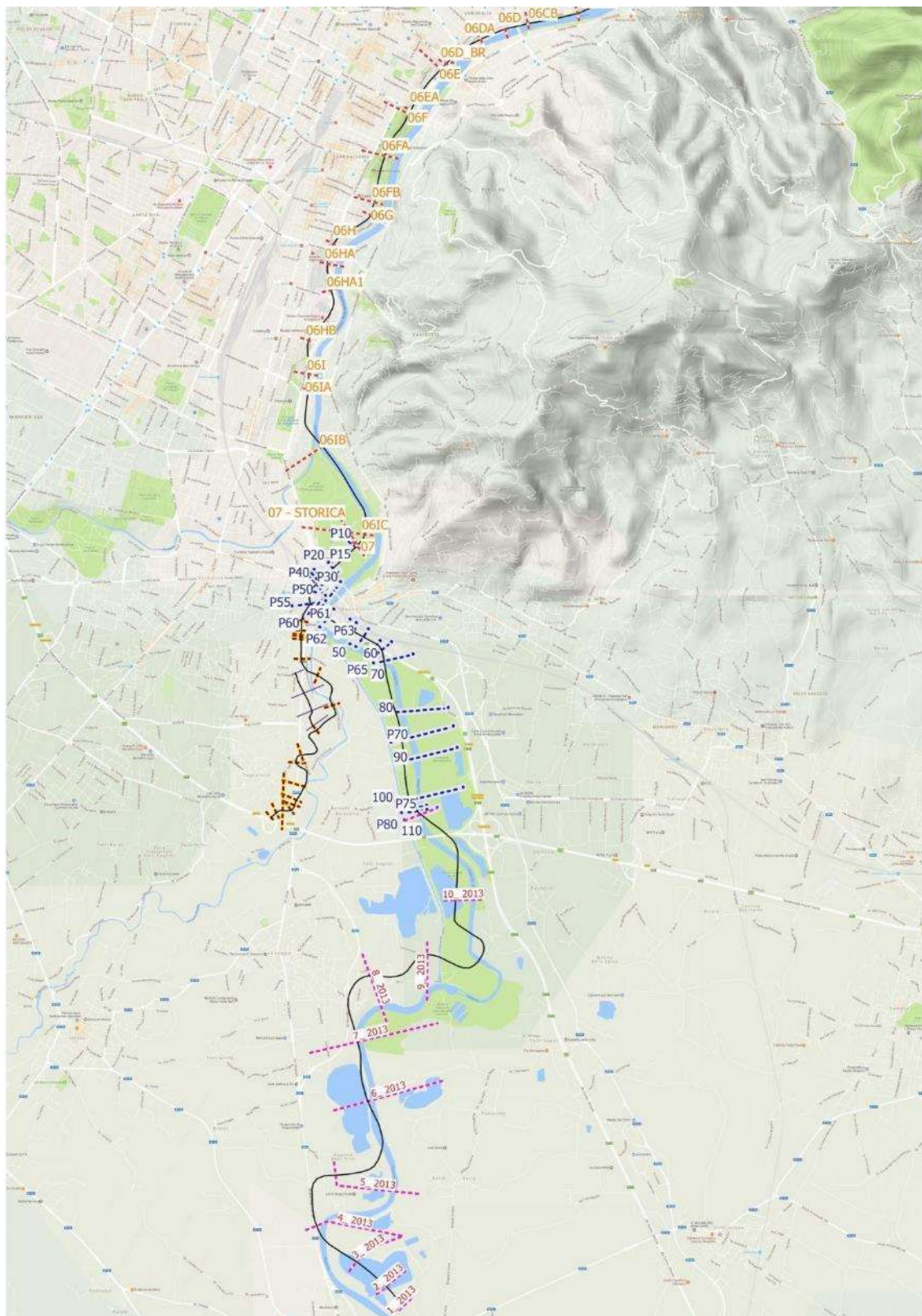


Figura 11 - Corografia e network del modello idrodinamico 1D del Po nel tratto torinese allestito in studio pregresso (Hydrodata, 2018) per la ricostruzione dell'evento di piena dell'ottobre 2016.

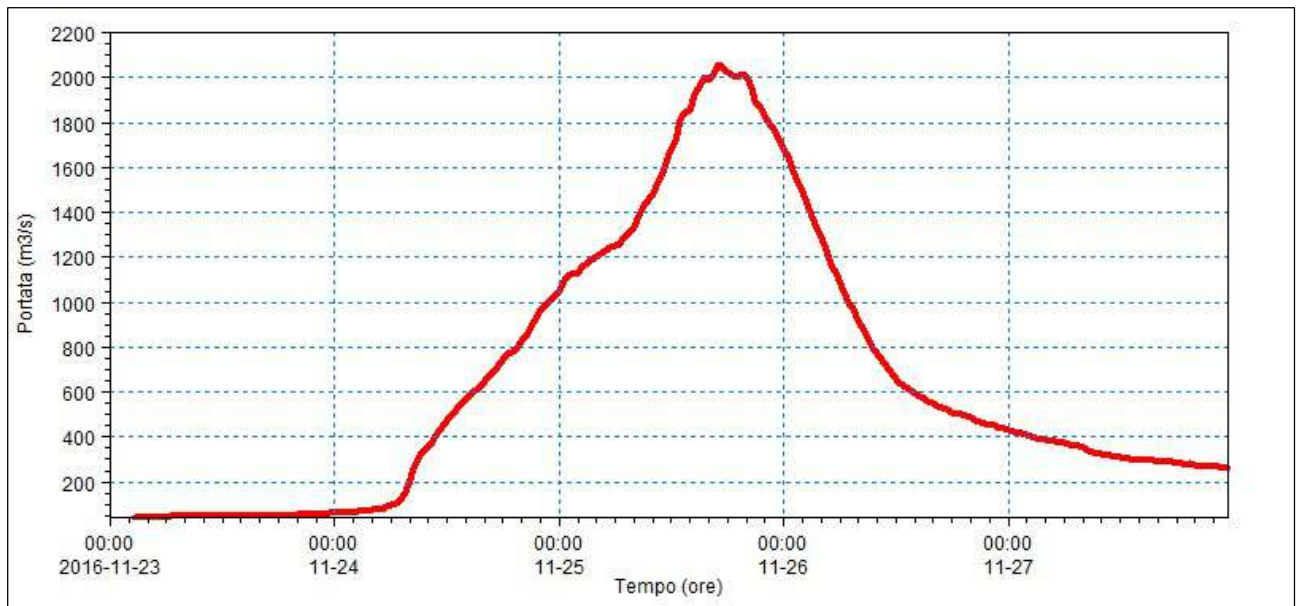


Figura 12 - Idrogramma di portata assegnato in input a monte nel modello, registrato a Carignano sul fiume Po (ponte della SP.122)

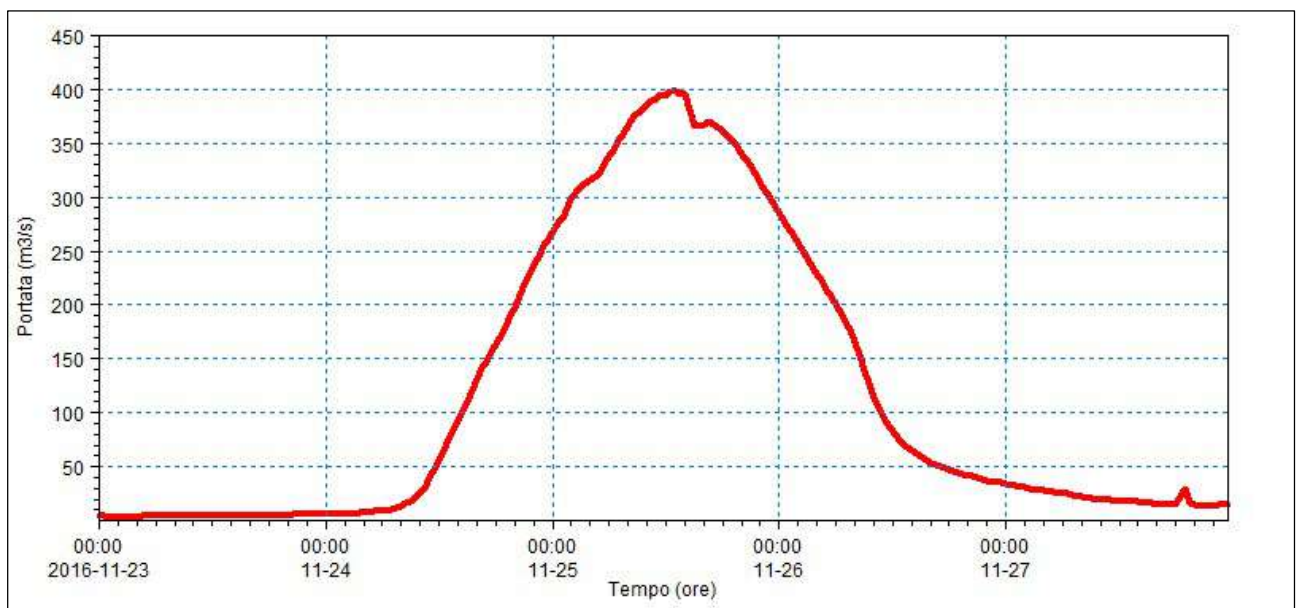
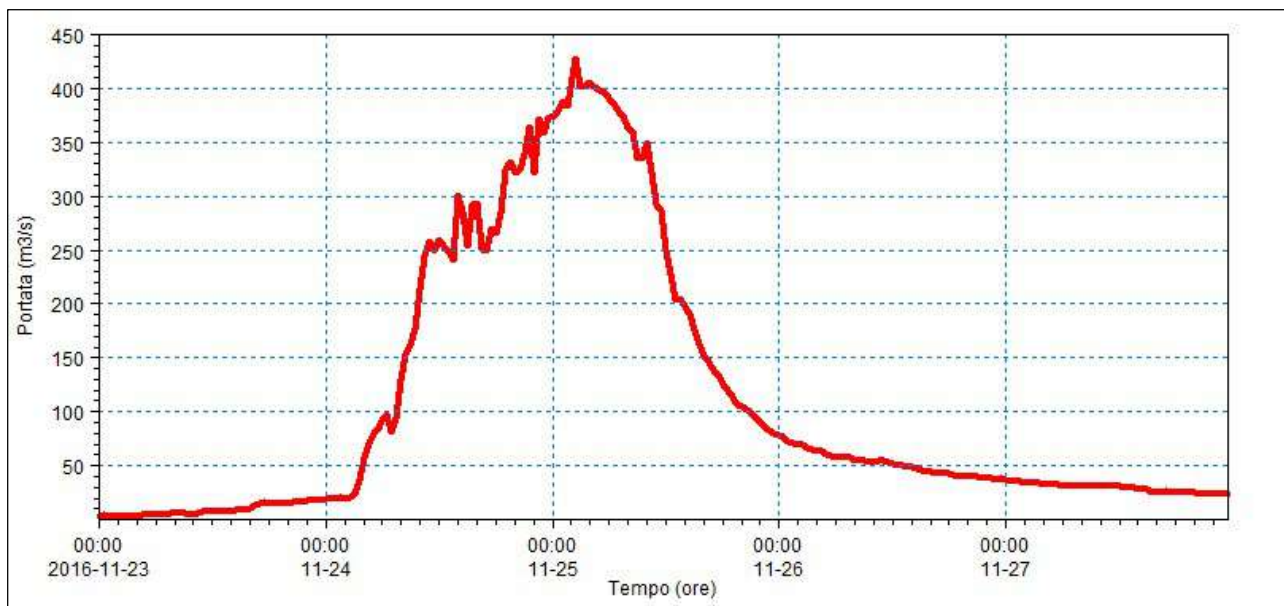
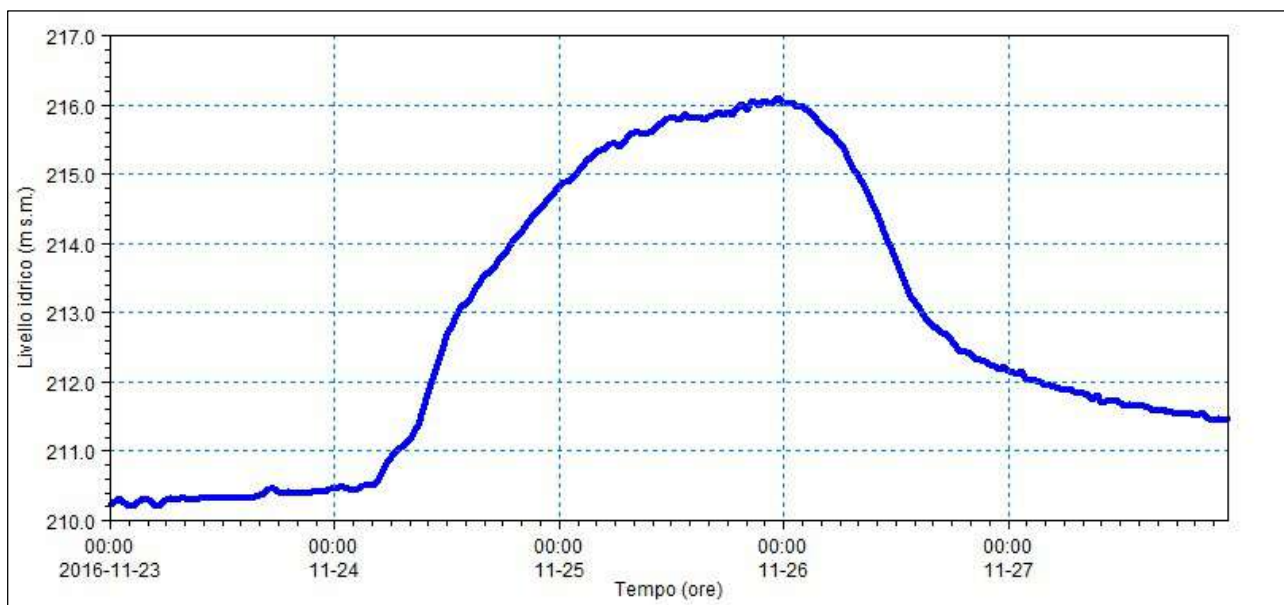


Figura 13 - Idrogramma di portata assegnato in input a monte nel modello, registrato al ponte SS.20 di Moncalieri sul torrente Chisola



**Figura 14 - Idrogramma di portata assegnato in input a monte nel modello, registrato sul ponte di corso Stupinigi sul torrente Sangone**



**Figura 15 - Idrogramma di livello idrometrico assegnato come condizione al contorno di valle nel modello, registrato a Torino sul ponte di corso Regina Margherita sul fiume Po**

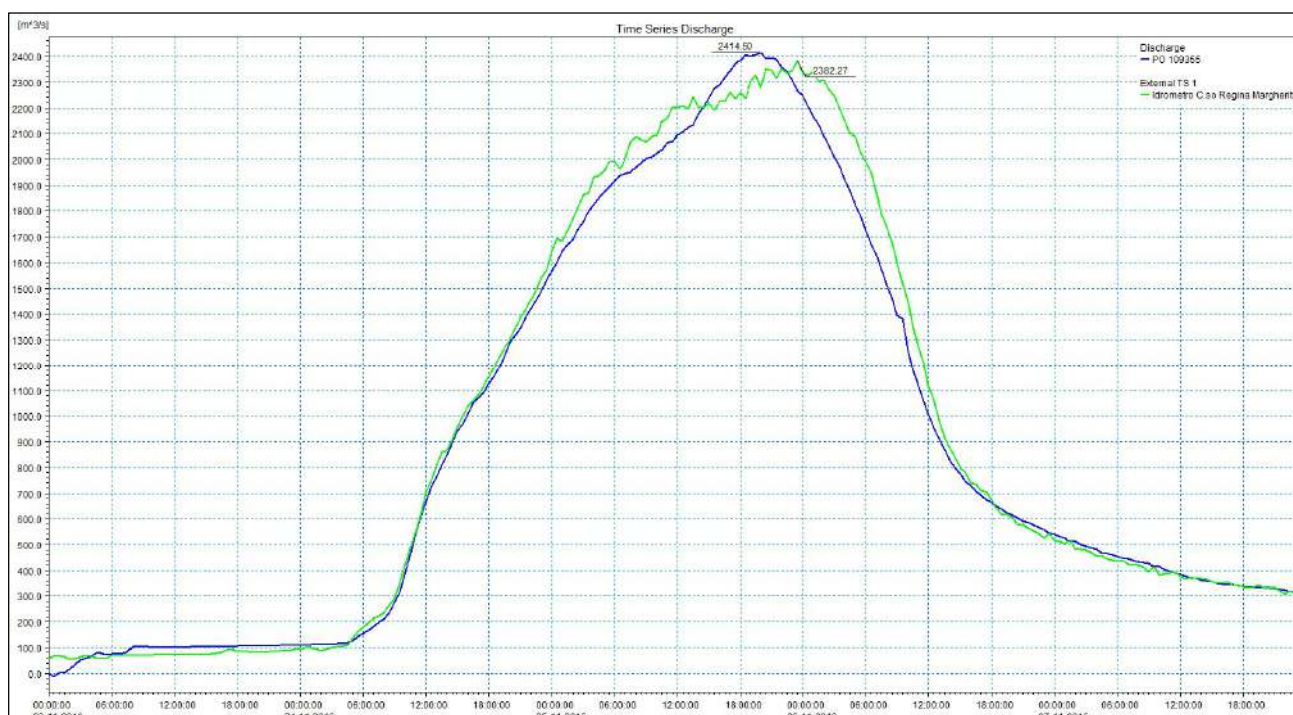
L'analisi eseguita con il modello monodimensionale a schematizzazione "quasi-2D" ha consentito di determinare i parametri di resistenza distribuita di alveo e golene per ciascuna asta fluviale, la laminazione esercitata dalle aree golenali interessate da allagamento e quindi i tempi di arrivo, il valore al colmo, la forma ed il volume degli idrogrammi di piena propagati verso valle. A questo scopo si evidenzia come il modello abbia riprodotto in modo soddisfacente l'evento del 2016 sia in termini di fasizzazione temporale degli idrogrammi di portata e di livello che di forma e volume rispetto ai valori misurati. Si è quindi rappresentato in modo realistico la propagazione delle onde lungo le aste, mettendo in conto in modo corretto i fenomeni di laminazione intervenuti.

La Figura 16 mette in evidenza la buona rappresentazione idrodinamica eseguita a scala di asta fluviale, confrontando l'idrogramma di portata simulato (colore blu) con quello misurato (colore verde) in

corrispondenza dell'idrometro di corso Regina Margherita sul fiume Po. Per quanto attiene l'idrometro localizzato a monte del ponte ferroviario di Moncalieri si è eseguito un confronto soltanto in termini di valore idrometrico al colmo, che ha fatto corrispondere ad un livello misurato di 222,00 m s.m. da AIPO un valore calcolato dal modello di 222,02 m s.m.

I livelli idrici sono risultati inoltre coerenti con le tracce di piena rilevate da AIPO nella porzione di monte del modello.

Il modello monodimensionale così calibrato è servito da "ossatura" per l'allestimento del modello bidimensionale, tarato sui parametri di scabrezza in modo da restituire valori di livello medio sulle sezioni coerenti con quelli monodimensionali su sezioni significative, oltre che per definire le condizioni idrodinamiche di valle al modello 2D.



**Figura 16 - Confronto tra gli idrogrammi misurati e simulati presso l'idrometro di corso Regina Margherita sul fiume Po nel corso dell'evento di piena dell'ottobre 2016.**

## 5.4 RISULTATI DEGLI SCENARI DI SIMULAZIONE

Il tratto di valle in condizioni di deflusso ordinario è totalmente rigurgitato dalla traversa Michelotti, che genera un profilo idrico di corrente caratterizzato da pendenza sub orizzontale.

In condizioni di piena la traversa risulta totalmente abbattuta e le piene a tempo di ritorno 20 e 200 anni transitano in alveo senza creare particolari criticità idrauliche in termini di rischio indotto. Anche la paratoia piana in sponda destra viene generalmente aperta in caso di piena ma cautelativamente in due dei tre scenari considerati si è considerata chiusa. L'effetto della sua apertura/chiusura risulta comunque minimo, viste le sue ridotte dimensioni, come verificato con il modello.

I risultati delle simulazioni eseguite per i tre scenari considerati sono illustrati nel seguito.

In condizioni di piena TR20 e TR200 anni le esondazioni sono limitate e interessano solo le aree più prossime all'alveo inciso; rispetto alla pianificazione vigente (PGRA, vedi capitolo 2) i risultati ottenuti sono del tutto coerenti.

Nella Figura 17 è rappresentata la distribuzione delle altezze idriche simulata con il modello 2D in corrispondenza del colmo dell'evento con TR=200 anni lungo tutto il tratto di Po indagato nel primo scenario.

Sullo stesso tratto, nella Figura 18 è mostrato il campo delle velocità in corrispondenza sempre del colmo dell'evento di riferimento duecentennale.

Nella Figura 19 è riportato invece un ingrandimento nel tratto di valle, nella zona di intervento che mette in evidenza la distribuzione delle altezze idriche e il campo dei vettori velocità ancora in corrispondenza del colmo dell'evento con TR=200 anni.

Analogamente nella Figura 20 è riportata la distribuzione areale delle velocità di flusso e infine nella Figura 21 la distribuzione delle quote di pelo libero.

Nella Figura 22 è rappresentato un ulteriore ingrandimento di dettaglio della distribuzione delle quote massime di pelo libero raggiunte nel corso dell'evento duecentennale di progetto: nei pressi del basamento, che non viene raggiunto dai livelli di piena, la quota massima del pelo libero calcolata è pari a 217,95 m s.m.; considerando che la quota minima di piano campagna nell'area di ubicazione del basamento, in base al rilievo Lidar, risulta pari a 218,85 m s.m. e che il basamento stesso presenta un'altezza di circa 1 m, risulta che il franco di sicurezza disponibile è ampiamente superiore a 1,5 m.



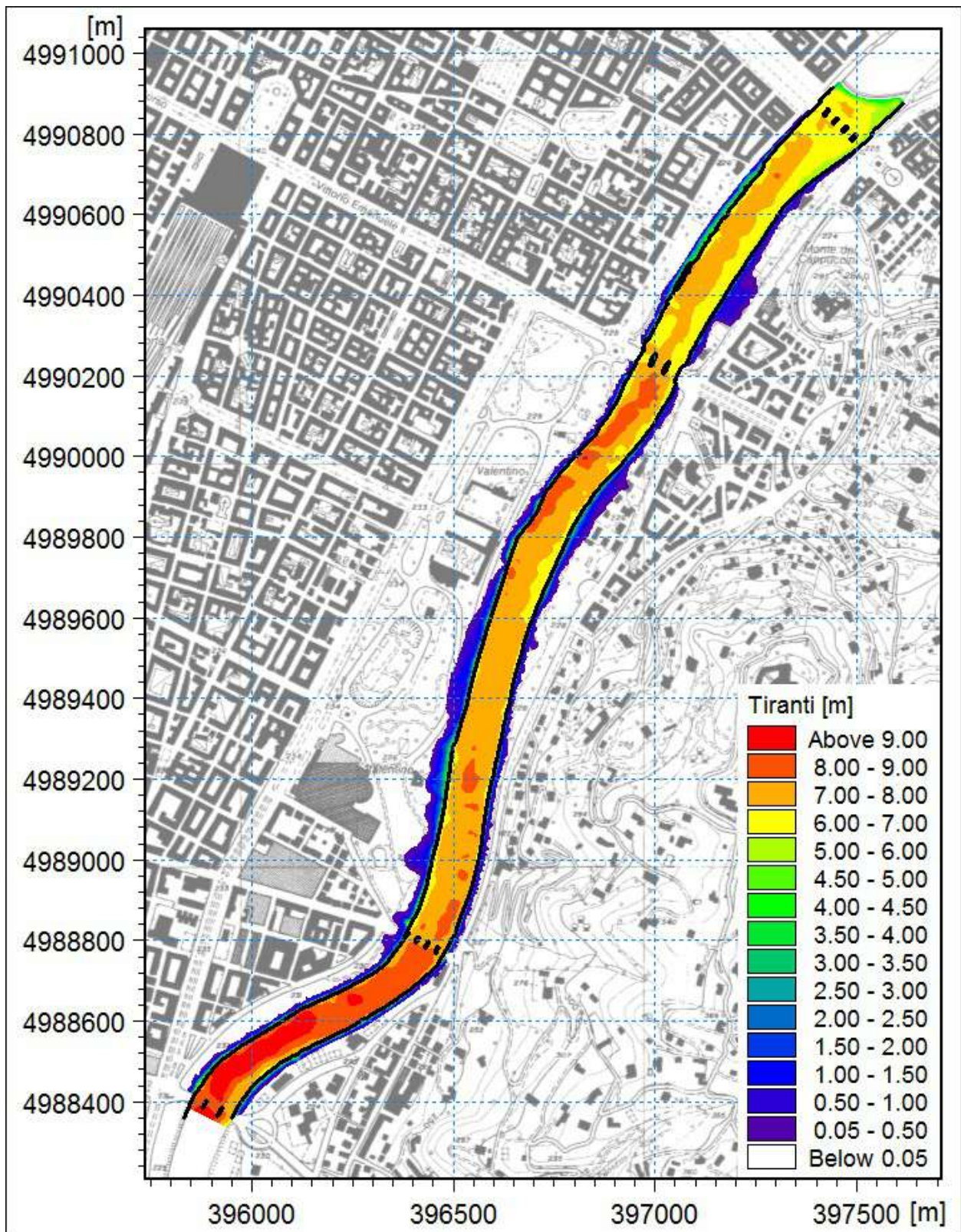


Figura 17 – Distribuzione delle altezze idriche in corrispondenza del colmo dell'evento con TR=200 anni nell'ipotesi di paratoia piana in sponda destra della traversa Michelotti chiusa.

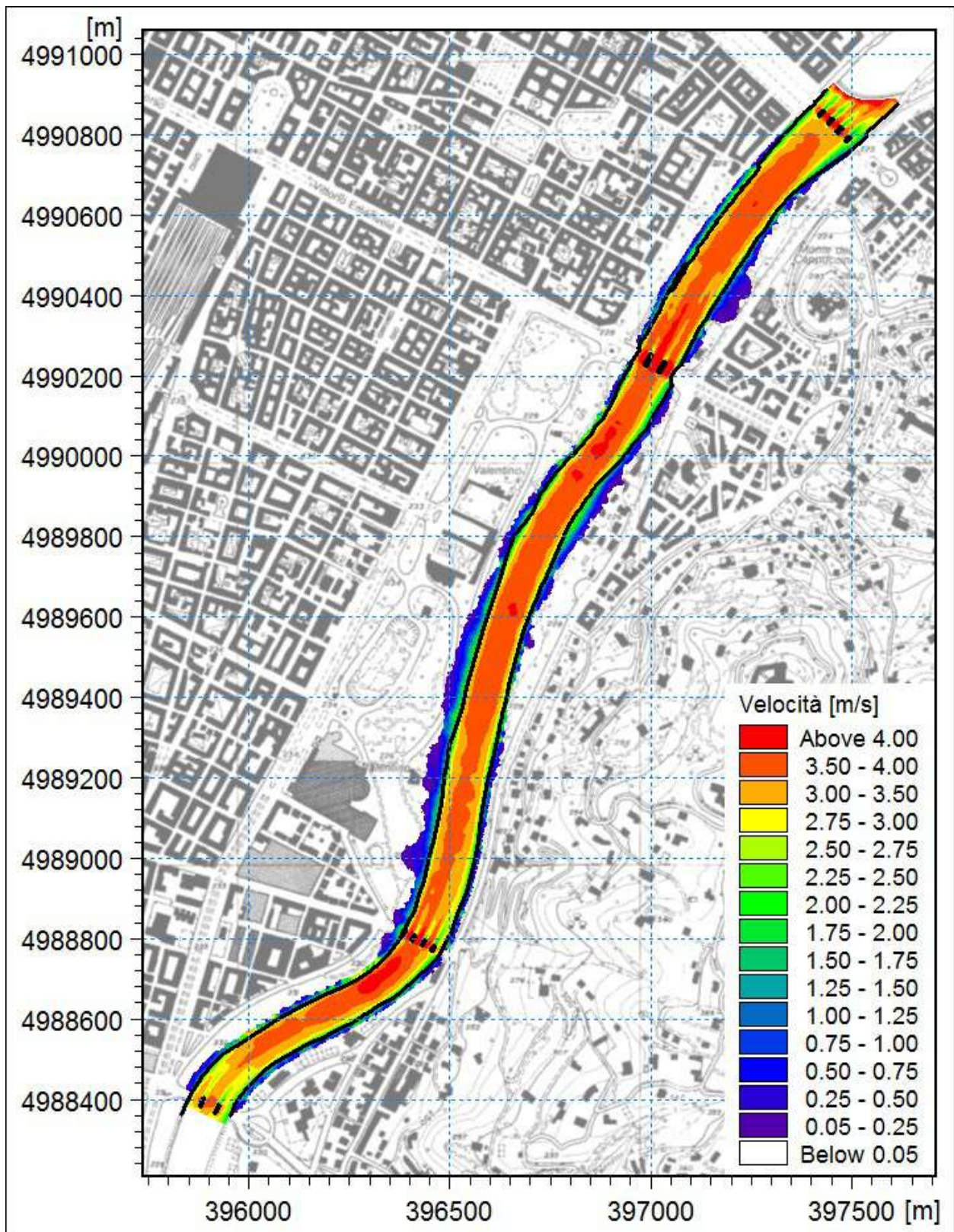


Figura 18 – Campo delle velocità in corrispondenza del colmo dell’evento con TR=200 anni nell’ipotesi di paratoia piana in sponda destra della traversa Michelotti chiusa.

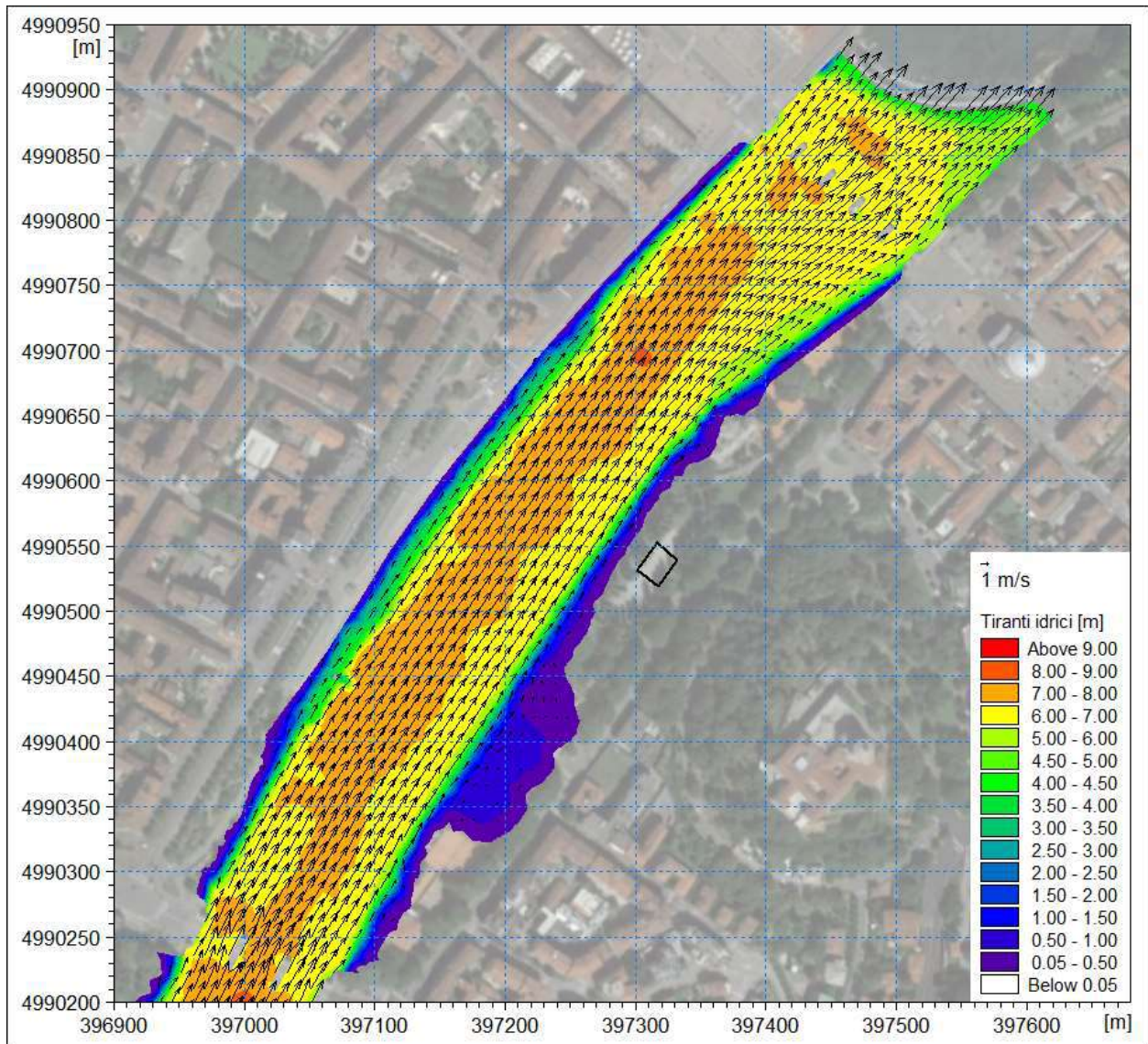


Figura 19 – Distribuzione delle altezze idriche e campo dei vettori velocità in corrispondenza del colmo dell'evento con TR=200 anni nell'ipotesi di paratoia piana in sponda destra della traversa Michelotti chiusa: ingrandimento nel tratto di valle, in corrispondenza del basamento della ruota panoramica (evidenziato in figura).

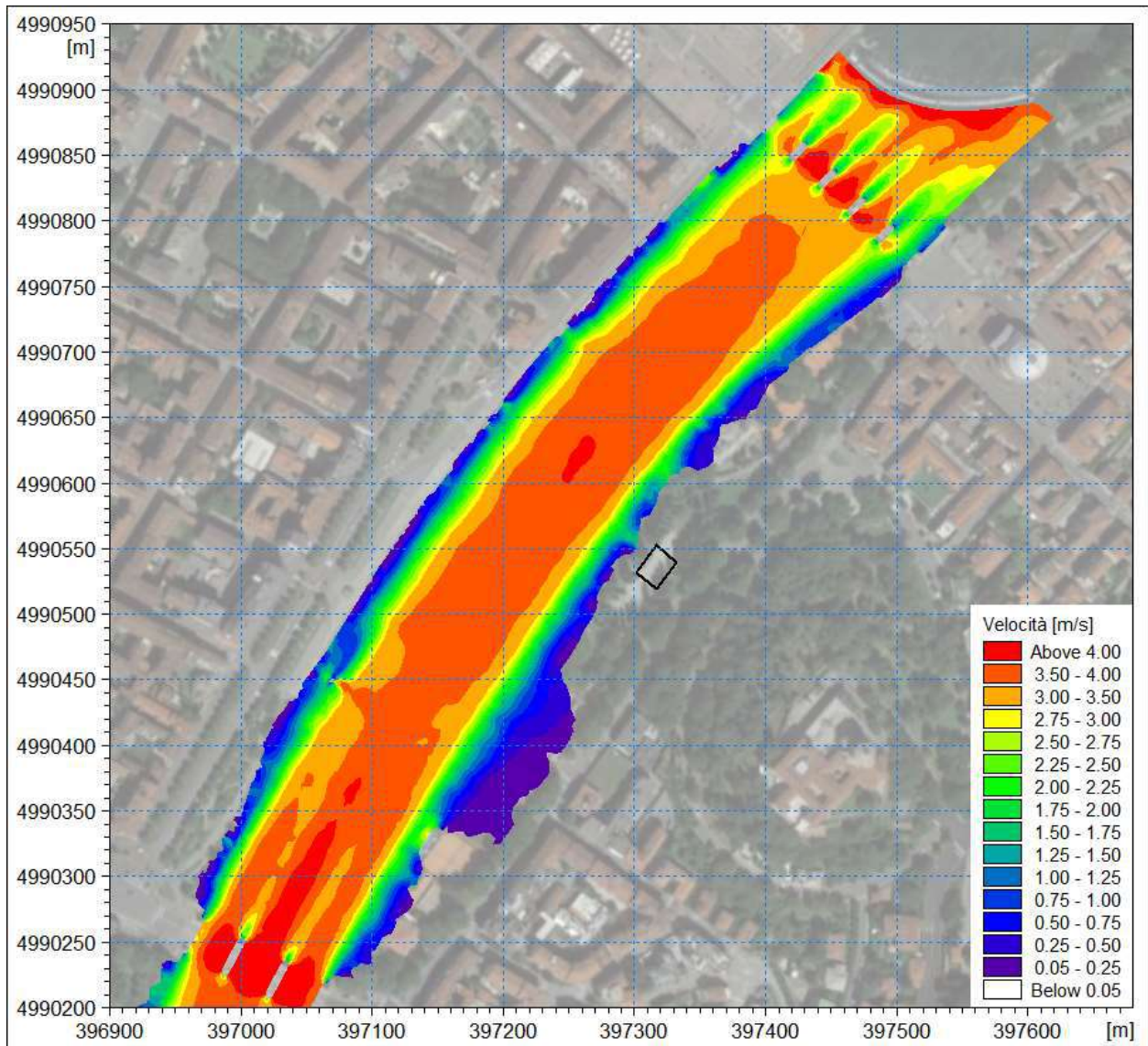
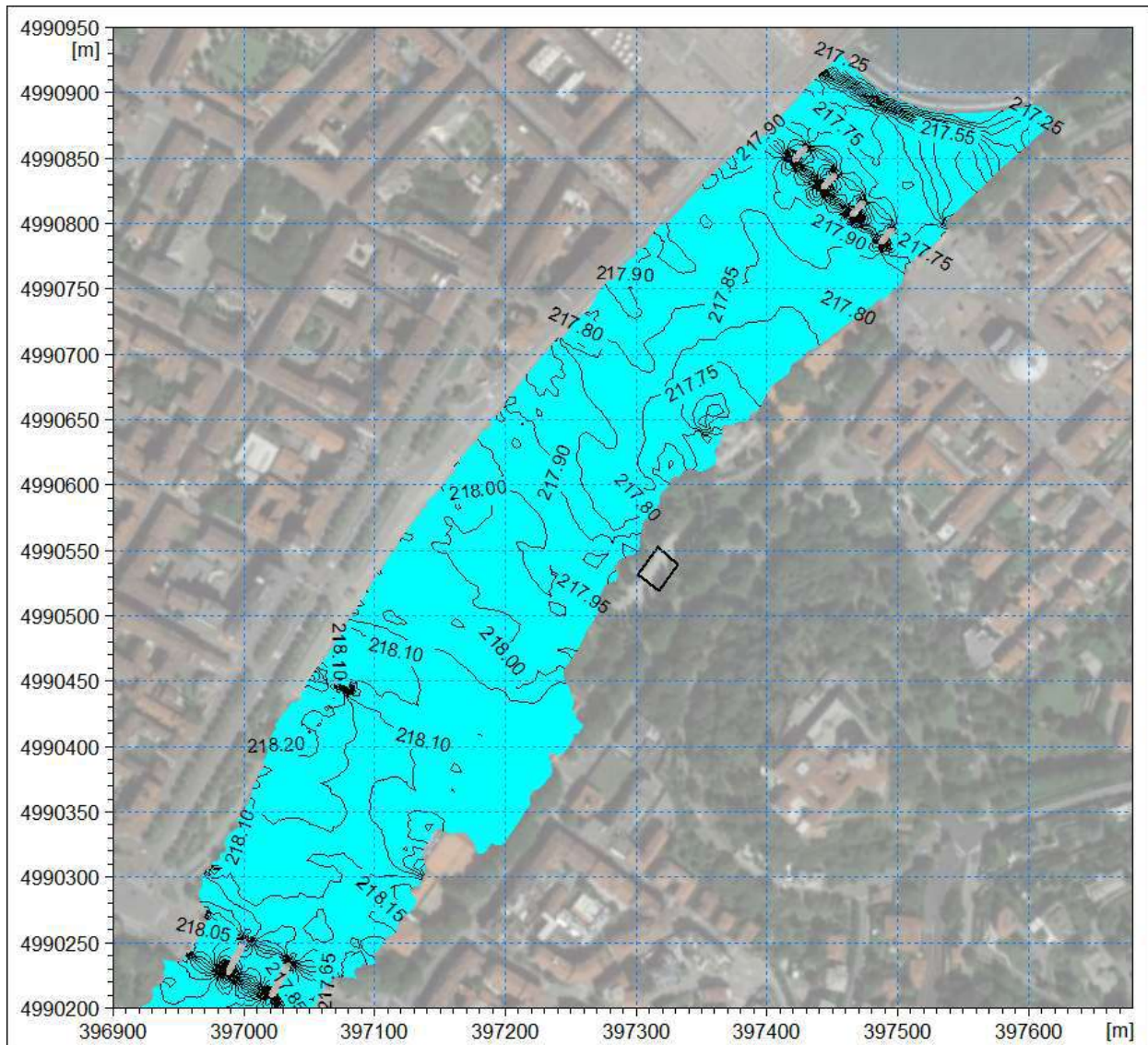
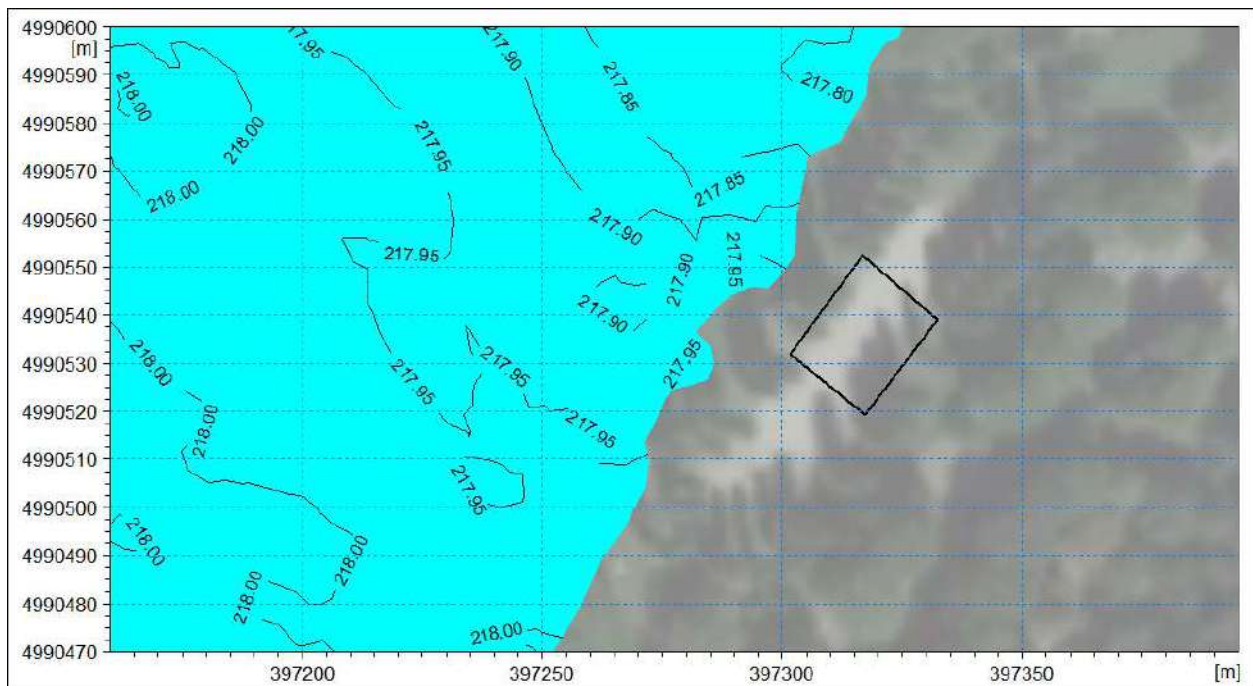


Figura 20 – Distribuzione delle velocità in corrispondenza del colmo dell'evento con TR=200 anni nell'ipotesi di paratoia piana in sponda destra della traversa Michelotti chiusa: ingrandimento nel tratto di valle, in corrispondenza del basamento della ruota panoramica (evidenziato in figura).



**Figura 21 – Distribuzione delle quote di pelo libero in corrispondenza del colmo dell'evento con TR=200 anni nell'ipotesi di paratoia piana in sponda destra della traversa Michelotti chiusa: ingrandimento nel tratto di valle, in corrispondenza del basamento della ruota panoramica (evidenziato in figura).**



**Figura 22 – Particolare in prossimità del basamento della distribuzione delle quote di pelo libero in corrispondenza del colmo dell'evento con TR=200 anni nell'ipotesi di paratoia piana in sponda destra della traversa Michelotti chiusa.**

I risultati della simulazione del secondo scenario (deflusso della portata di piena con tempo di ritorno 200 anni nell'ipotesi di paratoia piana in sponda destra della traversa Michelotti aperta) differiscono molto poco da quelli già illustrati relativi al primo scenario. Le mappe delle altezze d'acqua e delle velocità a scala di intero modello in questo caso non vengono pertanto rappresentati perché quasi del tutto identici a quelli riportati in Figura 17 e in Figura 18 per il primo scenario, in quanto le differenze tra i due scenari non sono apprezzabili a tale scala.

Nella Figura 23 è riportato invece un ingrandimento nel tratto di valle che mette in evidenza la distribuzione delle altezze idriche e il campo dei vettori velocità al colmo dell'evento con TR=200 anni nell'ipotesi di paratoia piana aperta. Analogamente nella Figura 24 è riportata la distribuzione areale delle velocità di flusso e infine nella Figura 25 la distribuzione delle quote di pelo libero.

Nella Figura 26 è rappresentato un ulteriore ingrandimento di dettaglio della distribuzione delle quote massime di pelo libero raggiunte nel corso dell'evento duecentennale di progetto nel secondo scenario: nei pressi del basamento la quota massima del pelo libero calcolata è pari a 217,90 m s.m., circa 0,05 m inferiore a quella determinata con il primo scenario. Valgono pertanto le stesse considerazioni fatte in precedenza.

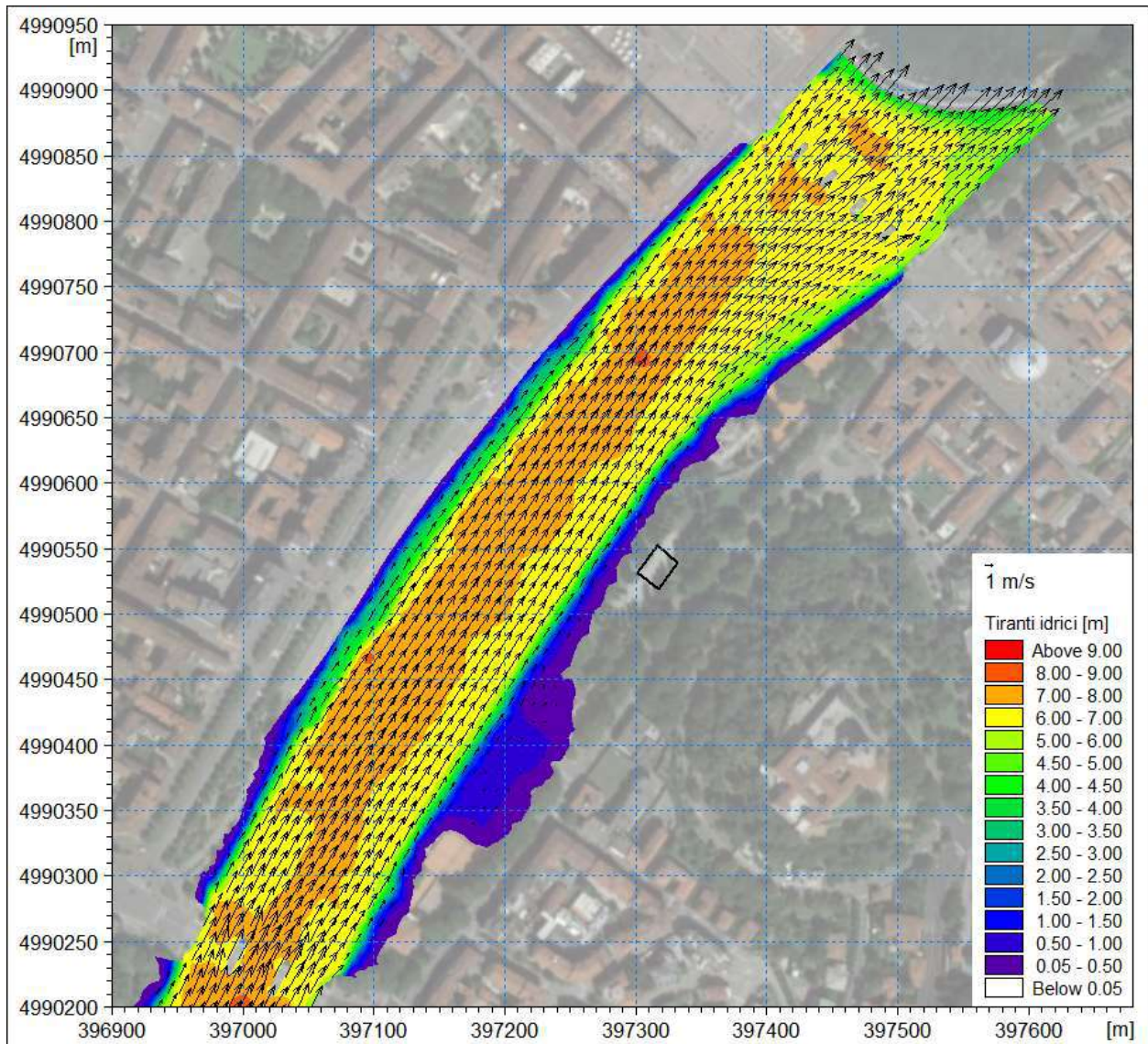


Figura 23 – Distribuzione delle altezze idriche e campo dei vettori velocità in corrispondenza del colmo dell'evento con TR=200 anni nell'ipotesi di paratoia piana in sponda destra della traversa Michelotti aperta: ingrandimento nel tratto di valle, in corrispondenza del basamento della ruota panoramica (evidenziato in figura).

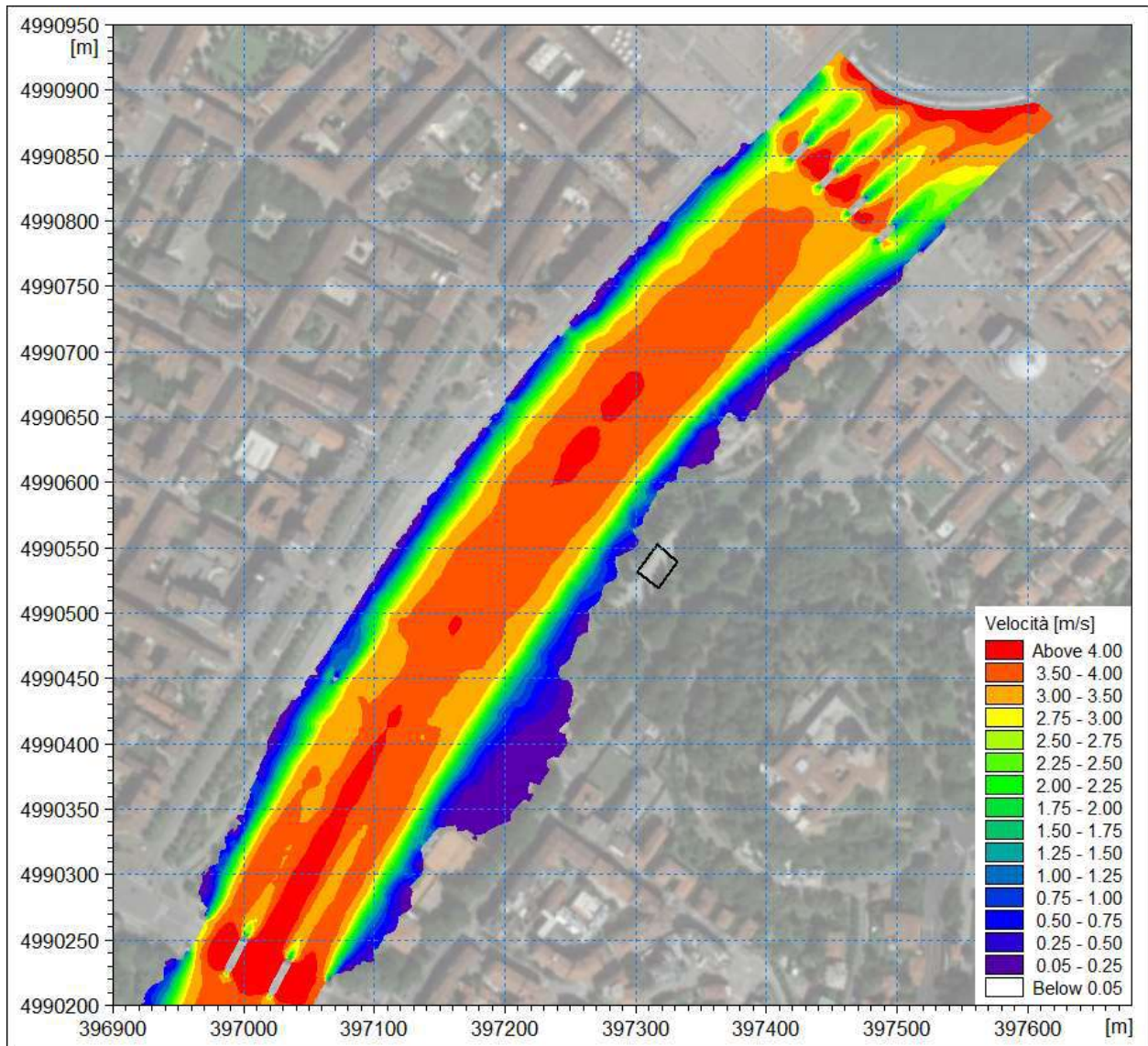


Figura 24 – Distribuzione delle velocità in corrispondenza del colmo dell'evento con TR=200 anni nell'ipotesi di paratoia piana in sponda destra della traversa Michelotti aperta: ingrandimento nel tratto di valle, in corrispondenza del basamento della ruota panoramica (evidenziato in figura).



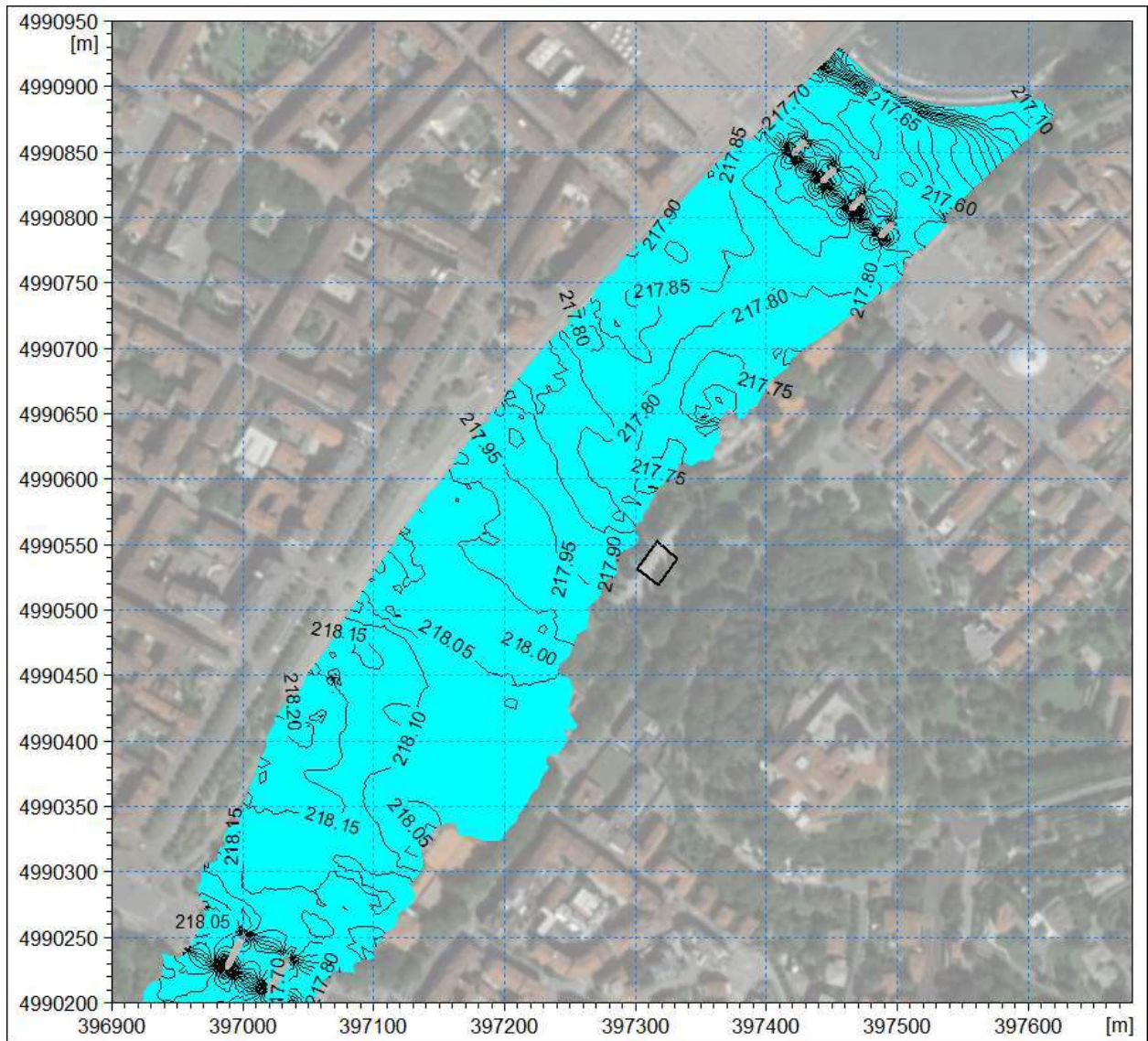
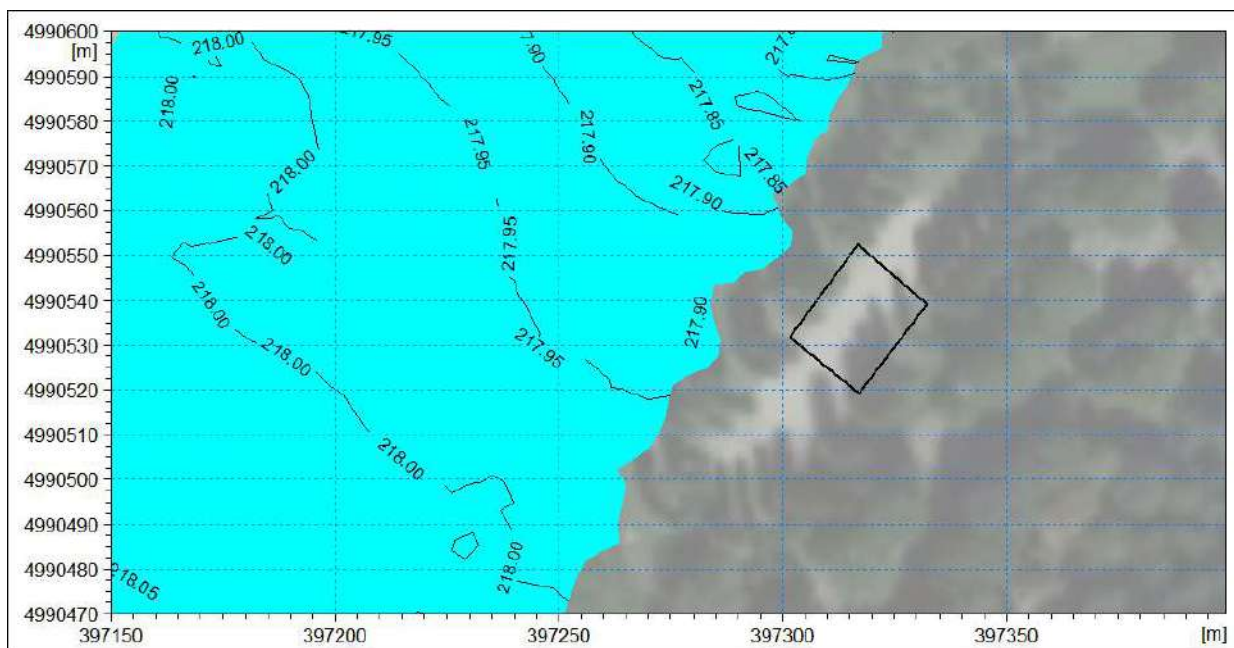


Figura 25 – Distribuzione delle quote di pelo libero in corrispondenza del colmo dell'evento con TR=200 anni nell'ipotesi di paratoia piana in sponda destra della traversa Michelotti aperta: ingrandimento nel tratto di valle, in corrispondenza del basamento della ruota panoramica (evidenziato in figura).



**Figura 26 – Particolare in prossimità del basamento della distribuzione delle quote di pelo libero in corrispondenza del colmo dell'evento con TR=200 anni nell'ipotesi di paratoia piana in sponda destra della traversa Michelotti aperta.**

Nel seguito sono infine presentati anche i risultati grafici relativi al transito nel tratto di Po considerato della portata di piena di riferimento con tempo di ritorno 20 anni (pari a 1.750 m<sup>3</sup>/s), nell'ipotesi di paratoia piana in sponda destra della traversa Michelotti chiusa.

Nella Figura 27 è rappresentata la distribuzione delle altezze idriche simulata con il modello 2D in corrispondenza della portata con TR=20 anni lungo tutto il tratto di Po indagato.

Sullo stesso tratto, e sempre in occasione del transito della portata ventennale, nella Figura 28 è mostrato il campo delle velocità di flusso.

Nella Figura 29 è riportato invece un ingrandimento nel tratto di valle della distribuzione delle altezze idriche e il campo dei vettori velocità al colmo di piena con TR pari a 20 anni.

Analogamente nella Figura 30 è riportata la distribuzione areale delle velocità di flusso e infine nella Figura 31 la distribuzione delle quote di pelo libero.

In prossimità del basamento la quota massima calcolata per TR=20 anni risulta pari a 216,60 m s.m..

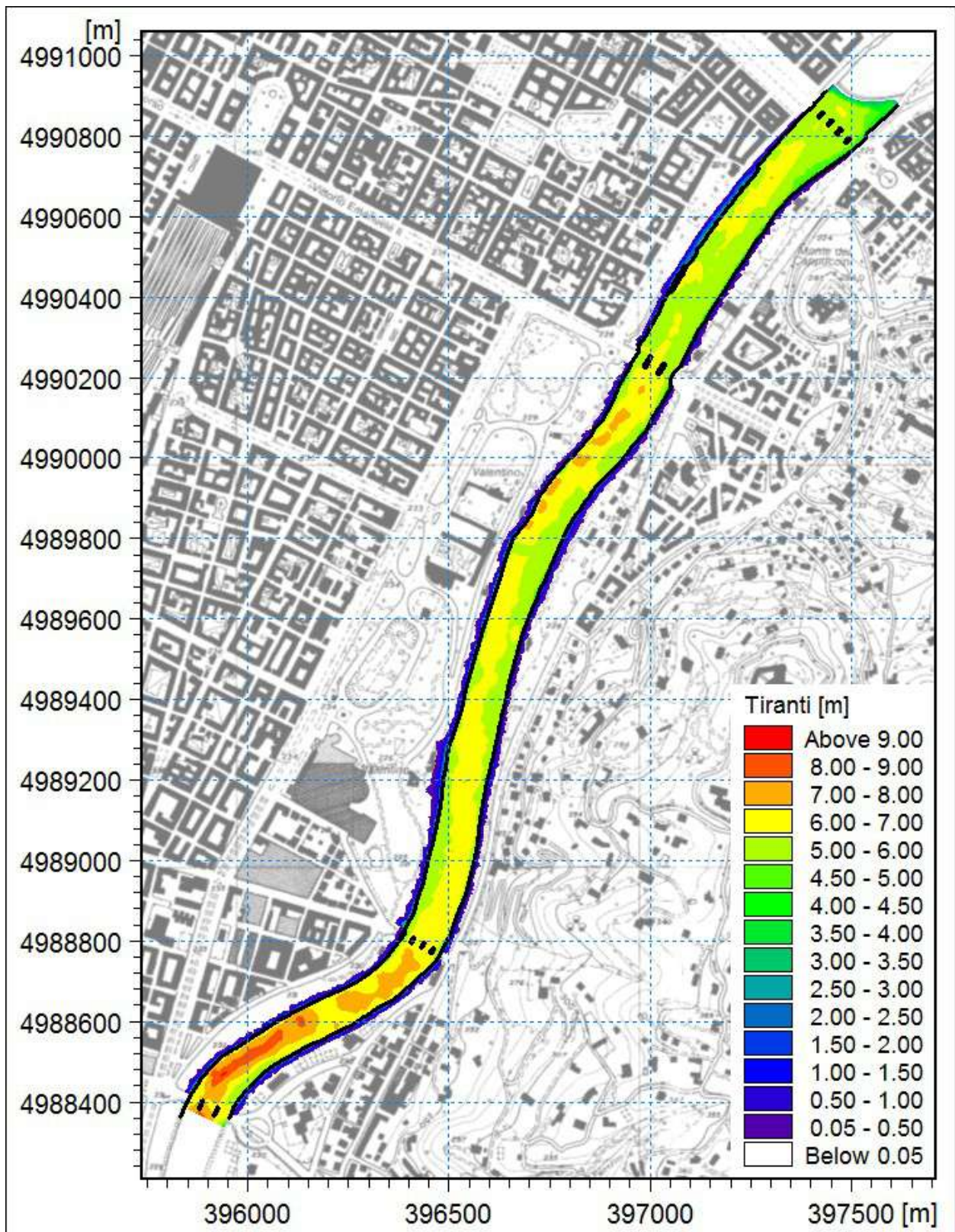


Figura 27 – Distribuzione delle altezze idriche in corrispondenza del colmo dell'evento con TR20 nell'ipotesi di paratoia piana in sponda destra della traversa Michelotti chiusa.

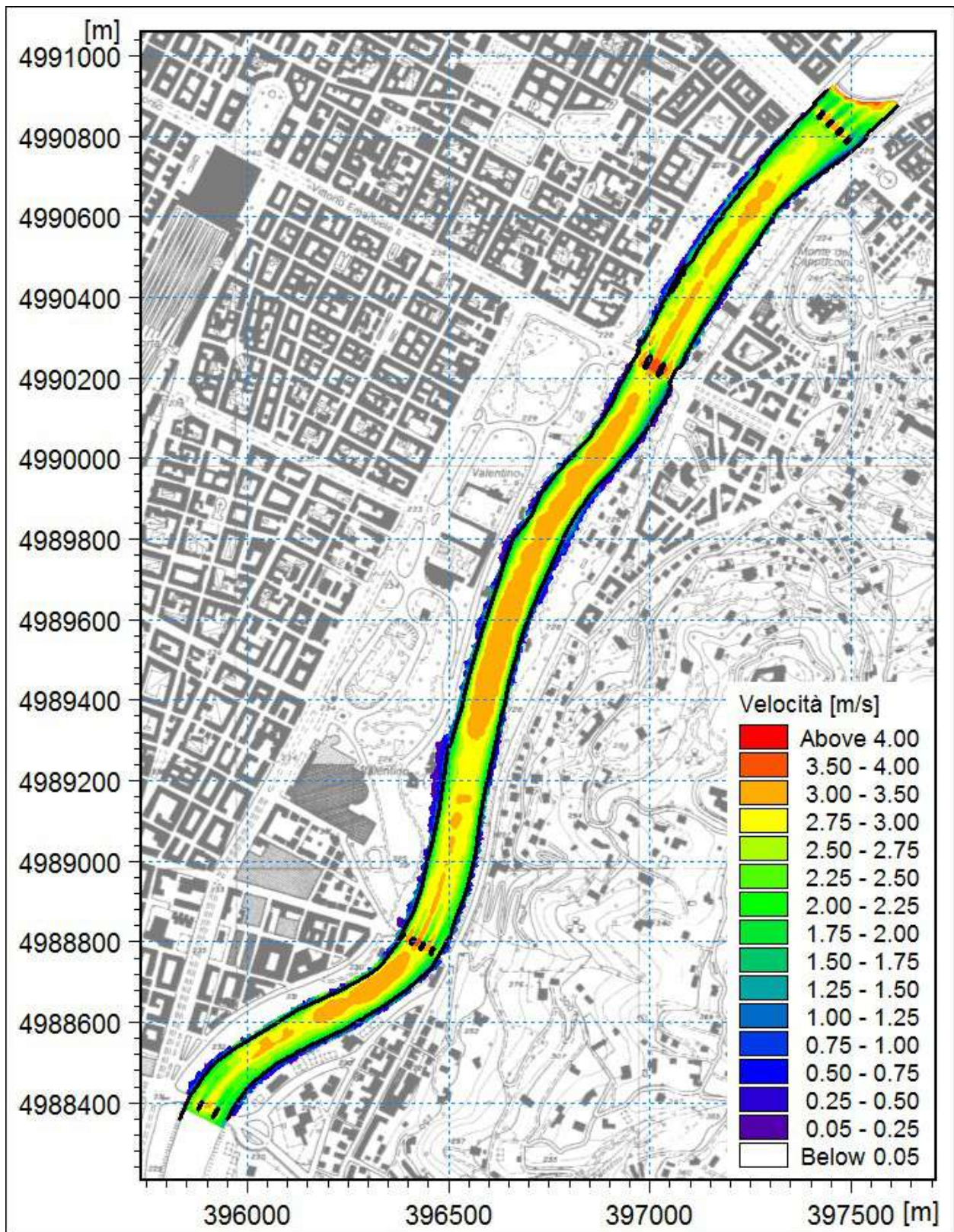


Figura 28 – Campo delle velocità in corrispondenza del colmo dell'evento con TR20 nell'ipotesi di paratoia piana in sponda destra della traversa Michelotti chiusa.

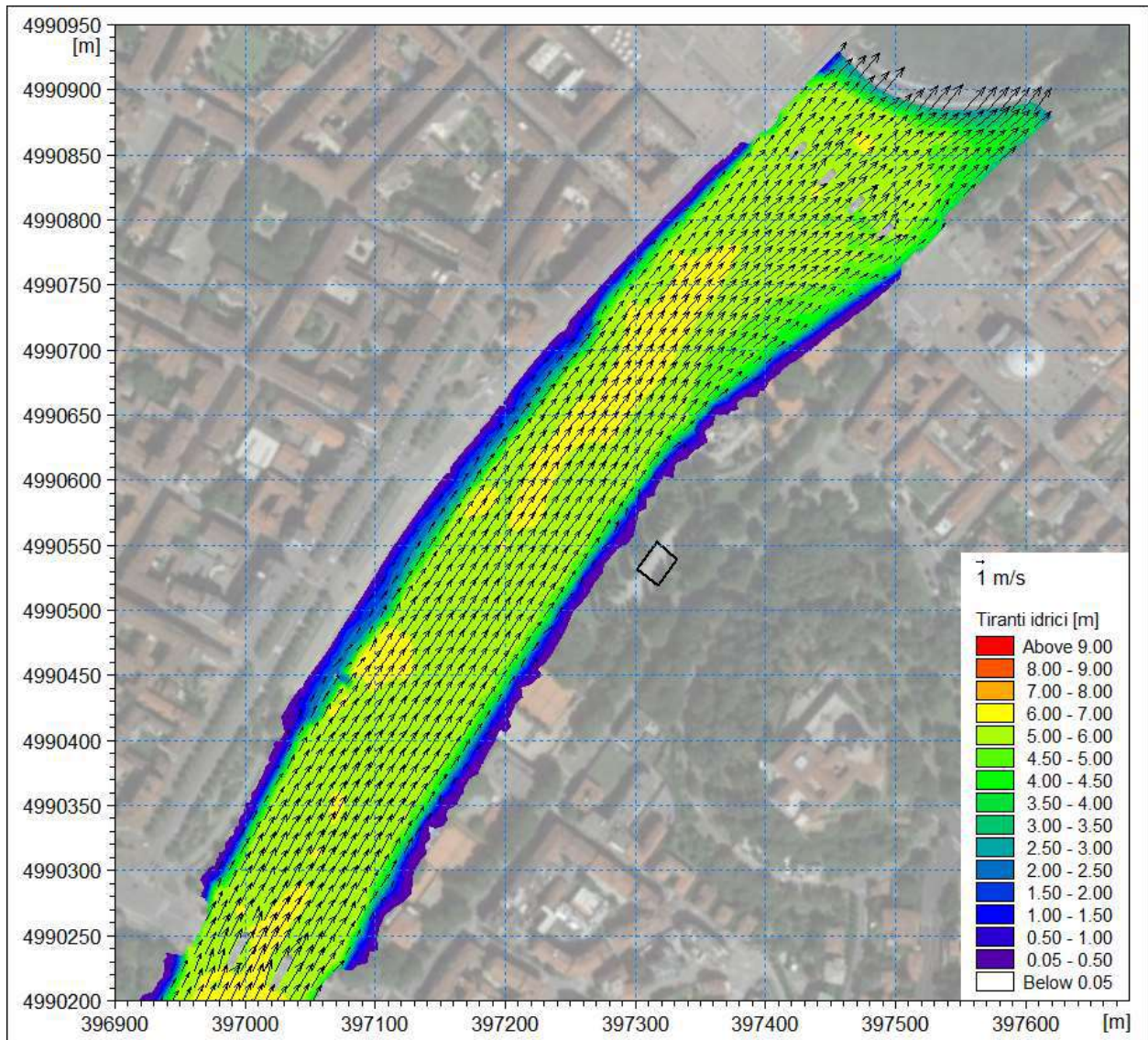


Figura 29 – Distribuzione delle altezze idriche e campo dei vettori velocità in corrispondenza del colmo dell'evento con TR=20 anni nell'ipotesi di paratoia piana in sponda destra della traversa Michelotti chiusa: ingrandimento nel tratto di valle, in corrispondenza del basamento della ruota panoramica (evidenziato in figura).

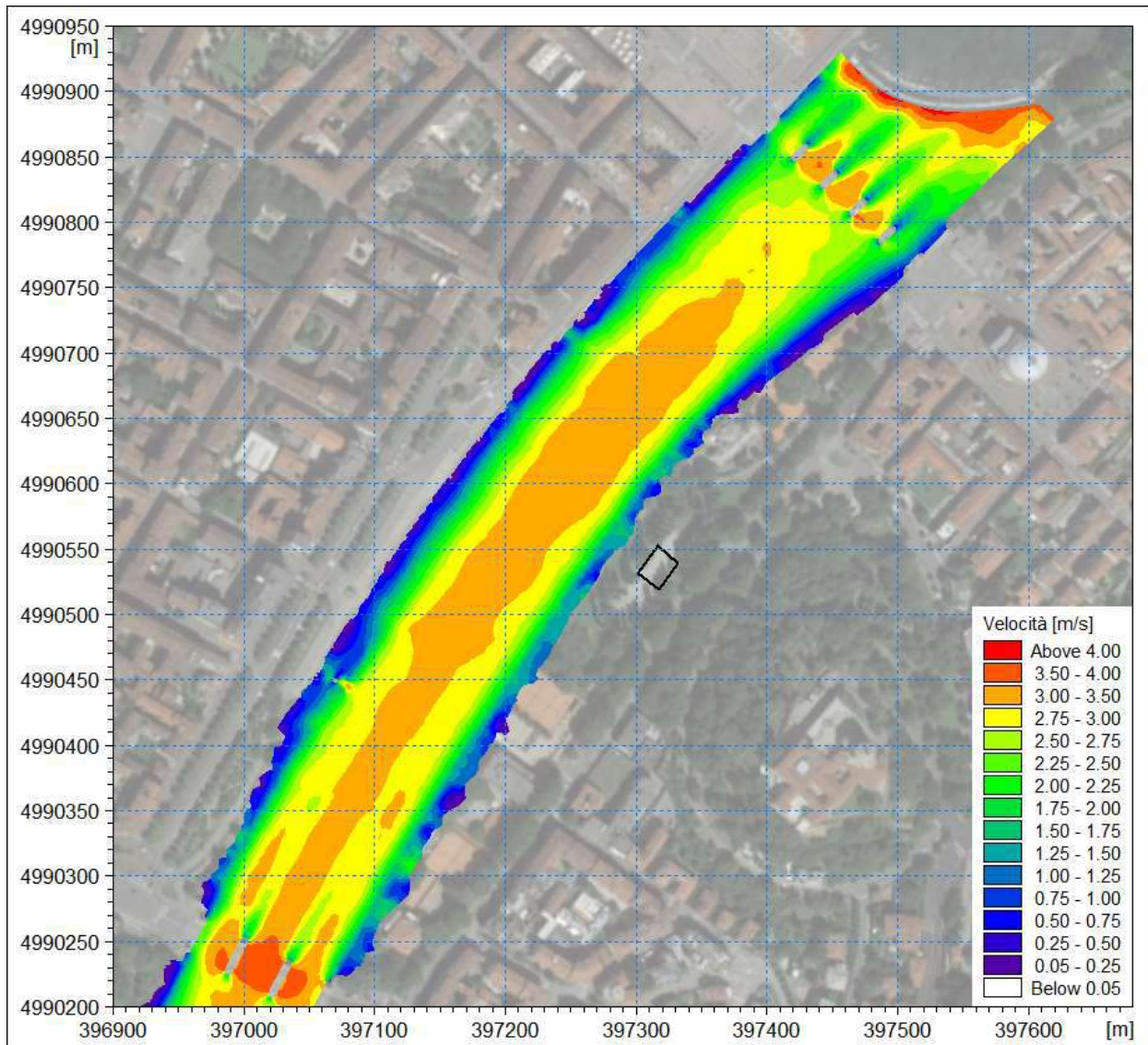
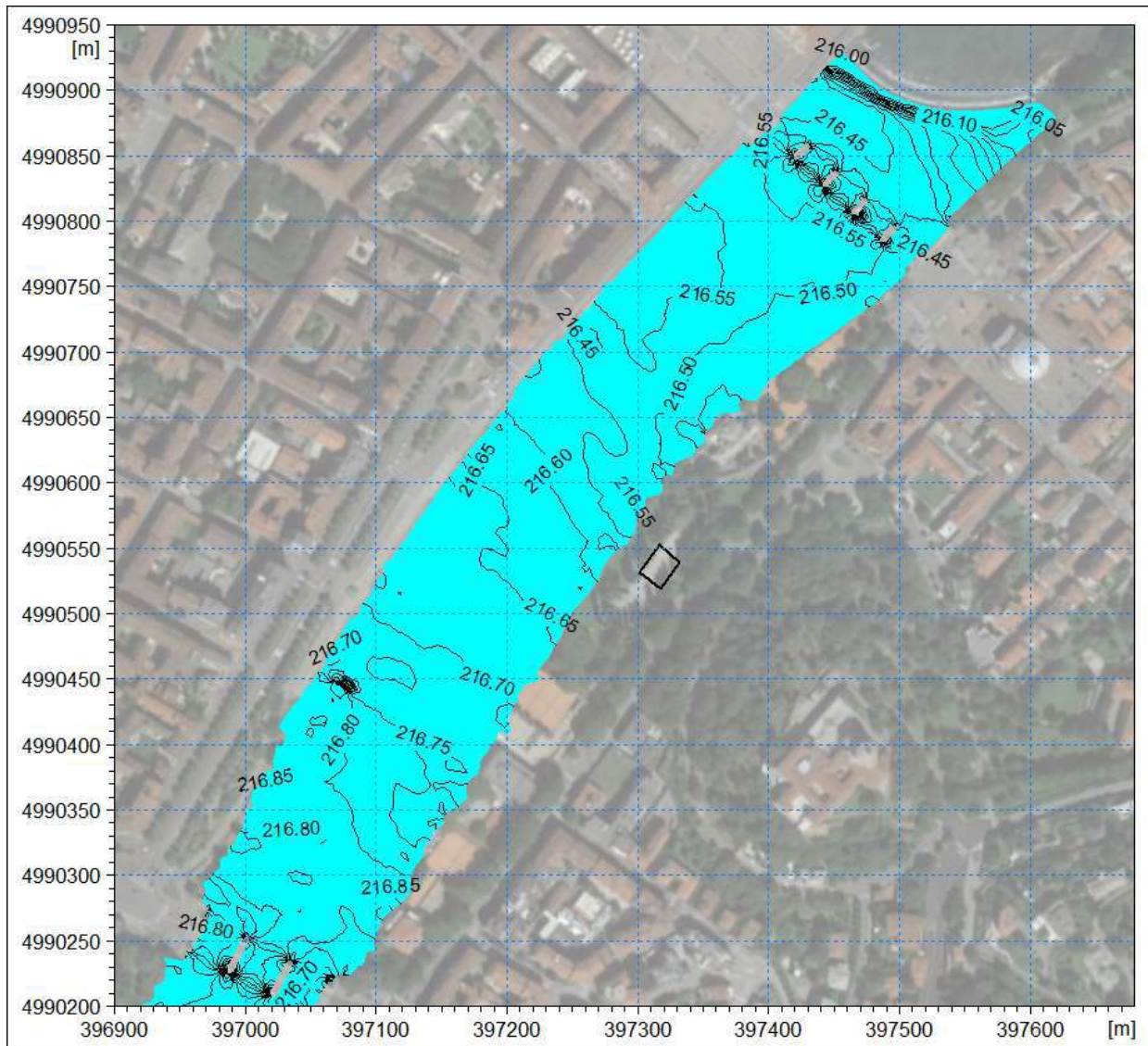


Figura 30 – Distribuzione delle velocità in corrispondenza del colmo dell'evento con TR=20 anni nell'ipotesi di paratoia piana in sponda destra della traversa Michelotti chiusa: ingrandimento nel tratto di valle, in corrispondenza del basamento della ruota panoramica (evidenziato in figura).



**Figura 31 – Distribuzione delle quote di pelo libero in corrispondenza del colmo dell’evento con TR=20 anni nell’ipotesi di paratoia piana in sponda destra della traversa Michelotti chiusa: ingrandimento nel tratto di valle, in corrispondenza del basamento della ruota panoramica (evidenziato in figura).**

## 6. CONCLUSIONI

Le analisi idrauliche sviluppate con supporto di modellistica numerica bidimensionale hanno consentito di analizzare in dettaglio l'assetto idrodinamico attuale del tratto fluviale in esame con riferimento a differenti condizioni idrologiche, per verificare l'eventuale impatto delle opere in progetto.

In generale sull'ambito di studio, relativamente al deflusso della piena con tempo di ritorno di 200 anni di riferimento per la progettazione, le aree di allagamento esterne all'alveo risultano sostanzialmente coerenti con le aree di pericolosità perimetrate dalla pianificazione vigente (PGRA), con localizzati scostamenti; le esondazioni sono limitate e interessano le aree più prossime all'alveo inciso.

Per quanto riguarda nello specifico l'area di prevista installazione della piattaforma (Figura 22), nonostante l'inclusione nella perimetrazione P2 del PGRA essa non risulta essere in realtà raggiunta dai livelli di piena duecentennale, che sulla sezione corrispondente raggiungono un massimo valore del pelo libero pari a 217,95 m s.m., a fronte di una quota minima del piano campagna in corrispondenza della piattaforma pari a 218,85 m s.m., in base al rilievo Lidar, con un franco idraulico attuale pari quindi a 0,90 m.

Non interferendo nemmeno marginalmente con i deflussi di piena, il nuovo manufatto non è quindi in grado di produrre alcun ostacolo al normale deflusso della stessa, né di aggravare in alcun modo le condizioni attuali di rischio idraulico per le aree circostanti.

Considerando invece i potenziali danneggiamenti che l'evento idrologico potrebbe produrre sul manufatto, tenendo conto anche delle incertezze insite nelle schematizzazioni modellistiche e nelle stime idrologiche, si ritiene adeguato prevedere, in analogia a quanto richiesto dalla Direttiva 1 del PAI (cfr. capitolo 2) per la verifica di rischio idraulico accettabile degli impianti posti in fascia A o B, che *le strutture civili, gli impianti elettrici e le attrezzature elettromeccaniche siano protetti dal danneggiamento durante eventi di piena con tempo di ritorno pari a 200 anni*, ovvero che tutti gli elementi sensibili possano presentare un franco idraulico minimo di 1,0 m rispetto ai massimi livelli di piena duecentennale.

Considerato che la quota massima del pelo libero calcolata per TR=200 anni è pari a 217,95 m s.m., che la quota minima di piano campagna nell'area di ubicazione del basamento risulta pari a 218,85 m s.m. e che il basamento stesso presenta un'altezza di circa un metro, risulta che il franco di sicurezza disponibile è ampiamente superiore al valore minimo richiesto di 1,0 m. È opportuno comunque, date le possibili incertezze nella definizione delle quote del DTM, prevedere che la quota minima della piattaforma di fondazione della ruota sia pari a **219,00 m s.m.**

Nel rispetto di questo vincolo, si ritiene che la verifica di compatibilità idraulica per l'installazione in oggetto possa essere meritevole di valutazione positiva.



ALLEGATO 1 - Descrizione del codice di calcolo  
MIKE21 - HD



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

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

Equazione di conservazione della massa:

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

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo x:

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

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

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

nelle quali:

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

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

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

1. dipendente dal flusso locale:

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

2. oppure dipendente dalla velocità locale:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



