



TORINO - IVREA - QUINCINETTO

IVREA - SANTHIA'

SISTEMA AUTOSTRADALE
TANGENZIALE DI TORINO

VISTO per ATIVA S.p.A.



Amministratore Delegato
Dott. Ing. LUIGI CRESTA

AUTOSTRADA A4/A5 - A5 TORINO QUINCINETTO IVREA SANTHIA'

NODO IDRAULICO DI IVREA 2° FASE DI COMPLETAMENTO

PROGETTO DEFINITIVO

STUDIO IDRAULICO GENERALE Relazione idraulica generale sul nodo di Ivrea con risultati del modello 2D

IL PROGETTISTA	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO
 <i>Il Direttore Tecnico</i> Dott. Ing. ROBERTO PETRALI ordine degli Ingegneri di Milano n° 14638	HYDRODATA M. Cargnelutti	HYDRODATA R. Dutto	ATIVA ENGINEERING V. Palmisano
	DATA GIUGNO 2012	REVISIONE	DATA
	SCALA -		
	UFFICIO SSP0101A050000PDIDR101--	COMMESSA	N° PROGETTO

INDICE

1.	PREMESSA	1
1.1	Approfondimenti richiesti da AIPO in sede di Verifica di Assoggettabilità a VIA	2
2.	ANALISI IDROLOGICA	2
3.	ANALISI IDRODINAMICA - TRATTO INTERAGENTE CON IL NODO RIBES/CHIUSELLA	6
3.1	Approccio metodologico	6
3.2	Messa a punto del modello idrodinamico monodimensionale	7
3.3	Costruzione della griglia di calcolo del modello numerico 2D	10
3.4	Parametri del modello 2D	14
3.5	Condizioni al contorno del modello 2D	15
3.6	Descrizione delle simulazioni e delle analisi idrauliche condotte con il modello 2D	16
3.7	Scenario attuale - simulazione SIM1	17
3.8	Scenario di progetto - simulazione SIM2	26
3.9	Scenario di progetto - simulazioni SIM3.1 e SIM3.2	41
4.	ANALISI IDRODINAMICA/TRATTO A MONTE DI IVREA	58
4.1	Premessa	58
4.2	Descrizione dei risultati delle analisi pregresse condotte mediante modello fisico	59
4.2.1	Configurazione di breve termine	60
4.2.2	Configurazione di lungo termine	61
4.3	Approccio metodologico seguito per l'applicazione del modello	63
4.4	Messa a punto del modello idrodinamico monodimensionale	63
4.5	Costruzione della griglia di calcolo del modello numerico 2D	67
4.6	Parametri del modello 2D	67
4.7	Condizioni al contorno del modello 2D	69
4.8	Descrizione delle simulazioni e delle analisi idrauliche condotte con il modello 2D	70
4.9	Risultati dello scenario attuale - simulazione SIM1M	70
4.10	Risultati dello scenario di progetto - simulazione SIM2M	76
5.	DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI IN PROGETTO	84
5.1	Interventi di protezione idraulica	84

ALLEGATI

ALLEGATO 1 - Descrizione del codice di calcolo MIKE 11 - HD

ALLEGATO 2 - Descrizione del codice di calcolo MIKE 21 - HD

1. PREMESSA

La presente relazione riguarda le analisi idrauliche relative alla Dora Baltea nel tratto a monte di Ivrea e al nodo rio Ribes - torrente Chiusella nel tratto potenzialmente influente sulle opere autostradali oggetto del progetto definitivo.

Si rimanda alla specifica relazione di inquadramento conoscitivo per la descrizione del contesto idrografico e delle problematiche di carattere idrologico e pianificatorio nell'area di studio.

Nello stesso elaborato vengono indicati gli studi pregressi che, dopo le piene del 1993 e del 2000, hanno affrontato le problematiche idrologico-idrauliche del nodo di Ivrea.

Per il **tratto autostradale interferente con il torrente Chiusella e con il paleoalveo del rio Ribes**, nell'ambito dello studio idraulico di aggiornamento eseguito per ATIVA è stato allestito un modello idrodinamico con struttura bidimensionale in grado di simulare il comportamento dell'area in esame durante l'evolversi dell'evento di piena di progetto.

Per la messa a punto del modello è stato utilizzato il codice di calcolo MIKE Flood del DHI^{Water Environment Health}, che consente la simulazione contestuale di tratti fluviali con schema 1D o quasi-2D e di tratti con schema 2D. In particolare le parti bidimensionali hanno riguardato tutto il tratto di rio Ribes dall'incile di Fiorano alla confluenza nel Chiusella, le aree golenali del Chiusella stesso fino al rilevato ferroviario Torino-Aosta mentre l'alveo inciso del torrente Chiusella, con relativi manufatti di attraversamento autostradale, stradale e ferroviario, sono stati rappresentati con un modello idrodinamico monodimensionale direttamente interfacciato con quello bidimensionale.

L'assetto del modello ha tenuto conto anche delle opere di attraversamento recentemente adeguate o in via di realizzazione sul tracciato del rio Ribes tra l'incile di Fiorano e l'area interagente con le opere autostradali.

Con il modello così strutturato è stato simulato l'andamento della piena di progetto nella situazione attuale (con lo stato delle opere di difesa idraulica e delle infrastrutture risultante dalle ricognizioni di aggiornamento del quadro conoscitivo e dalle indagini appositamente condotte) e nello scenario di progetto conseguente ai previsti interventi di adeguamento delle opere autostradali.

Anche per quanto riguarda il **tratto autostradale a monte di Ivrea** è stato allestito un modello idrodinamico con struttura bidimensionale in grado di simulare il comportamento dell'area in esame durante l'evolversi dell'evento di piena di progetto, utilizzando il codice di calcolo MIKE Flood del DHI^{Water Environment Health}. La parte bidimensionale del modello ha compreso le aree golenali della Dora Baltea, l'incile di Fiorano e la parte iniziale del rio Ribes fino al rilevato della Via Provinciale, mentre l'alveo inciso della Dora e i manufatti di attraversamento dell'autostrada sono stati rappresentati con un modello idrodinamico monodimensionale direttamente interfacciato con quello bidimensionale.

Il modello è stato inizialmente tarato sulla base dei risultati definitivi dello specifico studio su modello fisico promosso dalla Provincia di Torino ("Modello fisico finalizzato alla definizione delle condizioni di sfioro del fiume Dora Baltea nel paleoalveo del rio Ribes a monte dell'abitato di Ivrea" - Università di Trento, 2005) i cui parametri sono vincolanti in quanto assunti dagli enti competenti come termini di riferimento per le progettazioni al nodo idraulico in esame; successivamente il modello è stato impiegato per la simulazione dello

scenario di progetto al fine della verifica dei rivestimenti protettivi dei rilevati, degli attraversamenti secondari e dei campi di flusso nell'intorno delle pile del viadotto Fiorano.

1.1 Approfondimenti richiesti da AIPO in sede di Verifica di Assoggettabilità a VIA

Con riferimento al parere di compatibilità idraulica ai sensi del R.D. 523/1904, in sede di Verifica di Assoggettabilità a V.I.A., AIPO ritenne utile indicare alcuni approfondimenti di studio da effettuarsi in fase di stesura del Progetto Definitivo e in particolare:

- vista la disponibilità del rilievo LIDAR 2008, estendere la modellazione idraulica bidimensionale all'intera area allagabile lato Ovest del Rio Ribes ed alla fascia antistante il torrente Chiusella estendendo la modellazione di tale corso d'acqua fino alla confluenza in Dora;
- considerare concomitanze di portate più severe di quelle assunte in quanto potrebbero essere di interesse per le condizioni di esercizio dell'infrastruttura e per la Protezione Civile;
- relativamente al Lotto 3 estendere la modellazione 2D al fine di evidenziare l'influenza delle opere in progetto sulla dinamica di attivazione del rio Ribes e gli effetti dell'intervento nel territorio di Lessolo, anche in relazione alla presenza dei sottopassi e del tratto in viadotto non più tracimabile;
- relativamente alle aree insediate, allagate per la portata assunta ma su cui non sono previste opere dal P.A.I., indagare in maniera più dettagliata quali siano i tiranti d'acqua sul piano campagna ed elaborare uno scenario di simulazione che preveda la realizzazione di opere arginali di protezione al fine di indagare anche in tale contesto l'eventuale relazione con le modifiche indotte dall'adeguamento viario.

2. ANALISI IDROLOGICA

I dati idrologici di riferimento sono quelli derivanti dagli studi pregressi e dalle scelte di pianificazione del nodo idraulico illustrate nella relazione di inquadramento conoscitivo.

Per quanto riguarda in particolare il nodo Ribes - Chiusella, nelle analisi modellistiche numeriche iniziali si era fatto riferimento all'idrogramma con tempo di ritorno 200 anni defluente nel ramo del Rio Ribes, ricavato dallo "Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del fiume Dora Baltea nel tratto da Aymavilles alla confluenza in Po" dell'Autorità di Bacino del Fiume Po (HYDRODATA, 2001÷2003).

In particolare è stato estratto l'idrogramma di piena duecentennale in una sezione del Rio Ribes prossima all'incile di Fiorano. L'idrogramma, riportato in Figura 1, mostra un valore di portata al picco di piena pari a circa 990 m³/s, che rappresentava la situazione risultante in assenza delle arginature realizzate in corrispondenza dell'incile.

Le analisi idrauliche e le valutazioni di compatibilità definitive, sviluppate nello studio di aggiornamento idraulico del febbraio 2011 sono state però condotte con riferimento al valore di piena stimato dall'Università di Trento nel modello fisico del nodo di Ivrea per conto della Provincia di Torino (portata massima al colmo all'incile di Fiorano pari a 1265 m³/s valore riferito all'attuale situazione con presenza delle arginature in corrispondenza dell'incile) ed utilizzato per la progettazione e verifica delle opere di difesa del nodo di Ivrea.

A tale scopo si è costruito un idrogramma sintetico di progetto con portata al colmo QMAX = 1265 m³/s riscalando proporzionalmente il precedente idrogramma di piena duecentennale (vedi Figura 2).

In ingresso nel torrente Chiusella a monte dell'attraversamento del viadotto autostradale si è invece considerato l'idrogramma di piena con portata al colmo 338 m³/s adottato nel modello quasi-2D dell'intero nodo di Ivrea nell'ambito dello Studio di Fattibilità sopra citato dell'Autorità di Bacino del Fiume Po (vedi Figura 3).

Tale idrogramma è inferiore alla piena duecentennale di progetto del Chiusella (il cui valore al colmo è di circa 900 m³/s) e si riferisce alla condizione di concomitanza tra piena di Chiusella e piena duecentennale di Dora Baltea.

Nell'ambito del presente progetto definitivo, con riferimento ai dati di portata, sono state pertanto eseguite due distinte simulazioni bidimensionali:

- evento duecentennale in ingresso nel Chiusella e deflusso in arrivo dal rio Ribes tale che a valle della loro confluenza la portata al colmo sia equivalente a quella di riferimento e progetto considerata nelle precedenti simulazioni ($Q = 1.438,0 \text{ m}^3/\text{s}$);
- deflusso concomitante della piena di riferimento sul Ribes e dell'evento duecentennale del Chiusella.

La prima simulazione è stata impiegata per la verifica di progetto del viadotto Chiusella (verifica del franco di sicurezza) mentre la seconda simulazione è stata finalizzata alla verifica del franco residuo delle opere autostradali e delle difese idrauliche del Chiusella a valle della confluenza del Ribes, oltre che dell'assetto idrodinamico (tiranti, velocità, aree allagabili) a monte dello svincolo di Pavone e in corrispondenza dello stesso.

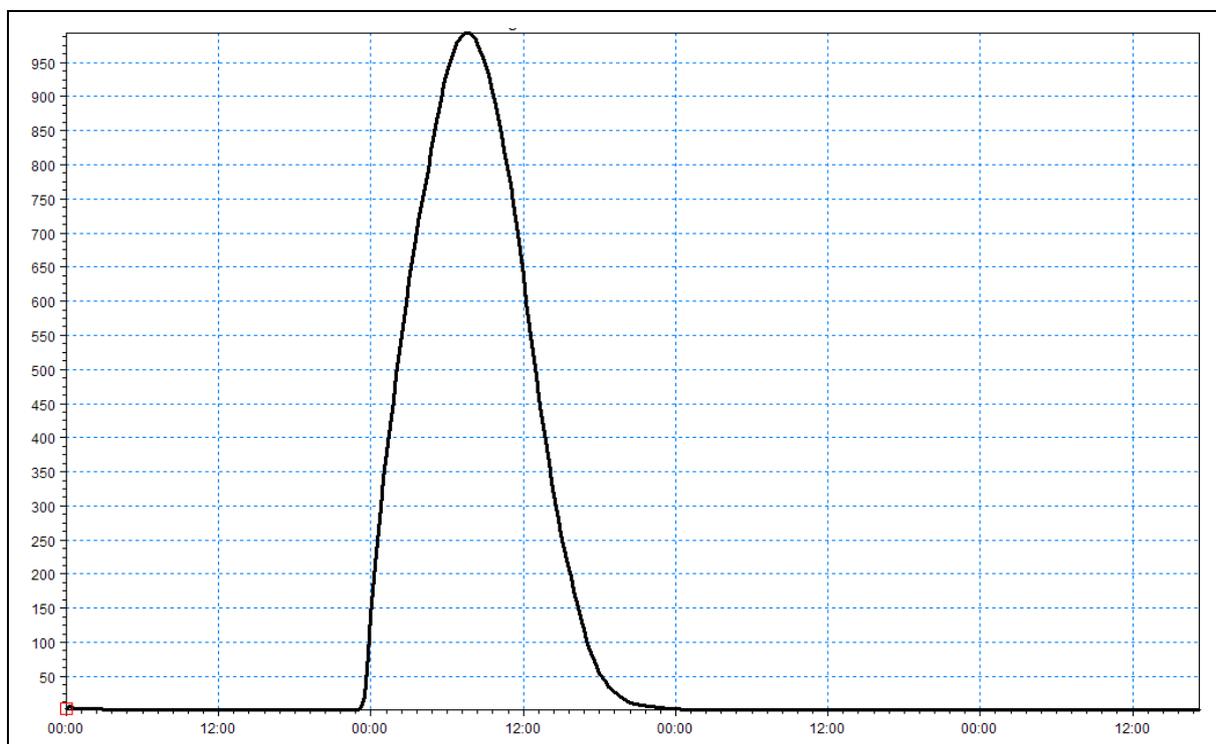


Figura 1 - Idrogramma di portata TR=200 anni estratto dai risultati dello "Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del fiume Dora Baltea nel tratto da Aymavilles alla confluenza in Po".

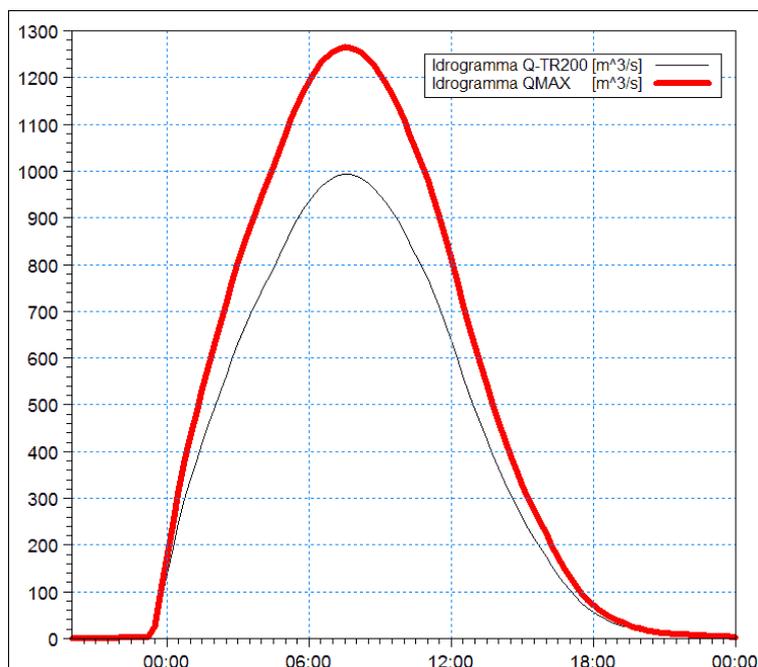


Figura 2 - Idrogramma di progetto con portata al colmo $Q_{MAX} = 1265 \text{ m}^3/\text{s}$ ottenuto a partire dall'idrogramma di piena di Figura 1.

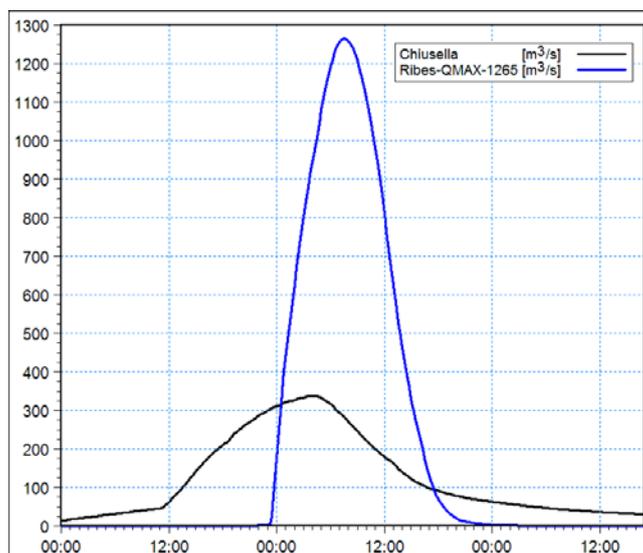


Figura 3 - Idrogramma di progetto in ingresso nel torrente Chiusella confrontato con quello in ingresso nel rio Ribes.

Nella Figura 4 sono rappresentati:

- l'idrogramma di piena duecentennale del torrente Chiusella con portata al colmo $900 \text{ m}^3/\text{s}$ costruito semplicemente riscalando proporzionalmente il precedente idrogramma con colmo pari a circa $340 \text{ m}^3/\text{s}$;
- l'idrogramma residuo sul rio Ribes ottenuto riscalando quello di progetto con portata al colmo $1265 \text{ m}^3/\text{s}$ in modo che a valle della confluenza nel Chiusella la portata al colmo risultante corrisponda a quella dell'evento di progetto duecentennale considerato nei precedenti scenari di simulazione.

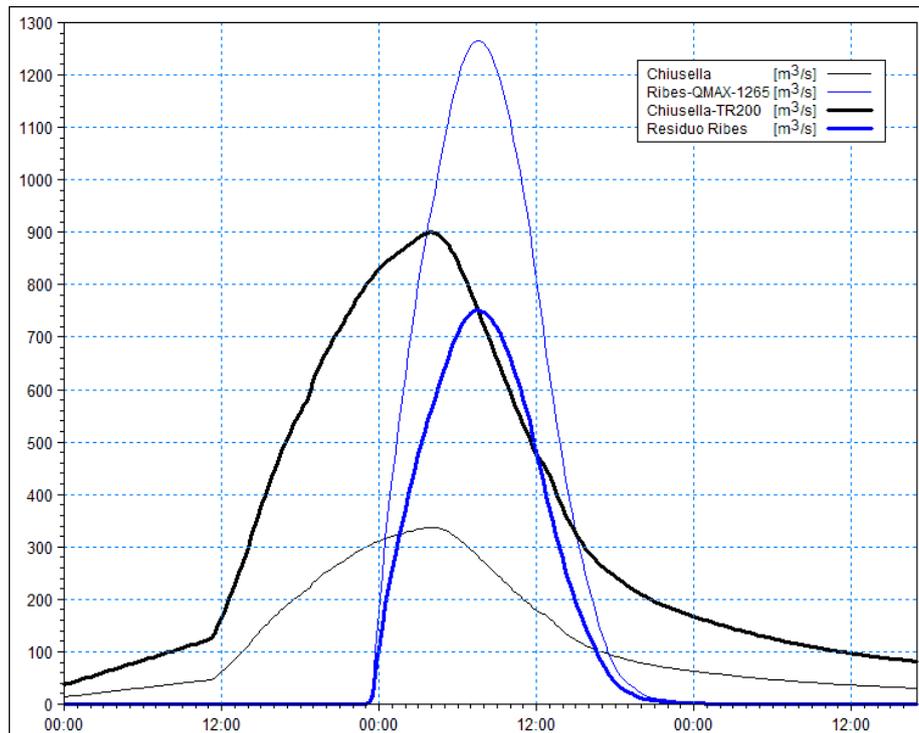


Figura 4 - Idrogramma di progetto con TR=200 anni in ingresso nel torrente Chiusella (linea nera spessa) e idrogramma residuo in ingresso nel rio Ribes (linea blu spessa).

Anche per quanto riguarda il nodo Dora Baltea-Ribes a monte di Ivrea si è fatto inizialmente riferimento all'idrogramma con tempo di ritorno 200 anni in ingresso nella Dora Baltea, ricavato dallo studio pregresso dell'AdBPo sopra citato. Tale idrogramma, caratterizzato da una portata al colmo pari a circa 2815 m³/s, è stato opportunamente riscalato uniformemente in modo da ottenere la portata al colmo pari a 2925 m³/s stimata dall'Università di Trento mediante il modello fisico del nodo di Ivrea precedentemente citato. Nella Figura 5 sono rappresentati entrambi gli idrogrammi considerati.

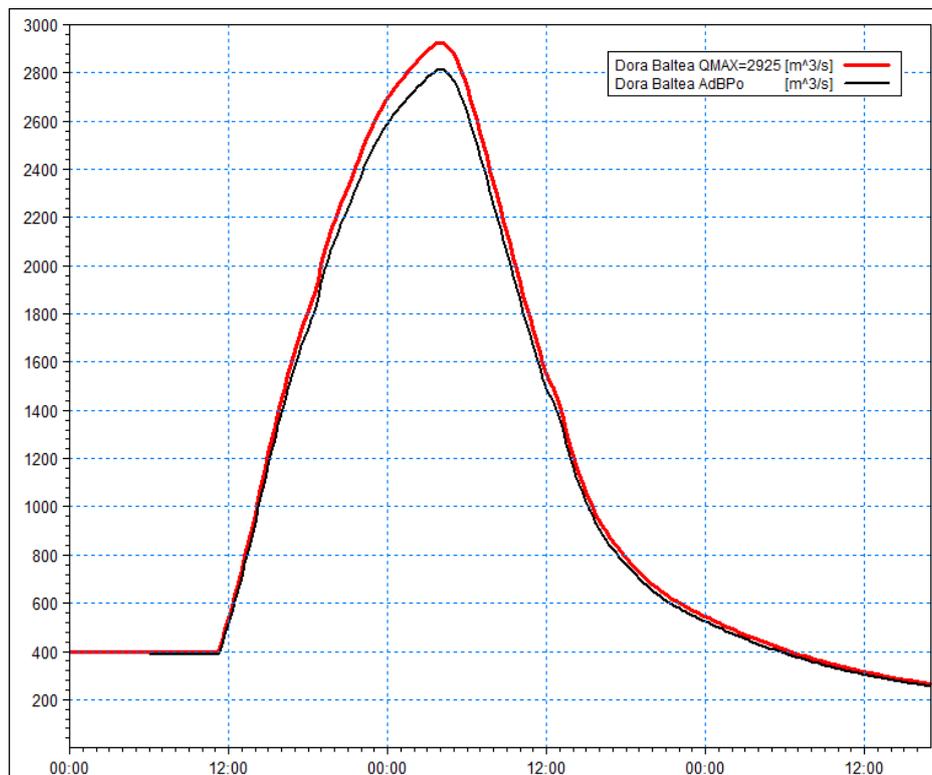


Figura 5 - Idrogramma di progetto in ingresso nella Dora Baltea a monte di Ivrea con portata al colmo QMAX = 2925 m³/s ottenuto a partire dall'idrogramma di piena dello studio pregresso dell'AdBPo.

Si rimanda al successivo paragrafo 3.6 per un elenco di dettaglio delle diverse simulazioni eseguite.

3. ANALISI IDRODINAMICA - TRATTO INTERAGENTE CON IL NODO RIBES/CHIUSELLA

3.1 Approccio metodologico

Il modello idrodinamico basato sul codice di calcolo **MIKE Flood** del DHI Water Environment Health messo a punto ai fini delle verifiche idrauliche relative al progetto preliminare è stato, nel corso del presente studio, opportunamente aggiornato ed esteso a monte dell'area di confluenza Ribes-Chiusella utilizzando il rilievo LIDAR 2008, modello digitale del terreno (DTM) fornito dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (M.A.T.T.M.) nell'ambito del Piano Ordinario di Telerilevamento Ambientale (POT-A) ed esteso anche a valle inserendo una porzione significativa del modello quasi-2D della Dora Baltea estratto dal corrispondente modello messo a punto nello studio dell'AdBPo.

Il modello combina dinamicamente l'approccio monodimensionale e quello bidimensionale.

Nel caso in esame, l'alveo del torrente Chiusella è stato modellato con approccio monodimensionale attraverso l'inserimento delle sezioni trasversali di rilievo del solo alveo inciso e delle geometrie dei ponti presenti nel tratto simulato, mentre le aree interessate dal deflusso della piena sul rio Ribes e le aree golenali del torrente Chiusella stesso sono state modellate con approccio bidimensionale, adottando una griglia di calcolo a celle quadrate di lato 10x10 m.

L'alveo del torrente Chiusella è stato poi collegato dinamicamente alle adiacenti aree golenali, sia in sponda destra che in sponda sinistra, mediante speciali funzioni di MIKE Flood, nel rispetto delle reali quote spondali.

Per quanto concerne l'alveo del torrente Chiusella, i risultati delle simulazioni condotte sono forniti sotto forma di profili longitudinali di livello e tabelle contenenti i principali parametri idraulici sezione per sezione. Per quanto concerne invece le aree inondabili e soprattutto quelle in corrispondenza dello svincolo di Pavone, i risultati ottenuti sono forniti sotto forma di mappe dei tiranti idrici e velocità di scorrimento riferite ai loro valori massimi.

Il codice di calcolo MIKE Flood è uno strumento modellistico integrato che permette di accoppiare in maniera dinamica, attraverso un'interfaccia utente grafica, il codice monodimensionale MIKE 11 e quello bidimensionale MIKE 21 (per una descrizione sintetica dei codici si vedano rispettivamente gli allegati 1 e 2).

MIKE Flood consente di sfruttare al massimo le potenzialità di MIKE 11 e di MIKE 21, facendo intervenire nell'ambito di uno stesso modello l'uno o l'altro codice in funzione delle specifiche esigenze di rappresentazione geometrica e di simulazione necessarie: MIKE 11 per la simulazione monodimensionale di tratti di alveo incisi non coperti da un DTM (modello digitale del terreno) e per il deflusso idrodinamico attraverso ponti, tombini, salti di fondo ecc., MIKE 21 per il deflusso nelle aree golenali o di esondazione e di invaso coperte da un DTM.

MIKE Flood è caratterizzato dal fatto che MIKE 11 e MIKE 21 rimangono singoli codici indipendenti l'un l'altro nella messa a punto e nell'input-output, mentre una specifica interfaccia grafica consente di definire i collegamenti reciproci e biunivoci di MIKE 11 e MIKE 21 per gli interscambi di portata e di quantità di moto e per la congruenza dei livelli idrici di calcolo.

Nel caso in esame è stato messo a punto un modello MIKE Flood, esteso fino alla zona di confluenza del Chiusella nella Dora Baltea, includendo anche un tratto di quest'ultima in modo da assegnare una condizione al contorno di valle che non influenzasse in alcun modo i risultati ottenuti sulle aree coperte dal modello 2D. Il modello complessivamente comprende:

- modello MIKE 11 monodimensionale per la rappresentazione dell'alveo inciso del torrente Chiusella con rappresentazione dei cinque ponti presenti sul tratto: autostrada A5, strada SP77, strada SS26 (ponte nuovo e ponte abbandonato) e ferrovia Torino-Aosta;
- modello MIKE 11 quasi-2D del nodo di confluenza del Chiusella nella Dora Baltea;
- modello MIKE 21 bidimensionale per la rappresentazione delle aree golenali allagabili del rio Ribes e del torrente Chiusella;
- connessione dinamica laterale (lungo entrambe le sponde dell'alveo inciso del torrente Chiusella) dei modelli MIKE 11 e MIKE 21 mediante MIKE Flood.

3.2 Messa a punto del modello idrodinamico monodimensionale

La prima attività condotta ai fini della messa a punto del modello MIKE Flood è stata la realizzazione del modello monodimensionale dell'alveo inciso del torrente Chiusella utilizzando il codice di calcolo MIKE 11 HD (modulo idrodinamico), del quale viene fornita una sintetica descrizione nell'allegato 1.

Il modello è stato realizzato a partire da un modello quasi-2D pregresso¹ (vedi Figura 6) eliminando i rami golenali del Chiusella e del Ribes e limitando le sezioni trasversali caratterizzanti il ramo principale del torrente Chiusella alla larghezza del solo alveo inciso. È stata invece mantenuta la struttura quasi-2D del nodo di confluenza del Chiusella nella Dora Baltea in modo da assegnare una condizione al contorno di valle sulla sezione terminale del tratto di Dora Baltea, ad una distanza tale da non influenzare minimamente i risultati ottenuti sull'area di applicazione del modello 2D. È stata infine prolungato verso monte il tratto di alveo simulato del Chiusella in modo da non escludere la possibilità di eventuali deflussi golenali in fascia B del Chiusella stesso a monte dell'attraversamento autostradale.

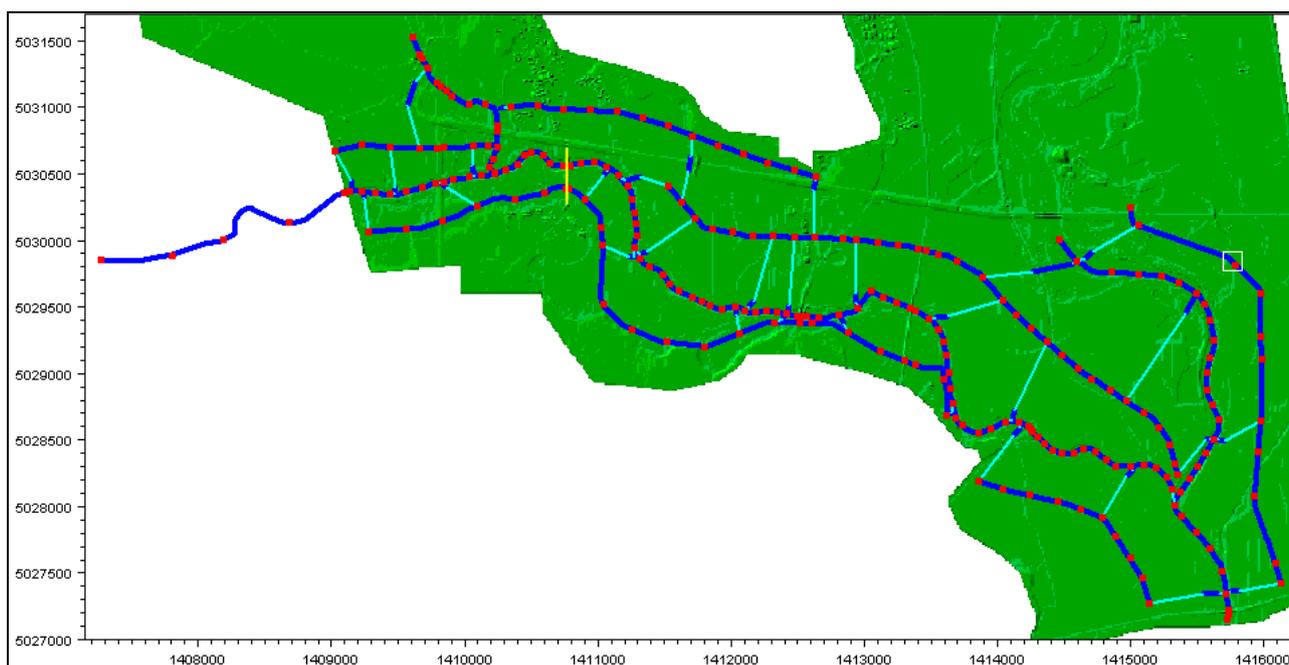


Figura 6 - Rappresentazione della schematizzazione quasi-bidimensionale adottata nello studio pregresso¹. In blu sono rappresentati i rami che modellano il flusso nelle parti incise degli alvei e nelle golene. Il posizionamento del ponte S.P. N.77 è indicato con tratto di colore giallo. I quadratini rossi rappresentano la posizione delle sezioni trasversali inserite nel modello.

La schematizzazione geometrica dell'alveo del Chiusella all'interno dell'area di applicazione del modello 2D è stata in particolare effettuata in modo da contenere i livelli di piena entro le sponde incise, tenendo conto delle caratteristiche geometriche del corso d'acqua e delle strutture interferenti con il moto. Il tratto di alveo considerato è stato schematizzato con 69 sezioni trasversali di rilievo. In corrispondenza dei cinque ponti sono state inserite, se non già presenti di rilievo, una sezione d'alveo a monte e una a valle della struttura stessa per esigenze di modellazione.

Una rappresentazione grafica dell'intero modello MIKE 11 è riportata nella Figura 7, nella quale in rosso sono riportate le sezioni d'alveo utilizzate nella modellazione ed è evidenziato il contorno del modello bidimensionale. Si osservi come le sezioni d'alveo siano limitate al solo alveo inciso all'interno dell'area di applicazione del modello 2D, mentre siano estese su intere porzioni golenali nei restanti tratti di modello quasi-

¹ Provincia di Torino, Area Viabilità ed Edilizia – "S.P. N.77 di Pavone. Ricostruzione ponte sul torrente Chiusella e sistemazione del corpo stradale – Progetto definitivo" – Relazione idrologico-idraulica – HYDRODATA, 2004.

2D. Sono infine evidenti gli ulteriori elementi che completano il modello MIKE 11: un ramo di imbocco sull'incile di Fiorano utilizzato per assegnare la condizione al contorno di monte di portata in ingresso nel Ribes e un tombino stradale di attraversamento del rilevato autostradale a nord del viadotto Cartiera che viene interessato marginalmente dai deflussi di esondazione lungo il rio Ribes.

Nella Tabella 1 è riportato l'elenco delle sezioni d'alveo relative al solo tratto di Chiusella compreso all'interno del contorno del modello 2D.

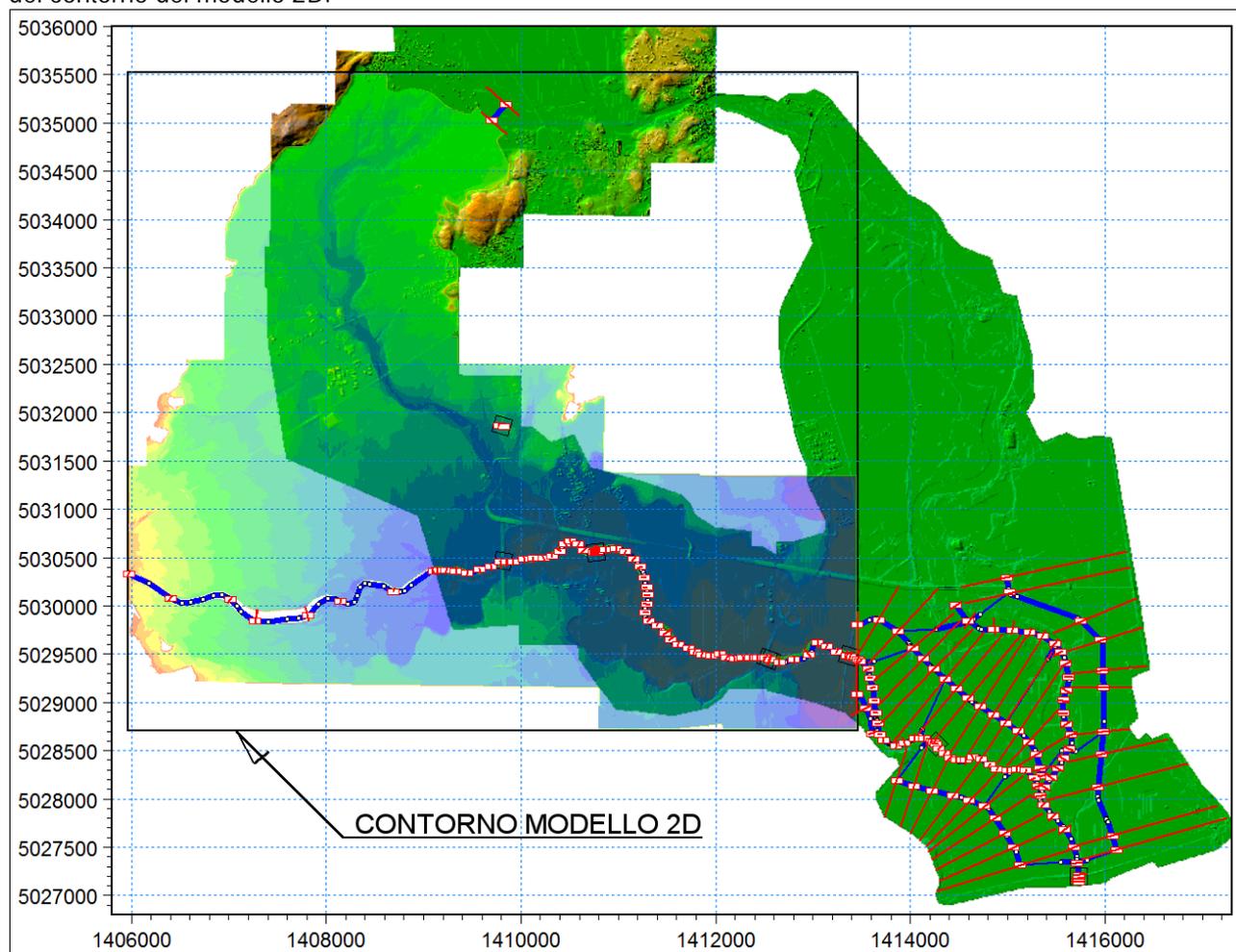


Figura 7 - Rappresentazione planimetrica del modello MIKE 11.

Progr. (m)	Sezioni rilievo	Progr. (m)	Sezioni rilievo	Progr. (m)	Sezioni rilievo
0,00 (*)	s23	3596,12	112-12	5670,29	134
493,89 (*)	s22	3689,93	113	5766,81	135
1134,38 (*)	s21	3773,50	114	5862,75	136
1473,48 (*)	s20	3880,76	115-11	5948,65	137
0,00	s20	3900,00	SP77_m	6035,51	138
538,00	s19	3910,00	SP77_v	6117,24	139-6
947,00	s18	3926,17	116	6192,08	140
1625,00	s17	4008,45	117	6267,15	141
2105,00	s16	4115,59	118	6345,22	142-5
2143,78	97	4212,88	119-10	6383,90	144-4

Progr. (m)	Sezioni rilievo	Progr. (m)	Sezioni rilievo	Progr. (m)	Sezioni rilievo
2236,68	98	4330,17	120	6396,77	145
2335,97	99-15	4436,55	121	6492,63	146
2450,58	100	4551,05	122	6647,82	147
2581,43	101	4650,87	123-9	6811,72	148-3
2701,61	102	4734,58	124	6975,11	149
2812,04	103-14	4828,18	125	7080,77	150-2
2875,26	104	4919,16	126	7194,82	151
2948,09	105	5012,28	127	7304,23	152-1
3064,10	106	5112,00	128	7340,96	153
3157,63	107-13	5233,04	129-8	7420,00	(interpolata)
3262,52	108	5314,09	130	7454,01	154
3352,45	109	5408,69	131	7565,22	155
3449,30	110	5518,16	132		
3539,10	111	5595,12	133-7		

Tabella 1 - Elenco delle sezioni adottate, con indicazione della progressiva longitudinale. Le sezioni contrassegnate con (*) appartengono ad un tratto aggiuntivo inserito a monte di quello del modello pregresso; i due tratti sono connessi in corrispondenza della sezione s20.

Nelle simulazioni si è considerato per l'alveo inciso del torrente Chiusella un valore medio del coefficiente di scabrezza K_s di Strickler pari a $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, in accordo con gli studi pregressi.

I ponti sono stati rappresentati nell'ambito del modello con strutture tipo "culvert" di forma geometrica variabile secondo una relazione quota-larghezza che tiene conto della luce libera al deflusso. Tale assunzione risulta valida in quanto il comportamento della corrente è regolato principalmente dal restringimento della sezione in presenza del ponte e dalle perdite di carico concentrate dovute allo stesso, più che da quelle distribuite lungo la struttura.

Sono stati in particolare introdotti i seguenti ponti:

- ponte dell'autostrada A5 alla progressiva 2844 m tra le sezioni 103-14 e 104;
- ponte della strada S.P.77 alla progressiva 3905 m tra le sezioni SP77_m e SP77_v;
- ponte nuovo della strada S.S.26 alla progressiva 6356,4 m tra le sezioni 142-5 e 144-4;
- ponte vecchio della strada S.S.26 alla progressiva 6390,3 m tra le sezioni 144-4 e 145;
- ponte della ferrovia Torino-Aosta alla progressiva 7322,6 m tra le sezioni 152-1 e 153.

Con il solo modello monodimensionale non sono state eseguite simulazioni di scenario per la scarsa capacità di portata dell'alveo inciso considerato. Sono state eseguite comunque numerose simulazioni di lavoro per testare le prestazioni del modello e verificare l'assenza di instabilità numeriche.

3.3 Costruzione della griglia di calcolo del modello numerico 2D

Per la messa a punto del modello MIKE Flood, dopo aver realizzato il modello monodimensionale dell'alveo inciso del Chiusella e i due rami minori con il codice MIKE 11 HD, si è proceduto alla costruzione del modello bidimensionale delle aree golenali allagabili utilizzando il codice di calcolo MIKE 21 HD descritto nell'allegato 2.

Successivamente, utilizzando il codice MIKE Flood, si è proceduto all'accoppiamento dei due modelli (monodimensionale e bidimensionale) mediante collegamenti laterali distribuiti lungo le sponde incise del torrente Chiusella e collegamenti "standard" per il ramo dell'incile di Fiorano, il ramo del tombino autostradale e i due rami golenali, sinistro e destro, del Chiusella a valle del rilevato ferroviario.

In un modello bidimensionale alle differenze finite, come MIKE 21, la descrizione geometrica del terreno è eseguita definendo la quota media del terreno in ogni cella di calcolo. Tale valore è usualmente calcolato, a partire dai dati rilevati, mediante tecniche di interpolazione.

Nello studio pregresso relativo al progetto preliminare la topografia del terreno o batimetria di calcolo del modello (griglia 2D) nelle condizioni attuali è stata ottenuta inizialmente con una procedura automatica di estrazione dei punti del modello digitale del terreno dell'Autorità di Bacino del Fiume Po a maglia 5x5 m.

Fondamentale è stata la definizione della dimensione del passo della griglia rettangolare da utilizzare per la messa a punto del modello, che influenza direttamente i tempi di calcolo e l'accuratezza spaziale della soluzione. All'aumentare del passo della griglia diminuiscono i tempi di calcolo, ma diminuisce l'accuratezza spaziale. La scelta deve quindi essere un compromesso tra le due esigenze. Nel caso in esame la scelta è stata dettata prevalentemente dall'esigenza di rappresentare bene la geometria delle aree esondabili e non quella dell'alveo inciso, già rappresentata con il modello 1D. Si è deciso pertanto di adottare una griglia di calcolo a maglia 10x10 m.

La batimetria messa a punto ai fini delle verifiche idrauliche relative al progetto preliminare è stata, nel corso del presente studio, opportunamente aggiornata ed estesa a monte dell'area di confluenza Ribes-Chiusella utilizzando il rilievo LIDAR 2008, modello digitale del terreno (DTM) fornito dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (M.A.T.T.M.) nell'ambito del Piano Ordinario di Telerilevamento Ambientale (POT-A).

Il DTM originale di rilievo del nodo di Ivrea fornito dalla Regione Piemonte Settore Pianificazione Difesa del Suolo – Dighe è consistito in 88 "tavole" (file ascii-raster) in coordinate geografiche contenenti ognuna 1000x1000 celle di lato 0,00001 gradi. Successivamente si è operata una "tassellatura" e una conversione di sistema di riferimento, adottando un sistema di coordinate Gauss Boaga per congruenza con tutte le informazioni ed elaborazioni cartografiche disponibili negli studi pregressi a partire da quelli dell'Autorità di Bacino del Fiume Po.

Nella Figura 8 è rappresentato l'intero DTM del nodo di Ivrea reso disponibile, utilizzato successivamente per predisporre le batimetrie del modello bidimensionale a maglia 10x10 m.

Definito il contorno dell'area di applicazione del modello bidimensionale, si è costruita una batimetria con griglia a passo spaziale 10 m coincidente con quella utilizzata nello studio pregresso, calcolando su ogni cella il valore medio di tutte le celle del DTM originale ricadenti nella stessa. Confrontando le quote della batimetria ottenuta con quelle corrispondenti della batimetria del modello pregresso sono emerse differenze mediamente contenute, eccetto che in casi particolari attribuibili al metodo di calcolo adottato (valore medio sulla cella da 10 m di lato) o a geometrie imposte nella batimetria del modello pregresso (elementi sovramontanti quali edifici, rilevati, manufatti in progetto ecc.).

Alla luce dei confronti effettuati, si è deciso di sostituire la batimetria del modello pregresso, estendendola sulle aree golenali del Chiusella precedentemente non coperte da rilievo in quanto meglio rappresentato dal recente rilievo LIDAR.

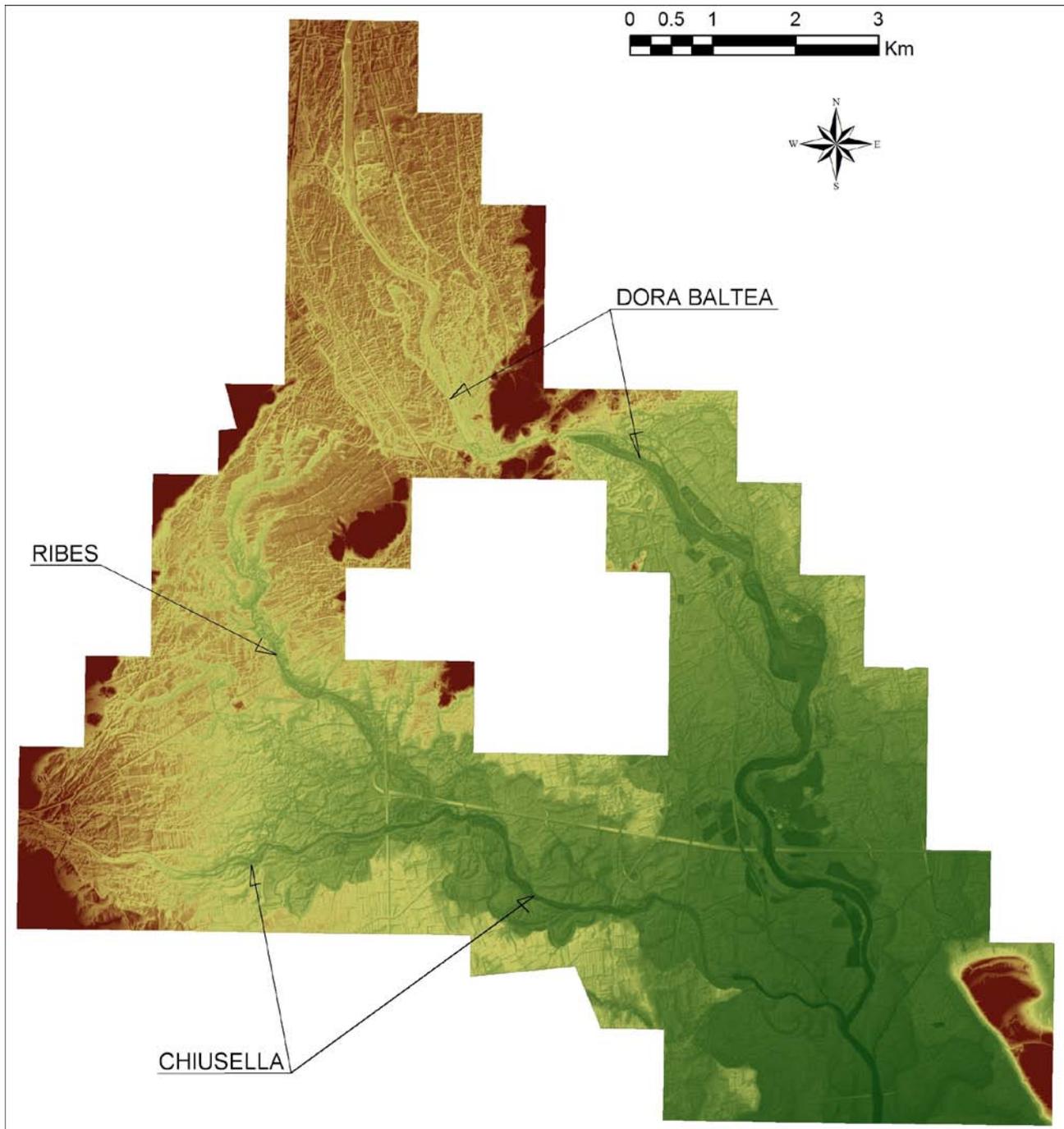


Figura 8 - Rilievo DTM LIDAR 2008 del nodo di Ivrea.

Nella Figura 9 è riportata la batimetria (o geometria di input) complessiva del modello relativa alla situazione attuale. In grigio sono evidenziate le zone escluse dal calcolo (celle inattive) perché considerate sicuramente non allagabili (aree con quota maggiore di 260 m s.m.). In verde scuro sono evidenziate le aree più depresse

(aree golenali) mentre in giallo e marrone chiaro sono distinguibili le aree in maggior rilievo. Nella figura, sovrapposte alla rappresentazione della batimetria, sono riportate le linee vettoriali del rilievo fotogrammetrico dell'AdBPo e i limiti della fascia B.

Occorre infine osservare come l'intero alveo inciso del torrente Chiusella sia stato escluso dalla simulazione con il modello bidimensionale MIKE 21 perché il suo contributo al deflusso delle piene è già simulato con il modello monodimensionale MIKE 11 nell'ambito del codice MIKE Flood che è in grado, come già detto, di "accoppiare" in contemporanea il funzionamento di entrambi i singoli modelli.

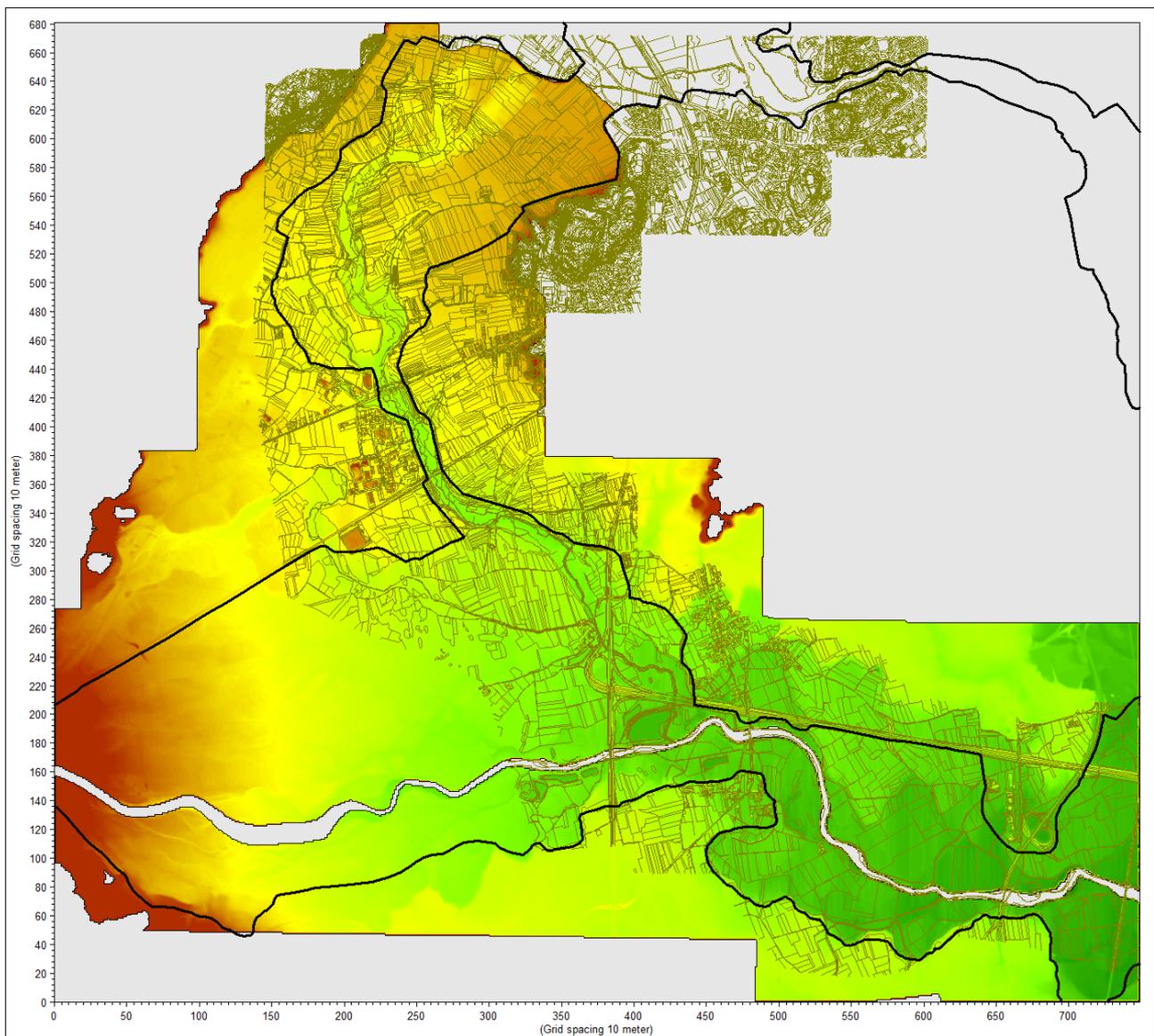


Figura 9 - Batimetria del modello 2D a maglia 10x10 m (situazione attuale).

3.4 Parametri del modello 2D

Il modello di simulazione oltre alla descrizione geometrica e alle condizioni al contorno, descritte nel paragrafo successivo, ha bisogno di un'altra serie di parametri che sono: passo di tempo di integrazione del sistema, coefficienti di scabrezza e coefficiente di viscosità turbolenta ("eddy viscosity").

Come passo di tempo di integrazione è stato utilizzato un valore pari a 2 secondi, che, in relazione alla dimensione delle celle di calcolo, può supportare numeri di Courant adeguati anche per velocità di deflusso dell'ordine di 5-6 m/s.

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 al coefficiente di eddy viscosity è stato assegnato un valore costante pari a $1 \text{ m}^2/\text{s}$ sull'intera estensione del modello.

La scabrezza rappresenta, all'interno delle equazioni del moto, il parametro che regola le perdite di energia distribuite, in primo luogo quelle per attrito sul fondo di scorrimento e sulle sponde dell'alveo attivo. Tale parametro è difficilmente valutabile con precisione ed è abitualmente utilizzato per tarare il modello.

Nel caso in esame sono stati adottati i coefficienti di scabrezza di Strickler rappresentati nella Figura 10.

Per tener conto della distribuzione delle velocità in prossimità dei laghi esistenti, la geometria di tali forme è stata rappresentata, in alternativa alle caratteristiche di profondità effettive, inserendo una superficie di limitata profondità e di scabrezza molto ridotta, propria di una superficie liquida che non partecipa al moto.

Questa schematizzazione ipotizza che il deflusso di piena in ingresso al lago non sia in grado di mettere in movimento l'acqua contenuta per l'intera profondità del lago stesso. Tale assunzione tiene conto del fatto che il modello 2D elabora per ogni cella di calcolo un valore di velocità mediato sull'altezza della colonna d'acqua, supposta interamente contribuente al moto, e di conseguenza inferiore al valore reale. Per sopperire a tale sottostima alla scabrezza associata a tali aree è stato assegnato un valore del coefficiente di Strickler di $50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, corrispondente ad una superficie molto liscia. Tale ipotesi consente di valutare il campo di moto nell'intorno dei laghi sicuramente secondo criteri di sicurezza.

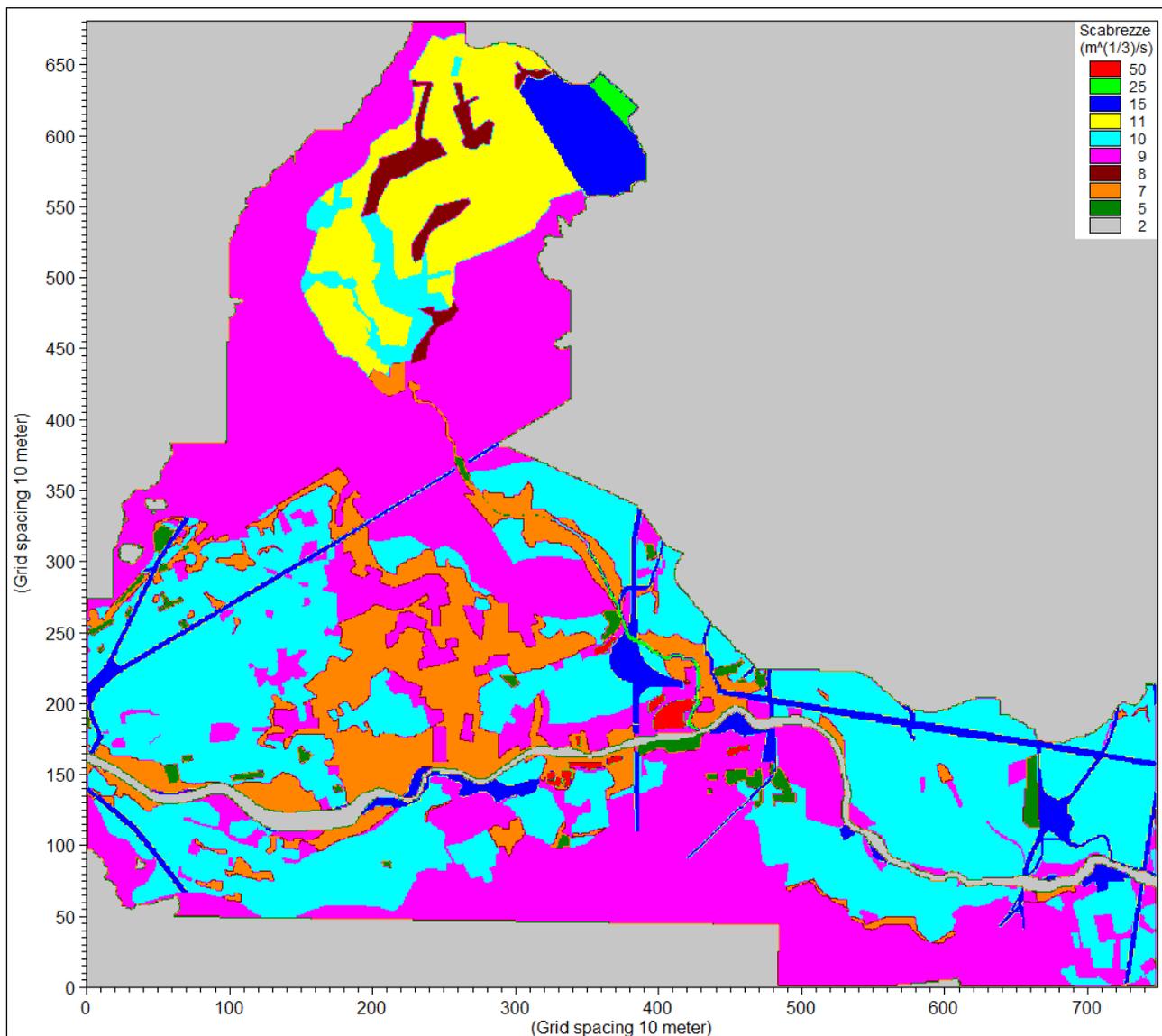


Figura 10 - Distribuzione areale dei coefficienti di scabrezza di Strickler nella situazione attuale.

3.5 Condizioni al contorno del modello 2D

Al modello sono state assegnate le seguenti condizioni al contorno, imposte tutte al modello monodimensionale MIKE 11:

- condizione al contorno di monte sul torrente Chiusella: idrogramma di portata in ingresso in funzione dello scenario considerato;
- condizione al contorno di monte sulla Dora Baltea (alveo inciso e ramo golenale sinistro): idrogrammi di portata dell'evento duecentennale tratti dal modello pregresso dell'AdBPo;
- condizione al contorno di valle sulla Dora Baltea: idrogramma di livello dell'evento duecentennale tratto anch'esso dal modello pregresso dell'AdBPo;
- condizione di monte in ingresso all'incile di Fiorano: idrogramma di portata inserito mediante il corrispondente ramo di MIKE 11 in funzione dello scenario considerato;

- condizioni al contorno “interne” di collegamento tra i due modelli MIKE 11 e MIKE 21: in corrispondenza di tutte le celle lungo le sponde destra e sinistra del Chiusella vengono applicate equazioni tipo “stramazzo a larga soglia” con quote di sfioro pari ai valori maggiori tra quelli delle celle del modello 2D e quelli corrispondenti delle quote di sponda delle sezioni d’alveo di MIKE 11, opportunamente interpolate.

Le condizioni al contorno risultano applicate in punti sufficientemente lontani dall’area di interesse e con i dovuti accorgimenti da poter considerare del tutto trascurabili eventuali errori commessi nella introduzione delle condizioni al contorno stesse.

3.6 Descrizione delle simulazioni e delle analisi idrauliche condotte con il modello 2D

Con il modello MIKE Flood sono state condotte le simulazioni dei seguenti scenari:

- 1) SIM1: **scenario attuale** in cui si è ipotizzato che i due ponti sul Ribes a monte dello svincolo di Pavone fossero già stati adeguati come da progetti della Provincia di Torino e che il viadotto Marchetti fosse già realizzato come da relativo progetto; i valori di portata considerati sono gli stessi assunti nello Studio di Fattibilità dell’Autorità di Bacino del fiume Po (da cui derivano le fasce fluviali) con la sola variazione dovuta all’incremento della portata transitante nel rio Ribes all’incile, che passa da 1.145 a 1.265 m³/s (valore desunto dal Modello Fisico e successivamente definito come valore di riferimento dalla stessa Autorità di Bacino).
- 2) SIM2: **scenario di progetto** in cui si è prevista la realizzazione delle opere di adeguamento autostradale e il completamento di tutte le arginature previste a valle come da progetto AIPO;
- 3) SIM3: **scenario di progetto** come SIM2 ma con diverse combinazioni di portata Ribes-Chiusella..

Negli scenari di progetto, come meglio descritto nel seguito, in corrispondenza dell’area industriale a monte dell’attraversamento della S.P. 565, interessata nella configurazione attuale da potenziali fenomeni di esondazione nel corso della piena di riferimento con portata al colmo 1265 m³/s, sono state introdotte difese arginali a protezione dell’area in corrispondenza dei limiti di fascia B al fine di valutare le eventuali variazioni di assetto idraulico a valle.

Le condizioni al contorno che contraddistinguono i vari scenari sono le seguenti:

- **SIM1** (scenario attuale): idrogramma di portata in ingresso a Fiorano con colmo pari a 1265 m³/s e idrogramma di portata in ingresso al Chiusella con colmo pari a 338 m³/s;
- **SIM2** (scenario di progetto): stessi idrogrammi dello scenario SIM1;
- **SIM3.1** (scenario di progetto): idrogramma di portata residuo in ingresso a Fiorano con colmo pari a circa 751 m³/s e idrogramma di portata duecentennale in ingresso al Chiusella con colmo pari a 900 m³/s (vedi Figura 4);
- **SIM3.2** (scenario di progetto complessivo): idrogramma di portata in ingresso a Fiorano con colmo pari a 1265 m³/s e idrogramma di portata duecentennale in ingresso al Chiusella con colmo pari a 900 m³/s (vedi ancora Figura 4).

La simulazione SIM 3.1, con una diversa combinazione di portata rispetto a quanto considerato dall’AdBPo per la definizione delle fasce fluviali, verifica il mantenimento del colmo di portata (pari a 1.438 m³/s) nel Chiusella prima della confluenza in Dora Baltea; il suo scopo è quello di verificare l’esistenza del franco idraulico di almeno 1.0 m del nuovo ponte Chiusella per la piena duecentennale del Chiusella.

La simulazione SIM 3.2 prevede una ipotetica concomitanza tra piena duecentennale della Dora Baltea e piena duecentennale del Chiusella (somma delle portate al colmo); il suo scopo è quello di verificare il comportamento del nuovo ponte Chiusella e l'eventuale esistenza di un franco residuo rispetto ad un evento catastrofico.

I risultati delle simulazioni ottenuti con il modello bidimensionale sono illustrati nei capitoli successivi mediante l'ausilio di elaborati grafici esplicativi:

- aree di esondazione con rappresentazione delle altezze d'acqua e dei vettori velocità;
- profili longitudinali di corrente lungo l'alveo inciso del torrente Chiusella.

3.7 Scenario attuale - simulazione SIM1

Nella Figura 11, sull'intera estensione del modello di valle, è riportata la distribuzione calcolata con il modello bidimensionale MIKE 21 nella situazione attuale delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna verificatesi nel corso del transito del colmo dell'evento di piena di progetto: le tonalità di azzurro più scure evidenziano le aree di esondazione con tiranti idrici maggiori. Le aree interne all'alveo inciso del torrente Chiusella non sono rappresentate perché, come sopra detto, il loro contributo al deflusso è stato già preso in conto nell'ambito del modello MIKE 11.

Nella Figura 12 la stessa rappresentazione è stata ingrandita in corrispondenza dello svincolo di Pavone e nel nodo di confluenza Ribes-Chiusella ed inoltre è stato sovrapposto il campo dei vettori velocità di deflusso.

Nella Figura 13 è riportata la distribuzione areale delle massime velocità di deflusso raggiunte nel corso dell'evento di piena di progetto a prescindere dall'istante in cui si sono verificate.

Nella Figura 14 è infine rappresentata, alla stessa scala, la distribuzione delle massime quote di pelo libero raggiunte in corrispondenza al transito dei colmi di piena dell'evento di progetto.

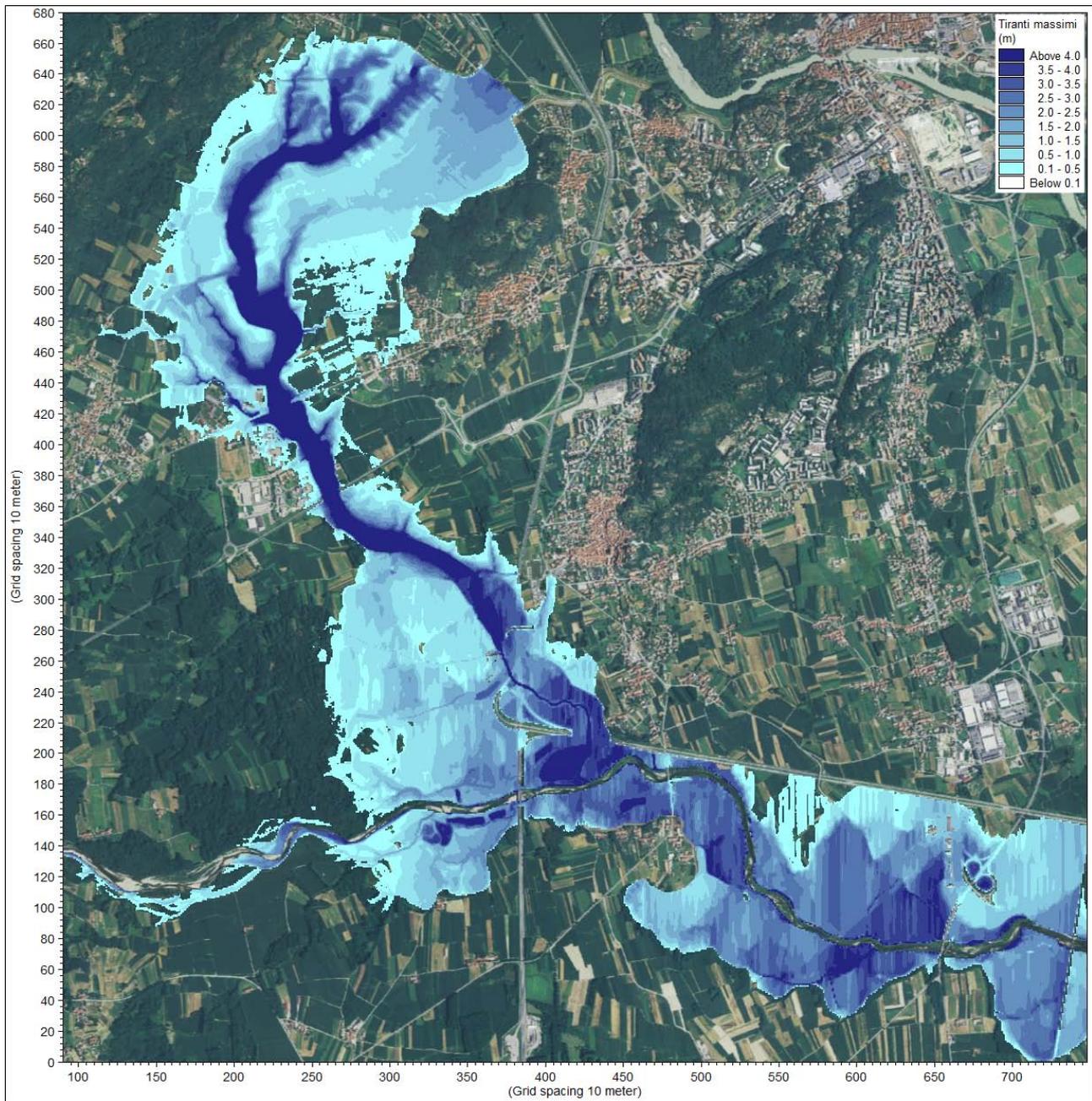


Figura 11 - Scenario attuale (SIM1). Involuppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna nel tratto di rio Ribes-torrente Chiusella a valle dell'incile di Fiorano.

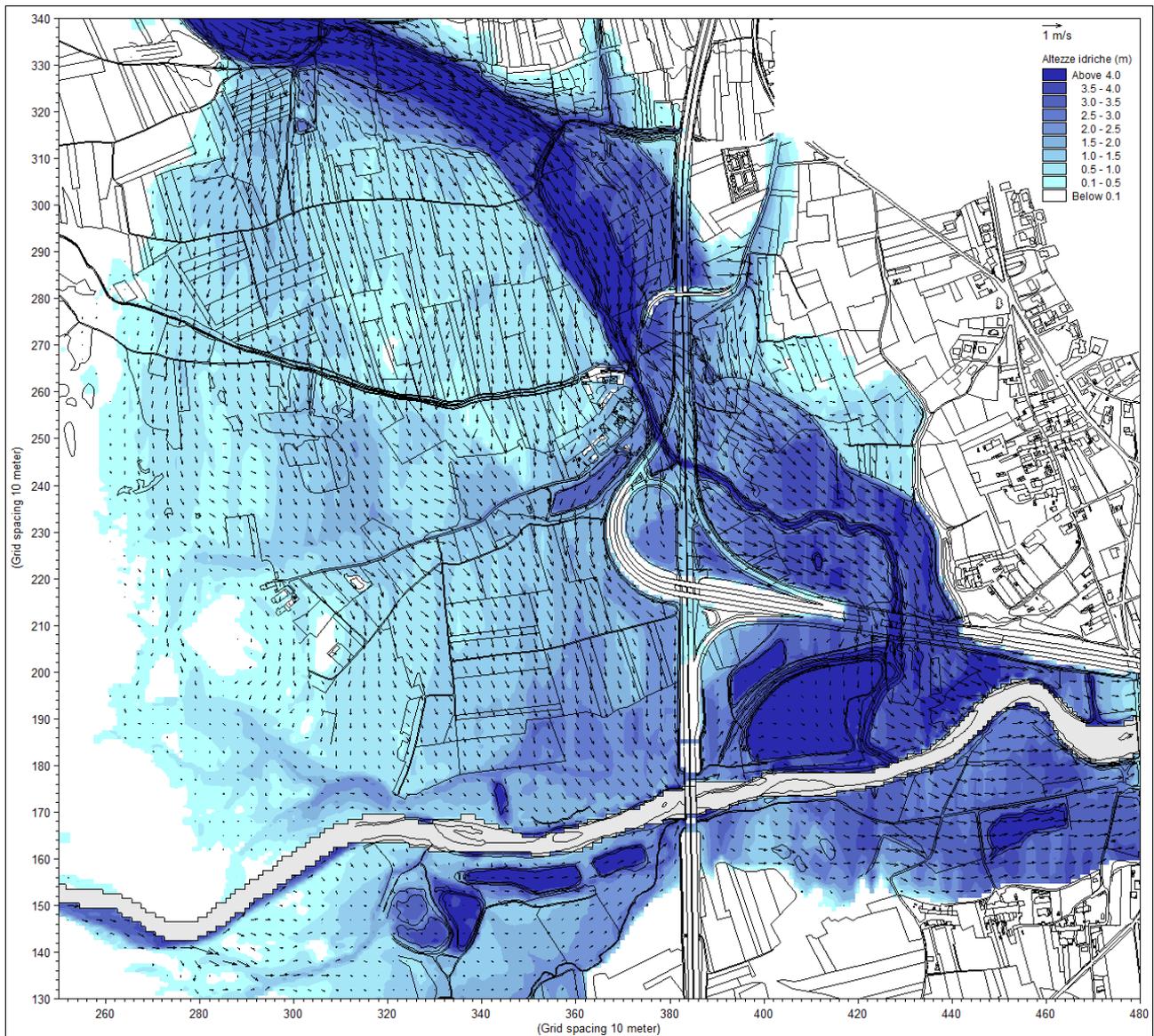


Figura 12 - Scenario attuale (SIM1). Ingrandimento nella zona di confluenza Ribes-Chiusella della distribuzione delle altezze d'acqua rispetto al piano campagna in corrispondenza del transito del colmo di piena e campo dei vettori velocità.

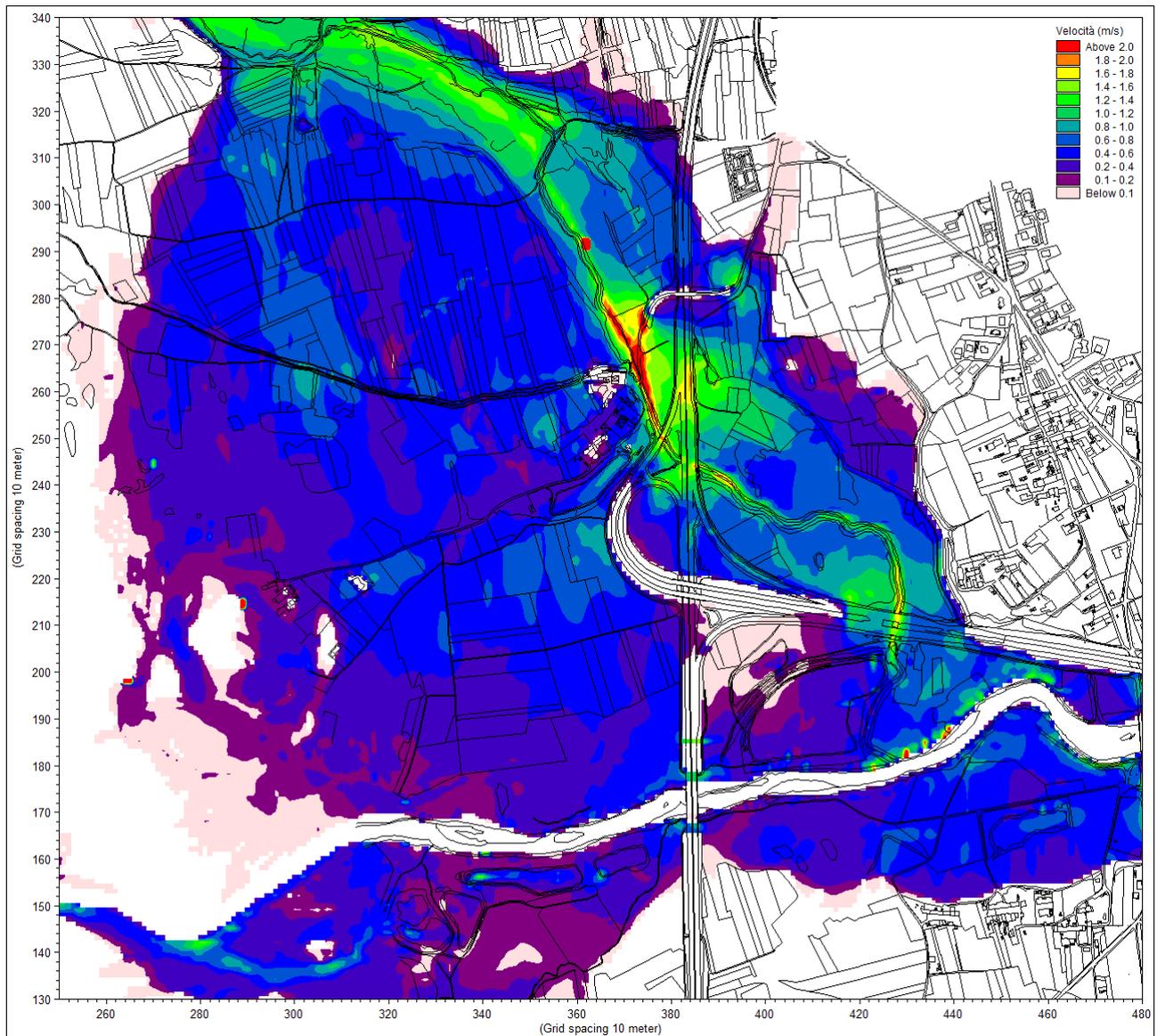


Figura 13 - Situazione attuale (SIM1). Ingrandimento nella zona di confluenza Ribes-Chiusella della distribuzione delle velocità massime di deflusso.

- v = velocità media della corrente (m/s);
- Fr = numero di Froude della corrente (-);
- H = carico idraulico totale (m s.m.).

ID Sez.	Progr. (m)	Fondo (m s.m.)	Q (m³/s)	P.L. (m s.m.)	h (m)	A (m²)	b (m)	v (m/s)	Fr (-)	H (m s.m.)
s23	0,00	250,26	337,68	252,60	2,34	108,84	57,47	3,10	0,72	253,09
s22	493,89	245,53	337,64	247,42	1,89	115,90	69,54	2,91	0,72	247,86
s21	1134,38	238,34	324,79	240,65	2,31	132,63	81,06	2,45	0,61	240,96
s20	0,00	235,16	329,71	238,08	2,92	153,12	136,56	2,15	0,65	238,32
s19	538,00	232,76	330,04	235,10	2,34	219,38	150,96	1,50	0,40	235,22
s18	947,00	230,34	258,41	233,13	2,79	82,56	38,51	3,13	0,68	233,63
s17	1625,00	226,25	268,70	231,04	4,79	154,25	46,96	1,74	0,31	231,19
s16	2105,00	225,89	267,99	230,64	4,75	191,38	60,11	1,40	0,25	230,74
97	2143,78	225,50	269,95	230,64	5,14	237,06	72,66	1,14	0,20	230,70
98	2236,68	224,74	270,92	230,61	5,87	270,70	66,01	1,00	0,16	230,66
99-15	2335,97	224,13	275,03	230,60	6,47	327,73	94,76	0,84	0,14	230,64
100	2450,58	224,08	274,66	230,58	6,49	238,74	48,57	1,15	0,17	230,64
101	2581,43	224,00	275,01	230,54	6,54	291,38	61,63	0,94	0,14	230,58
102	2701,61	223,96	331,13	230,42	6,46	267,18	53,67	1,24	0,18	230,50
103-14	2812,04	223,94	503,70	230,31	6,37	391,14	75,70	1,29	0,18	230,39
104	2875,26	223,94	569,83	230,30	6,36	424,13	79,41	1,34	0,19	230,39
105	2948,09	223,48	543,81	230,15	6,67	256,85	49,03	2,12	0,30	230,38
106	3064,10	223,20	495,11	230,15	6,95	353,24	63,27	1,40	0,19	230,25
107-13	3157,63	222,99	474,03	230,13	7,14	317,09	54,63	1,49	0,20	230,24
108	3262,52	222,76	482,27	230,02	7,26	272,58	45,44	1,77	0,23	230,18
109	3352,45	222,40	530,12	229,94	7,54	312,98	54,57	1,69	0,23	230,09
110	3449,30	222,23	561,25	229,89	7,66	382,48	60,70	1,47	0,19	230,00
111	3539,10	221,99	623,99	229,80	7,81	387,68	58,67	1,61	0,20	229,93
112-12	3596,12	221,84	699,50	229,76	7,92	424,30	64,89	1,65	0,21	229,90
113	3689,93	221,50	834,10	229,52	8,02	386,00	56,10	2,16	0,26	229,75
114	3773,50	221,09	948,89	229,49	8,40	538,04	84,28	1,76	0,22	229,65
115-11	3880,76	220,92	1100,10	229,34	8,42	581,13	91,45	1,89	0,24	229,52
ponte_M	3900,00	220,93	1137,58	229,30	8,37	589,58	89,48	1,93	0,24	229,49
ponte_V	3910,00	220,93	1146,31	229,23	8,30	583,17	89,48	1,97	0,25	229,43
116	3926,17	220,92	1140,18	229,22	8,30	574,09	87,67	1,99	0,25	229,42
117	4008,45	220,97	1086,99	229,06	8,09	453,43	78,09	2,40	0,32	229,36
118	4115,59	220,90	966,29	229,05	8,15	471,39	77,73	2,05	0,27	229,27
119-10	4212,88	220,92	829,52	228,92	8,00	338,14	55,42	2,45	0,32	229,22
120	4330,17	221,12	761,94	228,83	7,70	309,52	50,58	2,46	0,32	229,13
121	4436,55	220,96	746,34	228,73	7,77	330,29	60,49	2,26	0,31	228,99
122	4551,05	221,05	742,68	228,50	7,45	294,96	54,91	2,52	0,35	228,83
123-9	4650,87	221,24	690,60	228,40	7,16	277,57	45,50	2,49	0,32	228,71
124	4734,58	221,40	718,31	228,35	6,95	342,64	60,60	2,10	0,28	228,58
125	4828,18	221,41	719,45	228,32	6,91	386,54	67,99	1,86	0,25	228,49
126	4919,16	221,33	652,24	228,29	6,96	339,02	57,92	1,92	0,25	228,48
127	5012,28	221,29	660,15	228,17	6,88	340,00	59,59	1,94	0,26	228,36
128	5112,00	221,44	677,36	227,96	6,52	280,78	49,49	2,41	0,32	228,26
129-8	5233,04	221,53	757,04	228,01	6,48	610,87	104,57	1,24	0,16	228,08
130	5314,09	220,95	706,77	227,93	6,98	464,41	75,23	1,52	0,20	228,05
131	5408,69	220,45	664,34	227,81	7,36	328,82	61,00	2,02	0,28	228,02
132	5518,16	220,14	593,73	227,77	7,63	309,53	54,31	1,92	0,26	227,96

ID Sez.	Progr. (m)	Fondo (m s.m.)	Q (m ³ /s)	P.L. (m s.m.)	h (m)	A (m ²)	b (m)	v (m/s)	Fr (-)	H (m s.m.)
133-7	5595,12	219,57	544,19	227,72	8,15	282,51	45,17	1,93	0,25	227,91
134	5670,29	219,80	489,51	227,80	8,00	365,22	60,78	1,34	0,17	227,89
135	5766,81	219,78	458,36	227,77	7,99	317,21	48,54	1,44	0,18	227,87
136	5862,75	219,82	479,19	227,77	7,95	373,80	55,26	1,28	0,16	227,85
137	5948,65	219,92	537,88	227,71	7,79	423,45	63,67	1,27	0,16	227,79
138	6035,51	219,78	550,60	227,63	7,85	348,05	56,04	1,58	0,20	227,75
139-6	6117,24	219,81	584,37	227,53	7,72	328,41	55,12	1,78	0,23	227,69
140	6192,08	219,77	678,54	227,45	7,67	370,51	66,00	1,83	0,25	227,62
141	6267,15	219,77	914,50	227,07	7,30	334,62	58,47	2,73	0,36	227,45
142-5	6345,22	219,76	1502,68	226,90	7,14	595,86	95,64	2,52	0,32	227,22
144-4	6383,90	219,67	1557,68	226,91	7,24	644,81	105,43	2,42	0,31	227,21
145	6396,77	219,67	1474,28	226,74	7,07	661,53	111,95	2,23	0,29	226,99
146	6492,63	219,77	1214,12	226,54	6,77	543,13	101,45	2,24	0,31	226,79
147	6647,82	219,84	1079,52	226,35	6,51	442,44	79,59	2,44	0,33	226,65
148-3	6811,72	219,95	985,98	226,23	6,28	479,13	95,29	2,06	0,29	226,45
149	6975,11	219,94	800,39	226,14	6,20	419,03	82,07	1,91	0,27	226,33
150-2	7080,77	219,93	711,13	225,89	5,96	269,82	59,98	2,64	0,40	226,24
151	7194,82	220,02	747,59	225,58	5,56	267,43	55,87	2,80	0,41	225,98
152-1	7304,23	220,06	1204,73	225,09	5,03	441,33	98,94	2,73	0,41	225,47
153	7340,96	220,06	1364,16	224,89	4,83	445,40	104,71	3,06	0,47	225,37
interp	7420,00	219,87	1179,89	224,56	4,69	327,23	79,93	3,61	0,57	225,22
154	7454,01	219,79	1157,56	224,20	4,41	264,03	69,26	4,38	0,72	225,18
155	7565,22	219,59	272,75	224,16	4,57	278,54	75,93	0,98	0,16	224,21

Tabella 2 - Risultati della simulazione SIM1 dell'evento di piena di progetto nella situazione attuale lungo l'alveo inciso del torrente Chiusella (valori massimi di inviluppo di piena).

L'ubicazione planimetrica delle sezioni di rilievo lungo il Chiusella è riportata sulle 2 planimetrie su foto aerea delle aree esondabili (stato attuale e di progetto) allegate.

Dall'esame della figura 11 relativa allo scenario attuale e della Planimetria su foto aerea delle aree esondabili (Elaborato 102), risultano le seguenti considerazioni:

- l'area interessata dalle esondazioni oltrepassa la fascia B in alcuni settori, principalmente in corrispondenza del territorio in comune di Samone (porzione di area urbanizzata in sinistra) e in comune di Colletterto Giacosa (area industriale in destra);
- i tiranti idrici massimi prevedibili su tali settori sono dell'ordine di qualche decina di centimetri (Figura 15).

La maggior estensione dell'area esondabile rispetto alla fascia B trova motivazione nell'incremento della portata di progetto defluente dall'incile di Fiorano che passa da 1.145 m³/s (dato utilizzato nello Studio di Fattibilità dell'Autorità di Bacino del fiume Po) a 1.265 m³/s (dato assunto successivamente dalla stessa AdBPo come valore di riferimento per tutte le progettazioni).

L'idrogramma di portata nella sezione terminale del Chiusella presenta un valore al colmo di 1.438 m³/s (Figura 27).

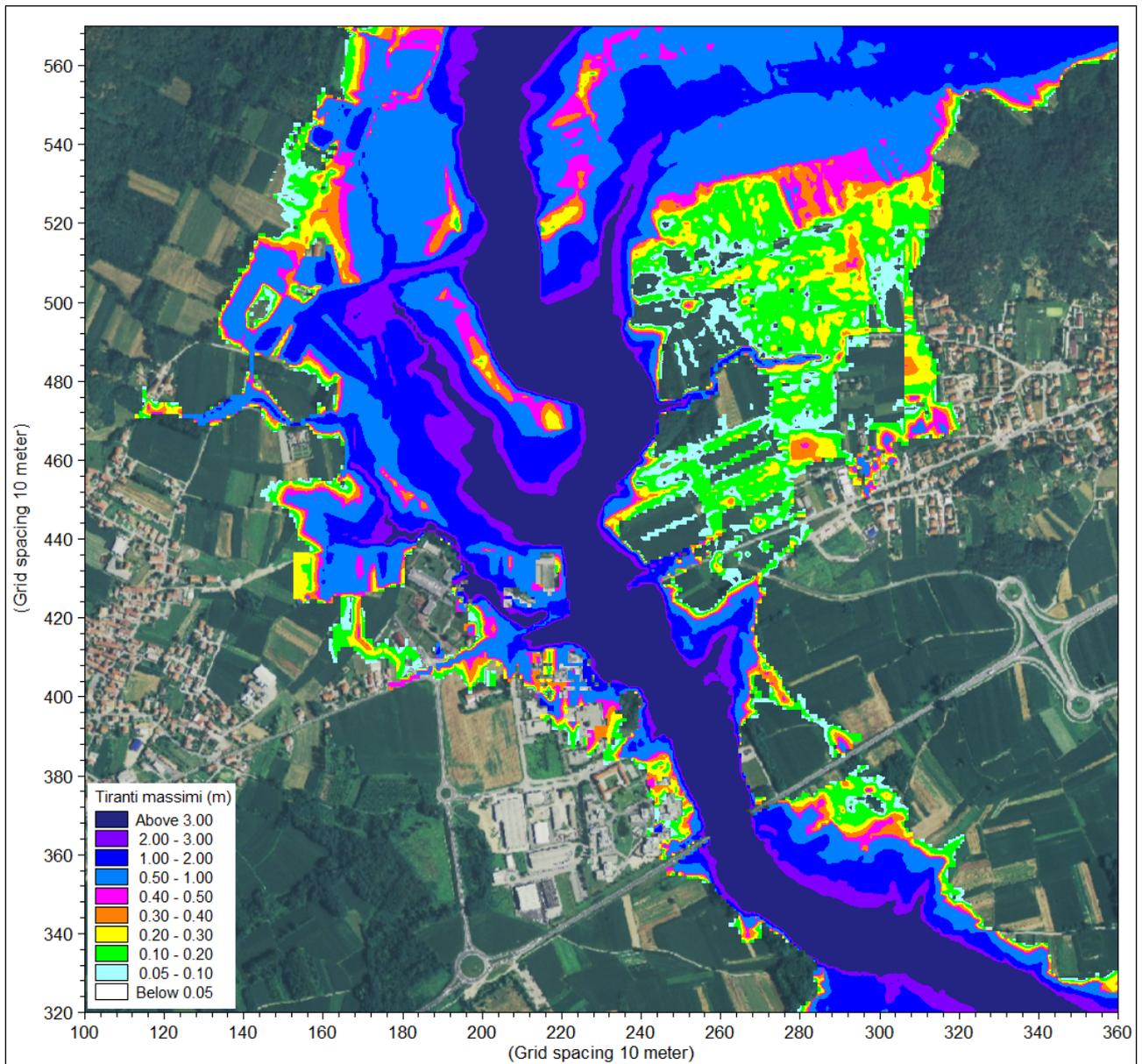


Figura 15 - Scenario attuale (SIM1). Ingrandimento nella zona del Ribes della distribuzione delle altezze d'acqua rispetto al piano campagna in corrispondenza del transito del colmo di piena.

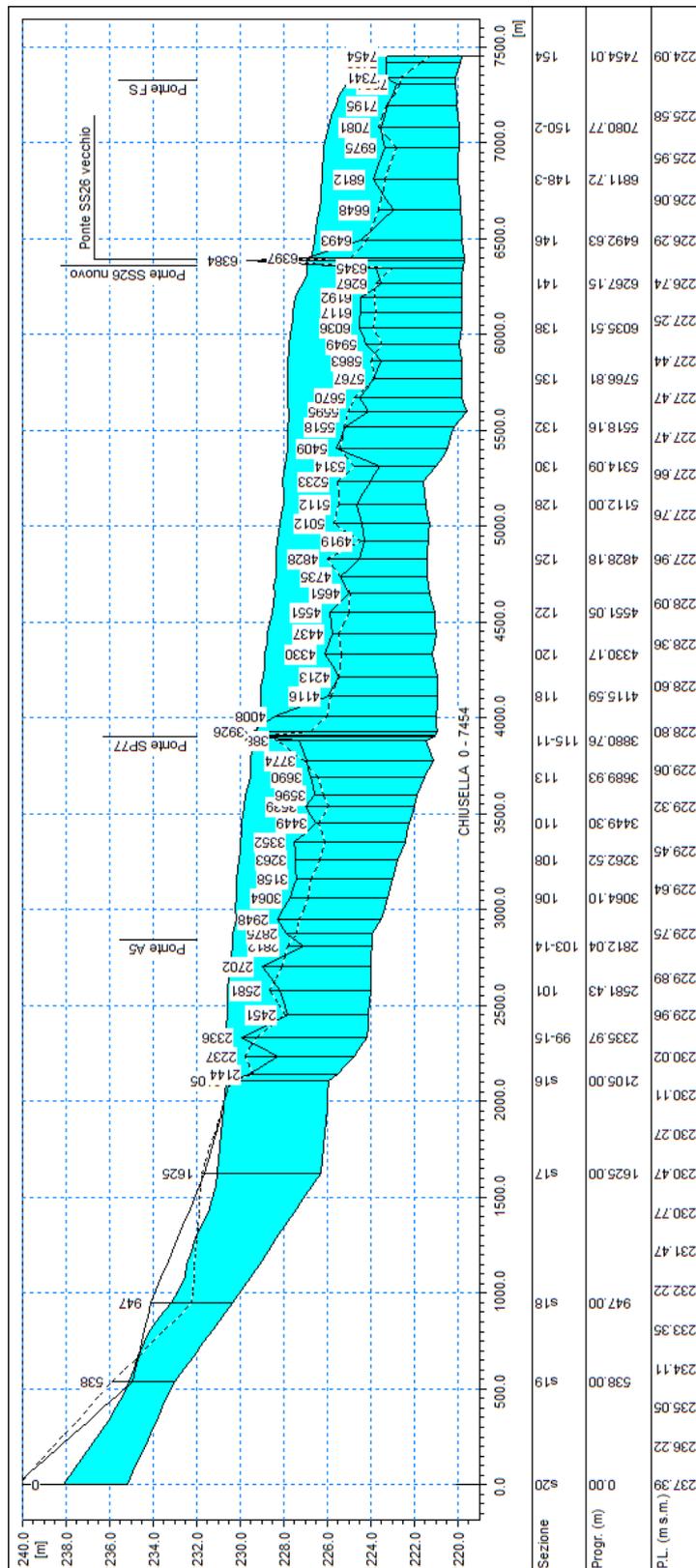


Figura 16 - Scenario attuale (SIM1). Profilo longitudinale delle massime quote di pelo libero all'interno dell'alveo inciso.

3.8 Scenario di progetto - simulazione SIM2

Come scenario di progetto si è considerata la situazione futura con gli interventi previsti di adeguamento dell'autostrada, con riferimento in particolare allo svincolo di Pavone (per quanto riguarda la A5 a monte di Ivrea si rimanda al par. 4), compresi gli interventi di arginatura pianificati e/o in fase di realizzazione a valle lungo il torrente Chiusella (progetto AIPO).

Per tenere conto degli interventi previsti sono state modificate le quote del modello digitale del terreno nell'ambito del modello 2D al fine di inserire le nuove rampe dello svincolo autostradale di Pavone, in accordo agli elaborati di progetto e di eliminare le rampe esistenti che saranno dismesse. Oltre al viadotto Marchetti, già presente nella batimetria dello scenario attuale, è stato introdotto nel modello anche il viadotto Cartiera e si è rimodellata l'area golenale del rio Ribes eliminando gli ostacoli al deflusso attualmente presenti.

La simulazione numerica è stata successivamente condotta adottando le stesse condizioni al contorno e gli stessi parametri di input già impiegati nel caso degli scenari relativi alla situazione attuale.

Nella Figura 17 è riportato il dettaglio della batimetria del modello relativa alla situazione di progetto nella zona di interesse in cui sono stati introdotti gli interventi. In essa appaiono evidenti la posizione e luce libera al deflusso dei viadotti Marchetti e Cartiera e l'ubicazione dell'argine AIPO in progetto a protezione dell'area industriale di Romano Canavese.

Nella Figura 18, sull'intera estensione del modello di valle, è riportata la distribuzione delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna verificatesi nel corso del transito del colmo dell'evento di piena di progetto. Rispetto allo scenario attuale non si osservano esondazioni in corrispondenza dell'area industriale a monte dell'attraversamento della S.P. 565 in destra orografica e più a monte in corrispondenza degli abitati in sinistra orografica avendo introdotto nella batimetria di progetto difese arginali a protezione di tali aree in corrispondenza dei limiti di fascia B. Tali opere non inducono comunque variazioni di assetto idraulico a valle in quanto la riduzione conseguente dei volumi di esondazione è del tutto trascurabile.

Nella Figura 19, nella zona di maggiore interesse al presente progetto, è riportata la distribuzione calcolata con il modello per lo scenario di progetto delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna verificatesi nel corso del transito del colmo dell'evento di piena considerato; sovrapposto ad essa è riportato inoltre il campo dei vettori velocità di deflusso.

Nella Figura 20 è rappresentata la distribuzione areale delle massime velocità di deflusso raggiunte nel corso dell'evento di piena a prescindere dall'istante in cui si sono verificate.

Nella Figura 21 è infine rappresentata la distribuzione delle massime quote di pelo libero raggiunte nel corso dell'evento di piena considerato.

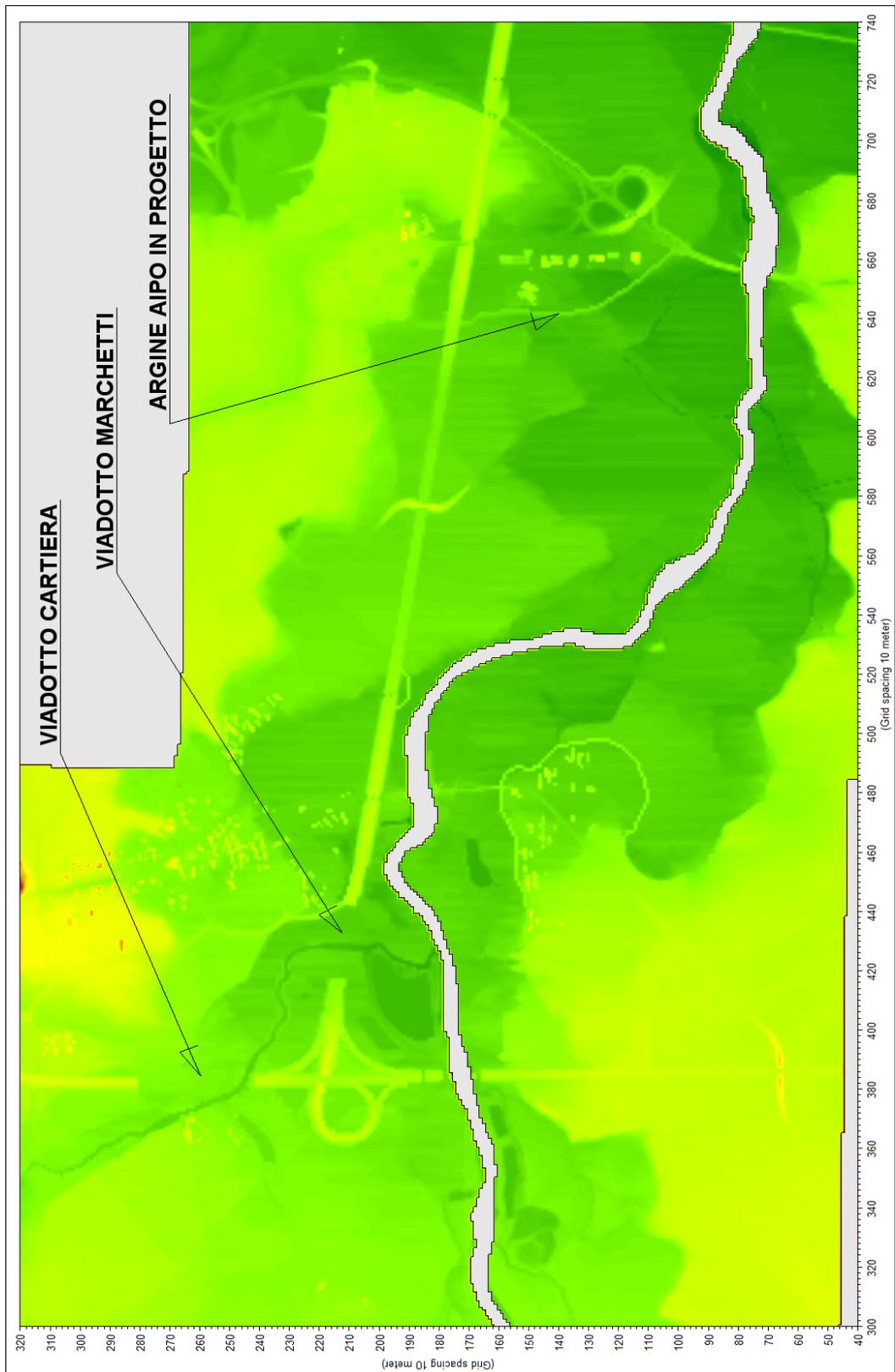


Figura 17 - Batimetria del modello 2D a maglia 10x10 m per la simulazione dello scenario SIM2.

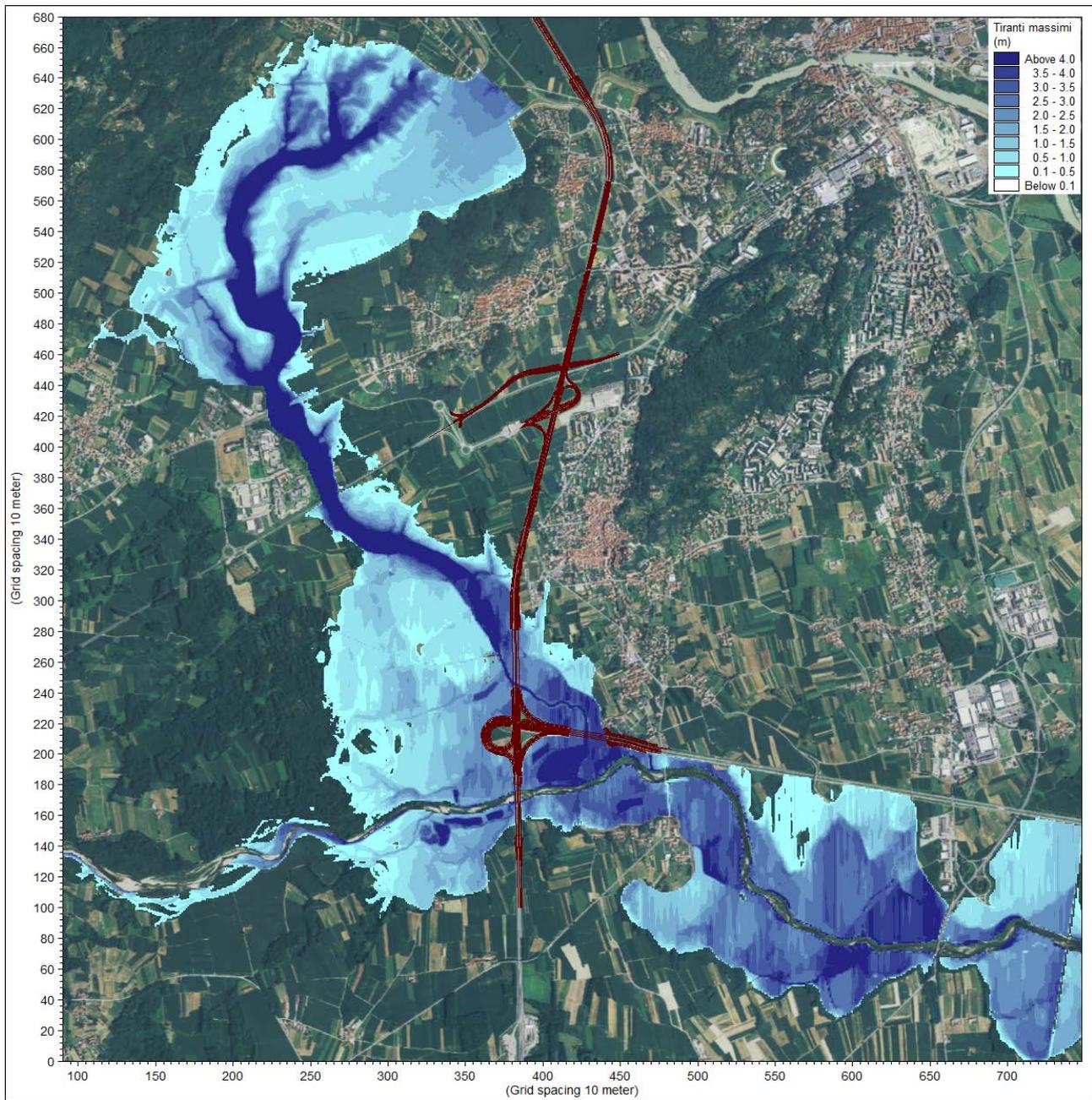


Figura 18 - Scenario di progetto (SIM2). Inviluppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna.

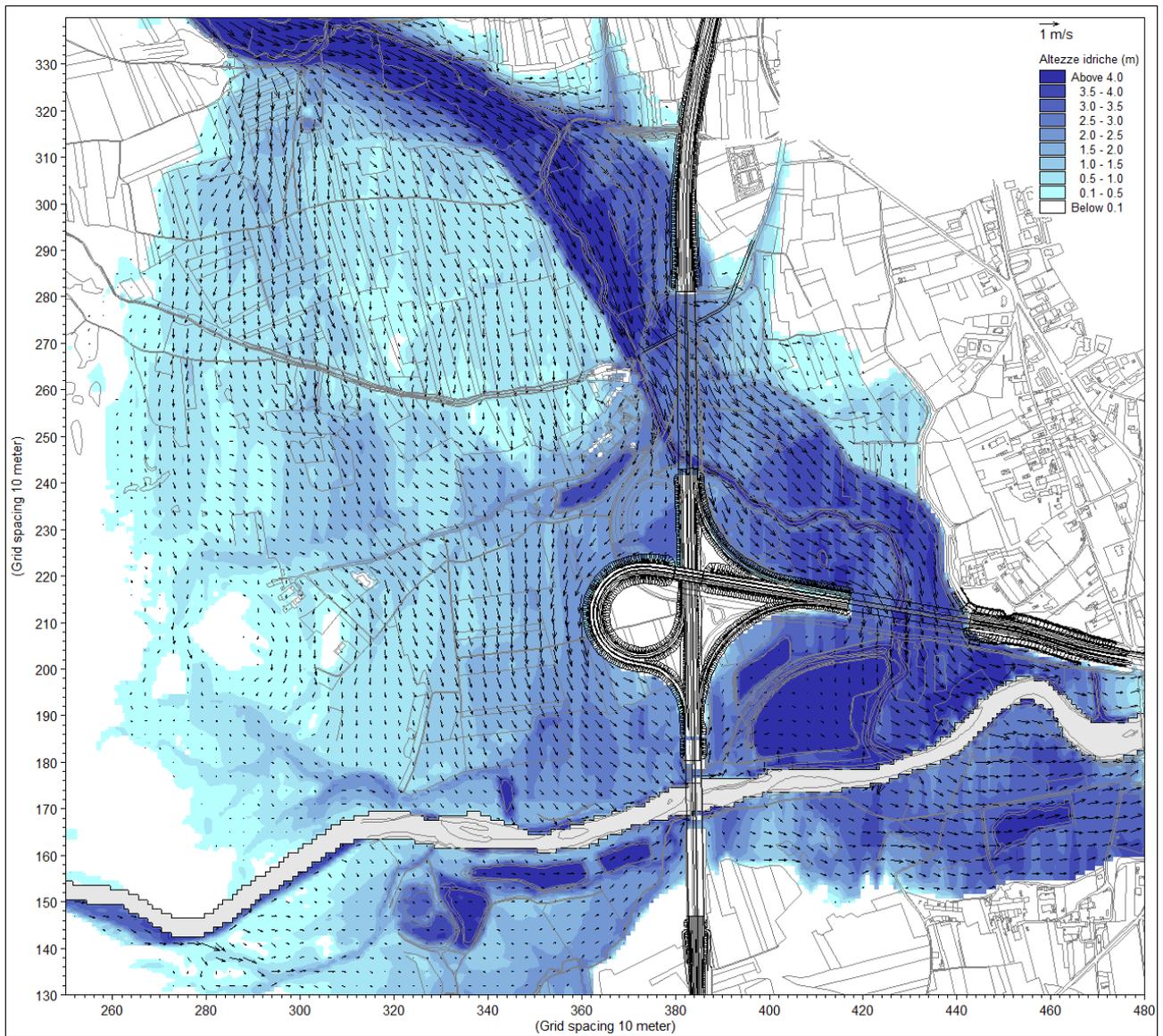


Figura 19 - Scenario di progetto (SIM2). Ingrandimento nella zona di interesse della distribuzione delle altezze d'acqua rispetto al piano campagna in corrispondenza del transito del colmo di piena e campo dei vettori velocità.

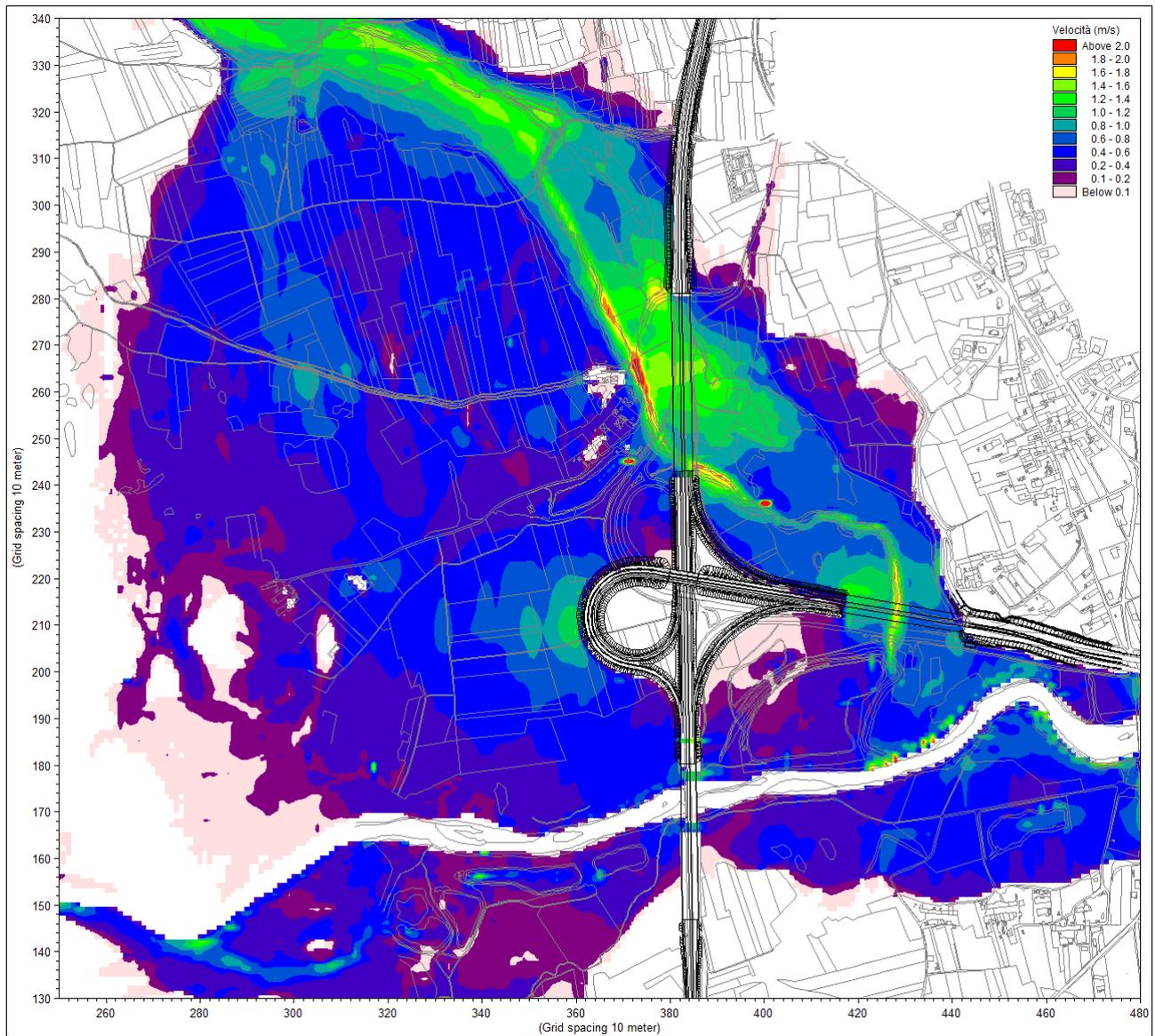


Figura 20 - Scenario di progetto (SIM2). Ingrandimento nella zona di interesse della distribuzione delle velocità massime di deflusso.

ID Sez.	Progr. (m)	Fondo (m s.m.)	Q (m³/s)	P.L. (m s.m.)	h (m)	A (m²)	b (m)	v (m/s)	Fr (-)	H (m s.m.)
s23	0,00	250,26	337,68	252,60	2,34	108,84	57,47	3,10	0,72	253,09
s22	493,89	245,53	337,64	247,42	1,89	115,90	69,54	2,91	0,72	247,86
s21	1134,38	238,34	324,79	240,65	2,31	132,63	81,06	2,45	0,61	240,96
s20	0,00	235,16	329,71	238,08	2,92	153,12	136,56	2,15	0,65	238,32
s19	538,00	232,76	330,03	235,10	2,34	219,38	150,96	1,50	0,40	235,22
s18	947,00	230,34	258,45	233,13	2,79	82,57	38,51	3,13	0,68	233,63
s17	1625,00	226,25	268,56	231,09	4,84	156,64	47,19	1,71	0,30	231,24
s16	2105,00	225,89	267,88	230,71	4,82	195,48	60,11	1,37	0,24	230,81
97	2143,78	225,50	269,63	230,71	5,21	241,96	72,66	1,11	0,19	230,77
98	2236,68	224,74	270,22	230,68	5,94	274,95	66,01	0,98	0,15	230,73
99-15	2335,97	224,13	275,01	230,67	6,54	333,81	94,76	0,82	0,14	230,70
100	2450,58	224,08	274,69	230,63	6,55	241,55	48,57	1,14	0,16	230,70
101	2581,43	224,00	275,83	230,59	6,59	294,82	61,63	0,94	0,14	230,64
102	2701,61	223,96	347,21	230,48	6,51	269,52	53,67	1,29	0,18	230,56
103-14	2812,04	223,94	524,66	230,33	6,39	393,28	75,70	1,33	0,19	230,42
104	2875,26	223,94	594,20	230,32	6,38	426,34	79,41	1,39	0,19	230,42
105	2948,09	223,48	555,20	230,15	6,67	257,38	49,03	2,16	0,30	230,39
106	3064,10	223,20	515,18	230,21	7,01	354,64	63,27	1,45	0,20	230,31
107-13	3157,63	222,99	488,85	230,15	7,16	318,42	54,63	1,54	0,20	230,27
108	3262,52	222,76	502,38	230,03	7,27	273,11	45,44	1,84	0,24	230,20
109	3352,45	222,40	547,23	229,93	7,53	313,49	54,57	1,75	0,23	230,09
110	3449,30	222,23	573,99	229,89	7,66	383,43	60,70	1,50	0,19	230,01
111	3539,10	221,99	623,49	229,84	7,85	389,46	58,67	1,60	0,20	229,97
112-12	3596,12	221,84	702,83	229,77	7,92	425,95	64,89	1,65	0,21	229,90
113	3689,93	221,50	824,99	229,56	8,06	388,33	56,10	2,12	0,26	229,79
114	3773,50	221,09	951,41	229,50	8,41	540,91	84,28	1,76	0,22	229,66
115-11	3880,76	220,92	1101,67	229,37	8,45	584,24	91,45	1,89	0,24	229,55
ponte_M	3900,00	220,93	1135,29	229,35	8,42	593,11	89,48	1,91	0,24	229,54
ponte_V	3910,00	220,93	1141,91	229,28	8,35	586,94	89,48	1,95	0,24	229,47
116	3926,17	220,92	1135,33	229,25	8,33	577,68	87,78	1,97	0,24	229,45
117	4008,45	220,97	1090,25	229,09	8,12	456,45	78,09	2,39	0,32	229,38
118	4115,59	220,90	956,40	229,12	8,22	475,78	77,73	2,01	0,26	229,32
119-10	4212,88	220,92	820,61	228,99	8,07	341,46	55,42	2,40	0,31	229,28
120	4330,17	221,12	761,86	228,90	7,78	312,52	50,58	2,44	0,31	229,20
121	4436,55	220,96	740,29	228,82	7,86	335,14	60,49	2,21	0,30	229,07
122	4551,05	221,05	750,52	228,58	7,53	299,27	54,91	2,51	0,34	228,90
123-9	4650,87	221,24	691,93	228,52	7,28	282,58	45,50	2,45	0,31	228,82
124	4734,58	221,40	716,77	228,45	7,05	348,44	60,60	2,06	0,27	228,67
125	4828,18	221,41	724,39	228,42	7,01	393,04	67,99	1,84	0,24	228,59
126	4919,16	221,33	655,85	228,38	7,05	345,55	57,92	1,90	0,25	228,57
127	5012,28	221,29	644,26	228,31	7,02	348,38	59,59	1,85	0,24	228,49
128	5112,00	221,44	657,56	228,13	6,69	289,12	49,49	2,27	0,30	228,39
129-8	5233,04	221,53	725,37	228,19	6,66	629,57	104,57	1,15	0,15	228,25
130	5314,09	220,95	670,00	228,12	7,17	479,09	75,23	1,40	0,18	228,22
131	5408,69	220,45	643,15	228,03	7,58	341,32	61,00	1,88	0,25	228,21
132	5518,16	220,14	568,08	227,98	7,84	321,91	54,31	1,76	0,23	228,14
133-7	5595,12	219,57	519,02	227,97	8,40	293,41	45,17	1,77	0,22	228,13
134	5670,29	219,80	479,16	228,05	8,24	380,03	60,78	1,26	0,16	228,13
135	5766,81	219,78	443,65	228,04	8,26	330,08	48,54	1,34	0,16	228,13
136	5862,75	219,82	426,79	228,02	8,20	389,96	55,26	1,09	0,13	228,08

ID Sez.	Progr. (m)	Fondo (m s.m.)	Q (m ³ /s)	P.L. (m s.m.)	h (m)	A (m ²)	b (m)	v (m/s)	Fr (-)	H (m s.m.)
137	5948,65	219,92	450,27	227,98	8,06	442,98	63,67	1,02	0,12	228,03
138	6035,51	219,78	560,19	227,87	8,09	362,09	56,04	1,55	0,19	227,99
139-6	6117,24	219,81	607,90	227,77	7,96	341,47	55,12	1,78	0,23	227,93
140	6192,08	219,77	710,31	227,65	7,88	384,77	66,00	1,85	0,24	227,83
141	6267,15	219,77	953,09	227,23	7,46	344,03	58,47	2,77	0,36	227,62
142-5	6345,22	219,76	1456,97	226,93	7,17	606,42	95,64	2,40	0,30	227,22
144-4	6383,90	219,67	1457,03	226,86	7,19	644,79	105,43	2,26	0,29	227,12
145	6396,77	219,67	1457,06	226,69	7,02	658,80	111,91	2,21	0,29	226,93
146	6492,63	219,77	1316,21	226,56	6,79	544,97	101,45	2,42	0,33	226,86
147	6647,82	219,84	1149,24	226,35	6,51	443,19	79,59	2,59	0,35	226,69
148-3	6811,72	219,95	1047,07	226,22	6,27	478,49	95,29	2,19	0,31	226,47
149	6975,11	219,94	844,84	226,14	6,20	418,01	82,07	2,02	0,29	226,35
150-2	7080,77	219,93	743,49	225,84	5,91	267,40	59,98	2,78	0,42	226,24
151	7194,82	220,02	764,43	225,54	5,52	265,30	55,87	2,88	0,42	225,96
152-1	7304,23	220,06	1196,35	225,08	5,02	440,35	98,94	2,72	0,41	225,45
153	7340,96	220,06	1352,12	224,88	4,82	444,90	104,71	3,04	0,47	225,35
interp	7420,00	219,87	1171,37	224,53	4,66	327,11	79,93	3,58	0,57	225,19
154	7454,01	219,79	1152,75	224,20	4,41	263,70	69,26	4,37	0,72	225,17
155	7565,22	219,59	272,12	224,16	4,57	278,20	75,93	0,98	0,16	224,21

Tabella 3 - Risultati della simulazione SIM2 (scenario di progetto) lungo l'alveo inciso del torrente Chiusella (valori massimi di inviluppo di piena).

Nella Figura 23 è riportato uno stralcio planimetrico della batimetria di progetto con l'ubicazione delle sezioni o profili di estrazione dei risultati del modello 2D ottenuti con la simulazione SIM2 dello scenario di progetto.

Nella Figura 24 sono rappresentati i profili delle massime quote di pelo libero e delle massime velocità di deflusso calcolate lungo la sezione A-B a monte del viadotto Cartiera.

Analogamente, nella Figura 25 sono rappresentati i corrispondenti profili lungo la sezione C-D a monte del viadotto Marchetti e nella Figura 26 sono riprodotti quelli lungo la spezzata E-F che corre nei pressi delle rampe del nuovo svincolo in progetto di Pavone.

I profili lungo la sezione G-H, a monte del viadotto Chiusella, sono riportati e descritti nel paragrafo successivo.

In merito ai risultati ottenuti con la simulazione SIM2 è possibile effettuare le seguenti considerazioni:

- la piena simulata prevede la concomitanza dell'evento su Dora Baltea e Chiusella nel seguente rapporto:
 - Q = 1.265 m³/s defluenti dall'incile di Fiorano;
 - Q = 338 m³/s defluenti dal Chiusella rispetto ad un valore di portata TR 200 pari a circa 900 m³/s;
- il modello numerico applicato per la situazione di progetto è lo stesso già messo a punto da Hydrodata nelle simulazioni eseguite per l'AdBPO per i parametri di taratura (scabrezza), però si riferisce all'altimetria aggiornata del terreno (rilievo LIDAR);
- allo scopo di consentire un efficace confronto sulle variazioni determinate dalla situazione di progetto (SIM2) rispetto allo stato attuale (SIM1) si forniscono i seguenti elementi:
 - idrogramma di piena nella sezione terminale del Chiusella per le 2 situazioni esaminate (Figura 27);

- mappa di confronto dei tiranti idrici misurati rispetto allo specchio d'acqua inviluppo ottenuto nelle 2 simulazioni (Figura 28);
- mappa di confronto delle velocità di deflusso ottenute nelle 2 simulazioni (Figura 29);
- dalla Figura 27 risulta che nella situazione di progetto la portata al colmo defluente nella sezione terminale del Chiusella è 1.428,00 m³/s, valore del tutto simile a quello risultante nello stato attuale (1.438,0 m³/s); il dato di portata citato risulta dalla combinazione tra portata defluente attraverso l'incile (1.265 m³/s) e quella che si aggiunge per effetto del Chiusella (338 m³/s), a meno degli effetti di laminazione dovuti alle esondazioni sulle aree golenali;
- dal confronto dei livelli idrici ottenuti lungo l'asse del Chiusella (Tabella 2 e Tabella 3) risulta che nella SIM2 l'incremento massimo dei livelli è di 7 cm, valore del tutto trascurabile, nel tratto fino alla sezione 119 (700 m a valle del viadotto Marchetti); si incrementano fino a un massimo di 27 cm nella sezione 137 (circa 400 m a monte del ponte della SS26) in conseguenza del restringimento provocato dalla arginatura in fase di realizzazione da parte di AIPO, già dimensionata per tali valori di livello.
- dall'esame della mappa di Figura 28 si nota che le aree esterne alle fasce nella situazione attuale presentano altezza d'acqua sul piano campagna dell'ordine di 20 cm circa sia in Comune di Samone (in sinistra) che in Comune di Collettero Giacosa (in destra); con la realizzazione dei lavori di adeguamento dell'autostrada questa situazione non cambia. Dal confronto con il progetto SIM2 risultano, a seconda della zona, incrementi e decrementi di livello dovuti allo spostamento dello svincolo di Pavone ed alla realizzazione del nuovo argine a protezione di Romano Canavese;
- dall'esame della mappa di Figura 29 analogo discorso può essere fatto per le velocità; si tratta di modifiche decisamente trascurabili;
- in corrispondenza del nuovo viadotto Cartiera i massimi livelli idrici ottenuti variano da 232,80 m s.m. a monte a 231,70 m s.m. a valle; rispetto a tali valori l'impalcato in progetto sarà posto a quote di intradosso tali da rispettare il franco idraulico minimo di 1,0 m.

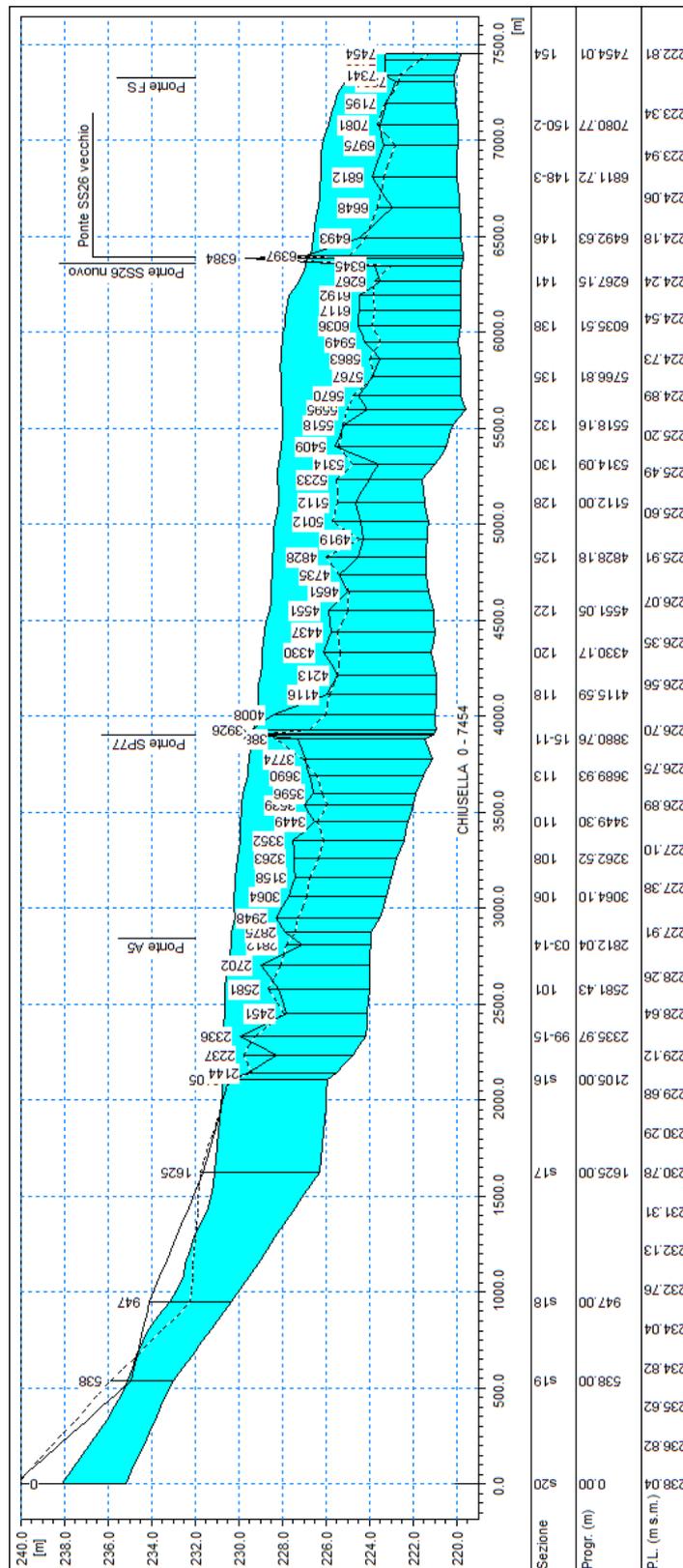


Figura 22 - Scenario di progetto (SIM2). Profilo longitudinale delle massime quote di pelo libero all'interno dell'alveo inciso.

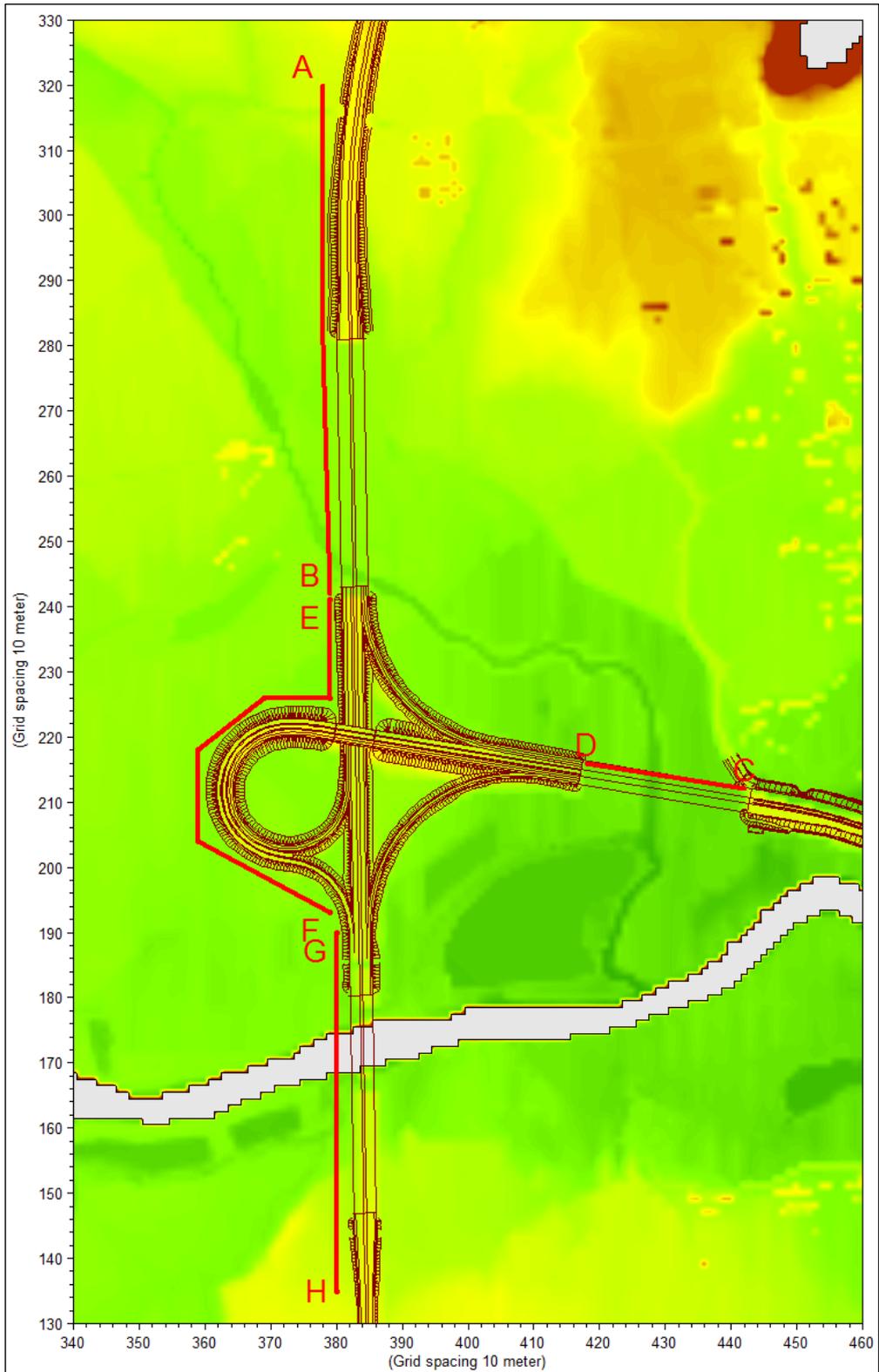


Figura 23 - Ubicazione delle sezioni o profili di estrazione dei risultati del modello.

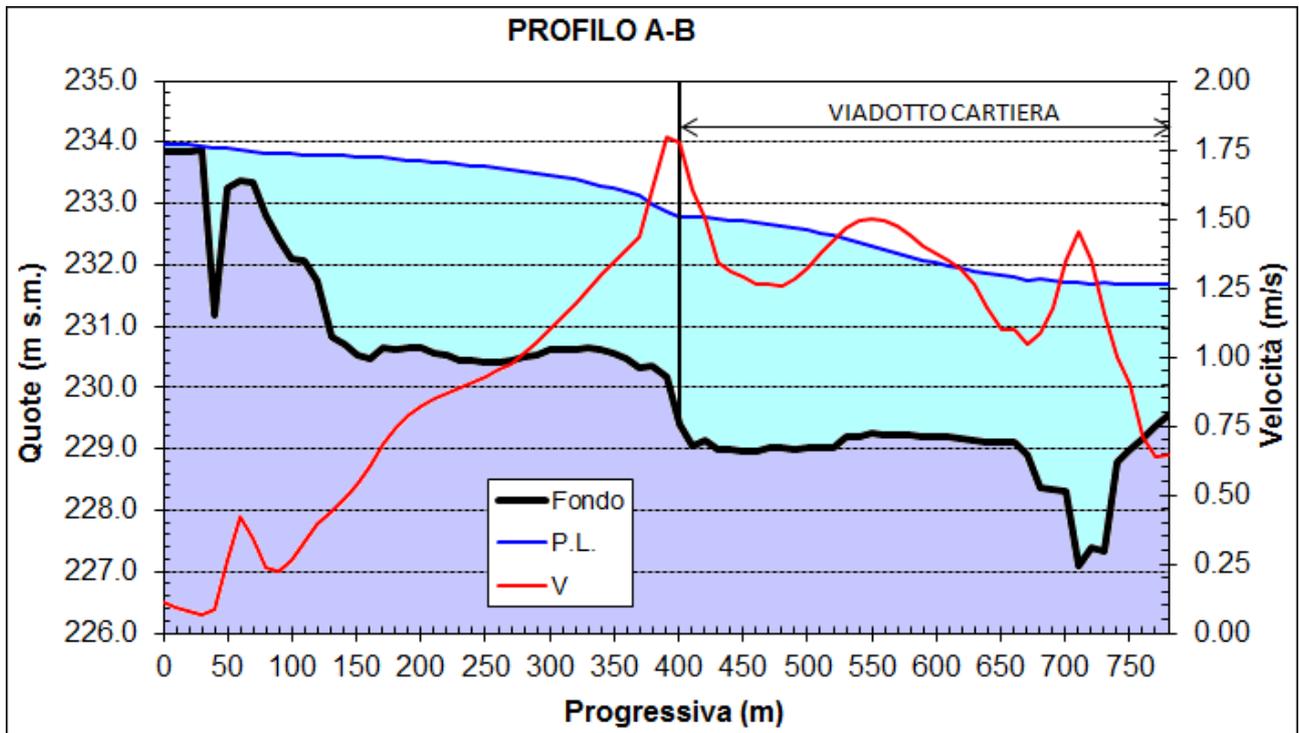


Figura 24 - Sezione A-B a monte del viadotto Cartiera: massime quote di pelo libero e massime velocità di deflusso calcolate con il modello 2D nello scenario di progetto.

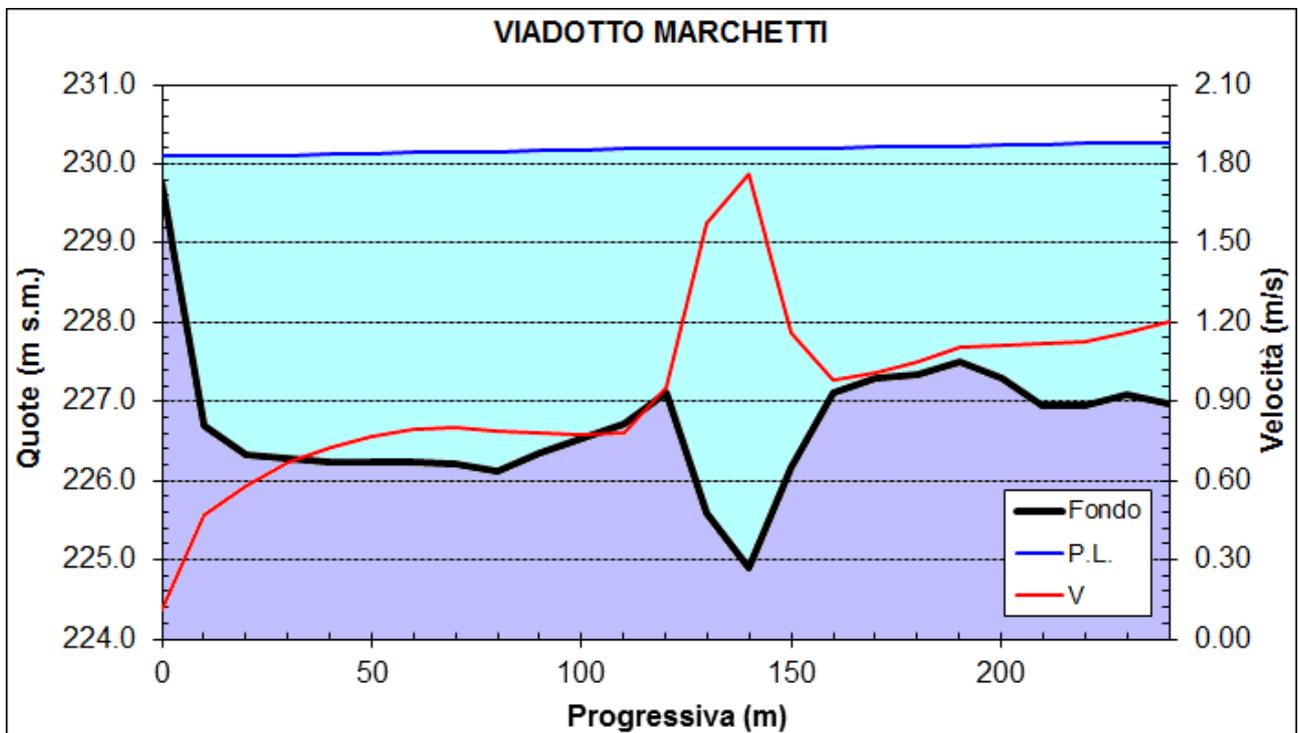


Figura 25 - Sezione C-D a monte del viadotto Marchetti: massime quote di pelo libero e massime velocità di deflusso calcolate con il modello 2D nello scenario di progetto.

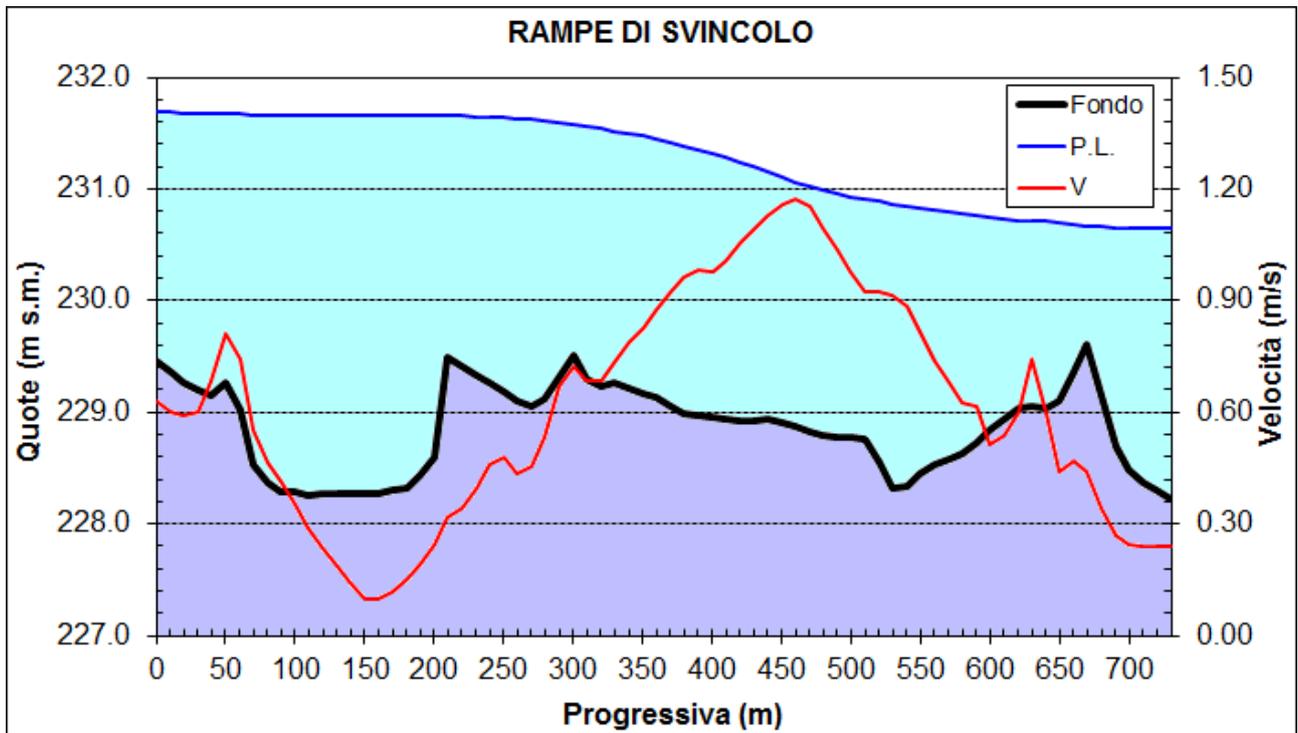


Figura 26 - Profilo E-F attorno alle rampe del nuovo svincolo in progetto di Pavone: massime quote di pelo libero e massime velocità di deflusso calcolate con il modello 2D nello scenario di progetto.

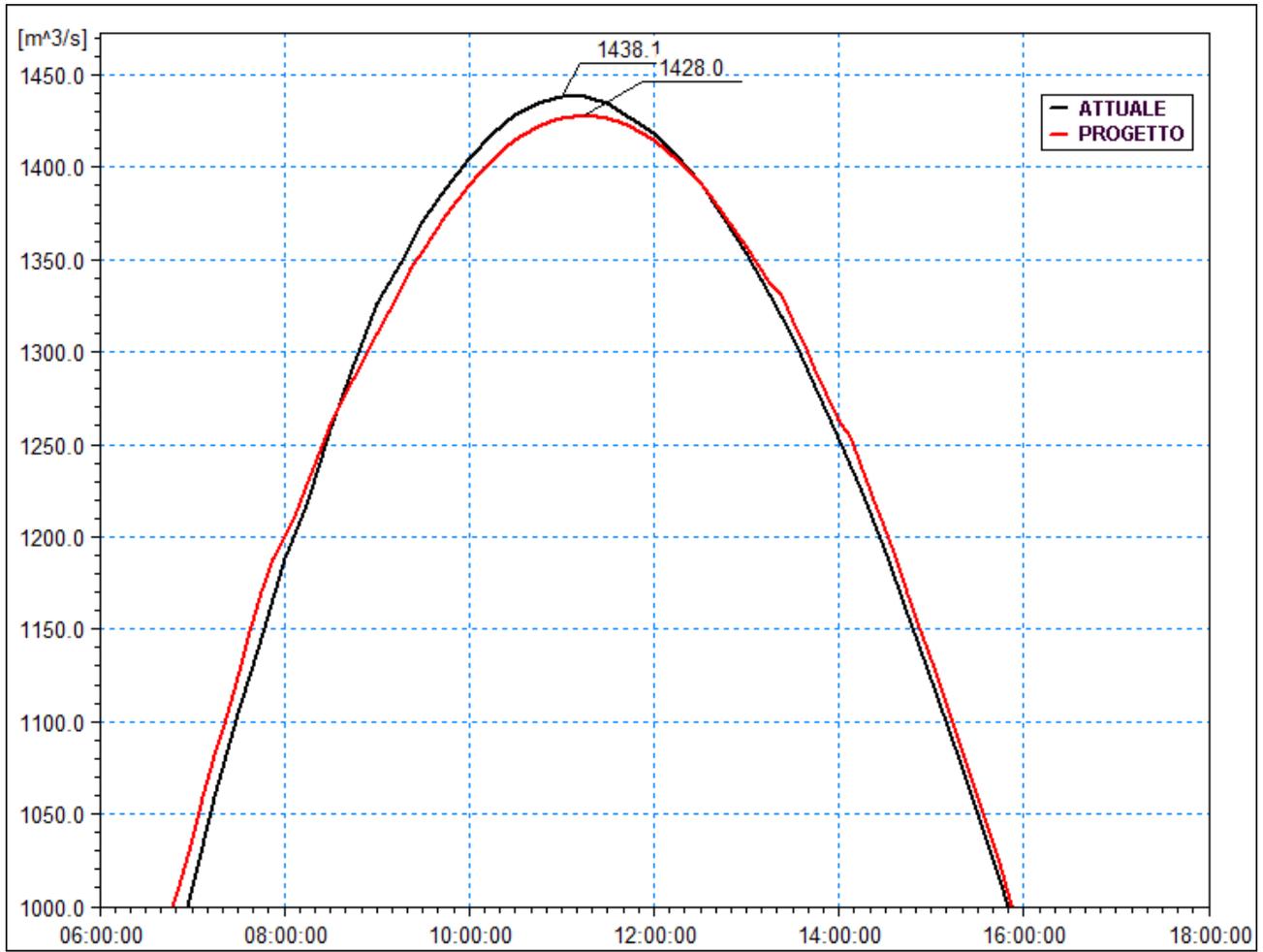


Figura 27 - Confronto tra gli idrogrammi di portata della piena di riferimento nella sezione terminale del Chiusella.

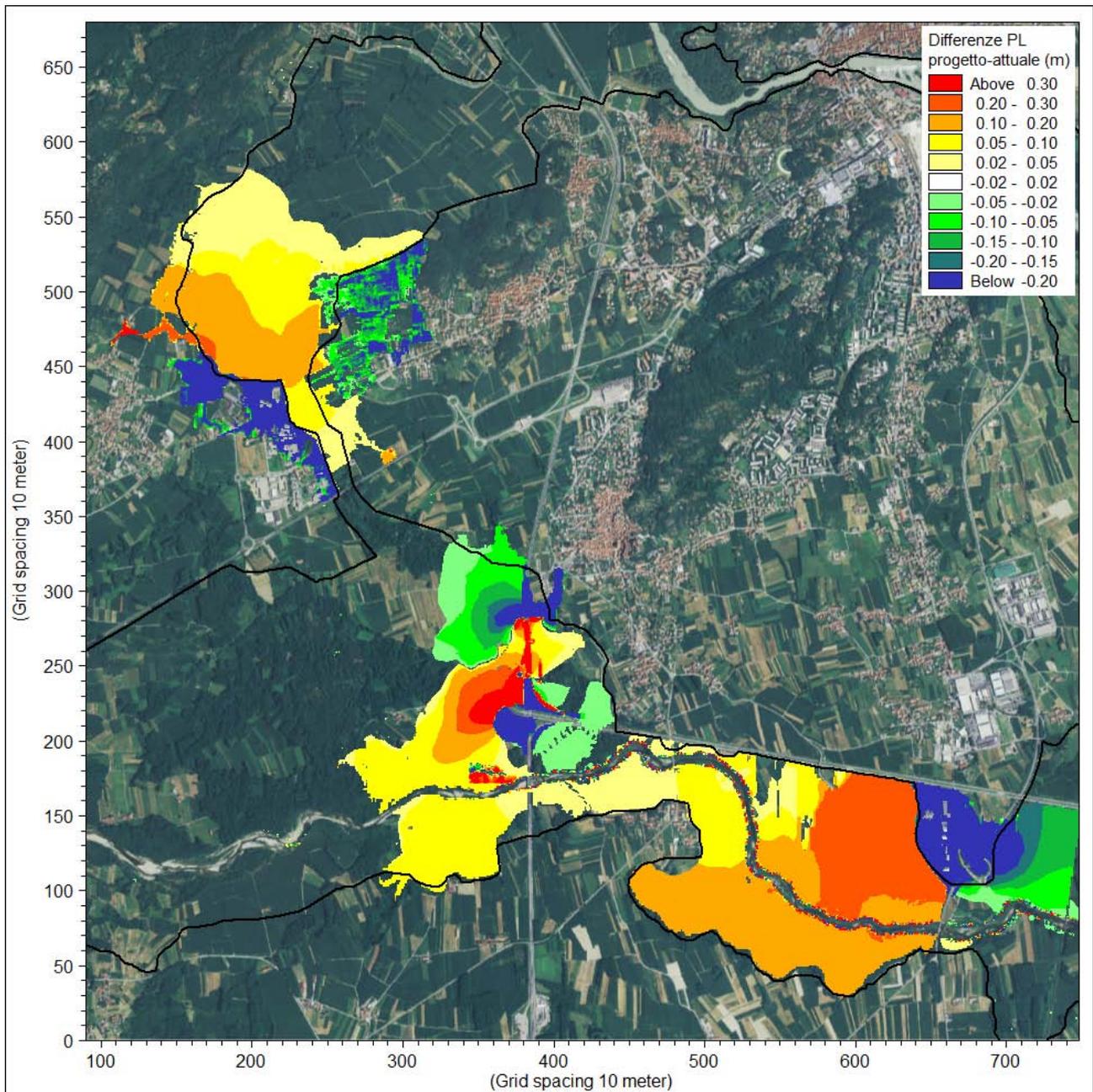


Figura 28 - Mappa delle differenze tra i livelli massimi di pelo libero dello scenario di progetto (SIM2) e quelli dello scenario attuale (SIM1).

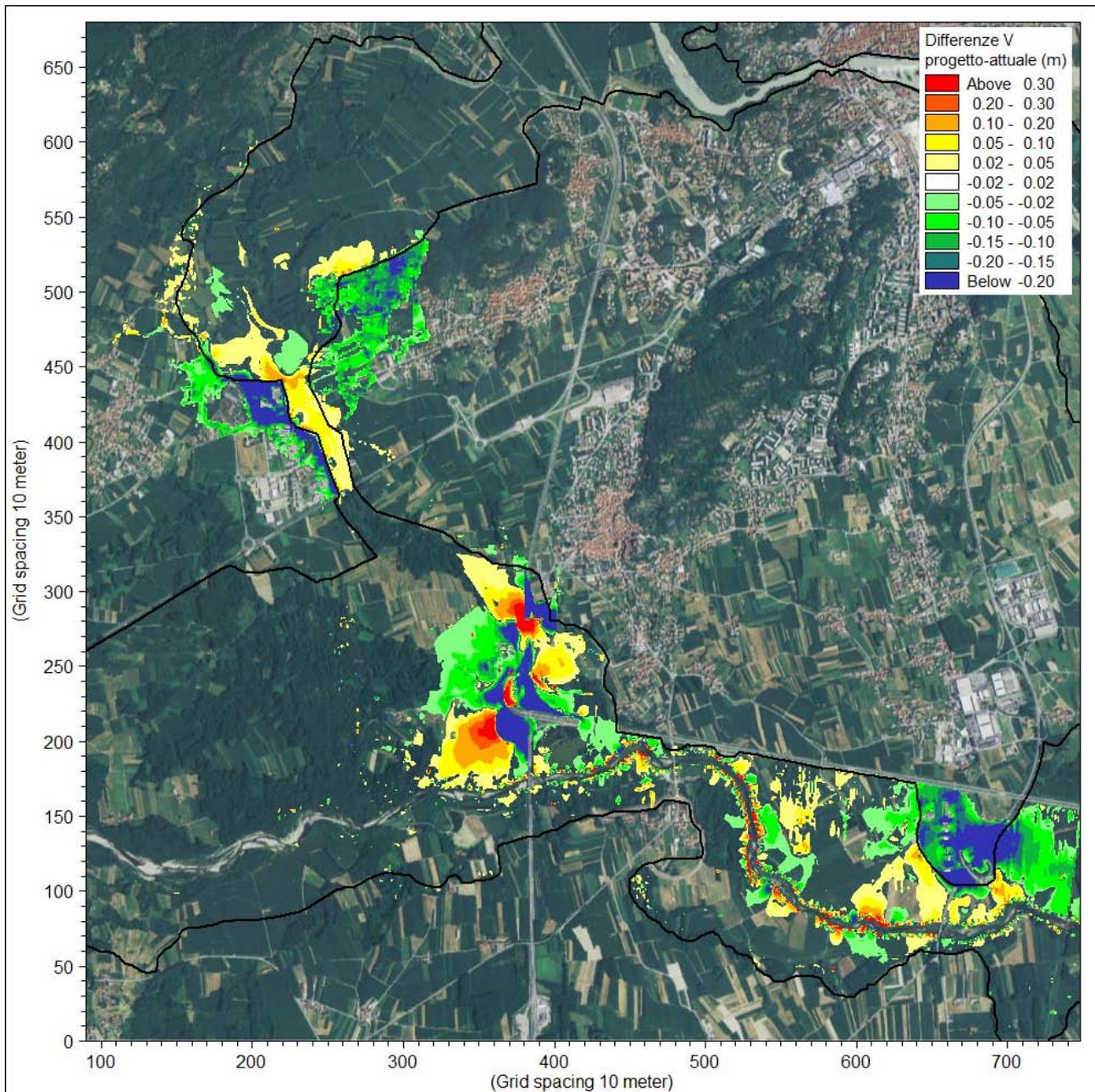


Figura 29 - Mappa delle differenze tra i valori massimi di velocità dello scenario di progetto (SIM2) e quelli dello scenario attuale (SIM1).

3.9 Scenario di progetto - simulazioni SIM3.1 e SIM3.2

Rispetto allo scenario di progetto SIM2 le due simulazioni si differenziano soltanto per la diversa combinazione degli idrogrammi di piena in ingresso nel nodo di confluenza del rio Ribes nel Chiusella:

- **SIM3.1:** idrogramma di portata residuo in ingresso sul Ribes a Fiorano con colmo pari a circa 751 m³/s e idrogramma di portata duecentennale in ingresso al Chiusella con colmo pari a 900 m³/s; a valle della confluenza dei due corsi d'acqua si ottengono condizioni di deflusso circa coincidenti a quelle delle simulazioni SIM1 e SIM2;

- **SIM3.2:** idrogramma di portata in ingresso sul Ribes a Fiorano con colmo pari a 1265 m³/s (TR200) e idrogramma di portata duecentennale in ingresso al Chiusella con colmo pari a 900 m³/s; avendo considerato la concomitanza di due eventi con tempo di ritorno 200 anni, a valle della confluenza si ottiene un evento con tempo di ritorno decisamente maggiore di 200 anni.

Entrambe le simulazioni sono finalizzate a verificare l'adeguatezza del nuovo ponte sul Chiusella rispetto ai franchi di legge imposti.

Nella Figura 30 è riportato il dettaglio della batimetria del modello relativa alla situazione di progetto, sulla quale sono indicati anche i limiti di fascia A e B in modo da visualizzare il fatto che la spalla destra del viadotto Chiusella è stata posizionata, come prima ipotesi, in corrispondenza del limite di fascia A.

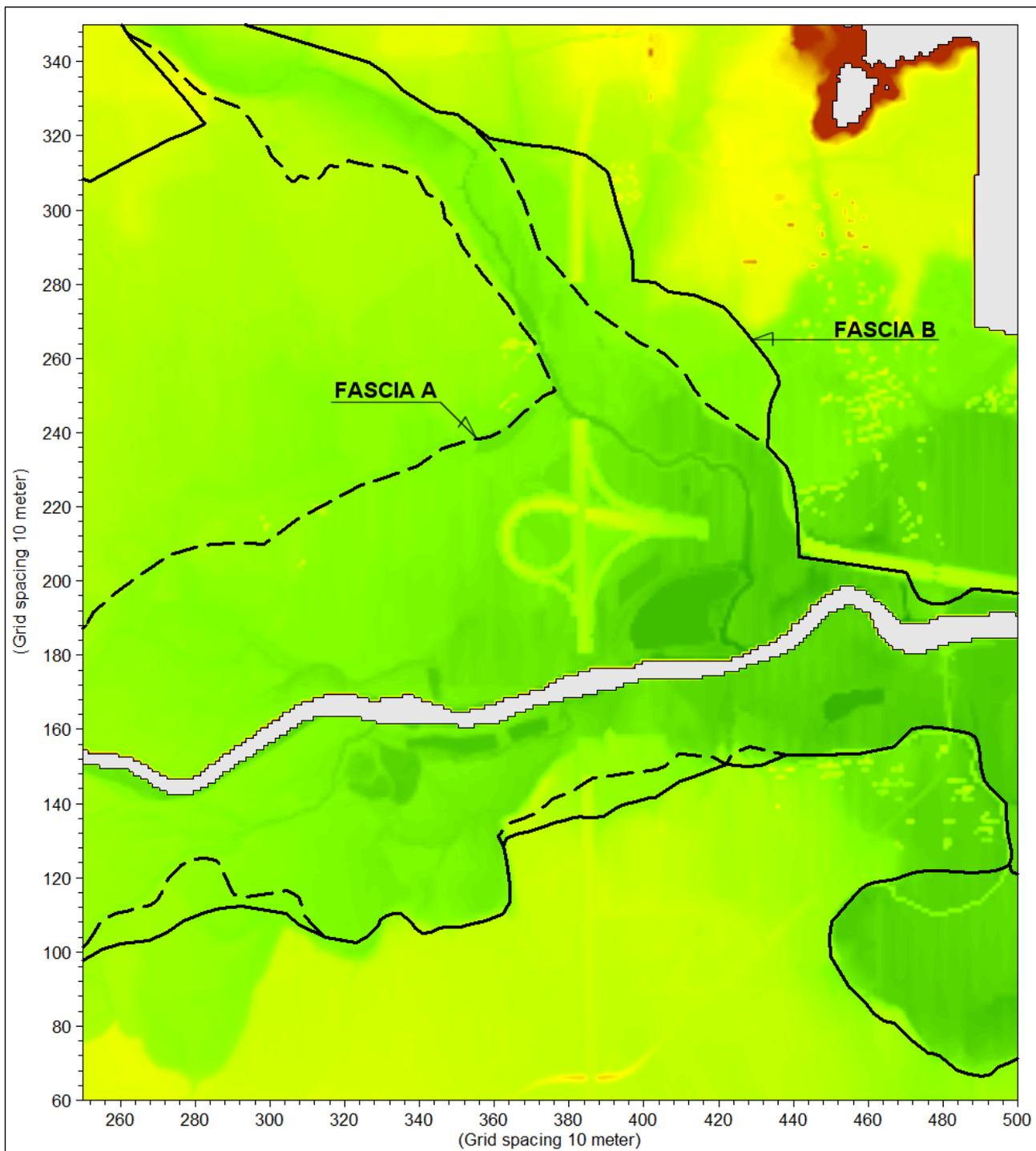


Figura 30 - Batimetria del modello 2D a maglia 10x10 m per la simulazione dello scenario SIM3.

Nella Figura 31 per la simulazione SIM3.1 e nella Figura 32 per la simulazione SIM3.2, sull'intera estensione del modello di valle, sono riportate le distribuzioni delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna calcolate nel corso del transito del colmo degli eventi di piena considerati.

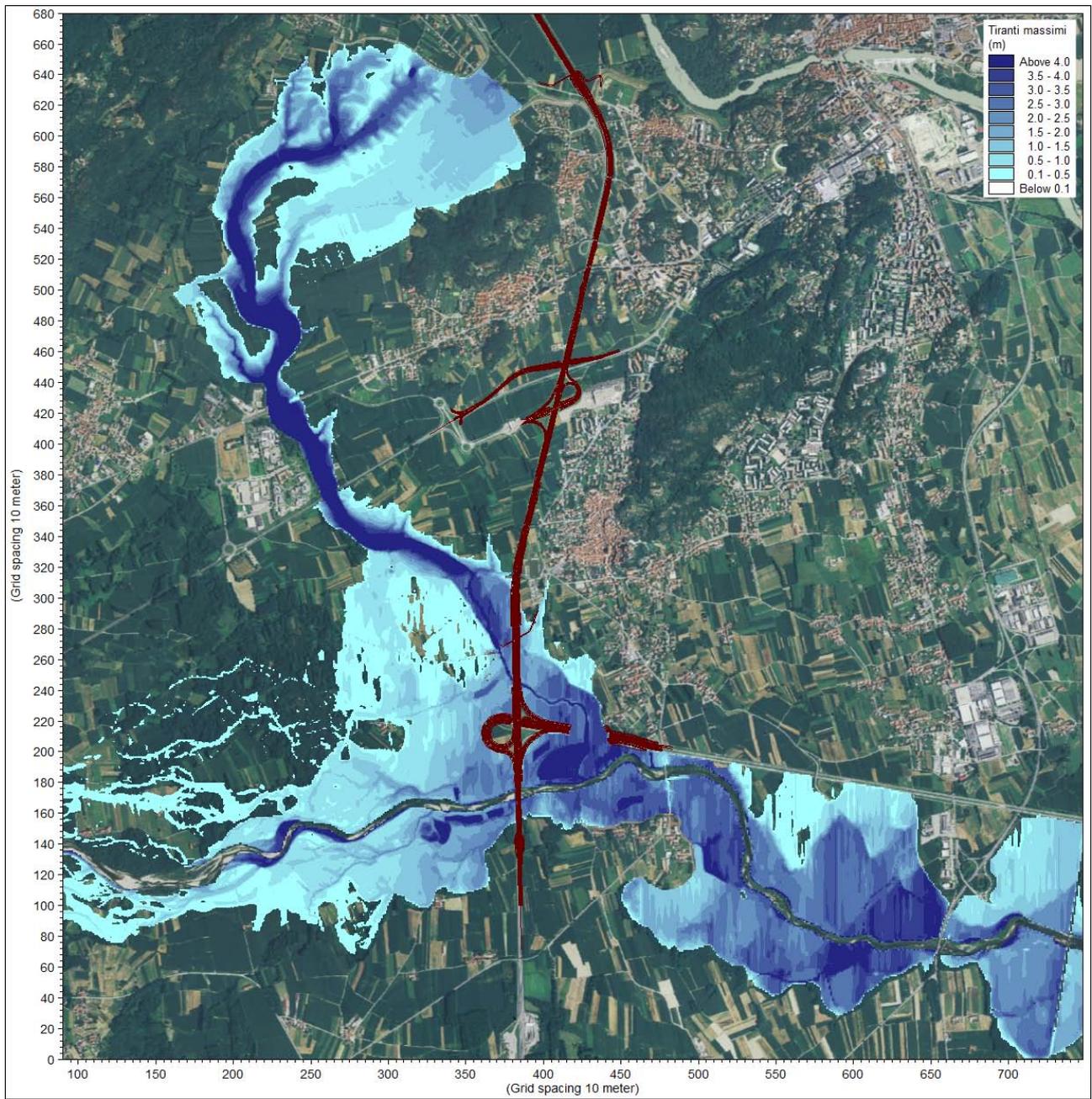


Figura 31 - Scenario di progetto (simulazione SIM3.1). Involuppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna.

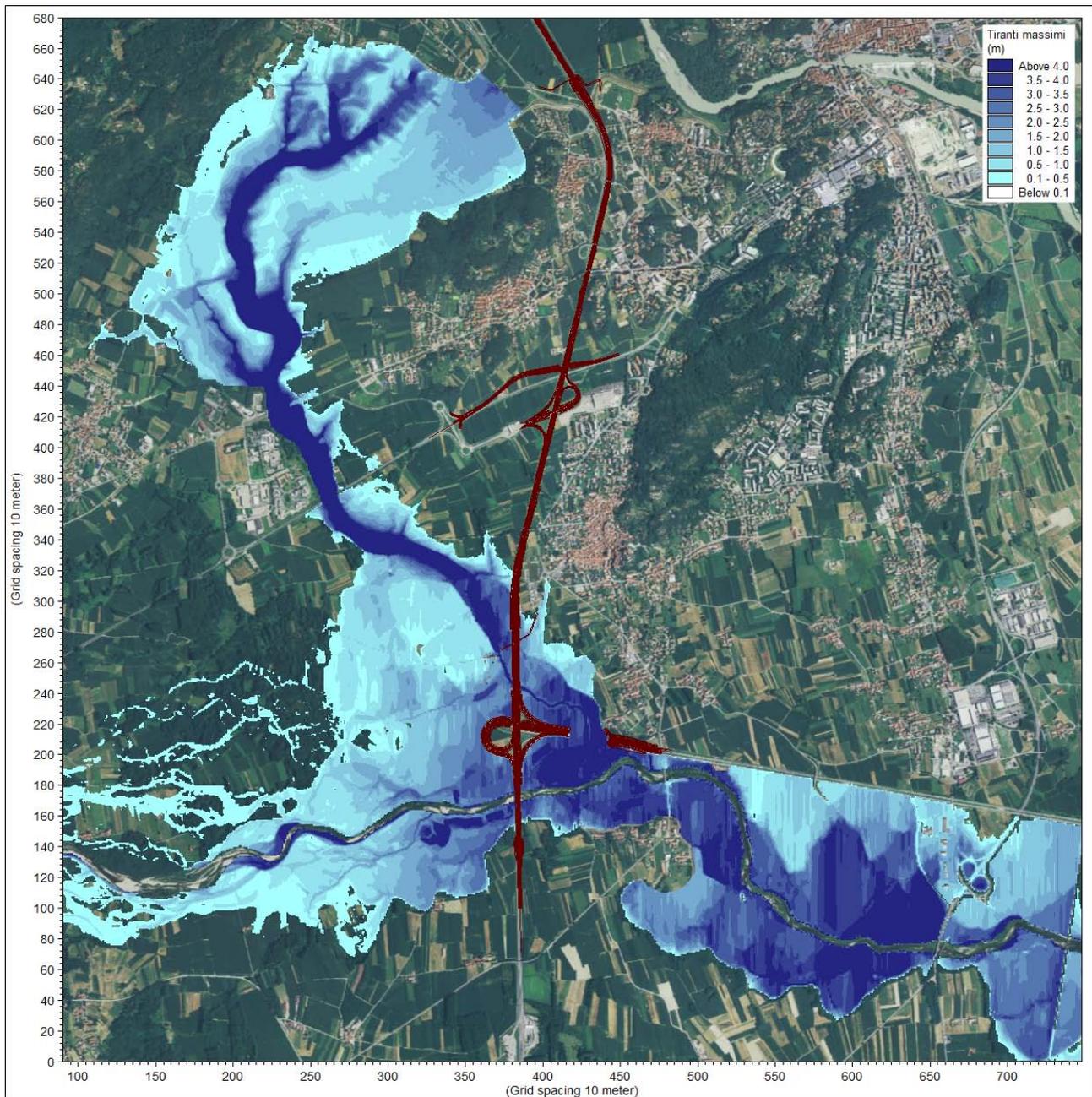


Figura 32 - Scenario di progetto (simulazione SIM3.2). Inviluppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna.

Nella Figura 33 per la simulazione SIM3.1 e nella Figura 34 per la simulazione SIM3.2, sono riportati i dettagli del campo di moto in concomitanza del transito del colmo degli eventi di piena considerati. Analogamente nella Figura 35 e nella Figura 36 sono rappresentate le corrispondenti distribuzioni areali delle massime velocità di deflusso raggiunte nel corso dell'evento di piena a prescindere dall'istante in cui si sono verificate. Infine nella Figura 37 e nella Figura 38 sono rappresentate le distribuzioni delle massime quote di pelo libero raggiunte nel corso delle due simulazioni condotte.

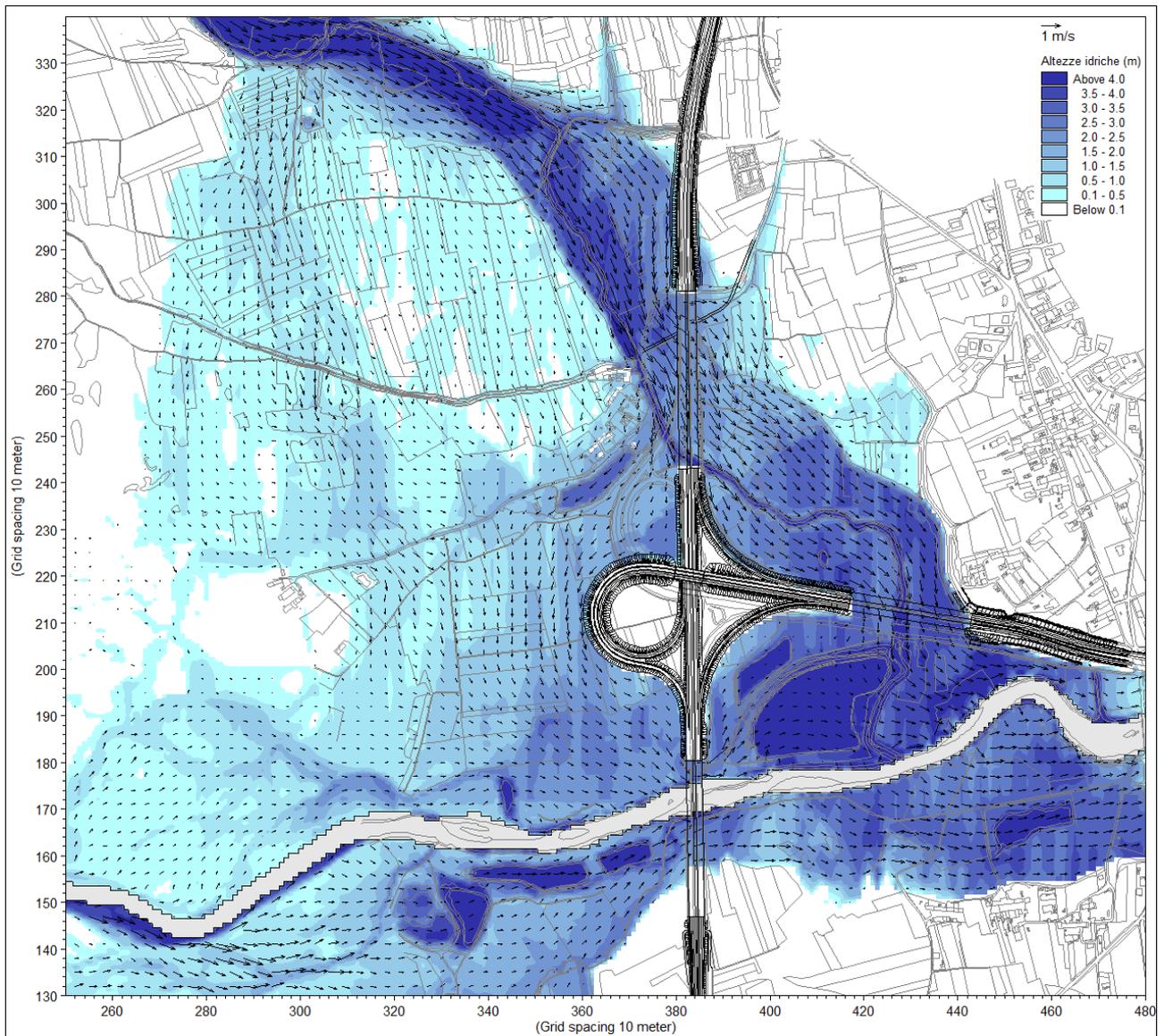


Figura 33 - Scenario di progetto (simulazione SIM3.1). Ingrandimento nella zona di interesse della distribuzione delle altezze d'acqua rispetto al piano campagna in corrispondenza del transito del colmo di piena e campo dei vettori velocità.

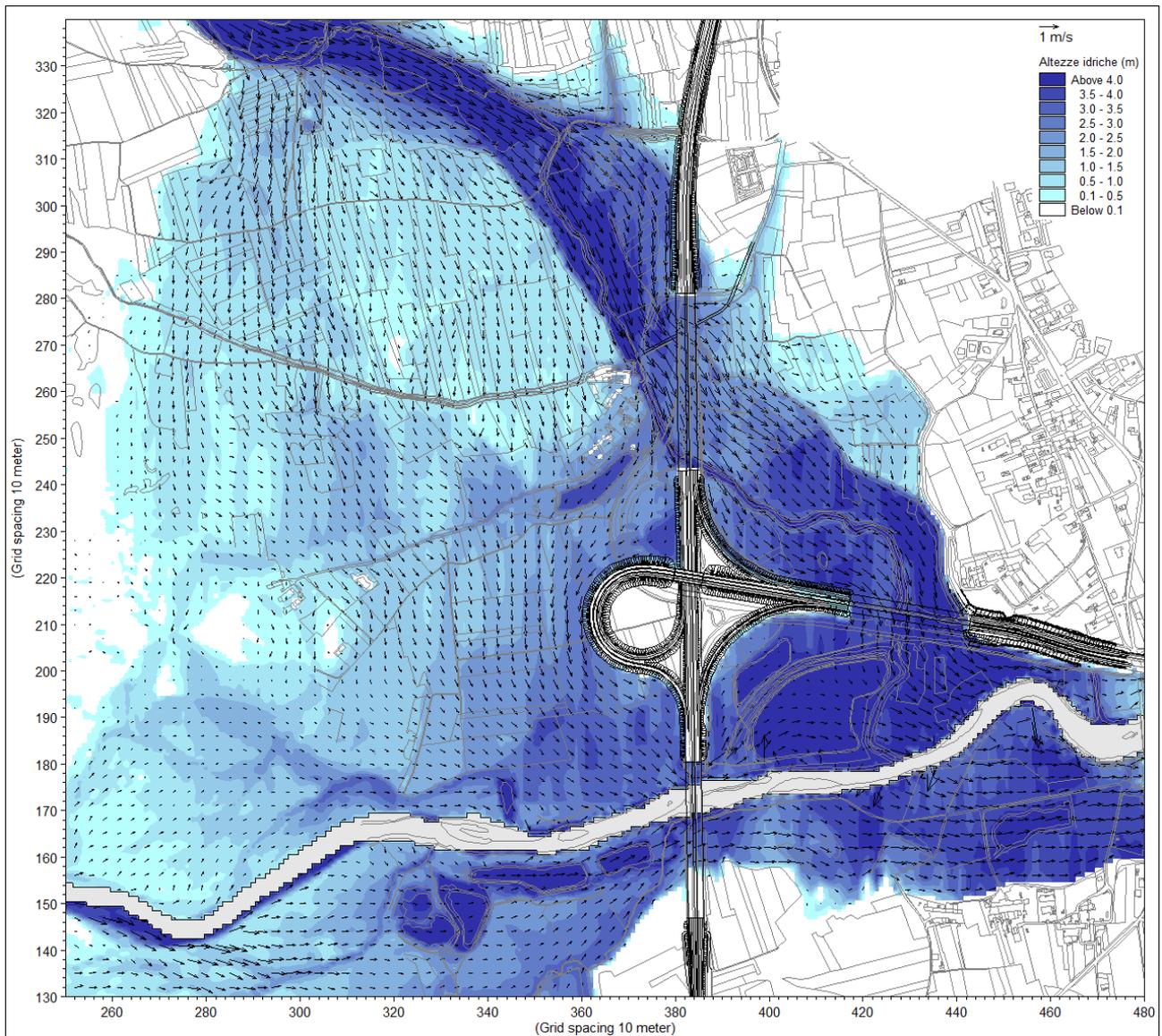


Figura 34 - Scenario di progetto (simulazione SIM3.2). Ingrandimento nella zona di interesse della distribuzione delle altezze d'acqua rispetto al piano campagna in corrispondenza del transito del colmo di piena e campo dei vettori velocità.

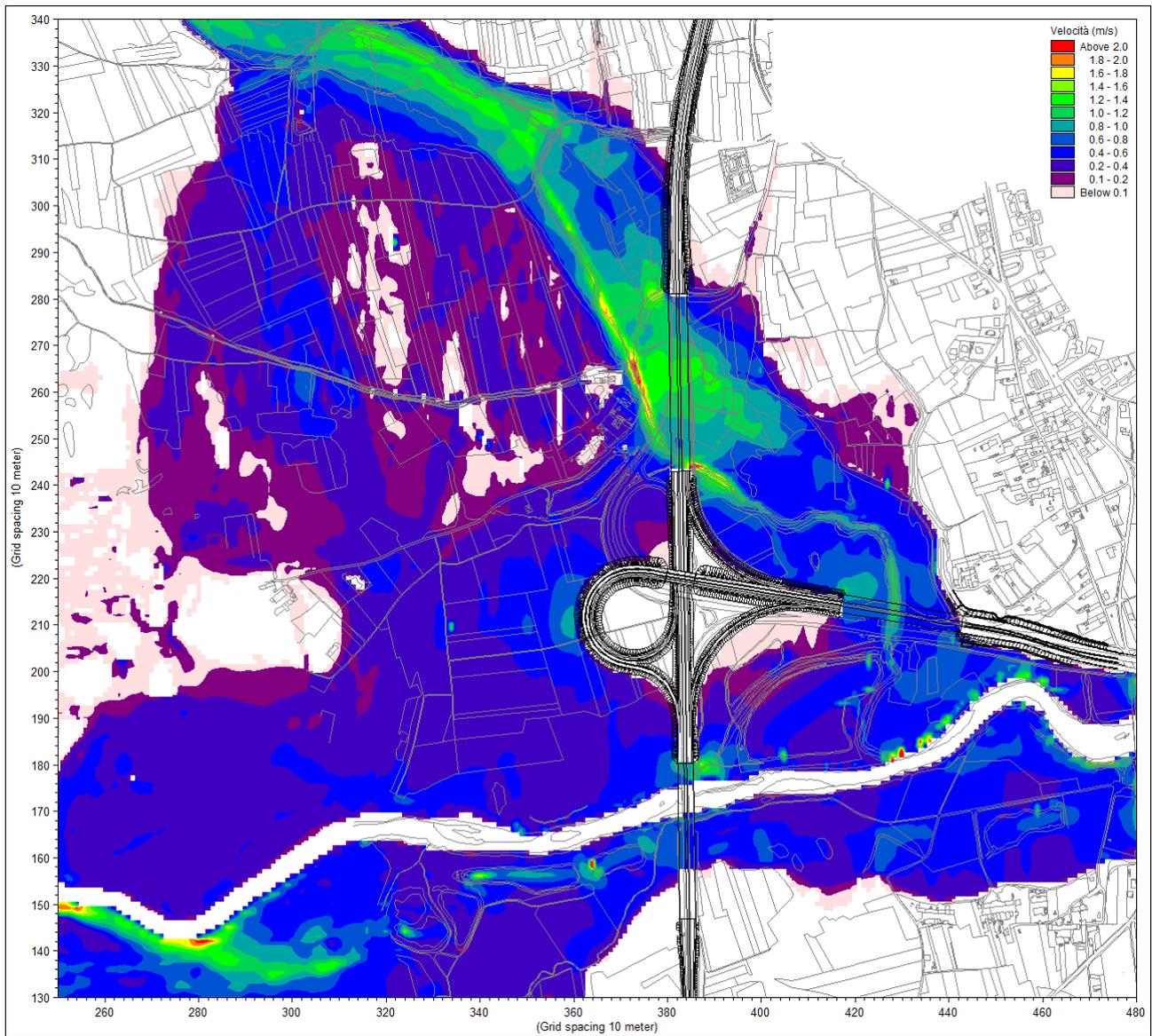


Figura 35 - Scenario di progetto (simulazione SIM3.1). Ingrandimento nella zona di interesse della distribuzione delle velocità massime di deflusso.

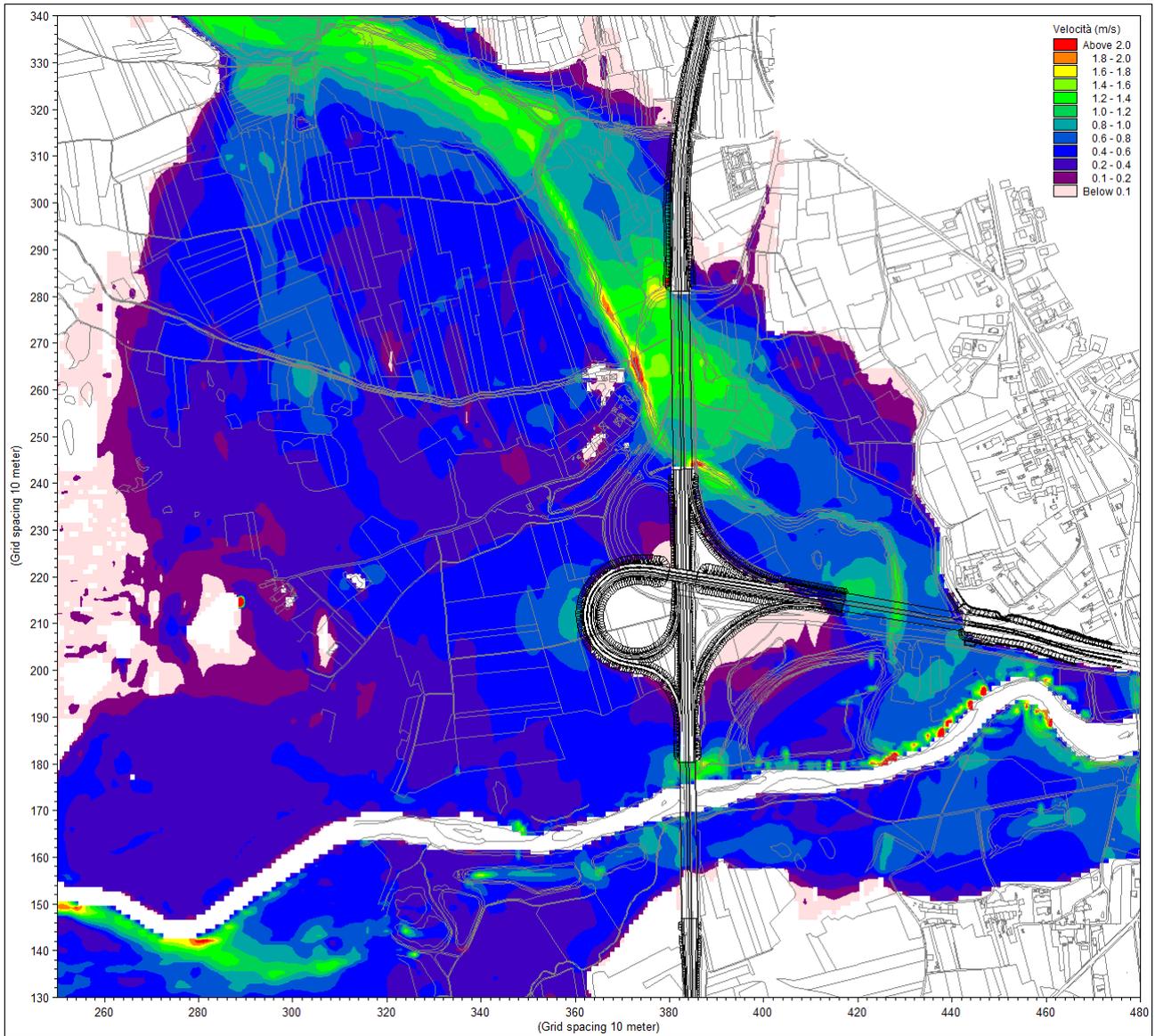


Figura 36 - Scenario di progetto (simulazione SIM3.2). Ingrandimento nella zona di interesse della distribuzione delle velocità massime di deflusso.

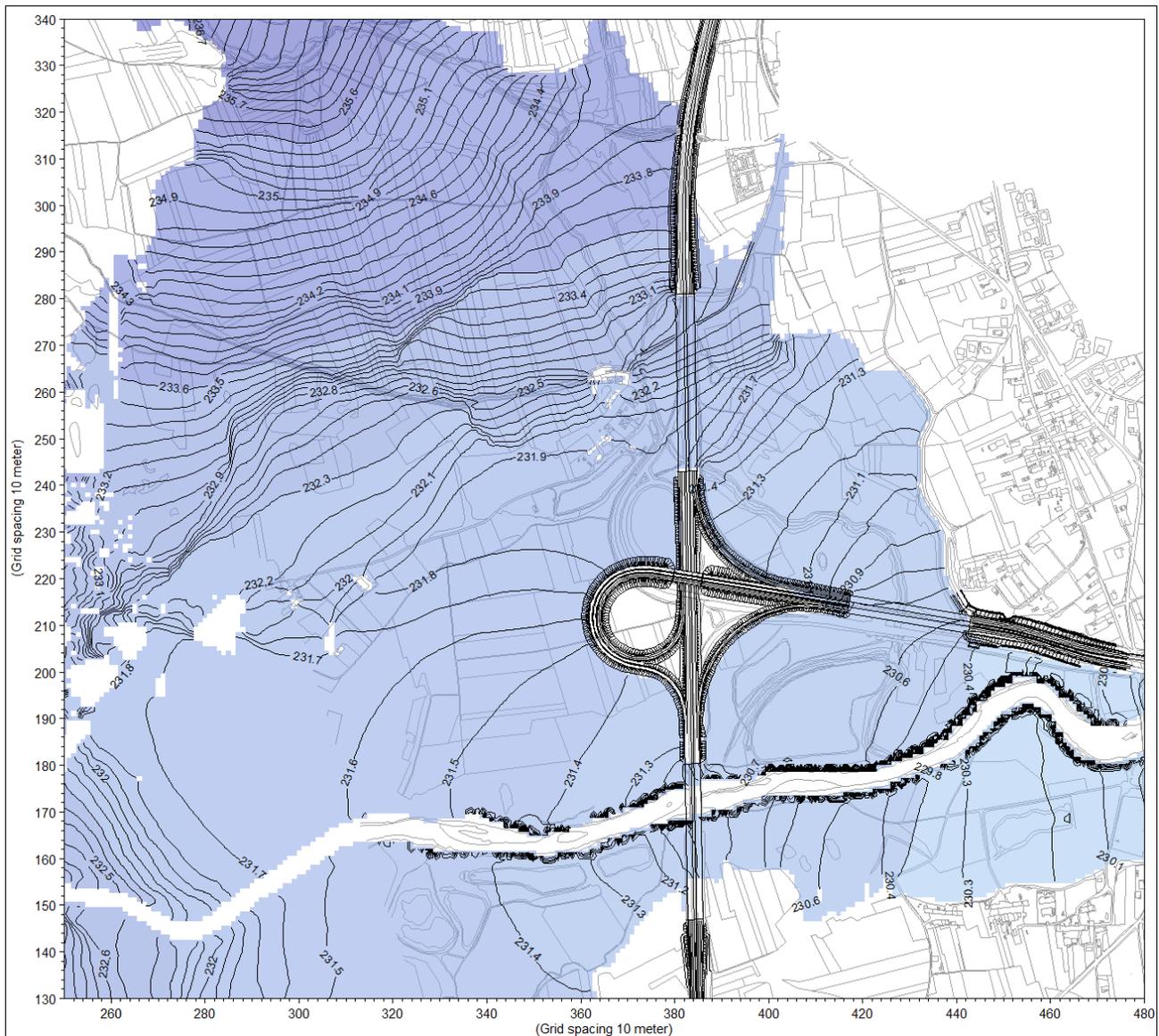


Figura 38 - Scenario di progetto complessivo (simulazione SIM3.2). Ingrandimento nella zona di interesse della distribuzione delle quote massime del pelo libero raggiunte nel corso del deflusso dell'evento di piena considerato.

Nella Figura 39 è riportato un confronto tra i profili longitudinali delle massime quote di pelo libero all'interno dell'alveo inciso del Chiusella ottenuti con il modello relativi alle simulazioni SIM3.1 e SIM3.2. La concomitanza dei due eventi duecentennali determina condizioni di rigurgito provocate dalla presenza del ponte della S.S. 26 e, soprattutto, dall'argine in sinistra in corso di realizzazione da parte di AIPO, che si risentono per più di un chilometro a monte del viadotto Chiusella. Gli incrementi di livello su tutto il tratto vallivo del Chiusella sono mediamente pari a $0,6 \div 0,8$ m.

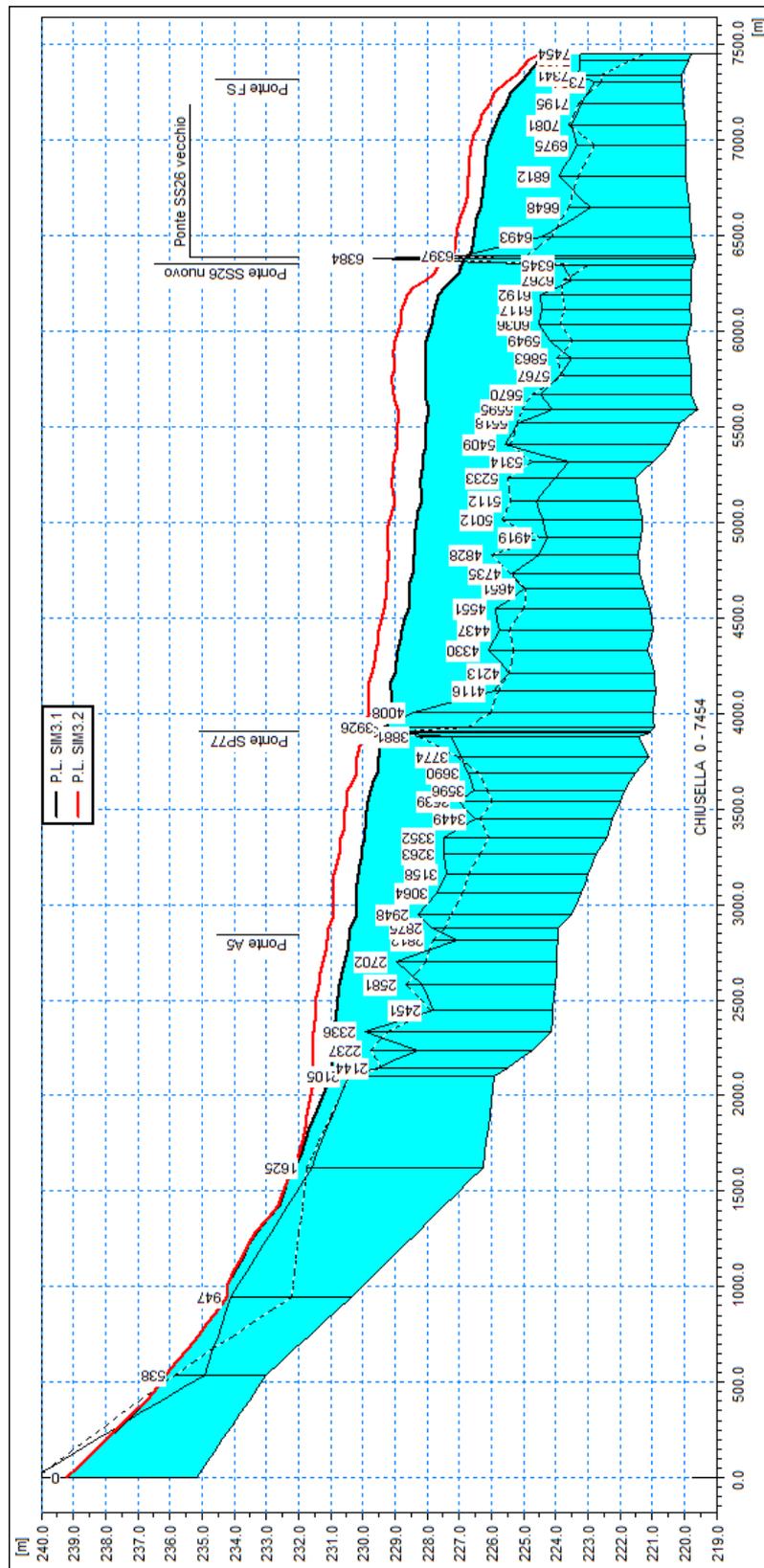


Figura 39 - Scenario di progetto. Confronto tra i profili longitudinali delle massime quote di pelo libero all'interno dell'alveo inciso del Chiusella relativi alle simulazioni SIM3.1 e SIM3.2.

Nella Tabella 4, in corrispondenza delle sezioni trasversali d'alveo di rilievo, sono elencati i parametri caratterizzanti i valori massimi di inviluppo del profilo di corrente dell'evento di piena considerato nel caso dello scenario di progetto SIM3.1.

ID Sez.	Progr. (m)	Fondo (m s.m.)	Q (m³/s)	P.L. (m s.m.)	h (m)	A (m²)	b (m)	v (m/s)	Fr (-)	H (m s.m.)
s23	0,00	250,26	899,93	254,25	3,99	211,37	72,27	4,26	0,79	255,17
s22	493,89	245,53	827,25	248,65	3,12	203,35	73,34	4,07	0,78	249,49
s21	1134,38	238,34	833,23	241,92	3,58	242,40	89,15	3,44	0,67	242,52
s20	0,00	235,16	866,09	239,21	4,05	310,34	140,83	2,79	0,60	239,61
s19	538,00	232,76	833,53	236,13	3,37	375,29	152,24	2,22	0,45	236,38
s18	947,00	230,34	396,89	234,23	3,89	126,64	41,07	3,13	0,57	234,73
s17	1625,00	226,25	506,04	232,13	5,88	207,56	49,56	2,44	0,38	232,43
s16	2105,00	225,89	489,61	230,99	5,10	212,05	60,11	2,31	0,39	231,26
97	2143,78	225,50	494,72	230,98	5,48	261,83	72,66	1,89	0,32	231,16
98	2236,68	224,74	506,57	230,92	6,18	290,82	66,01	1,74	0,26	231,07
99-15	2335,97	224,13	498,70	230,89	6,76	354,85	94,76	1,41	0,23	230,99
100	2450,58	224,08	460,95	230,80	6,72	250,04	48,57	1,84	0,26	230,97
101	2581,43	224,00	480,45	230,71	6,71	302,48	61,63	1,59	0,23	230,84
102	2701,61	223,96	515,38	230,55	6,59	273,40	53,67	1,89	0,27	230,73
103-14	2812,04	223,94	648,00	230,42	6,47	399,10	75,70	1,62	0,23	230,55
104	2875,26	223,94	690,81	230,41	6,47	432,39	79,41	1,60	0,22	230,54
105	2948,09	223,48	666,81	230,17	6,69	258,05	49,03	2,58	0,36	230,51
106	3064,10	223,20	640,16	230,19	6,99	353,97	63,27	1,81	0,24	230,36
107-13	3157,63	222,99	591,57	230,15	7,16	317,73	54,63	1,86	0,25	230,33
108	3262,52	222,76	563,77	230,03	7,27	272,17	45,44	2,07	0,27	230,24
109	3352,45	222,40	595,81	229,91	7,51	313,17	54,57	1,90	0,25	230,10
110	3449,30	222,23	622,56	229,88	7,65	382,48	60,70	1,63	0,21	230,02
111	3539,10	221,99	653,06	229,83	7,84	388,73	58,67	1,68	0,21	229,97
112-12	3596,12	221,84	719,73	229,76	7,92	425,63	64,89	1,69	0,21	229,91
113	3689,93	221,50	843,98	229,55	8,05	387,67	56,10	2,18	0,26	229,79
114	3773,50	221,09	958,62	229,51	8,42	540,42	84,28	1,77	0,22	229,67
115-11	3880,76	220,92	1101,02	229,37	8,45	584,21	91,45	1,88	0,24	229,55
ponte_M	3900,00	220,93	1135,04	229,33	8,40	592,87	89,48	1,91	0,24	229,52
ponte_V	3910,00	220,93	1143,25	229,26	8,33	586,61	89,48	1,95	0,24	229,45
116	3926,17	220,92	1136,98	229,25	8,33	577,74	87,78	1,97	0,24	229,45
117	4008,45	220,97	1089,23	229,10	8,13	456,45	78,09	2,39	0,32	229,39
118	4115,59	220,90	954,19	229,11	8,21	475,93	77,73	2,00	0,26	229,31
119-10	4212,88	220,92	815,85	228,99	8,07	341,98	55,42	2,39	0,31	229,28
120	4330,17	221,12	756,20	228,90	7,78	312,87	50,58	2,42	0,31	229,20
121	4436,55	220,96	745,16	228,79	7,83	333,98	60,49	2,23	0,30	229,05
122	4551,05	221,05	737,34	228,57	7,52	299,20	54,91	2,46	0,34	228,88
123-9	4650,87	221,24	684,50	228,52	7,28	282,66	45,50	2,42	0,31	228,82
124	4734,58	221,40	711,15	228,45	7,05	349,15	60,60	2,04	0,27	228,66
125	4828,18	221,41	721,16	228,41	7,00	392,83	67,99	1,84	0,24	228,58
126	4919,16	221,33	635,70	228,39	7,06	345,85	57,92	1,84	0,24	228,56
127	5012,28	221,29	642,67	228,30	7,01	348,24	59,59	1,85	0,24	228,48
128	5112,00	221,44	654,91	228,15	6,71	290,10	49,49	2,26	0,30	228,41
129-8	5233,04	221,53	720,69	228,20	6,67	630,89	104,57	1,14	0,15	228,26
130	5314,09	220,95	685,53	228,12	7,17	478,97	75,23	1,43	0,18	228,23
131	5408,69	220,45	653,96	228,01	7,56	341,31	61,00	1,92	0,26	228,20
132	5518,16	220,14	575,46	228,00	7,86	322,03	54,31	1,79	0,23	228,16

ID Sez.	Progr. (m)	Fondo (m s.m.)	Q (m³/s)	P.L. (m s.m.)	h (m)	A (m²)	b (m)	v (m/s)	Fr (-)	H (m s.m.)
133-7	5595,12	219,57	529,28	227,95	8,38	293,13	45,17	1,81	0,23	228,12
134	5670,29	219,80	481,15	228,04	8,24	379,79	60,78	1,27	0,16	228,12
135	5766,81	219,78	439,42	228,03	8,25	329,06	48,54	1,34	0,16	228,12
136	5862,75	219,82	441,48	228,01	8,19	387,99	55,26	1,14	0,14	228,07
137	5948,65	219,92	456,36	228,01	8,09	442,33	63,67	1,03	0,12	228,06
138	6035,51	219,78	548,05	227,87	8,09	361,99	56,04	1,51	0,19	227,99
139-6	6117,24	219,81	600,00	227,77	7,96	341,32	55,12	1,76	0,23	227,93
140	6192,08	219,77	704,86	227,65	7,88	384,58	66,00	1,83	0,24	227,82
141	6267,15	219,77	951,40	227,22	7,45	343,80	58,47	2,77	0,36	227,61
142-5	6345,22	219,76	1457,72	226,92	7,16	605,40	95,64	2,41	0,31	227,21
144-4	6383,90	219,67	1457,74	226,85	7,18	643,61	105,40	2,26	0,29	227,11
145	6396,77	219,67	1457,74	226,67	7,00	657,51	111,89	2,22	0,29	226,92
146	6492,63	219,77	1318,41	226,55	6,78	543,52	101,45	2,43	0,33	226,85
147	6647,82	219,84	1143,49	226,34	6,50	442,53	79,59	2,58	0,35	226,68
148-3	6811,72	219,95	1054,30	226,20	6,25	476,46	95,29	2,21	0,32	226,45
149	6975,11	219,94	832,07	226,12	6,18	417,51	82,07	1,99	0,28	226,32
150-2	7080,77	219,93	734,59	225,85	5,92	267,46	59,98	2,75	0,42	226,24
151	7194,82	220,02	757,84	225,54	5,52	265,27	55,87	2,86	0,42	225,95
152-1	7304,23	220,06	1196,30	225,08	5,02	439,86	98,94	2,72	0,41	225,46
153	7340,96	220,06	1352,46	224,88	4,82	444,36	104,71	3,04	0,47	225,35
interp	7420,00	219,87	1168,49	224,54	4,66	326,96	79,93	3,57	0,56	225,19
154	7454,01	219,79	1150,37	224,20	4,41	263,58	69,26	4,36	0,71	225,17
155	7565,22	219,59	271,60	224,16	4,57	278,09	75,93	0,98	0,16	224,20

Tabella 4 - Risultati della simulazione SIM3.1 lungo l'alveo inciso del torrente Chiusella (valori massimi di inviluppo di piena).

Nella Tabella 5, in corrispondenza delle sezioni trasversali d'alveo di rilievo, sono elencati i parametri caratterizzanti i valori massimi di inviluppo del profilo di corrente dell'evento di piena considerato nel caso dello scenario di progetto SIM3.2.

ID Sez.	Progr. (m)	Fondo (m s.m.)	Q (m³/s)	P.L. (m s.m.)	h (m)	A (m²)	b (m)	v (m/s)	Fr (-)	H (m s.m.)
s23	0,00	250,26	899,93	254,25	3,99	211,74	72,42	4,25	0,79	255,17
s22	493,89	245,53	830,95	248,65	3,12	203,97	73,35	4,07	0,78	249,50
s21	1134,38	238,34	837,74	241,93	3,59	243,22	89,17	3,44	0,67	242,53
s20	0,00	235,16	871,04	239,22	4,06	311,52	140,86	2,80	0,60	239,62
s19	538,00	232,76	837,95	236,14	3,38	376,33	152,24	2,23	0,45	236,39
s18	947,00	230,34	397,75	234,24	3,90	126,89	41,07	3,13	0,57	234,74
s17	1625,00	226,25	506,08	232,16	5,91	209,09	49,56	2,42	0,38	232,46
s16	2105,00	225,89	489,00	231,52	5,63	244,26	60,11	2,00	0,32	231,73
97	2143,78	225,50	493,93	231,53	6,03	301,53	72,66	1,64	0,26	231,66
98	2236,68	224,74	506,00	231,51	6,77	329,95	66,01	1,53	0,22	231,63
99-15	2335,97	224,13	498,16	231,51	7,38	413,62	94,76	1,20	0,18	231,58
100	2450,58	224,08	460,34	231,44	7,36	282,34	48,57	1,63	0,22	231,58
101	2581,43	224,00	478,51	231,38	7,38	343,61	61,63	1,39	0,19	231,48
102	2701,61	223,96	524,28	231,23	7,27	310,42	53,67	1,69	0,22	231,38
103-14	2812,04	223,94	711,01	231,09	7,15	451,02	75,70	1,58	0,21	231,22
104	2875,26	223,94	785,89	231,08	7,14	486,80	79,41	1,61	0,21	231,22
105	2948,09	223,48	743,11	230,88	7,40	292,24	49,03	2,54	0,33	231,20

ID Sez.	Progr. (m)	Fondo (m s.m.)	Q (m³/s)	P.L. (m s.m.)	h (m)	A (m²)	b (m)	v (m/s)	Fr (-)	H (m s.m.)
106	3064,10	223,20	708,10	230,92	7,72	399,50	63,27	1,77	0,23	231,08
107-13	3157,63	222,99	654,57	230,88	7,89	357,46	54,63	1,83	0,23	231,05
108	3262,52	222,76	640,41	230,72	7,96	305,32	45,44	2,10	0,26	230,95
109	3352,45	222,40	705,06	230,68	8,28	351,94	54,57	2,00	0,25	230,89
110	3449,30	222,23	742,56	230,58	8,35	425,07	60,70	1,75	0,21	230,73
111	3539,10	221,99	782,77	230,48	8,49	429,49	58,67	1,82	0,22	230,65
112-12	3596,12	221,84	880,05	230,45	8,61	469,08	64,89	1,88	0,22	230,63
113	3689,93	221,50	1015,44	230,20	8,70	423,95	56,10	2,40	0,28	230,49
114	3773,50	221,09	1162,23	230,16	9,07	595,13	84,28	1,95	0,23	230,35
115-11	3880,76	220,92	1297,60	230,04	9,12	644,18	91,45	2,01	0,24	230,24
ponte_M	3900,00	220,93	1306,39	230,02	9,09	653,26	89,48	2,00	0,24	230,23
ponte_V	3910,00	220,93	1305,24	229,95	9,02	646,89	89,48	2,02	0,24	230,16
116	3926,17	220,92	1295,95	229,93	9,01	636,73	88,14	2,04	0,24	230,14
117	4008,45	220,97	1226,85	229,80	8,83	510,87	78,09	2,40	0,30	230,09
118	4115,59	220,90	1081,17	229,82	8,92	531,05	77,73	2,04	0,25	230,03
119-10	4212,88	220,92	935,97	229,69	8,77	380,74	55,42	2,46	0,30	230,00
120	4330,17	221,12	897,96	229,57	8,45	346,71	50,58	2,59	0,32	229,91
121	4436,55	220,96	863,96	229,51	8,55	377,17	60,49	2,29	0,29	229,78
122	4551,05	221,05	857,09	229,33	8,28	339,62	54,91	2,52	0,32	229,65
123-9	4650,87	221,24	796,41	229,24	8,00	315,97	45,50	2,52	0,31	229,56
124	4734,58	221,40	838,57	229,20	7,80	393,79	60,60	2,13	0,27	229,43
125	4828,18	221,41	822,92	229,20	7,79	446,65	67,99	1,84	0,23	229,37
126	4919,16	221,33	702,36	229,20	7,87	394,91	57,92	1,78	0,22	229,36
127	5012,28	221,29	719,07	229,16	7,87	398,83	59,59	1,80	0,22	229,33
128	5112,00	221,44	746,90	228,99	7,55	331,67	49,49	2,25	0,28	229,25
129-8	5233,04	221,53	813,12	229,13	7,60	723,24	104,57	1,12	0,14	229,19
130	5314,09	220,95	756,57	229,08	8,13	546,42	75,23	1,38	0,16	229,18
131	5408,69	220,45	720,95	229,01	8,56	396,34	61,00	1,82	0,23	229,18
132	5518,16	220,14	631,81	229,01	8,87	372,17	54,31	1,70	0,21	229,16
133-7	5595,12	219,57	578,54	229,00	9,43	335,65	45,17	1,72	0,20	229,15
134	5670,29	219,80	508,33	229,02	9,22	440,20	60,78	1,15	0,14	229,09
135	5766,81	219,78	460,34	229,02	9,24	379,98	48,54	1,21	0,14	229,09
136	5862,75	219,82	448,97	229,02	9,20	444,96	55,26	1,01	0,11	229,07
137	5948,65	219,92	498,12	229,00	9,08	505,83	63,67	0,98	0,11	229,05
138	6035,51	219,78	706,47	228,82	9,04	414,10	56,04	1,71	0,20	228,97
139-6	6117,24	219,81	712,68	228,77	8,96	395,17	55,12	1,80	0,22	228,94
140	6192,08	219,77	875,17	228,60	8,83	447,47	66,00	1,96	0,24	228,79
141	6267,15	219,77	1252,32	228,04	8,27	390,75	58,47	3,20	0,40	228,56
142-5	6345,22	219,76	1896,09	227,63	7,87	673,56	95,64	2,82	0,34	228,03
144-4	6383,90	219,67	1895,90	227,53	7,86	715,97	107,51	2,65	0,33	227,89
145	6396,77	219,67	1895,84	227,20	7,53	716,31	112,27	2,65	0,33	227,56
146	6492,63	219,77	1679,30	227,08	7,31	597,03	101,45	2,81	0,37	227,48
147	6647,82	219,84	1455,67	226,84	7,00	481,37	79,59	3,02	0,39	227,30
148-3	6811,72	219,95	1315,26	226,72	6,77	524,86	95,29	2,51	0,34	227,04
149	6975,11	219,94	1046,67	226,63	6,69	459,25	82,07	2,28	0,31	226,90
150-2	7080,77	219,93	894,55	226,36	6,43	298,62	59,98	3,00	0,43	226,82
151	7194,82	220,02	922,91	226,03	6,01	292,89	55,87	3,15	0,44	226,54
152-1	7304,23	220,06	1447,30	225,51	5,45	482,88	98,94	3,00	0,43	225,97
153	7340,96	220,06	1631,55	225,24	5,18	482,06	104,71	3,38	0,50	225,82
interp	7420,00	219,87	1409,29	224,89	5,02	352,16	79,93	4,00	0,61	225,71

ID Sez.	Progr. (m)	Fondo (m s.m.)	Q (m ³ /s)	P.L. (m s.m.)	h (m)	A (m ²)	b (m)	v (m/s)	Fr (-)	H (m s.m.)
154	7454,01	219,79	1384,57	224,49	4,70	283,74	69,26	4,88	0,77	225,70
155	7565,22	219,59	277,05	224,46	4,87	301,02	75,93	0,92	0,15	224,50

Tabella 5 - Risultati della simulazione SIM3.2 lungo l'alveo inciso del torrente Chiusella (valori massimi di inviluppo di piena).

A monte del viadotto Chiusella il franco di sicurezza rispetto alla quota minima di intradosso di progetto (231,68 m s.m.) per l'evento di piena di riferimento duecentennale sul Chiusella e residuo sul Ribes (simulazione SIM3.1) risulta pari a:

$$231,68 - 230,41 = 1,27 \text{ m.}$$

Il franco di sicurezza residuo nell'ipotesi catastrofica di considerare la concomitanza dell'evento duecentennale sul Chiusella e dell'evento duecentennale sul nodo Dora Baltea/Ribes (simulazione SIM3.2) risulta pari a:

$$231,68 - 231,10 = 0,58 \text{ m.}$$

Gli idrogrammi di portata defluenti sotto il viadotto sono rappresentati nella Figura 40, ottenuti con il modello numerico sommando i due contributi determinati con il modello monodimensionale MIKE 11 e bidimensionale MIKE 21: le portate al colmo risultano pari a circa 977 m³/s con lo scenario SIM3.1 e pari a circa 1193 m³/s con lo scenario SIM3.2.. Alle portate di piena in ingresso nel Chiusella si sommano infatti i deflussi di esondazione del rio Ribes che oltrepassano lo svincolo di Pavone.

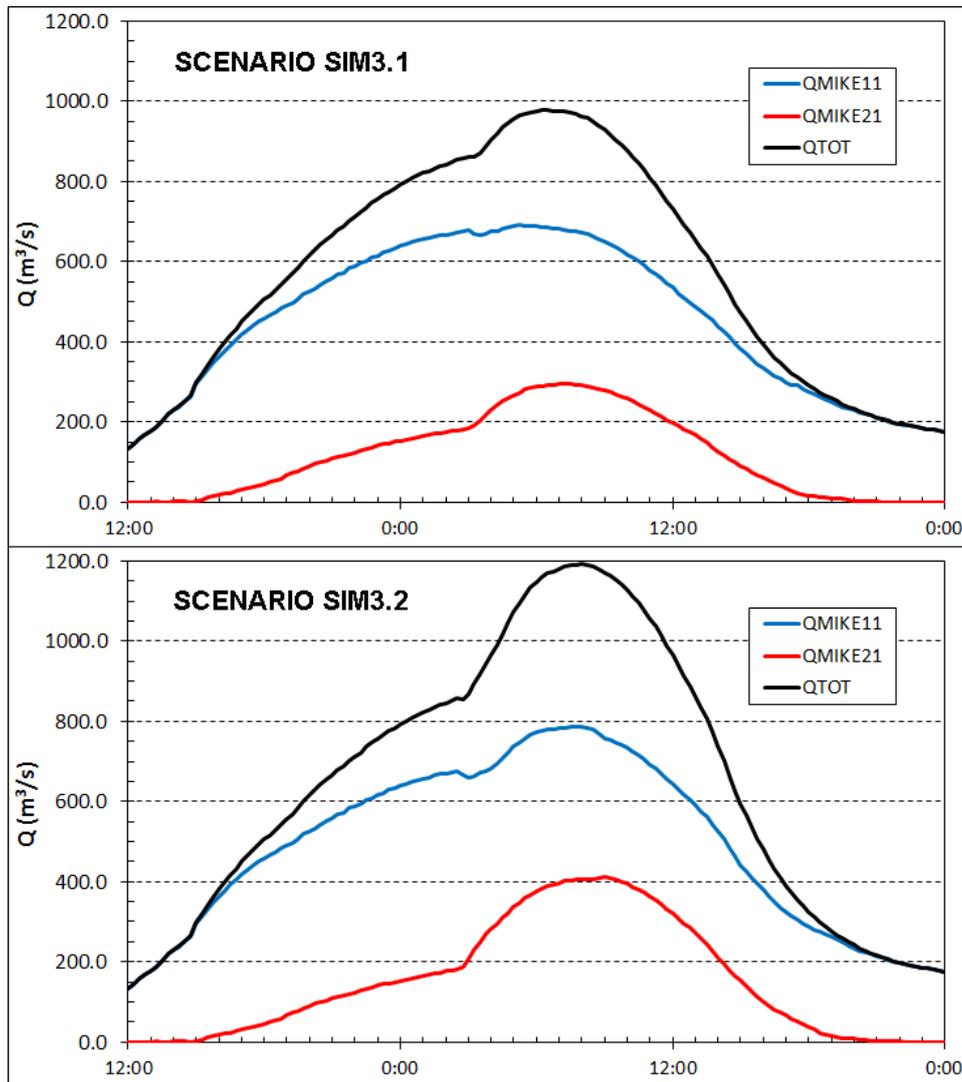


Figura 40 - Idrogrammi di portata defluenti sotto il viadotto Chiusella.

Nella Figura 41 sono rappresentati i profili delle massime quote di pelo libero e delle massime velocità di deflusso calcolate lungo la sezione G-H a monte del viadotto Chiusella.

In tutti gli scenari, anche quello più cautelativo di concomitanza dei due eventi duecentennali sul Chiusella e sul Ribes, il terrazzamento presente in sponda destra non risulta sormontato e presenta un franco di sicurezza elevato: per questo motivo è stato possibile, a parità di condizioni di deflusso, ridurre la luce del viadotto avanzando la posizione della spalla destra (direzione Torino).

Pertanto la luce di progetto del nuovo viadotto Chiusella è di 284 m.

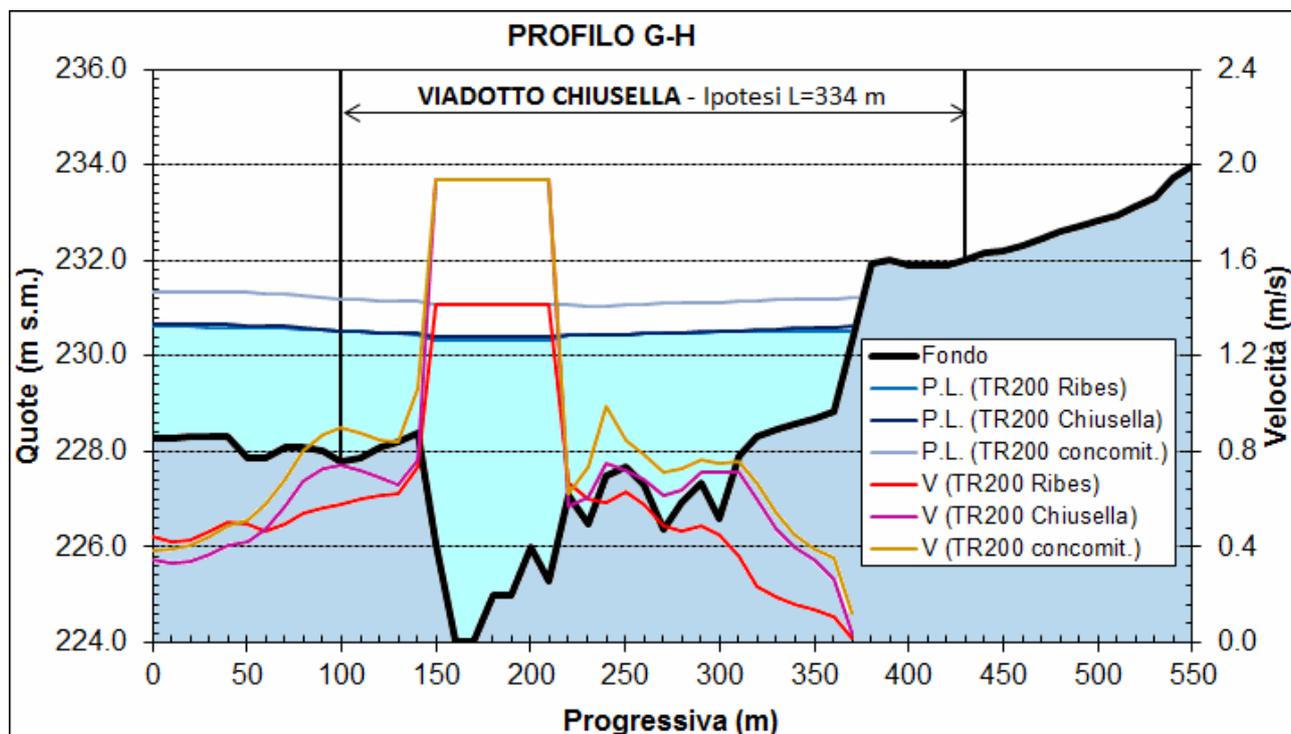


Figura 41 - Sezione G-H a monte del viadotto Chiusella: massime quote di pelo libero e massime velocità di deflusso calcolate con il modello 2D nei diversi scenari considerati.

4. ANALISI IDRODINAMICA/TRATTO A MONTE DI IVREA

4.1 Premessa

L'autostrada A5 in questo tratto attraversa l'ampia area di esondazione della Dora Baltea a monte della strettoia del Ponte Vecchio di Ivrea.

In destra idrografica poco a monte dell'argine di Banchette-Salerano che si intesta sul rilevato autostradale, si trova l'incile di Fiorano, attualmente già nella configurazione definitiva così come verificata dalle analisi idrauliche dello "Studio di fattibilità della sistemazione idraulica" dell'Autorità di Bacino del Po già citato (Stralcio nodo idraulico di Ivrea, 2002 - scenario C) e dalle successive analisi su modello fisico eseguite dalla Provincia di Torino ("Modello fisico finalizzato alla definizione delle condizioni di sfioro del fiume Dora Baltea nel paleoalveo del rio Ribes a monte dell'abitato di Ivrea-2005").

L'assetto dei livelli di progetto a monte dell'incile di Fiorano e le conseguenti quote di riferimento per la sicurezza idraulica del nuovo viadotto e del rilevato autostradale sono stati desunti, in sede di progetto preliminare, dai risultati dello studio su modello fisico sopra citato, dal quale sono derivati i livelli e le portate di progetto sul nodo idraulico approvati nell'ambito della riunione del Comitato per il coordinamento degli interventi del nodo idraulico di Ivrea tenutasi il 20/09/2005, che costituisce il riferimento per tutte le successive attività di progettazione idraulica.

Per gli approfondimenti richiesti nella fase di progettazione definitiva è stato invece necessario eseguire analisi numeriche integrative, mediante un modello bidimensionale calibrato sui dati di livello e portata prodotti dal

modello fisico, finalizzate alla verifica dei rivestimenti protettivi dei rilevati, degli attraversamenti secondari (adeguatezza delle sezioni e dimensionamento di eventuali opere antiersive) e dei campi di flusso nell'intorno delle pile del viadotto Fiorano.

È stato in particolare messo a punto ed applicato un modello numerico bidimensionale basato sul codice di calcolo MIKE Flood del DHI_{Water Environment Health}, allestito partendo dalla precedente applicazione svolta a supporto dello studio di fattibilità dell'Autorità di Bacino del Po (2001) e calibrata sulle tracce di piena ante revisione altimetrica operata da ARPA e Provincia di Torino nel 2005. Il modello numerico è stato aggiornato con la batimetria derivante dal rilievo LIDAR 2008 precedentemente citato, è stato integrato con il dettaglio delle opere autostradali in progetto ed è stato ricalibrato sui dati risultanti dalle simulazioni con modello fisico. Successivamente è stata eseguita la simulazione con l'evento di piena di riferimento (portata entrante nel settore di studio pari a 2925 m³/s, configurazione definitiva degli argini come da "scenario c"), determinando in dettaglio i parametri idraulici locali necessari per le verifiche sopra indicate.

L'analisi modellistica è stata attuata per valutare in dettaglio le velocità massime di deflusso in corrispondenza del rilevato che si verificano non tanto nella fase di colmo della piena quanto piuttosto nella fase transitoria di massimo gradiente idrometrico corrispondente all'arrivo dell'onda di piena sul rilevato.

4.2 Descrizione dei risultati delle analisi pregresse condotte mediante modello fisico

A seguito dello studio su modello fisico sopra citato, ATIVA ha incaricato il CUDAM di Trento dell'effettuazione di specifiche prove finalizzate a verificare gli effetti sull'assetto idrodinamico della realizzazione di un viadotto in corrispondenza dell'incile di Fiorano, ipotizzando diverse luci di deflusso (da 390 m a 510 m).

Da tale studio sperimentale sono derivati i risultati sintetizzati nel seguito.

Si è fatto riferimento allo "scenario C" di progetto, assunto dagli enti competenti come condizione di riferimento per la definizione degli interventi di protezione idraulica.

La Figura 42 riporta la delimitazione del modello fisico sul contesto territoriale e idrografico dell'incile di Fiorano con gli interventi di arginatura dello scenario C.

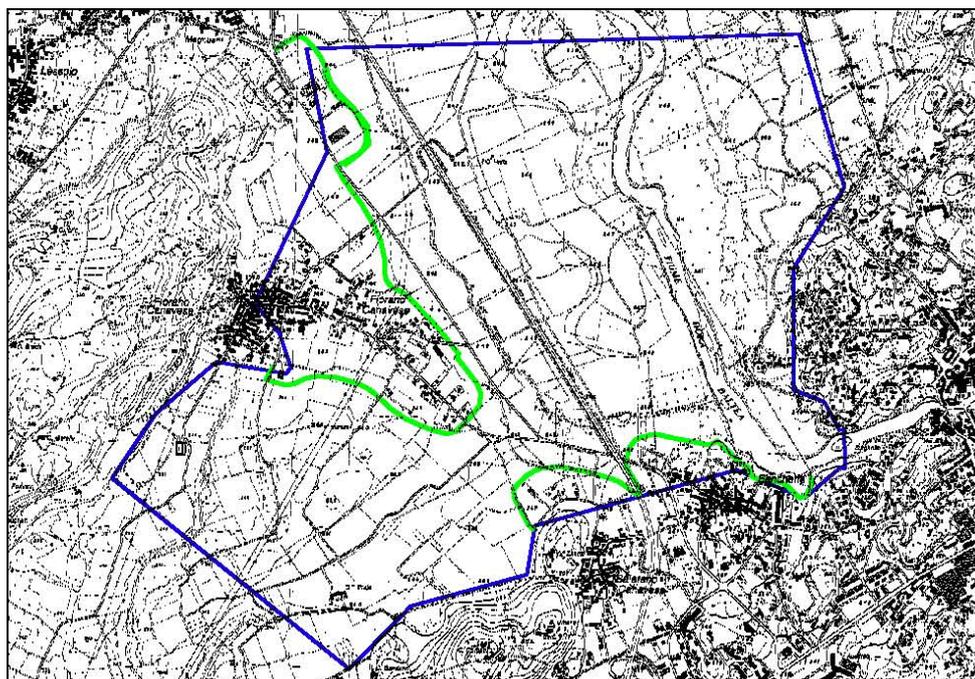


Figura 42 - Tracciato autostradale, delimitazione del modello fisico e arginature come da scenario C (da studio CUDAM - Novembre 2005).

Il modello fisico è stato realizzato in scale distorte: scala 1:75 per le dimensioni orizzontali e 1:37,5 per le dimensioni verticali, a cui conseguono, con l'ipotesi di conservazione del n. di Froude, le scale 1:17.223 per le portate, 1:6,12 per le velocità e 1:0,77 per le scabrezze.

Il modello rappresenta il tratto autostradale compreso circa tra le progressive 41+096 km e 43+100 km.

Sono state considerate le situazioni sotto indicate:

- configurazione di breve termine con arginature come da scenario c dell'AdBPo;
- configurazione di lungo termine con arginature come da scenario c dell'AdBPo.

La configurazione di breve termine riporta l'assetto attuale del tratto autostradale, mentre quella di lungo termine ne rappresenta la situazione di progetto, con sovrizzo del profilo in rilevato e realizzazione del viadotto, che è stato verificato con diverse luci di deflusso al fine di valutarne l'eventuale impatto rispetto alle condizioni di deflusso e, quindi, ottimizzarne la luce complessiva.

4.2.1 Configurazione di breve termine

La Tabella 6 e la Figura 43, tratte dallo studio CUDAM, riportano i dati idraulici di confronto, relativi all'evento 2000, corrispondente all'evento duecentennale di progetto, tra la configurazione senza arginature (evento di taratura) e la configurazione di breve termine con argini come da scenario c.

		MODELLO FISICO evento 2000	MODELLO FISICO evento 2000 con argini
Portata in ingresso	(m ³ /s)	2.925	2.925
Portata in uscita verso Ponte Vecchio	(m ³ /s)	1.610	1.660

Livello all'Isola dei Conigli ²	(m s.l.m.)	245,60	246,05
Portata in uscita a Banchette-Salerano	(m ³ /s)	403	0,00
Portata in uscita sul Ribes	(m ³ /s)	912	1.265

Tabella 6 - Confronto fra risultati del modello fisico per l'evento di taratura e per l'evento 2000 nella configurazione con argini (scenario c).

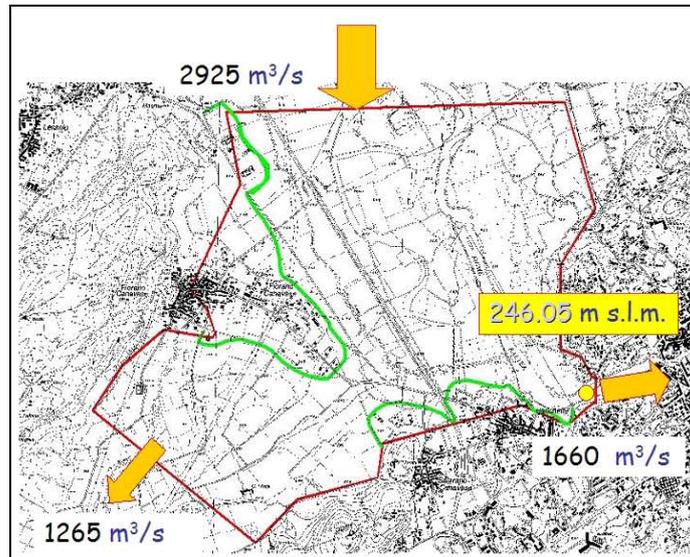


Figura 43 - Configurazione delle portate per lo scenario c nella configurazione di breve termine.

4.2.2 Configurazione di lungo termine

La configurazione di lungo termine riguarda l'assetto di progetto dell'autostrada (sopraelevazione profilo del rilevato e viadotto di Fiorano), verificato sia con l'evento 2000 che con l'evento cinquecentennale.

Entrambi gli eventi sono stati simulati considerando 4 ampiezze del viadotto, relative rispettivamente alla luce di riferimento iniziale a scavalco della fascia A (510 m) e a 3 soluzioni che prevedono la riduzione della stessa rispettivamente del 25%, 50% e 75%.

Nella situazione di riferimento con luce di 510 m le portate e i tiranti idrici sono pressoché gli stessi dello scenario di breve termine (con l'assetto attuale dell'autostrada), come riportato nella Tabella 6 e nella Figura 43. In questa situazione il livello al colmo dell'evento del 2000 in corrispondenza del viadotto in progetto raggiunge la quota di:

$$H_{MAX} = 246,00 \text{ m s.m.}$$

Nell'intero tratto di tracciato autostradale simulato a monte del viadotto (circa 2 km) il pelo libero subisce un incremento graduale di circa 10 cm.

Le simulazioni con luce parzializzata³ del 25%, 50% e 75% producono gli effetti sulla portata defluente verso Ponte Vecchio e sulle quote idriche massime sotto al viadotto riportati nella Figura 44 e nella Figura 45.

² Condizione di valle del modelli fisico (il livello nella sezione di valle del modello fisico è ottenuto da una simulazione numerica a sua volta riferita al modello fisico realizzato dal Politecnico di Torino per lo studio sperimentale della scala di deflusso nella sezione del Ponte Vecchio di Ivrea).

Si evidenzia come fino a un restringimento del 25%, della luce rispetto all'ipotesi di riferimento di 510 m, non si rilevi alcun effetto peggiorativo sul livello e sulla portata defluente verso il Ponte Vecchio.



Figura 44 - Scenario c di lungo termine/evento 2000: andamento della portata verso Ponte Vecchio per chiusure progressive della luce del viadotto.

Pertanto, per ragioni idrauliche, la luce del ponte potrebbe essere ridotta fino a 383 m circa senza provocare alcuna variazione sulle condizioni di deflusso verificate per lo stato attuale (con tracimazione del rilevato autostradale); progettualmente si è ritenuto però opportuno considerare una luce di 490 m, compatibile con i limiti della fascia A.

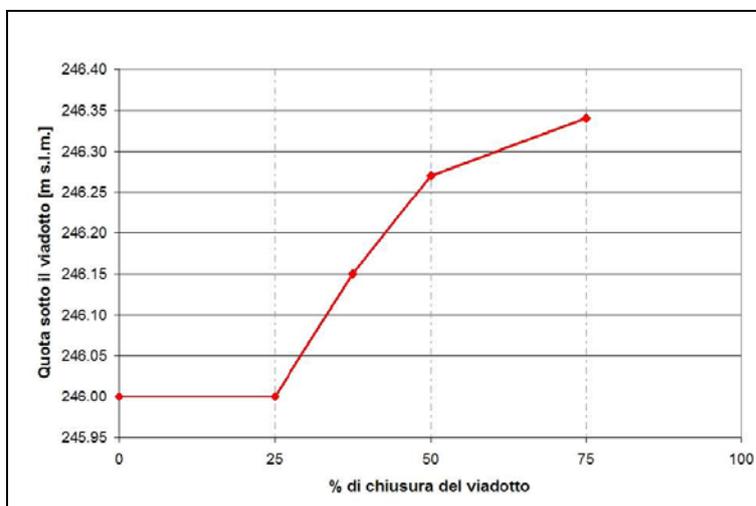


Figura 45 - Scenario c di lungo termine/evento 2000: andamento dei tiranti nei pressi del viadotto per chiusure progressive della luce del viadotto.

³ La parzializzazione della luce è stata eseguita nel modello simmetricamente sui due lati.

4.3 Approccio metodologico seguito per l'applicazione del modello

Per la messa a punto del modello idrodinamico è stato impiegato il codice di calcolo **MIKE Flood** del DHI Water Environment Health, che combina dinamicamente l'approccio monodimensionale e quello bidimensionale, già illustrato nel capitolo 3 per l'analisi idraulica del nodo di confluenza Ribes-Chiusella.

Il modello pregresso applicato a supporto dello studio di fattibilità dell'Autorità di Bacino del fiume Po (2001) è servito come base di partenza per la realizzazione del nuovo modello impiegato nel presente studio, ma nel corso del lavoro è stato via via aggiornato e migliorato, apportando ad esso varie modifiche sia strutturali, che relative alle condizioni al contorno e ai parametri di taratura.

Anche in questo caso la geometria del modello bidimensionale è stata aggiornata utilizzando il rilievo LIDAR 2008, modello digitale del terreno (DTM) fornito dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (M.A.T.T.M.) nell'ambito del Piano Ordinario di Telerilevamento Ambientale (POT-A), in modo da disporre della geometria planoaltimetrica esatta di tutte le arginature realizzate nell'ultimo decennio.

Rispetto al modello pregresso dell'AdBPo si è deciso inoltre di modellare con approccio monodimensionale (MIKE 11) l'intero tratto di Dora Baltea compreso nell'area di indagine attraverso l'inserimento delle sezioni trasversali di rilievo dell'alveo inciso e delle geometrie dei ponti presenti, in particolare il ponte vecchio di Ivrea.

L'alveo della Dora Baltea è stato poi collegato dinamicamente alle adiacenti aree golenali modellate mediante il codice di calcolo MIKE 21 con approccio bidimensionale su griglia di calcolo a celle quadrate di lato 10x10 m, sia in sponda destra che in sponda sinistra, mediante speciali funzioni di MIKE Flood, nel rispetto delle reali quote spondali.

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

- modello MIKE 21 bidimensionale per la rappresentazione delle aree golenali della Dora Baltea e del rio Ribes, compreso il rilevato autostradale oggetto del presente studio;
- modello MIKE 11 monodimensionale dell'intero tratto di Dora Baltea caratterizzato dalle sezioni trasversali dell'alveo inciso rilevate nel corso dello studio dell'AdBPo (2001);
- ulteriori semplici modelli MIKE 11 per la rappresentazione di tutti i ponticelli, tombini ecc. presenti lungo il rilevato autostradale;
- connessione dinamica dei modelli MIKE 21 e MIKE 11.

Per la taratura del modello si è cercato di riprodurre al meglio le condizioni di deflusso (livelli e portate) simulate con il modello fisico e illustrate in sintesi nella Tabella 6 (evento 2000 con argini) e nella Figura 43.

Come input idrologico è stato utilizzato l'idrogramma di piena di assegnato tempo di ritorno in ingresso nella Dora Baltea a monte di Ivrea con portata al colmo 2925 m³/s rappresentato nella Figura 5.

4.4 Messa a punto del modello idrodinamico monodimensionale

La prima attività condotta ai fini della messa a punto del modello MIKE Flood è stata la realizzazione del modello monodimensionale dell'alveo inciso del tratto di Dora Baltea a monte di Ivrea utilizzando il codice di calcolo MIKE 11 HD (modulo idrodinamico), del quale viene fornita una sintetica descrizione nell'allegato 1.

Il modello è stato realizzato a partire dal modello quasi-2D messo a punto nell'ambito dello studio pregresso dell'AdBPo più volte citato⁴ eliminando tutti i rami golenali e limitando le sezioni trasversali caratterizzanti il ramo principale della Dora Baltea alla larghezza del solo alveo inciso all'interno della coperta dal modello bidimensionale.

Il tratto di alveo della Dora Baltea è stato schematizzato con 32 sezioni trasversali di rilievo. In corrispondenza del ponte vecchio di Ivrea è stata inserita una struttura tipo "culvert" che riproduce fedelmente la scala di deflusso sperimentale determinata con il modello fisico realizzato dal Politecnico di Torino e in particolare i valori di livello/portata definiti come condizioni al contorno di valle del modello fisico dell'Università di Trento.

Una rappresentazione grafica dell'intero modello MIKE 11 è riportata nella Figura 46, nella quale in rosso sono riportate le sezioni d'alveo utilizzate nella modellazione ed è evidenziato il contorno del modello bidimensionale. Si osservi come le sezioni d'alveo siano limitate al solo alveo inciso all'interno dell'area di applicazione del modello 2D, mentre siano estese sull'intera area golenale nel tratto a monte. Sono infine evidenti i tombini di attraversamento del rilevato autostradale in tutto il tratto di interesse, caratterizzati da due sezioni di rilievo monte/valle e da una struttura tipo "culvert" che rappresenta la luce libera del manufatto.

Nella Tabella 7 è riportato l'elenco delle sezioni d'alveo relative al solo tratto di Dora Baltea.

⁴ Autorità di Bacino del Fiume Po - "Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del fiume Dora Baltea nel tratto da Aymavilles alla confluenza in Po" - HYDRODATA, 2001-2003.

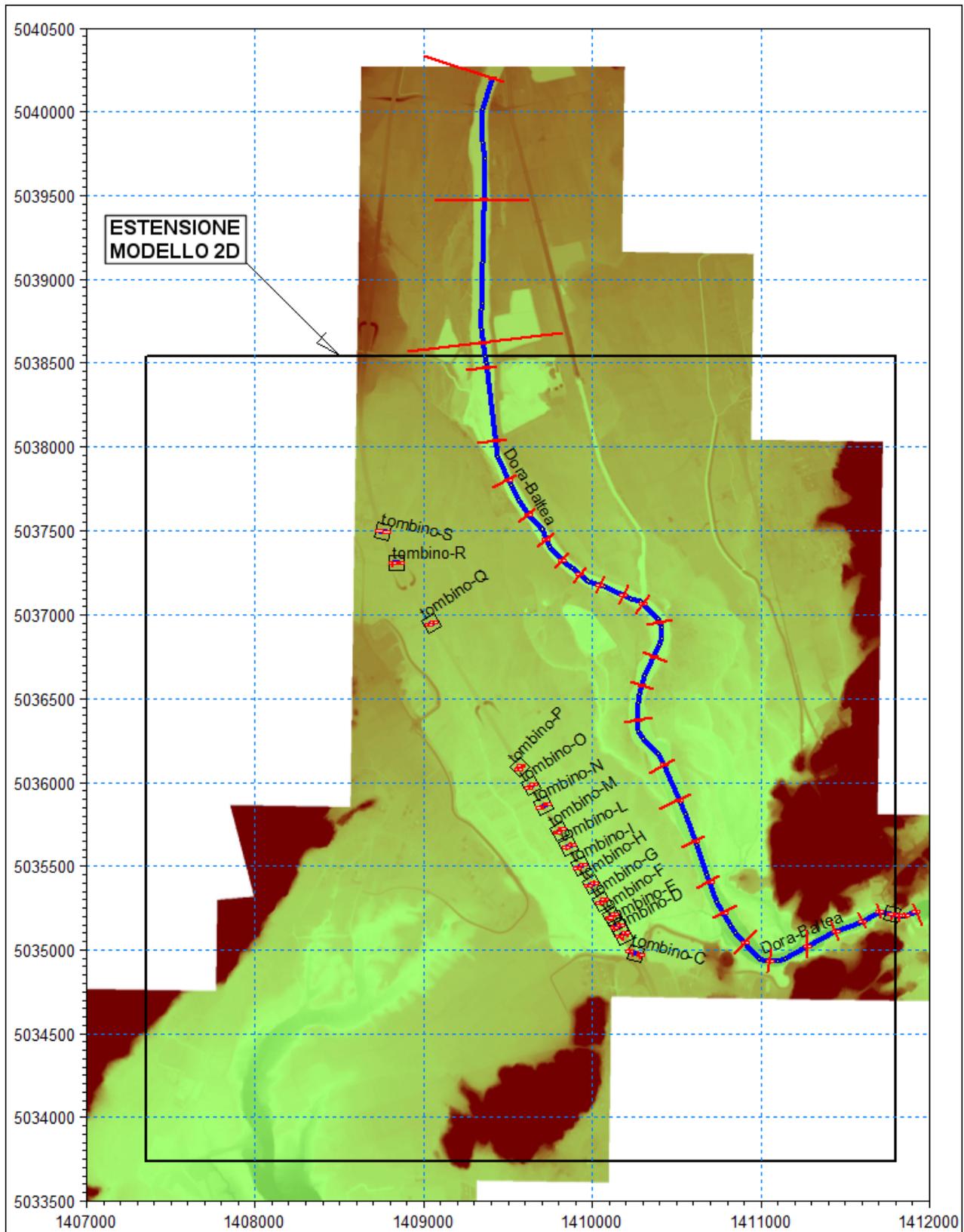


Figura 46 - Rappresentazione planimetrica del modello MIKE 11 a monte di Ivrea.

Progr. (m)	Sezioni rilievo	Progr. (m)	Sezioni rilievo	Progr. (m)	Sezioni rilievo
s41	0,00	8	3429,86	19	5812,06
s40	737,00	9	3561,19	20	6007,75
s39-1	1591,00	10	3710,84	s37-4	6250,59
1	1740,00	11	3925,82	22	6448,11
s39	2187,00	12	4115,51	23	6617,71
2	2431,84	13	4319,37	24	6732,60
3	2672,98	s38	4641,87	m37-3	6803,00
4	2853,70	15	4873,55	26	6817,00
5	3009,96	16	5135,04	27	6861,53
6	3145,89	17	5392,16	28	6898,80
7	3281,03	s37-5	5591,00	m37-1	6962,00

Tabella 7 - Elenco delle sezioni di rilievo della Dora Baltea, con indicazione della progressiva longitudinale.

Il ponte vecchio di Ivrea e i tombini autostradali sono stati rappresentati nell'ambito del modello con strutture tipo "culvert" di forma geometrica variabile secondo una relazione quota-larghezza che tiene conto della luce libera al deflusso. Tale assunzione risulta valida in quanto il comportamento della corrente è regolato principalmente dal restringimento della sezione in presenza del ponte/tombino e dalle perdite di carico concentrate dovute allo stesso, più che da quelle distribuite lungo la struttura.

Il ponte vecchio di Ivrea è stato in particolare inserito alla progressiva 6810 m tra le sezioni m73-3 e 26.

Nella Tabella 8 è riportato infine l'elenco dei tombini inseriti nel modello con le rispettive progressive autostradali di riferimento, la denominazione utilizzata nel modello (vedi Figura 46) e la caratterizzazione geometrica relativa allo stato attuale e a quello previsto nel progetto definitivo.

ID TOMBINO	PROGRESSIVA AUTOSTRADALE	SEZIONE ATTUALE BxH	SEZIONE PROGETTO BxH
C	41+351	10,50x4,30	sostituito con viadotto
D	41+480	5,00x5,11	sostituito con viadotto
E	41+546	5,00x6,20	sostituito con viadotto
F	41+609	4,00x3,85	sostituito con viadotto
G	41+720	5,00x5,11	sostituito con viadotto
H	41+839	4,00x3,40	sostituito con viadotto
I	41+964	4,00x2,97	sostituito con viadotto
L	42+102	4,00x2,83	5,00x5,50
M	42+206	4,00x2,43	5,00x5,50
N	42+385	4,00x2,15	5,00x5,50
O	42+526	4,00x1,75	5,00x5,50
P	42+656	4,00x2,20	5,00x5,50
Tp	42+950	non presente	10,00x5,50
Q	43+660	4,00x1,50	5,00x5,50
R	44+077	4,00x1,00	5,00x5,50
S	44+287	1,00x1,95	2,00x2,00

Tabella 8 - Elenco dei tombini autostradali, con indicazione della corrispondente progressiva.

Con il solo modello monodimensionale non sono state eseguite simulazioni di scenario per la scarsa capacità di portata dell'alveo inciso considerato. Sono state eseguite comunque alcune simulazioni di lavoro per testare le prestazioni del modello e verificare l'assenza di instabilità numeriche.

4.5 Costruzione della griglia di calcolo del modello numerico 2D

Per la messa a punto del modello MIKE Flood, dopo aver realizzato il modello monodimensionale dell'alveo inciso della Dora Baltea e i rami minori in corrispondenza dei tombini autostradali con il codice MIKE 11 HD, si è proceduto alla costruzione del modello bidimensionale delle aree golenali allagabili utilizzando il codice di calcolo MIKE 21 HD descritto nell'allegato 2.

Successivamente, utilizzando il codice MIKE Flood, si è proceduto all'accoppiamento dei due modelli (monodimensionale e bidimensionale) mediante collegamenti laterali distribuiti lungo le sponde incise della Dora Baltea e collegamenti "standard" per i rami minori.

Si è deciso inizialmente di adottare la stessa griglia di calcolo a maglia 10x10 m già impiegata nel modello pregresso dell'AdBPo. Successivamente tale griglia è stata sostituita con una nuova griglia più aggiornata ottenuta a partire dal rilievo DTM LIDAR 2008 rappresentato nella Figura 7.

La griglia di calcolo a maglia 10x10 m realizzata per il presente studio è costituita complessivamente da 480 righe x 444 colonne (213120 punti di calcolo).

Nella Figura 47 è riportata la batimetria (o geometria di input) complessiva del modello relativa alla situazione attuale. In grigio sono evidenziate le zone escluse dal calcolo (celle inattive) perché considerate sicuramente non allagabili (aree con quota maggiore di 260 m s.m.). In verde scuro sono evidenziate le aree più depresse (aree golenali) mentre in giallo e marrone chiaro sono distinguibili le aree in maggior rilievo. Nella figura, sovrapposte alla rappresentazione della batimetria, sono riportate le linee vettoriali rappresentanti i limiti della fascia B.

Si osservi come l'intero alveo inciso della Dora Baltea sia stato escluso dalla simulazione con il modello bidimensionale MIKE 21 perché il suo contributo al deflusso delle piene è già simulato con il modello monodimensionale MIKE 11 nell'ambito del codice MIKE Flood.

4.6 Parametri del modello 2D

Il modello di simulazione oltre alla descrizione geometrica e alle condizioni al contorno, descritte nel paragrafo successivo, ha bisogno di un'altra serie di parametri che sono: passo di tempo di integrazione del sistema, coefficienti di scabrezza e coefficiente di viscosità turbolenta ("eddy viscosity").

Come passo di tempo di integrazione è stato utilizzato un valore pari a 2 secondi.

La viscosità turbolenta, legata alla non uniforme distribuzione del campo delle velocità, viene simulata nel modello tramite il coefficiente di "eddy viscosity". Nel caso in esame al coefficiente di eddy viscosity è stato assegnato un valore costante pari a 2 m²/s sull'intera estensione del modello.

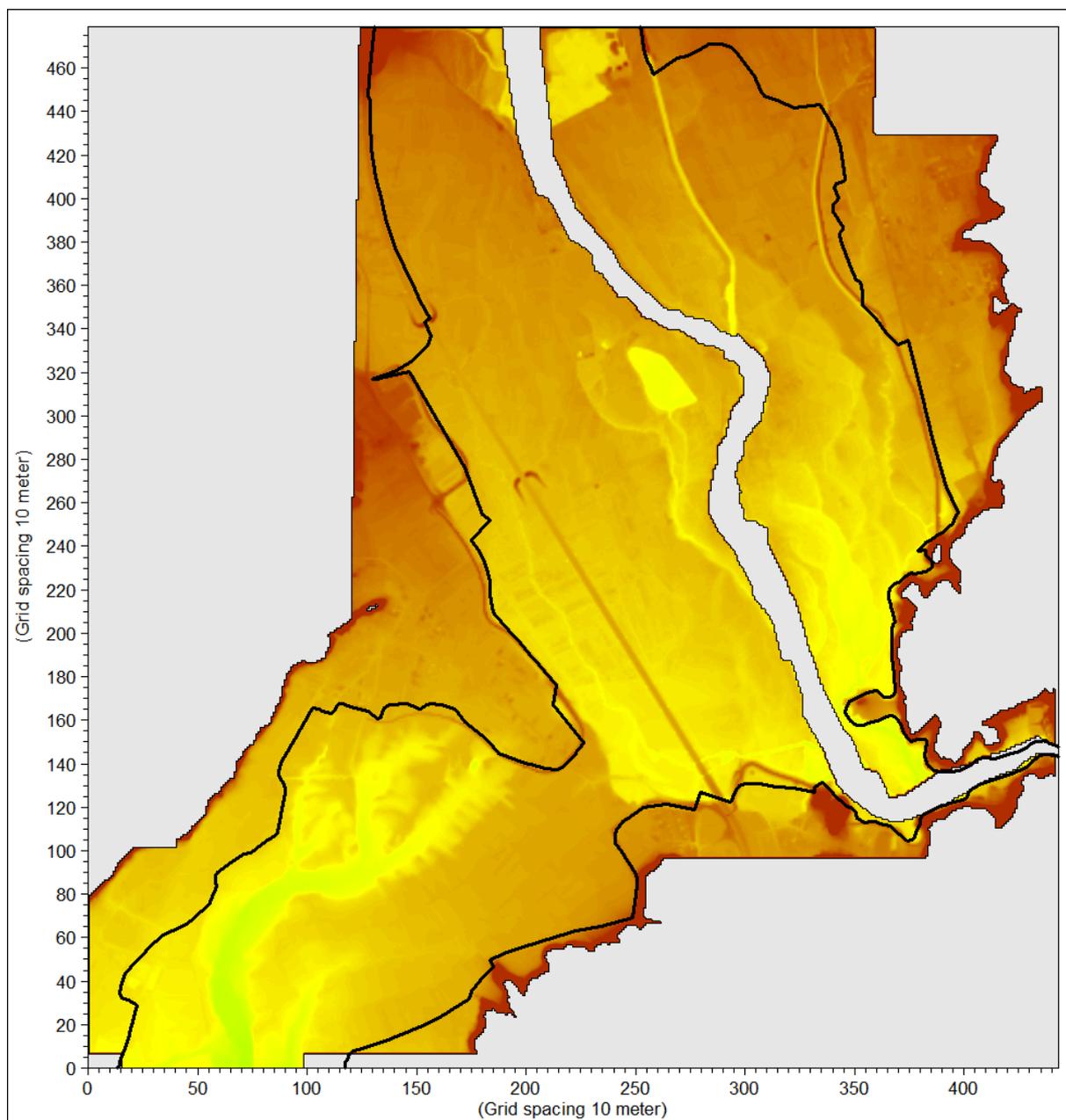


Figura 47 - Batimetria del modello 2D a maglia 10x10 m (situazione attuale).

La scabrezza rappresenta, all'interno delle equazioni del moto, il parametro che regola le perdite di energia distribuite, in primo luogo quelle per attrito sul fondo di scorrimento e sulle sponde dell'alveo attivo. Tale parametro è difficilmente valutabile con precisione ed è abitualmente utilizzato per tarare il modello.

Nel caso in esame sono stati adottati i coefficienti di scabrezza di Strickler rappresentati nella Figura 48, tratti dal modello pregresso dell'AdBPo, eccetto che per quelli assegnati nella zona a cavallo dell'incile di Fiorano.

Al fine di tarare il modello in modo da riprodurre al meglio le condizioni di deflusso definite con il modello fisico dell'Università di Trento, è stato infatti necessario imporre nella zona dell'incile di Fiorano un coefficiente di scabrezza di Strickler pari a $40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

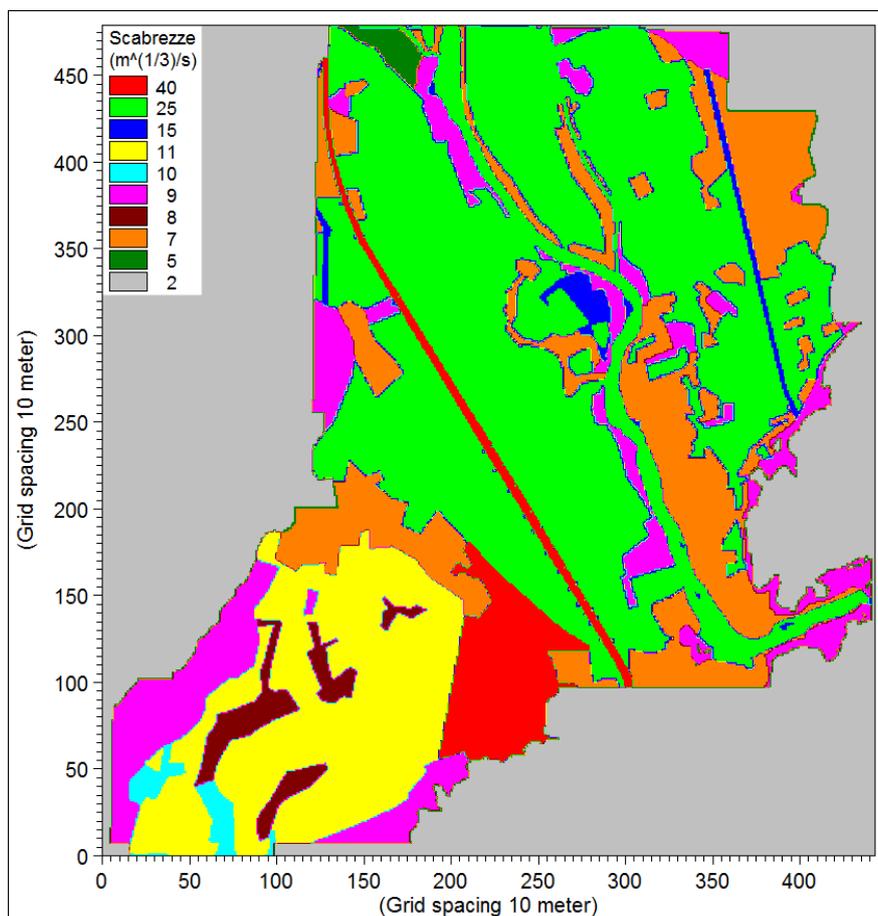


Figura 48 - Distribuzione areale dei coefficienti di scabrezza di Strickler nella situazione attuale al termine della fase di taratura del modello.

4.7 Condizioni al contorno del modello 2D

Al modello sono state assegnate le seguenti condizioni al contorno:

- condizione al contorno di monte sulla Dora Baltea (codice MIKE 11): idrogramma di portata in ingresso con portata al colmo 2925 m³/s (vedi Figura 5);
- condizione al contorno di valle sulla Dora Baltea (codice MIKE 11): scala di deflusso in condizioni critiche in corrispondenza della sezione a progr. 6962 m; questa condizione è del tutto influente sui risultati del modello nella zona di interesse per la presenza del ponte vecchio di Ivrea che disconnette idraulicamente il tratto d'alveo a monte di esso;
- condizione al contorno di valle sul Ribes (codice MIKE 21): livello idrico costante pari a 240,70 m s.m. imposto ad una distanza tale da non influenzare minimamente il deflusso sull'incile di Fiorano che rappresenta anch'esso una disconnessione idraulica per tutta l'area a monte di esso;
- condizioni al contorno "interne" di collegamento tra i due modelli MIKE 11 e MIKE 21: in corrispondenza di tutte le celle lungo le sponde destra e sinistra della Dora Baltea vengono applicate equazioni tipo "stramazzo a larga soglia" con quote di sfioro pari ai valori maggiori tra quelli delle celle del modello 2D e quelli corrispondenti delle quote di sponda delle sezioni d'alveo di MIKE 11, opportunamente interpolate.

4.8 Descrizione delle simulazioni e delle analisi idrauliche condotte con il modello 2D

Con il modello MIKE Flood sono state condotte le simulazioni dei seguenti scenari:

SIM1M: **scenario attuale** utilizzato sia per effettuare la **taratura** del modello che per ottenere una base dati di riferimento per la quantificazione degli effetti indotti dagli interventi in progetto;

SIM2M: **scenario di progetto** in cui si è previsto l'adeguamento in quota del rilevato autostradale, la realizzazione del nuovo viadotto, l'ampliamento dei tombini esistenti (vedi Tabella 8), la realizzazione di un nuovo tombino (denominato Tp), la demolizione di due sovrappassi e la realizzazione di uno nuovo.

Per entrambi gli scenari sono state utilizzate le stesse condizioni al contorno descritte nel paragrafo precedente.

I risultati delle simulazioni ottenuti con il modello bidimensionale sono illustrati nei capitoli successivi mediante l'ausilio di elaborati grafici esplicativi:

- aree di esondazione con rappresentazione delle altezze d'acqua e dei vettori velocità;
- profili longitudinali di corrente lungo l'alveo inciso della Dora Baltea.

4.9 Risultati dello scenario attuale - simulazione SIM1M

Nella Figura 49 è riportata la distribuzione calcolata con il modello bidimensionale MIKE 21 nella situazione attuale delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna verificatesi nel corso del transito del colmo dell'evento di piena di progetto: le tonalità di azzurro più scure evidenziano le aree di esondazione con tiranti idrici maggiori. Le aree interne all'alveo inciso della Dora Baltea non sono rappresentate perché, come sopra detto, il loro contributo al deflusso è stato già preso in conto nell'ambito del modello MIKE 11.

Nella Figura 50 è riportata la distribuzione areale delle massime velocità di deflusso raggiunte nel corso dell'evento di piena di progetto a prescindere dall'istante in cui si sono verificate.

Nella Figura 51 è infine rappresentata, alla stessa scala, la distribuzione delle massime quote di pelo libero raggiunte in corrispondenza al transito del colmo di piena dell'evento di progetto.

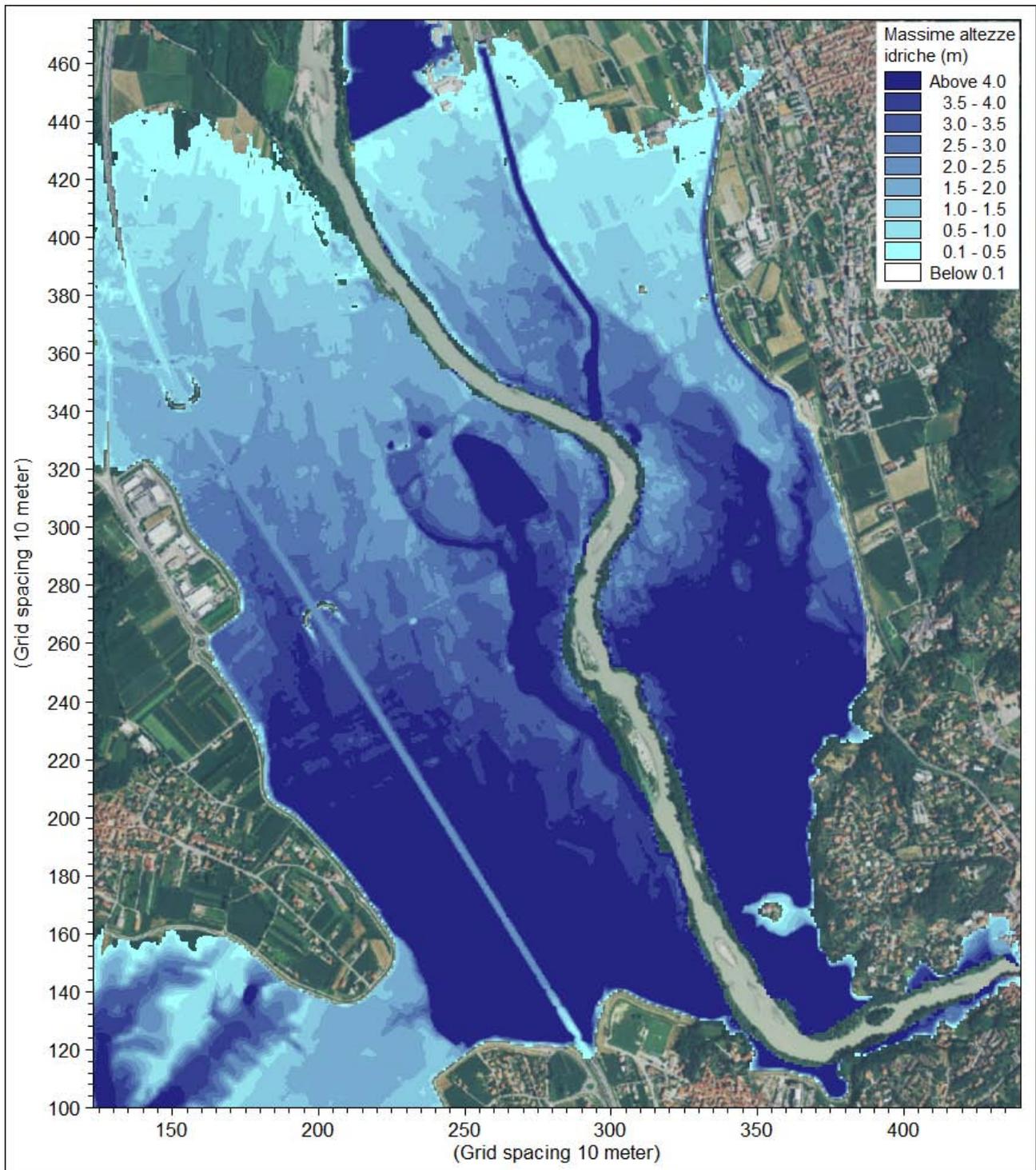


Figura 49 - Scenario attuale (SIM1M). Involuppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna.

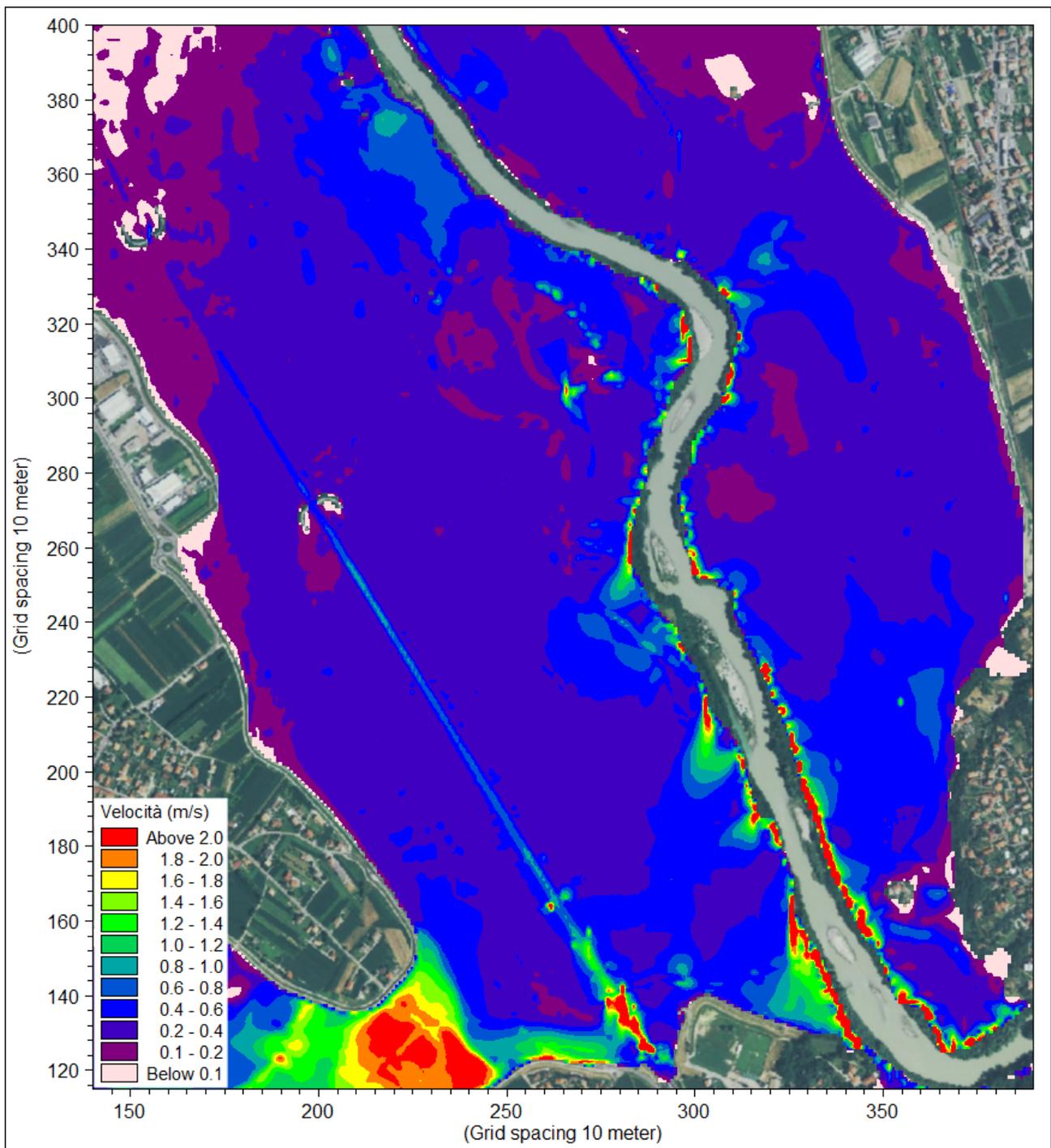


Figura 50 - Situazione attuale (SIM1M). Ingrandimento nella zona di interesse della distribuzione delle velocità massime di deflusso.

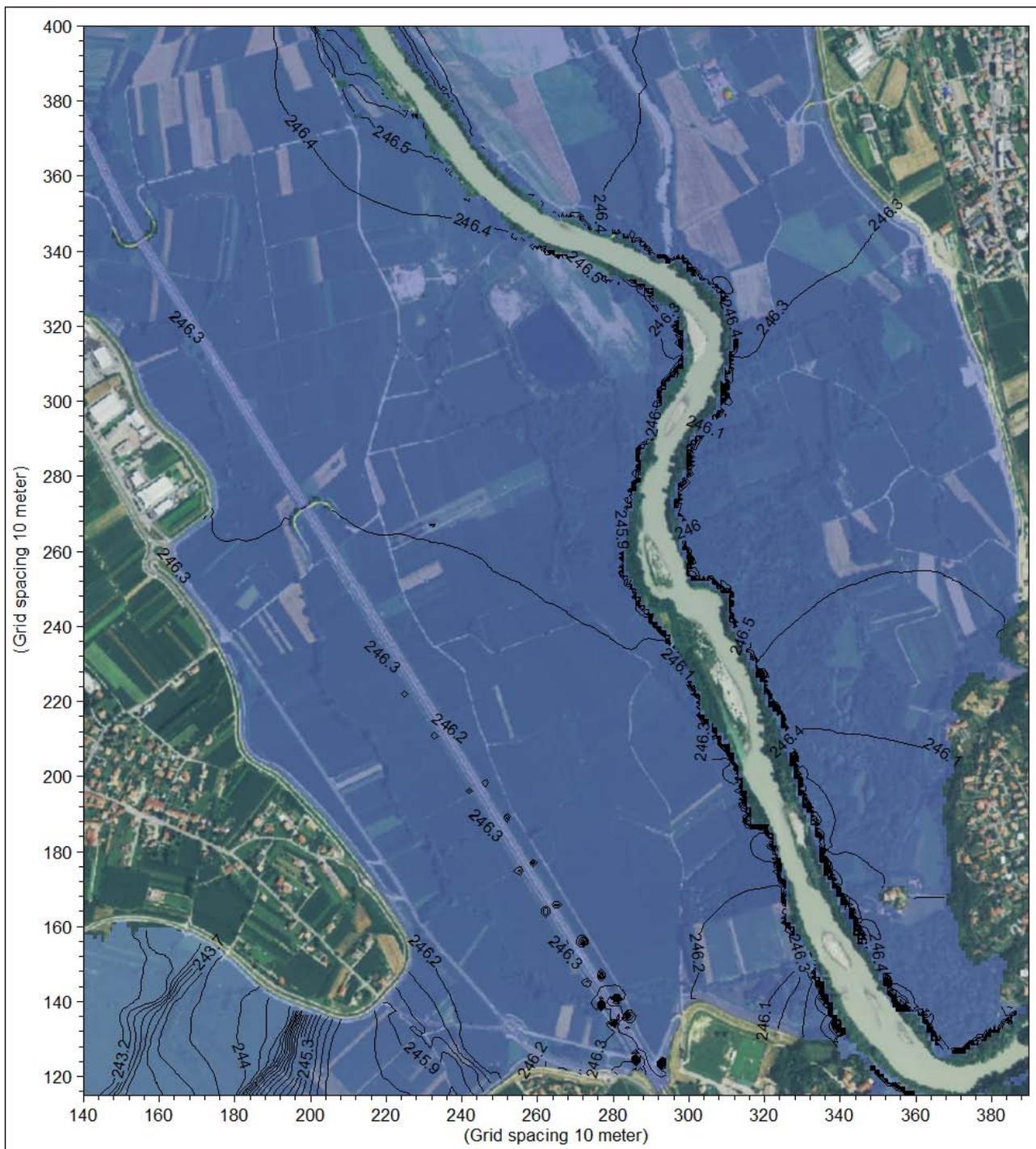


Figura 51 - Situazione attuale (SIM1M). Ingrandimento nella zona di interesse della distribuzione delle quote massime del pelo libero raggiunte nel corso del deflusso dell'evento di piena di progetto.

Nella Tabella 9, in corrispondenza delle sezioni trasversali d'alveo di rilievo lungo la Dora Baltea, sono elencati i seguenti parametri caratterizzanti i valori massimi di iniluppo del profilo di corrente dell'evento di piena di progetto, rappresentato graficamente nella Figura 52:

- ID Sez. = identificativo sezione di rilievo;

- Progr. = progressiva metrica lungo l'asta (m);
- Fondo = quota di fondo (m s.m.);
- Q = portata (m³/s);
- P.L. = quota di pelo libero (m s.m.);
- h = altezza d'acqua sul fondo (m);
- A = area della sezione liquida (m²);
- b = larghezza del pelo libero (m);
- v = velocità media della corrente (m/s);
- Fr = numero di Froude della corrente (-);
- H = carico idraulico totale (m s.m.).

ID Sez.	Progr. (m)	Fondo (m s.m.)	Q (m ³ /s)	P.L. (m s.m.)	h (m)	A (m ²)	b (m)	v (m/s)	Fr (-)	H (m s.m.)
s41	0,00	244,34	2925,00	251,17	6,83	631,99	122,10	4,63	0,65	252,27
s40	737,00	240,91	2924,58	249,07	8,16	728,10	120,68	4,02	0,52	249,90
s39-1	1591,00	240,59	2922,98	248,70	8,11	2014,01	904,87	1,45	0,31	248,81
1	1740,00	239,94	2922,88	248,32	8,38	970,63	180,43	3,01	0,41	248,78
s39	2187,00	237,99	2922,62	247,75	9,76	991,31	162,83	2,95	0,38	248,20
2	2431,84	237,93	2874,80	246,98	9,04	649,55	114,51	4,43	0,59	247,97
3	2672,98	237,71	2581,09	246,72	9,01	651,39	94,72	3,96	0,48	247,52
4	2853,70	237,43	2441,04	246,62	9,19	703,00	97,85	3,47	0,41	247,24
5	3009,96	237,25	2242,37	246,52	9,27	659,92	97,22	3,40	0,42	247,11
6	3145,89	237,02	2091,01	246,48	9,46	654,05	93,38	3,20	0,39	247,00
7	3281,03	236,74	1940,00	246,55	9,81	695,81	84,66	2,79	0,31	246,95
8	3429,86	236,53	1838,03	246,46	9,93	671,10	84,37	2,74	0,31	246,84
9	3561,19	236,28	1805,97	246,50	10,22	803,25	89,96	2,25	0,24	246,76
10	3710,84	236,15	1684,58	246,64	10,49	1264,75	140,38	1,33	0,14	246,73
11	3925,82	235,87	1644,87	246,58	10,71	969,04	104,36	1,70	0,18	246,73
12	4115,51	235,74	1624,86	246,52	10,78	786,31	101,06	2,07	0,24	246,73
13	4319,37	235,65	1584,50	246,64	10,99	1134,37	123,86	1,40	0,15	246,73
s38	4641,87	235,56	1417,10	246,67	11,11	1337,42	169,18	1,06	0,12	246,73
15	4873,55	235,32	1382,35	246,68	11,36	1452,78	160,95	0,95	0,10	246,73
16	5135,04	235,14	1233,03	246,66	11,52	1044,40	111,35	1,18	0,12	246,73
17	5392,16	234,89	1251,96	246,67	11,78	1120,13	110,89	1,12	0,11	246,73
s37-5	5591,00	234,63	1236,31	246,67	12,04	1674,76	154,94	0,74	0,07	246,69
19	5812,06	233,80	1836,59	246,56	12,76	1719,64	156,30	1,07	0,10	246,61
20	6007,75	232,61	2001,26	246,46	13,85	1286,22	110,24	1,56	0,15	246,59
s37-4	6250,59	232,16	1729,53	246,50	14,34	1497,18	163,10	1,16	0,12	246,56
22	6448,11	230,94	1725,16	246,45	15,51	1179,56	108,10	1,46	0,14	246,56
23	6617,71	229,33	1723,73	246,40	17,07	1370,42	105,40	1,26	0,11	246,48
24	6732,60	227,91	1723,71	246,36	18,45	1448,19	105,82	1,19	0,10	246,44
m37-3	6803,00	225,25	1723,69	246,34	21,09	1314,07	103,94	1,31	0,12	246,43
26	6817,00	225,25	1723,71	239,24	13,99	204,88	33,69	8,41	1,09	242,84

Tabella 9 - Risultati della simulazione SIM1M dell'evento di piena di progetto nella situazione attuale lungo l'alveo inciso della Dora Baltea (valori massimi di inviluppo di piena).

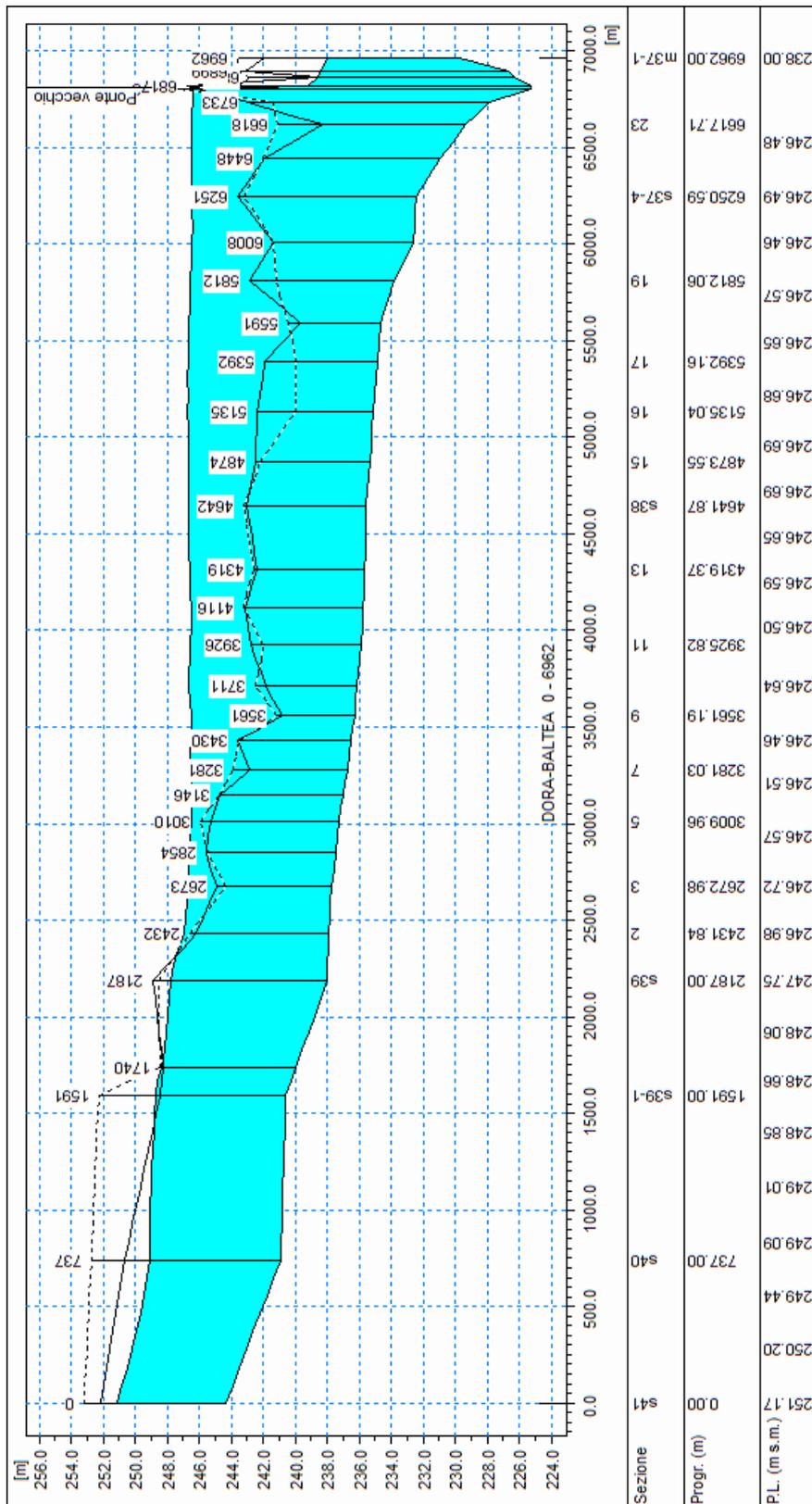


Figura 52 - Scenario attuale (SIM1M). Profilo longitudinale delle massime quote di pelo libero all'interno dell'alveo inciso della Dora Baltea.

Nella Tabella 10 è riportato il confronto tra i principali risultati del modello fisico e quelli ottenuti nel presente studio con il modello numerico: la corrispondenza tra i valori di portata e livello ottenuti si ritiene soddisfacente e a favore di sicurezza. Un migliore allineamento tra i due risultati sarebbe stato possibile soltanto incrementando il coefficiente di scabrezza di taratura dell'area dell'incile di Fiorano oltre al valore adottato al termine della fase di taratura del modello, pari a $40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Valori di scabrezza maggiori di quest'ultimo non sono stati ritenuti affidabili e fisicamente basati vista la tipologia di uso del suolo presente attualmente nella zona dell'incile, di tipo agricolo con coltura prevalente a mais.

		MODELLO FISICO	MODELLO NUMERICO
Portata max in ingresso	(m^3/s)	2.925	2.925
Portata max in uscita verso Ponte Vecchio	(m^3/s)	1.660	1724
P.L. max a monte autostrada	(m s.m.)	246,05	246,20
Portata max in uscita sul Ribes	(m^3/s)	1.265	1.216

Tabella 10 - Confronto fra i risultati del modello fisico e del modello numerico nello scenario attuale.

4.10 Risultati dello scenario di progetto - simulazione SIM2M

Per tenere conto degli interventi previsti sono state modificate le quote della batimetria del modello 2D al fine di rappresentare il rialzo del rilevato autostradale e la realizzazione del viadotto di Fiorano, in accordo agli elaborati di progetto; sono state inoltre eliminate le rampe di due sovrappassi esistenti che saranno dismessi e introdotte quelle di un nuovo sovrappasso in progetto. Nella Figura 53 è rappresentata la batimetria costruita per la simulazione dello scenario di progetto.

Per completare la messa a punto del modello MIKE Flood dello scenario di progetto sono state infine aggiornate le geometrie dei tombini di attraversamento autostradale, eliminando quelli che saranno dismessi ed introducendo quello di nuova realizzazione.

Nella Figura 54 è rappresentata la mappa dei coefficienti di scabrezza inseriti nel modello per la simulazione dello scenario di progetto: si differenzia da quella di taratura dello scenario attuale solo in corrispondenza degli interventi in progetto.

La simulazione numerica è stata successivamente condotta adottando le stesse condizioni al contorno e gli stessi parametri di input già impiegati nel caso dello scenario relativo alla situazione attuale.

Nella Figura 55 è riportata la distribuzione calcolata con il modello bidimensionale nella situazione di progetto delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna verificatesi nel corso del transito del colmo dell'evento di piena con TR=200 anni.

Nella Figura 56 è riportata la distribuzione areale delle massime velocità di deflusso raggiunte nel corso dello stesso evento di piena a prescindere dall'istante in cui si sono verificate.

Nella Figura 57 è infine rappresentata, alla stessa scala, la distribuzione delle massime quote di pelo libero raggiunte nel corso dell'evento.

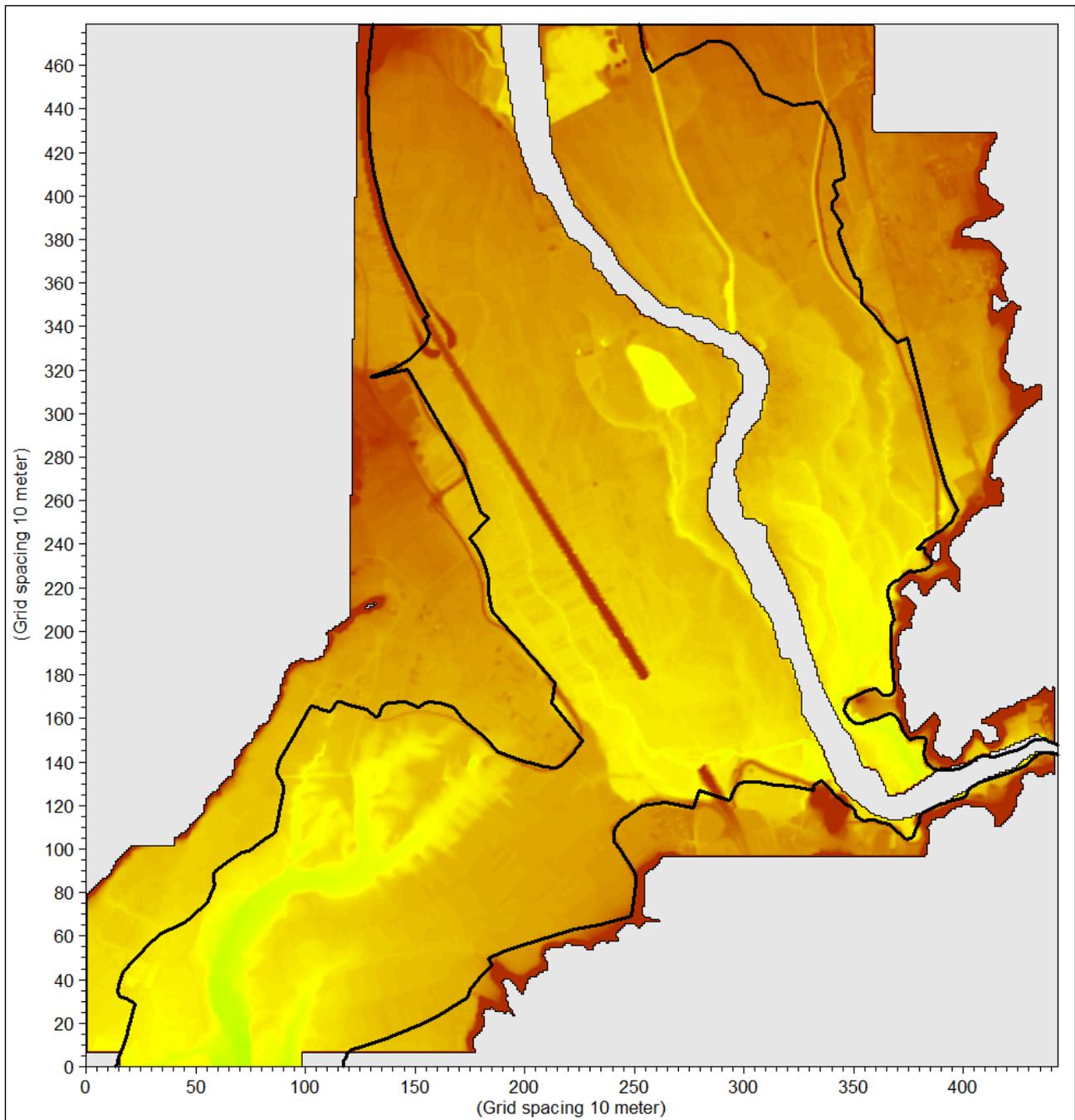


Figura 53 - Batimetria del modello 2D a maglia 10x10 m relativa allo scenario di progetto.

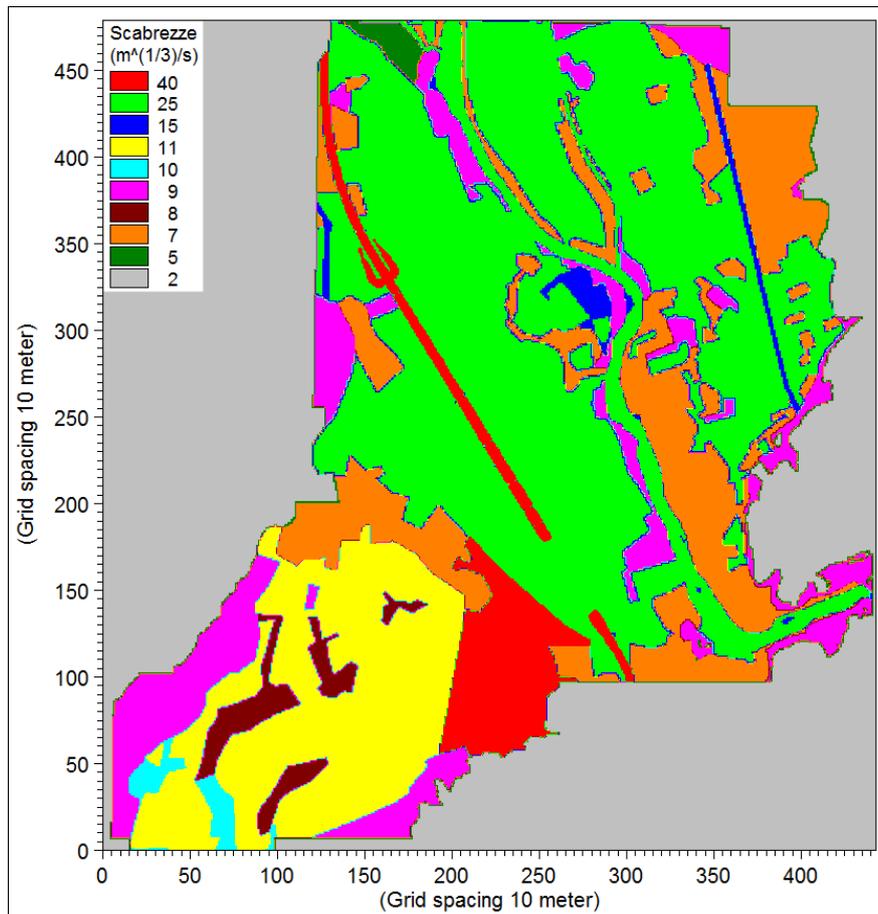


Figura 54 - Distribuzione areale dei coefficienti di scabrezza di Strickler nello scenario di progetto.

Nella Figura 58 è rappresentata una mappa delle differenze tra i livelli massimi di pelo libero dello scenario di progetto e quelli dello scenario attuale che evidenzia i seguenti risultati:

- in un'ampia zona a monte del viadotto di Fiorano in progetto non si hanno variazioni significative nei livelli massimi;
- a monte dell'autostrada (lato Dora Baltea) si assiste ad un modesto incremento dei livelli compreso tra 2 e 10 cm per effetto del sovrizzo del rilevato autostradale;
- a valle dell'autostrada (lato Fiorano) viceversa, i livelli decrescono di una quantità compresa tra 2 e 10 cm.

Nella Figura 59 è rappresentata una mappa delle differenze tra i valori massimi di velocità calcolati nello scenario di progetto e quelli corrispondenti relativi allo scenario attuale che evidenzia un modesto aumento localizzato di velocità dell'ordine dei 0,2 m/s nelle zone di ingresso e uscita del viadotto di Fiorano.

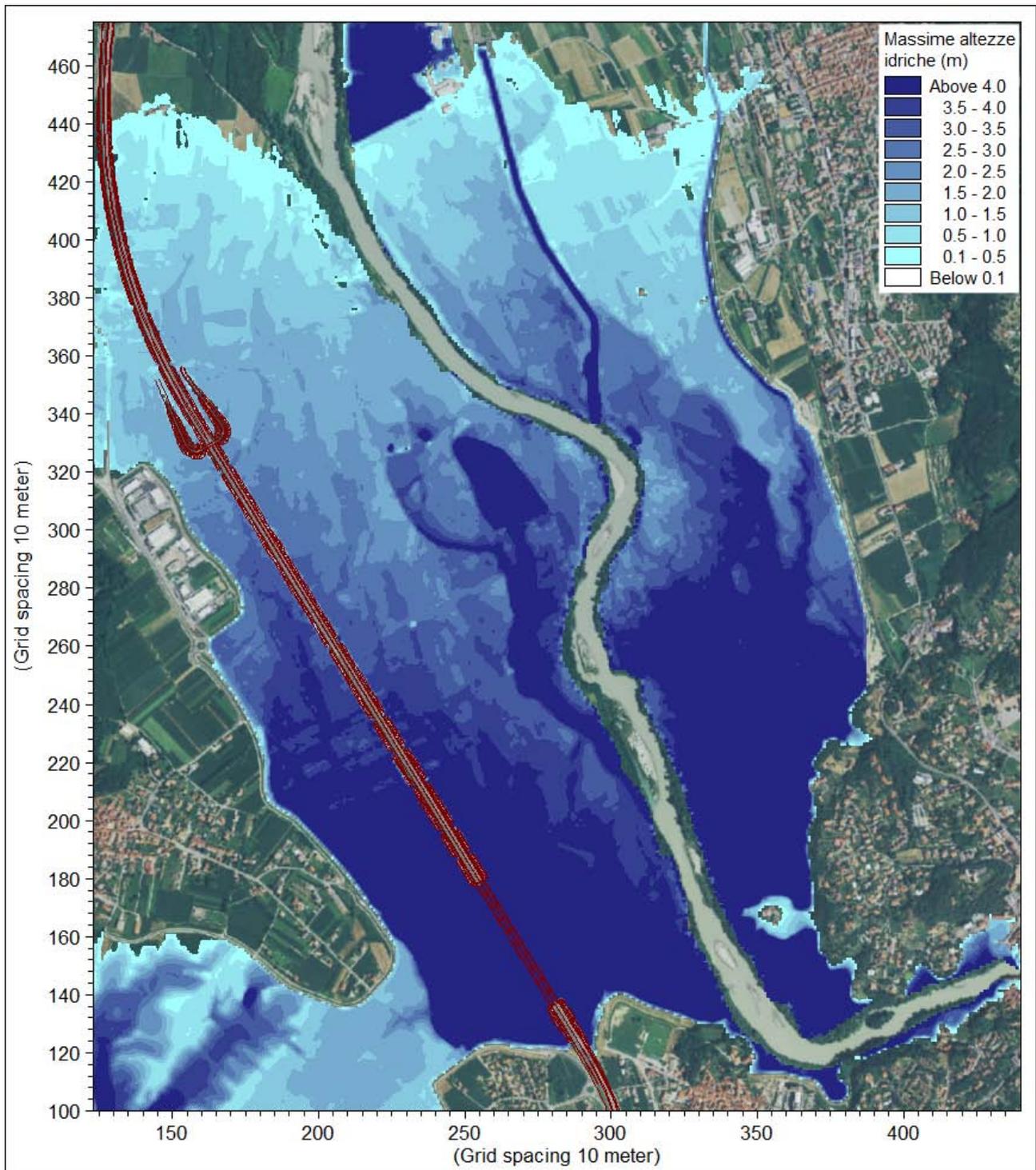


Figura 55 - Scenario di progetto (SIM2M). Involuppo delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna.

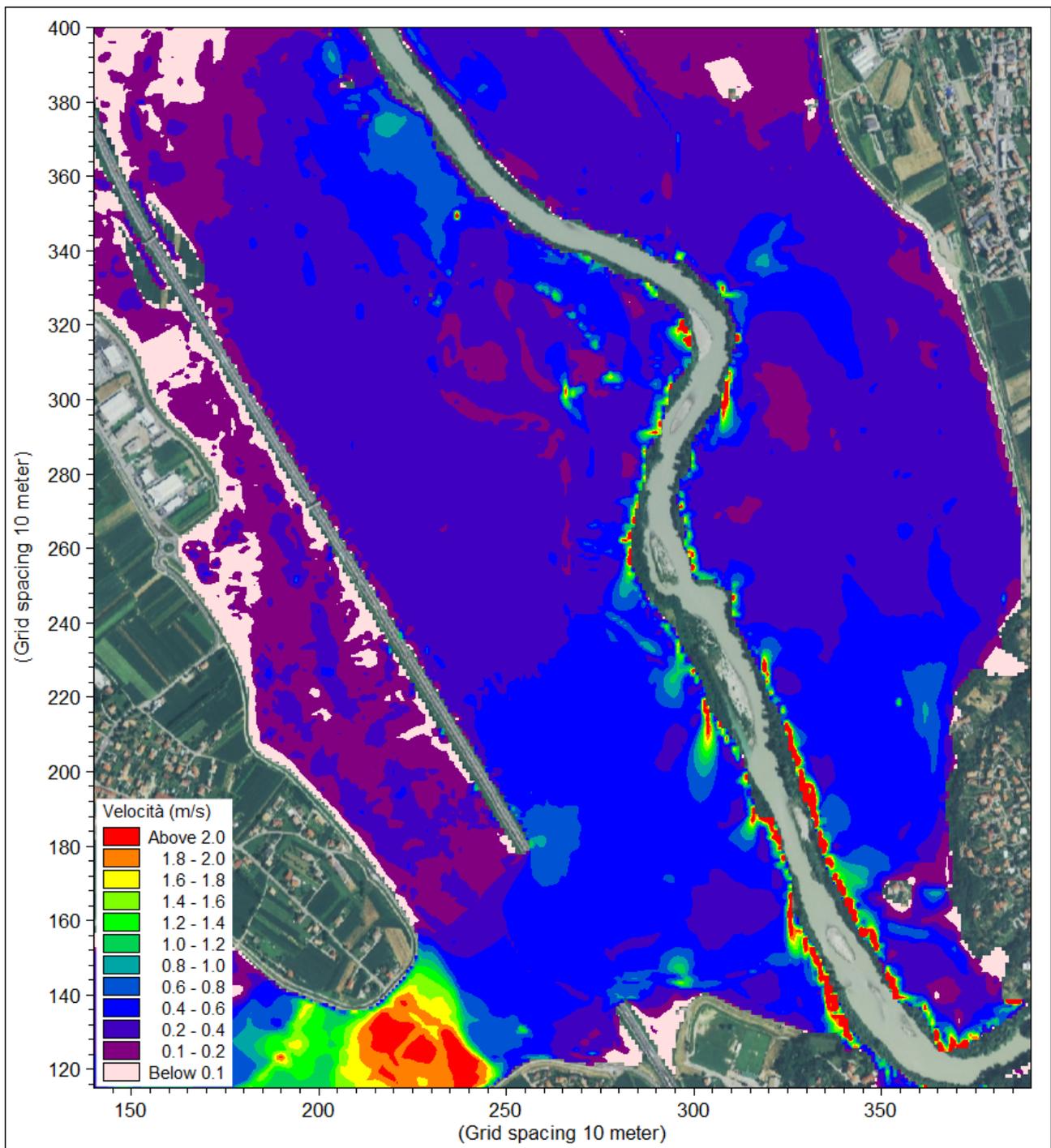


Figura 56 - Situazione di progetto (SIM2M). Ingrandimento nella zona di interesse della distribuzione delle velocità massime di deflusso.

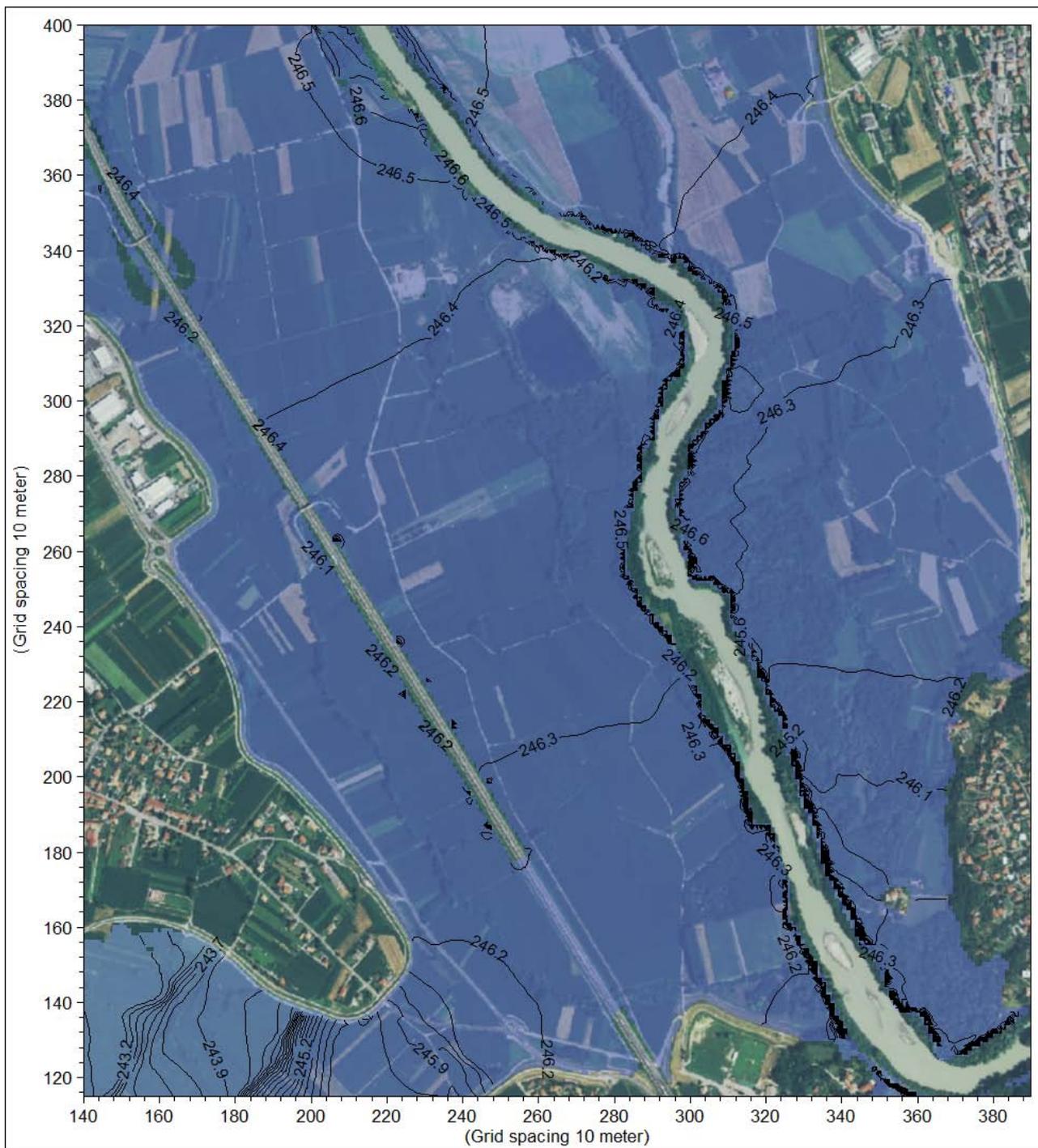


Figura 57 - Situazione di progetto (SIM2M). Ingrandimento nella zona di interesse della distribuzione delle quote massime del pelo libero raggiunte nel corso del deflusso dell'evento di piena di progetto.

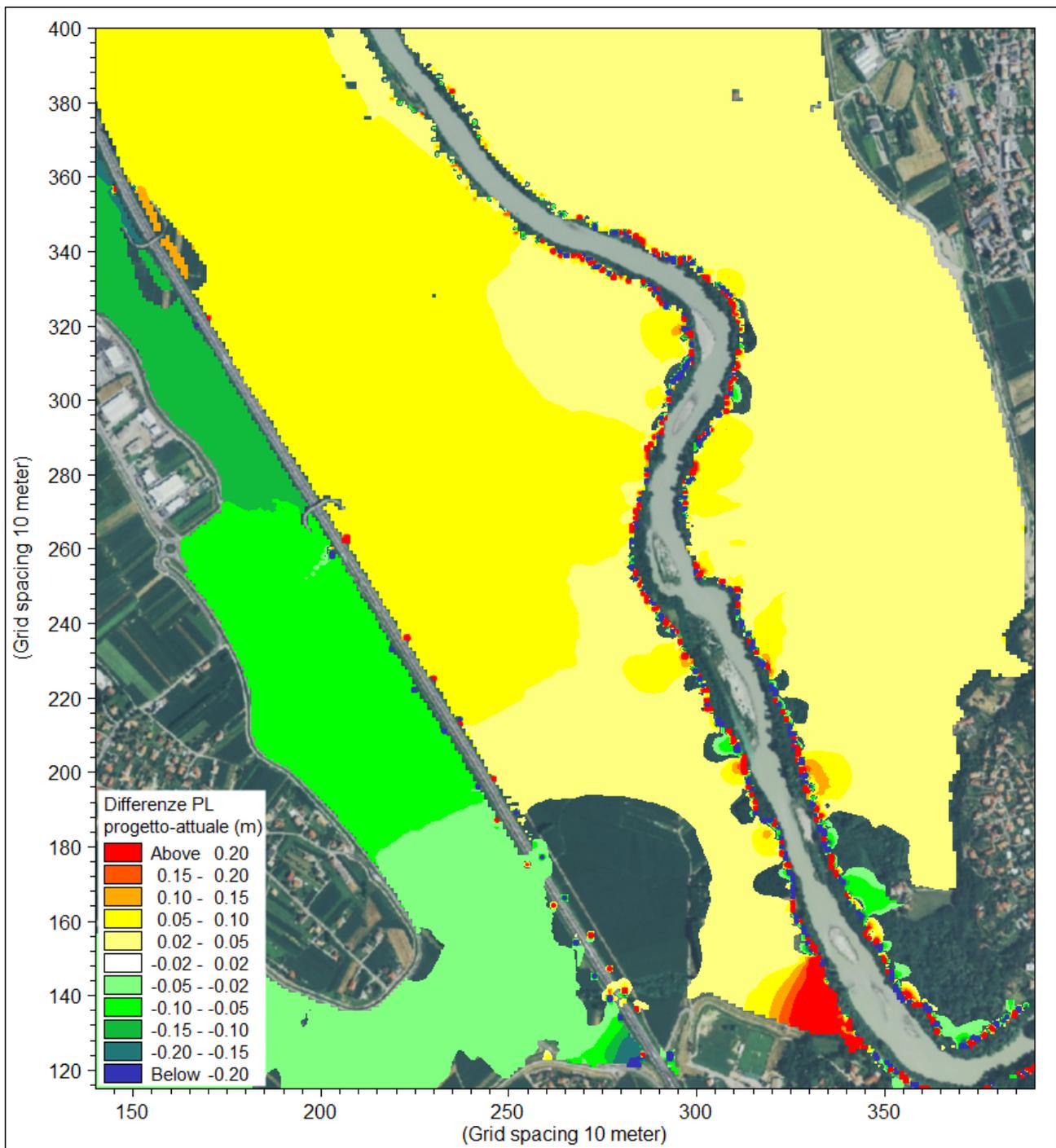


Figura 58 - Mappa delle differenze tra i livelli massimi di pelo libero dello scenario di progetto e quelli dello scenario attuale.

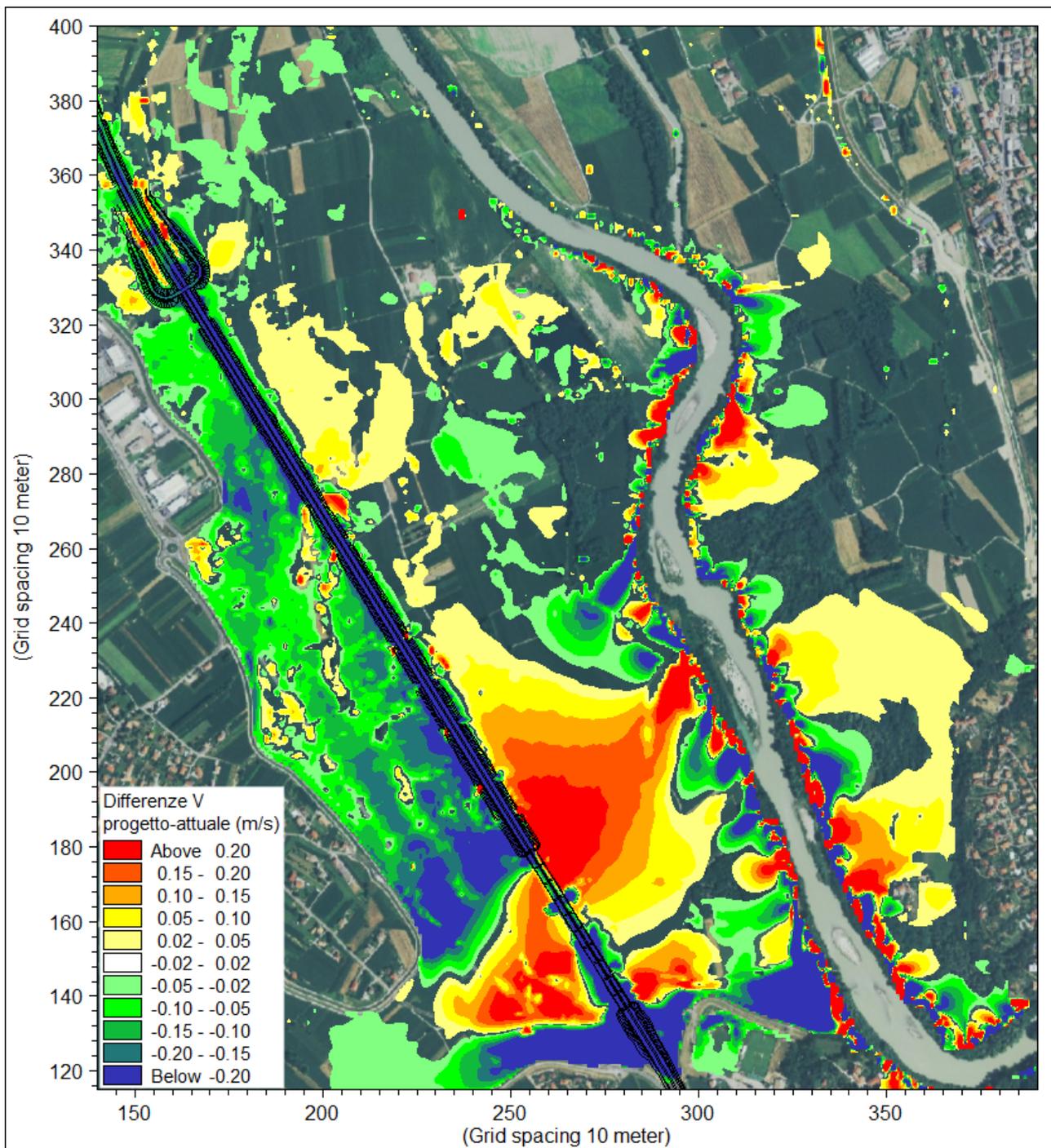


Figura 59 - Mappa delle differenze tra i valori massimi di velocità dello scenario di progetto e quelli dello scenario attuale.

Nella Tabella 11, in corrispondenza delle sezioni trasversali d'alveo di rilievo lungo la Dora Baltea, sono elencati i parametri caratterizzanti i valori massimi di inviluppo del profilo di corrente dell'evento di piena di progetto. Le differenze di livello rispetto all'analogo profilo di corrente dello scenario attuale sono limitate a pochi centimetri.

ID Sez.	Progr. (m)	Fondo (m s.m.)	Q (m ³ /s)	P.L. (m s.m.)	h (m)	A (m ²)	b (m)	v (m/s)	Fr (-)	H (m s.m.)
s41	0,00	244,34	2925,00	251,17	6,83	632,08	122,12	4,63	0,65	252,27
s40	737,00	240,91	2924,58	249,08	8,17	728,40	120,81	4,02	0,52	249,90
s39-1	1591,00	240,59	2922,92	248,71	8,12	2019,54	904,91	1,45	0,31	248,82
1	1740,00	239,94	2922,80	248,33	8,39	971,94	180,50	3,01	0,41	248,79
s39	2187,00	237,99	2922,40	247,76	9,77	993,06	162,86	2,94	0,38	248,21
2	2431,84	237,93	2871,96	247,00	9,07	652,02	114,51	4,40	0,59	247,99
3	2672,98	237,71	2574,74	246,75	9,04	654,83	94,72	3,93	0,48	247,54
4	2853,70	237,43	2435,34	246,66	9,23	706,95	97,85	3,44	0,41	247,27
5	3009,96	237,25	2238,65	246,57	9,32	664,30	97,22	3,37	0,41	247,14
6	3145,89	237,02	2087,88	246,52	9,50	658,19	93,38	3,17	0,38	247,03
7	3281,03	236,74	1935,28	246,59	9,85	700,04	84,66	2,76	0,31	246,98
8	3429,86	236,53	1838,41	246,50	9,97	674,78	84,37	2,72	0,31	246,88
9	3561,19	236,28	1827,95	246,54	10,26	806,06	89,96	2,27	0,24	246,80
10	3710,84	236,15	1788,29	246,67	10,52	1265,09	140,38	1,41	0,15	246,77
11	3925,82	235,87	1663,27	246,61	10,74	973,66	104,36	1,71	0,18	246,76
12	4115,51	235,74	1632,59	246,54	10,80	788,37	101,06	2,07	0,24	246,76
13	4319,37	235,65	1595,60	246,66	11,01	1134,12	123,86	1,41	0,15	246,76
s38	4641,87	235,56	1425,75	246,70	11,14	1336,35	169,18	1,07	0,12	246,76
15	4873,55	235,32	1393,93	246,71	11,39	1454,02	160,95	0,96	0,10	246,76
16	5135,04	235,14	1248,73	246,69	11,55	1046,41	111,35	1,19	0,12	246,76
17	5392,16	234,89	1268,78	246,69	11,80	1120,19	110,89	1,13	0,11	246,76
s37-5	5591,00	234,63	1193,97	246,68	12,05	1675,85	154,94	0,71	0,07	246,71
19	5812,06	233,80	1805,48	246,56	12,76	1720,74	156,30	1,05	0,10	246,62
20	6007,75	232,61	1892,68	246,48	13,87	1289,17	110,24	1,47	0,14	246,59
s37-4	6250,59	232,16	1758,33	246,50	14,34	1497,69	163,10	1,17	0,12	246,57
22	6448,11	230,94	1728,34	246,46	15,52	1177,51	108,10	1,47	0,14	246,57
23	6617,71	229,33	1723,23	246,45	17,12	1366,57	105,40	1,26	0,11	246,53
24	6732,60	227,91	1723,76	246,45	18,54	1448,07	105,82	1,19	0,10	246,52
m37-3	6803,00	225,25	1723,83	246,43	21,18	1314,16	103,94	1,31	0,12	246,51
26	6817,00	225,25	1723,83	239,24	13,99	204,89	33,69	8,41	1,09	242,84

Tabella 11 - Risultati della simulazione SIM2M nella situazione di progetto lungo l'alveo inciso della Dora Baltea (valori massimi di inviluppo di piena).

5. DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI IN PROGETTO

5.1 Interventi di protezione idraulica

Gli interventi di protezione idraulica previsti consistono essenzialmente in rivestimenti dei tratti di rilevato esposti all'azione erosiva delle acque di esondazione, eseguiti mediante materassi metallici tipo "Reno".

L'estensione dei tratti rivestiti è indicata in dettaglio nelle planimetrie generali degli interventi di protezione idraulica del rilevato autostradale (IDR111-114) e sui profili (IDR104-105), in base a una suddivisione per classi di altezza dei rivestimenti rispetto al piano campagna.

Sugli stessi elaborati viene specificato lo sviluppo trasversale del rivestimento e la lunghezza dei tratti rivestiti.

La tipologia realizzativa dell'intervento è illustrata nella sezione tipologica riportata nello specifico elaborato (IDR202).

I materassi, realizzati con maglie metalliche a doppia torsione e riempiti in pietrame intasato superficialmente con terreno vegetale, sono posati sul paramento del rilevato con interposizione di un geotessile di peso non inferiore a 400 g/m².

Al piede del rilevato il materasso viene affondato per 1,0 m sotto al p.c. ed esteso orizzontalmente per 1,30 m sotto al fosso di guardia.

Lo spessore del materasso è 0,30 m.

Il materasso sarà coperto superficialmente mediante stesa di geocomposito formato da rete metallica zincata preaccoppiata a biorete in cocco.

E' previsto infine un intervento di rinverdimento mediante idrosemina.

Complessivamente nel tratto di sede autostradale che si sviluppa in destra Dora Baltea, in area esondabile, si prevede di rivestire il rilevato stradale per circa 3.050 m lato fiume (di cui 2.950 m a monte e 100 m a valle del viadotto Fiorano) e per circa 745 m lato campagna.

In particolare sul lato campagna si prevede di rivestire un tratto di scarpata (30 m) a cavallo dei diversi manufatti di attraversamento (tombini scolari, ponticelli o sottovia) dove le velocità del deflusso idrico risultano più elevate.

Per ogni tratto indicato sugli elaborati grafici si sono definite le principali caratteristiche geometriche del rivestimento, distinguendolo in classi di altezza in funzione dell'altezza del livello idrico calcolato per la piena di progetto: il criterio assunto è quello di estendere il rivestimento ad una quota di 0,50 m superiore al livello calcolato.

Nel tratto di sede autostradale che si sviluppa lungo il rio Ribes e la confluenza nel torrente Chiusella, si prevede di rivestire il rilevato stradale per 2.375 m complessivi, di cui 1.345 m sulle scarpate in direzione Torino, 480 m lungo la rampa di interconnessione Santhià-Ivrea e 550 m lungo la rampa di interconnessione Torino-Santhià.

ALLEGATO 1 - Descrizione del codice di calcolo MIKE 11 -
HD

1. PREMESSA

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

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

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

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

2. DESCRIZIONE DELLE CONDIZIONI DI MOTO SIMULATE

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

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

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

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

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

3. EQUAZIONI GENERALI DI DE SAINT VENANT

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

- a) Il fluido (acqua) è incompressibile ed omogeneo, cioè senza significativa variazione di densità.

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

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

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

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

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

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

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

dove:

- A = area della sezione bagnata (m²);
 C = coefficiente di attrito di Chezy (m^{1/2}s⁻¹);
 g = accelerazione di gravità (m s⁻²);
 h = altezza del pelo libero rispetto ad un livello di riferimento orizzontale (m);
 Q = portata (m³/s);
 R = raggio idraulico (m);
 α = coefficiente di distribuzione della quantità di moto;
 q = portata laterale addotta (m²/s).

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

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

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

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

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

5. APPROSSIMAZIONE DELL'ONDA DIFFUSIVA

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

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

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

6. DESCRIZIONE IN CORRISPONDENZA DI STRUTTURE

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

Tipi di strutture simulate

Tipo 1. Stramazzo a larga soglia

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

Tipo 2. Relazione Q-h

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

Tipo 3. Tombino

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

Tipo 4. Relazione Q-t

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

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

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

Tipo 6. Strutture mobili

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

7. RESISTENZA D'ATTRITO

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

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

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

dove C è il coefficiente di attrito di Chezy.

Secondo la formula di Strickler, lo stesso termine diventa:

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

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

8. CONDIZIONI INIZIALI

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

9. METODO DI SOLUZIONE

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

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

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

10. CONDIZIONI AL CONTORNO

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

11. DEFINIZIONE DEI PASSI DI CALCOLO

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

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

1) Criterio di Courant

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

dove:

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

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

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

2) Criterio della velocità.

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

$$V \cdot \Delta t < \Delta x$$

dove V è velocità media della corrente.

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

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

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

ALLEGATO 2 - Descrizione del codice di calcolo MIKE 21 –
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:

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

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

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

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;

- ρ_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 τ che compaiono nelle equazioni di conservazione della quantità di moto lungo le direzioni x e y . La formulazione utilizzata prende in considerazione il parametro E "eddy viscosity" che è implementato secondo due modalità:

1. dipendente dal flusso locale:

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

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, Δ è la dimensione spaziale della griglia e c_s è una costante compresa tra 0,25 e 1.

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

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

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

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

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

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