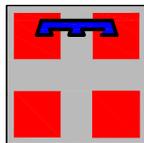




PROVINCIA DI ASTI



REGIONE PIEMONTE



PROVINCIA DI CUNEO

COLLEGAMENTO AUTOSTRADALE ASTI - CUNEO

TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)

LOTTO 6 RODDI - DIGA ENEL

PROGETTO ESECUTIVO
STUDI E INDAGINI

IDROLOGIA ED IDRAULICA

RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA
FIUME TANARO E CONFLUENZE PRINCIPALI

Aggiornato: 00	Data : Apr. 2013	Descrizione: EMISSIONE	Redatto: ing. Buffo	Controllato: ing. Ossesia	Approvato: ing. Ghislandi	Codifica: 2.6 E - r B.4.1.01
Aggiornato:	Data :	Descrizione:	Redatto:	Controllato:	Approvato:	Lotto Prog. Tipo Elaborato
Aggiornato:	Data :	Descrizione:	Redatto:	Controllato:	Approvato:	Data: Marzo 2015
Aggiornato:	Data :	Descrizione:	Redatto:	Controllato:	Approvato:	Scala: -



PROGETTISTA e RESP. INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:

Dott. Ing. Enrico Ghislandi
Albo di Milano
N° A 16993

CONCESSIONARIA:



INDICE

1. PREMESSA.....	3
2. STATO ATTUALE DELLE OPERE DI PROTEZIONE IDRAULICA.....	4
3. TRACCIATO AUTOSTRADALE IN PROGETTO	6
4. ANALISI IDROLOGICO-IDRAULICA / ASTA DEL TANARO	7
4.1. INQUADRAMENTO	7
4.2. ANALISI IDROLOGICA	7
4.3. ANALISI IDRAULICA	8
4.3.1. <i>Assetto geometrico dell'alveo</i>	8
4.3.2. <i>Manufatti interferenti</i>	10
4.3.3. <i>Modalità di deflusso in piena</i>	11
5. ANALISI IDRAULICA CON MODELLO BIDIMENSIONALE / ASTA DEL TANARO	19
5.1. PREMESSA.....	19
5.2. ANALISI IDROLOGICA	19
5.3. MESSA A PUNTO DEL MODELLO NUMERICO	21
5.3.1. <i>Costruzione della griglia di calcolo del modello numerico 2D</i>	21
5.3.2. <i>Parametri del modello</i>	23
5.3.3. <i>Condizioni al contorno</i>	24
5.3.4. <i>Descrizione delle simulazioni e delle analisi idrauliche condotte</i> 25	
5.4. ANALISI DEI RISULTATI	25
6. ANALISI IDROLOGICO-IDRAULICA / NODO DI CONFLUENZA DEL TALLORIA.....	41
6.1. INQUADRAMENTO	41
6.2. ANALISI IDROLOGICA	41
6.3. MESSA A PUNTO DEL MODELLO NUMERICO	43
6.3.1. <i>Costruzione della griglia di calcolo del modello numerico 2D</i>	43
6.3.2. <i>Parametri del modello</i>	47
6.3.3. <i>Condizioni al contorno</i>	47
6.3.4. <i>Descrizione delle simulazioni e delle analisi idrauliche condotte</i> 48	
6.4. RISULTATI DEGLI SCENARI DI SIMULAZIONE	48
6.4.1. <i>Scenario SIM1 - situazione attuale</i>	48
6.4.2. <i>Scenario SIM2 - situazione di progetto</i>	56
6.6 ANALISI DELLO SCALZAMENTO DELLE PILE DEL PONTE SUL T.TALLORIA	71
7 CONCLUSIONI.....	75



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Relazione idrologica idraulica - Fiume Tanaro e confluenze principali

ALLEGATO 1 – Descrizione del codice di calcolo MIKE 11-HD (modulo idrodinamico)

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

ALLEGATO 3 – Descrizione delle formule di calcolo dell'erosione alla base delle pile di ponte

ALLEGATO 4 – Tabelle di calcolo dello scalzamento delle pile e dei plinti del ponte

1. PREMESSA

La presente relazione è finalizzata all'aggiornamento delle analisi idrauliche di supporto alla progettazione esecutiva del collegamento autostradale A6-A21 (Asti-Cuneo), nel tratto corrispondente al Lotto 2.6.

La presente analisi prende le mosse dagli studi idrologici-idraulici eseguiti nelle precedenti fasi di progettazione del collegamento autostradale e delle opere di protezione idraulica previste sull'asta del Tanaro e degli affluenti a seguito della piena del novembre 1994.

Rispetto al quadro conoscitivo pregresso sono state svolte preliminarmente le opportune indagini di aggiornamento finalizzate ai seguenti aspetti:

- valutazione delle portate di progetto;
- valutazione dello stato attuale del sistema di difesa idraulica realizzato sull'asta del Tanaro e sugli affluenti e delle relative interferenze con il tracciato autostradale in progetto.

Le suddette attività sono state svolte mediante opportuni contatti con gli Enti competenti, sopralluoghi in campo e rilievi topografici integrativi delle opere di protezione idraulica.

L'analisi idraulica, appoggiata al suddetto quadro conoscitivo aggiornato, è stata svolta su due livelli:

- simulazione idraulica quasi-bidimensionale dell'asta del Tanaro;
- analisi bidimensionale di dettaglio del tratto in corrispondenza di Alba e del nodo di confluenza Tanaro – Talloria..

L'analisi quasi-2D dell'asta del Tanaro in particolare è stata svolta implementando il modello numerico MIKE11 del DHI_{Water.Environment.Health}, in assetto quasi-bidimensionale, ad un tratto fluviale esteso verso valle fino a Masio e a monte fino a ricomprendere il lotto 2.6, in modo da disporre di un profilo idraulico di supporto alla progettazione non influenzato, nel tratto di interesse, dalle condizioni al contorno di valle assunte.

Le valutazioni idrauliche svolte, oltre a fornire i necessari input alla progettazione delle opere autostradali, rispondono ai criteri stabiliti dalla Deliberazione 11 maggio 1999 n. 2 dell'Autorità di Bacino del Fiume Po "Criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico all'interno delle fasce A e B" e degli altri riferimenti normativi in essa citati.

L'analisi idrodinamica bidimensionale di dettaglio è stata effettuata, con modelli separati e allineati sulle condizioni al contorno, sia sull'asta del Tanaro che sul nodo di confluenza Tanaro – Talloria, considerando le condizioni di stato attuale e quelle di progetto, con l'inserimento delle nuove opere.

2. STATO ATTUALE DELLE OPERE DI PROTEZIONE IDRAULICA

Le opere di protezione idraulica (o comunque rilevanti per l'idrodinamica locale) di significativo interesse per quanto riguarda il lotto autostradale in esame sono costituite principalmente dal sistema arginale rappresentato negli elaborati cartografici allegati, esteso in destra idrografica dalla confluenza del Talloria a quella del Cherasca e in sinistra dallo svincolo di raccordo con la ex SS 231 fino all'innesto sui rilevati della tangenziale di Alba e della viabilità minore.

Relativamente a tali opere sono stati acquisiti gli elementi documentali disponibili e sono stati eseguiti specifici rilievi topografici finalizzati alle analisi idrauliche.

Le opere idrauliche presenti lungo l'asta del Tanaro sono state descritte nel modello in termini di esatta posizione e geometria sulla base di un rilievo topografico di dettaglio eseguito appositamente per il presente studio, mentre il loro stato di conservazione e manutenzione è stato caratterizzato sulla base di sopralluoghi ed osservazioni dirette in situ.

In particolare sono state individuate le seguenti tipologie di opere classificate dall'AIPO come:

- rilevati arginali principali, realizzati successivamente all'evento alluvionale del novembre 1994;
- opere di difesa in alveo (difese di sponda radenti) in massi di cava sciolti che hanno la funzione di conferire stabilità morfologica all'alveo inciso;
- opere di controllo del trasporto solido e di derivazione (briglie e traverse).

I rilevati arginali sono presenti sia in destra che in sinistra idraulica ed in particolare:

- in destra Tanaro si estendono a carattere continuo a partire dalla confluenza del torrente Talloria (monte abitato di Alba) fino alla confluenza del torrente Cherasca (valle abitato di Alba);
- in sinistra Tanaro si estendono a partire dalla SS. 231 (cascina Secchi) fino alla confluenza del Torrente Riddone, a valle di Alba.

Le opere di difesa presenti sono rilevanti per la stabilità delle sponde e quindi per quella degli argini in tutto il tratto considerato; esse sono costituite da massi di cava sciolti di grandi dimensioni e appaiono in discreto stato di conservazione.

Relativamente al nodo di confluenza del torrente Talloria, le opere idrauliche di principale interesse per quanto riguarda il lotto autostradale in esame, rappresentate nello specifico elaborato grafico, sono costituite da:

- scolmatore del torrente Talloria;
- sistemazione dell'interferenza Talloria-Canale di Verduno.

Lo scolmatore del Talloria è un manufatto scatolare tombato che incanala la portata defluente nel torrente, sottraendola all'alveo originario in loc. C. Prassano (poco a valle della confluenza del Talloria di Castiglione) e restituendola immediatamente a valle dell'attraversamento della SS 231.

Il vecchio alveo, diventato a seguito degli interventi un ramo secondario, è interessato da deflussi pressochè solo in condizioni di piena, per la quota parte di portata non derivata dallo scolmatore e per il drenaggio del bacino residuo.

A valle della SS 231 vi è un'interferenza tra il canale artificiale di Verduno e il Talloria. L'alveo nel torrente è stato deviato realizzando un taglio di meandro artificiale rispetto all'alveo originario, con sezione in calcestruzzo.



Il canale sottopassa con un sifone tale tratto di deviazione, e successivamente attraversa anche il ramo d'alveo originario (il quale è in grado di riattivarsi solo in caso di piena) mediante ponte canale.

In corrispondenza del sottopasso viabile della SS 231, circa 400 m a valle dell'attraversamento del Talloria, ha inizio l'argine principale di Tanaro di sponda destra.

Esso si sviluppa inizialmente parallelo alla viabilità, per poi deviare dopo circa 400 m avvicinandosi alla sponda del fiume, con un tratto di recente realizzazione.

Il canale di Verduno nella configurazione attuale alimenta con gran parte della portata da esso veicolata una centralina idroelettrica ubicata in prossimità di tale tratto di argine, la quale scarica le acque turbinate direttamente in Tanaro.

Si evidenzia come, poco a valle di tale scarico, l'argine destro di Tanaro presenti un locale abbassamento della quota di sommità ("corda molle") di entità superiore al metro.

Circa 200 m a monte della centralina, a monte di un'opera di regolazione della portata derivata mediante paratoie, vi è una derivazione in sponda destra, sezionabile con paratoia piana, che alimenta mediante tubazione in c.a. di diametro pari a 1,0 m il canale di Verduno nel tratto di valle.

Tale tubazione sottopassa l'argine e recapita la portata (in condizioni ordinarie pari a circa $1 \text{ m}^3/\text{s}$) nel canale che si diparte a tergo di quest'ultimo.



3. TRACCIATO AUTOSTRADALE IN PROGETTO

L'autostrada A33 in progetto si sviluppa secondo un tracciato localizzato al limite della fascia B e B di progetto prevista dal PAI; in particolare in sponda destra nel tratto a monte di Alba essa risulta già attualmente difesa dall'argine destro realizzato dall'AIPO con i fondi stanziati dal PS45.

Per il restante tratto essa si sviluppa secondo tipologie a viadotto (attraversamento del torrente Talloria) e a rilevato (raccordo con il tracciato dell'attuale tangenziale di Alba) tali da perturbare in modo minimale il deflusso di piena del Tanaro e dei suoi affluenti, in modo compatibile con quanto previsto dal PAI.

4. ANALISI IDROLOGICO-IDRAULICA / ASTA DEL TANARO

4.1. INQUADRAMENTO

Come specificato in Premessa, l'analisi idraulica dell'asta complessiva del Tanaro è stata eseguita mediante modellistica numerica quasi-bidimensionale, applicata in modo omogeneo sull'intero tratto fluviale interessato dal tracciato in progetto, oltre ad un ulteriore tratto adeguatamente sviluppato per non risentire delle condizioni al contorno di valle, in modo da definire un profilo idraulico coerente sull'intero tratto interessato dalla progettazione.

Nei paragrafi che seguono viene pertanto illustrata in modo unitario l'analisi complessiva svolta sull'intero tratto fluviale che si estende dalla confluenza della Stura di Demonte fino a Masio.

La finalità dello studio è quella di determinare l'eventuale influenza dell'autostrada A33 sul deflusso del Tanaro per la piena di progetto con tempo di ritorno 200 anni, determinata nel PAI, in assenza delle casse di espansione a monte di Alba; il valore al colmo della piena succitata è pari a 3700 m³/s.

Le attività sono state svolte nel rispetto delle normative vigenti ed in particolare della "Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica", emanata dall'Autorità di Bacino del Fiume Po ai sensi dell'art.10 delle Norme di Attuazione del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico, e della Deliberazione 11 maggio 1999 dell'Autorità di Bacino del Fiume Po "Criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico all'interno delle fasce A e B" (Deliberazione n.2/99) e degli altri riferimenti normativi in essa citati.

4.2. ANALISI IDROLOGICA

Per l'aspetto idrologico e la determinazione delle portate da utilizzare per le successive verifiche idrauliche del tratto di fiume Po in esame, si è fatto riferimento alla sopracitata "Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica", emanata dall'Autorità di Bacino del Fiume Po.

In accordo con i dati forniti nel PAI, come già detto, le verifiche idrauliche con modello quasi 2D sono state condotte con riferimento alla portata di piena con tempo di ritorno duecentennale in assenza delle casse di espansione, pari a 3700 m³/s. Nella seguente *Figura 1* si riportano gli idrogrammi di piena in assenza ed in presenza delle casse di espansione previste a monte di Alba.

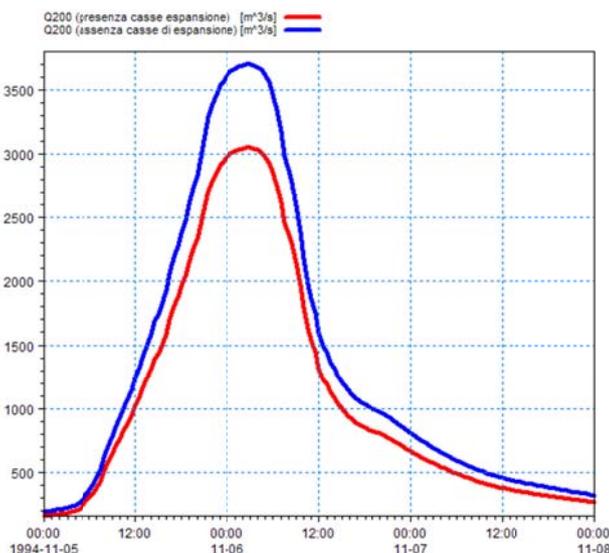


Figura 1 - Idrogrammi per tempo di ritorno 200 anni in assenza ed in presenza delle casse di espansione previste a monte di Alba.

4.3. ANALISI IDRAULICA

4.3.1. Assetto geometrico dell'alveo

Per la descrizione delle caratteristiche geometriche dell'alveo si è proceduto ad una raccolta dei dati disponibili.

Le fonti utilizzate sono:

- sezioni trasversali di rilievo eseguite nell'anno 2000 nell'ambito della stesura del progetto generale;
- piano quotato eseguito sugli ambiti golenali del Tanaro nell'anno 2009 .

Nel modello sono state inserite le sezioni d'alveo del rilievo 2000 per quanto attiene alla parte incisa del Tanaro mentre per i tratti golenali è stato eseguito un aggiornamento geometrico, per le parti ricadenti all'interno dei piani quotati eseguiti nel 2009.

In particolare i nuovi rilievi comprendono la livellazione delle quote di sommità e al piede dei rilevati arginali di entrambe le sponde.

Di seguito si allega in forma tabellare il profilo longitudinale del tratto di fiume Tanaro interessato dall'autostrada in progetto con indicazione delle sezioni trasversali in termini di codice identificativo, distanza progressiva e tipologia di manufatti interferenti con l'asta del Tanaro.

Sezione	Manufatto	Progressiva m
-	-	-
77T		129722
76T		130682
73T	monte briglia	131101
73T	valle briglia	131108
72T		131456

Sezione -	Manufatto -	Progressiva m
71T		131871
70T		132134
1N		132634
68Tm	ponte Pollenzo	132848
68T	ponte Pollenzo	132859
68Tv	ponte Pollenzo	132870
67T		132885
66T	monte briglia	133120
65T	valle briglia	133157
2N		133591
64T		134041
3N		134841
63T		135536
4N		136286
62T		137013
61T		138415
60Tb		138965
60T		140036
59Tb		140669
7N		141319
59T		141832
58Tb		142678
58T		143274
57T		143924
56Tm	ponte strallato Alba	143953
56Tv	ponte strallato Alba	143973
55T		144000
54T		144585
53Tm	ponte stradale e ferroviario Alba	144608.5
53Tv	ponte stradale e ferroviario Alba	144621.5
52T		144656
51T		145519
8N		146119
50Tb		146750
50T		147720
49Tb		148380
49T		148945

Sezione	Manufatto	Progressiva m
-	-	
48T		149669
47T		150484
45Tm	monte briglia	151101
45Tv	valle briglia	151103
44T		152116
43Tm	ponte Neive	152162
43Tv	ponte Neive	152170
42T		152217

Tabella 1 - Profilo longitudinale del fiume Tanaro nel tratto interessato dall'autostrada Asti-Cuneo in progetto

In realtà, come già evidenziato, il modello numerico costruito per le analisi idrodinamiche è molto più esteso rispetto al tratto di Tabella 1; in particolare esso si estende verso valle fino all'abitato di Masio garantendo così dal punto di vista del calcolo idraulico in corrispondenza dei lotti autostradali in progetto la totale indipendenza dalle condizioni al contorno assunte.

4.3.2. Manufatti interferenti

Nel tratto modellizzato idraulicamente i manufatti interferenti con l'asta del Tanaro, da monte verso valle, sono i seguenti:

- briglia localizzata nella sezione 73T al servizio dell'opera di presa del canale di Verduno;
- ponte di Pollenzo localizzato nella sezione 68T;
- 66T traversa di derivazione localizzata a valle del ponte di Pollenzo;
- ponte strallato della tangenziale di Alba localizzato a monte della città (sezione 56T);
- ponte stradale e ferroviario di Alba localizzato nella sezione 53T;
- 45T briglia localizzata tra gli abitati di Alba e Castagnito Baraccone;
- 43T ponte di Neive.

La geometria dei manufatti sopra descritti è stata inserita nel modello di simulazione nel modo seguente:

- le opere di attraversamento sono state rappresentate con una struttura tipo "culvert" di forma geometrica variabile secondo una relazione quota-larghezza che tiene conto della luce effettiva di deflusso al netto delle pile; si è inoltre inserita una struttura di sfioro al di sopra del piano viabile nel caso di un eventuale sormonto dell'attraversamento;
- le opere trasversali di derivazione e di stabilizzazione del profilo di fondo sono state schematizzate tramite strutture di tipo "weir" capaci di simulare idrodinamicamente il deflusso attraverso una qualsivoglia tipologia di stramazzo.

4.3.3. Modalità di deflusso in piena

Le verifiche numeriche finalizzate alla valutazione della compatibilità idraulica della A33 sono state eseguite utilizzando il codice di calcolo MIKE 11 (modulo idrodinamico) del DHI_{Water.Environment.Health}, del quale viene fornita una sintetica descrizione nell'allegato 1.

Il modello idrodinamico simula il deflusso in moto stazionario e non, secondo schematizzazione monodimensionale o quasi 2D, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali, descrivibile attraverso i diversi approcci dell'“onda cinematica”, dell'“onda diffusiva” e dell'“onda dinamica” e con la messa in conto principalmente delle seguenti condizioni:

- portate laterali,
- flusso libero o rigurgitato,
- differenti regole operative di funzionamento di serbatoi o invasi,
- resistenze localizzate e perdite di carico concentrate,
- aree d'espansione,
- nodi idraulici (biforcazioni e convergenti).

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 soluzione del sistema di equazioni di De Saint Venant permette di rappresentare, in dettaglio, tutte le trasformazioni che l'onda di piena subisce nella traslazione da monte verso valle per effetto della laminazione naturale, dell'interferenza con le opere idrauliche, delle esondazioni al di fuori dell'alveo attivo, della confluenza di tributari laterali e del contributo distribuito dei bacini versanti.

Nel caso specifico, si è utilizzato il funzionamento in moto vario per eseguire la calibrazione del modello in modo da tener conto degli effetti di laminazione indotti dall'invaso in alveo e nelle aree esondabili e per stimare l'entità volumetrica delle esondazioni.

4.3.3.1. Messa a punto del modello idrodinamico

La schematizzazione geometrica dell'alveo è stata effettuata in modo da ottenere una buona rappresentazione del deflusso in piena, tenendo conto delle caratteristiche geometriche del corso d'acqua e delle strutture interferenti con il moto.

Il tratto di alveo modellizzato è stato schematizzato mediante 43 sezioni trasversali.

Le sezioni trasversali in corrispondenza dei manufatti di attraversamento e di derivazione e/o di controllo del trasporto solido sono state duplicate a monte ed a valle delle strutture stesse per rappresentarne correttamente l'effetto idrodinamico sulla corrente.

Le condizioni al contorno adottate per le simulazioni idrodinamiche sono le seguenti:

- condizione al contorno di monte: idrogramma di portata per tempo di ritorno 200 anni (in assenza delle casse di espansione) avente valore al colmo pari a 3700 m³/s (*Figura 1*);
- condizione al contorno di valle (abitato di Masio): scala di deflusso in moto uniforme.

La distanza dalla sezione di valle dall'area di progetto garantisce l'indipendenza del profilo idrico di calcolo dall'assunzione della condizione al contorno imposta.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Relazione idrologica idraulica - Fiume Tanaro e confluenze principali

Di seguito si allega lo schema planimetrico complessivo del Tanaro utilizzato nella schematizzazione quasi 2D (Figure 2 e 3), che è stata assunta in corrispondenza dei lotti in progetto al fine di descrivere in modo adeguato i fenomeni idrodinamici in questi tratti fluviali dove il transito della piena può riguardare in modo determinante lo scambio di deflusso tra l'alveo attivo e le zone golenali.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco Il Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Relazione idrologica idraulica - Fiume Tanaro e confluenze principali

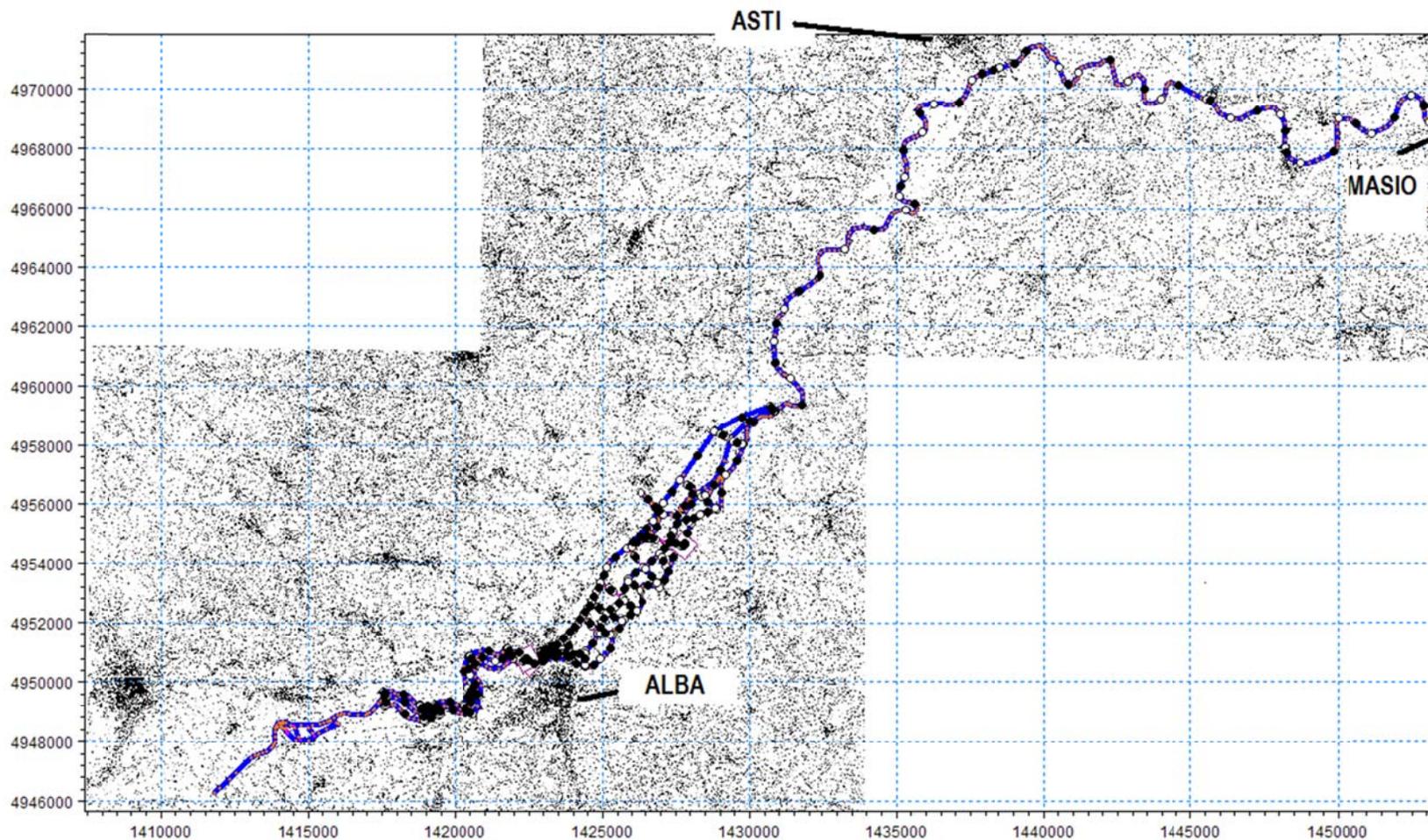


Figura 2 - Schema planimetrico del modello idrodinamico Quasi 2D esteso dalla confluenza della Stura di Demonte all'abitato di Masio.

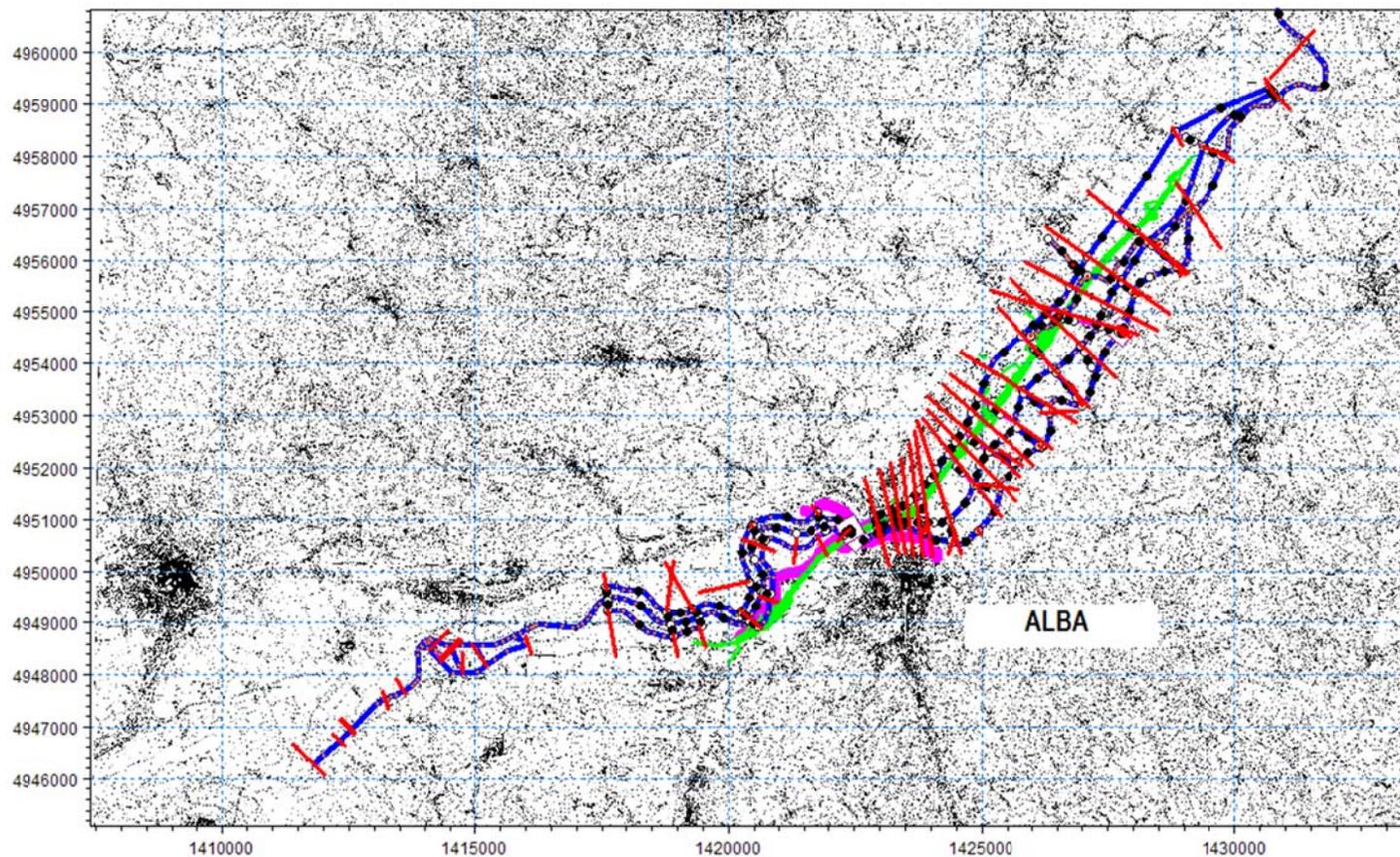


Figura 3 - Particolare dell'area del Tanaro interessata dal tracciato dell'autostrada Asti-Cuneo in progetto, con riportate le sezioni di rilievo utilizzate (colore rosso), il tracciato autostradale (colore verde) e le opere di contenimento dei livelli esistenti (rosa).

Lo schema quasi-2D per il modello numerico monodimensionale consiste nella schematizzazione delle golene esterne all'alveo inciso come dei canali di flusso laterali, che interscambiano portata con l'alveo principale del corso d'acqua. L'interscambio di portata avviene attraverso delle strutture di sfioro "link channel" che rappresentano il deflusso di esondazione dall'alveo principale nella golenata attraverso:

- il ciglio di sponda del corso d'acqua;
- la sommità arginale o di un elemento morfologico di contenimento dei livelli;
- il rilevato di un'infrastruttura interferente con il corso d'acqua.

Il modello quasi-bidimensionale consente quindi di rappresentare uno schema di deflusso complesso costituito da più rami monodimensionali collegati tra loro ed eventualmente interagenti in modo da simulare adeguatamente l'importante azione di accumulo e rilascio dei volumi esondati nei rami golenali.

La Figura 4 rappresenta la ripartizione di una sezione topografica tra l'alveo principale e la zona golenale, rappresentati con canali di flusso diversi nello schema quasi-2D, con i relativi canali di collegamento.

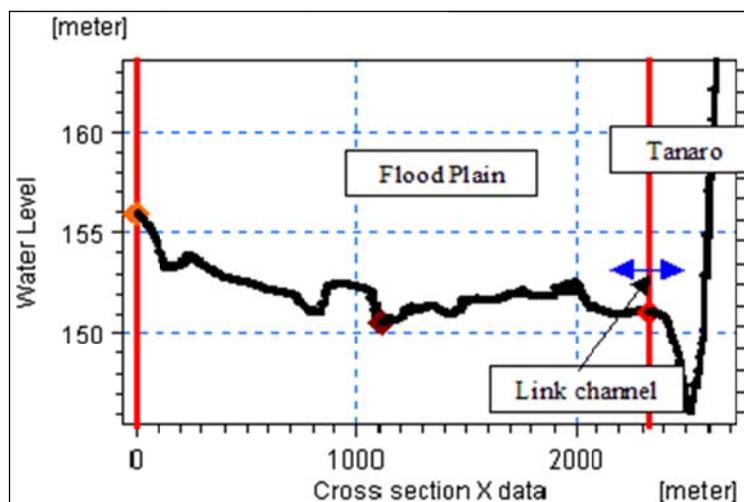


Figura 4 - Esempio di sezione con ripartizione dei flussi nell'alveo principale e in golenata, per la schematizzazione quasi 2D.

Il modello numerico così costruito è stato sottoposto ad una procedura di taratura riferita all'evento del novembre 1994, relativamente alla geometria di stato attuale, (assenza delle opere in progetto).

Le verifiche svolte sui livelli rilevati della piena e sui livelli del PAI hanno messo in evidenza come, per raggiungere le quote idriche della piena 1994 con lo schema quasi-2D sia necessario assegnare alle zone golenali attive del Tanaro parametri di scabrezza di Strickler compresi nell'intervallo $10 \div 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, mentre per l'alveo inciso ci si attesta su valori di $18-23 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

4.3.3.2. Simulazioni idrodinamiche

Sono state condotte simulazioni per il tempo di ritorno di 200 anni in assenza di casse di espansione, al fine di calcolare l'andamento dei profili idrometrici di piena nella configurazione di progetto dell'autostrada A33,.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Relazione idrologica idraulica - Fiume Tanaro e confluenze principali

Non si sono eseguite simulazioni nell'ipotesi di assenza dell'infrastruttura autostradale, ad eccezione di quella utilizzata per la taratura, in quanto il suo tracciato risulta retrostante alle opere di contenimento dei livelli realizzate di recente e comunque mai interferente con il deflusso principale del Tanaro.

4.3.3.3. *Analisi dei risultati*

Nel seguito i risultati della simulazione di progetto sono presentati sotto forma di tabella e di profilo longitudinale schematico. Nella tabella, in corrispondenza delle sezioni trasversali d'alveo inserite nel modello, sono elencati i parametri idrodinamici caratterizzanti la piena con tempo di ritorno 200 anni.

Sezione N.	Manufatto -	Progressiva m	Quota fondo alveo m s.m.	Tirante m	Livello idrico m s.m.	Carico totale m s.m.	Velocità m/s	Area deflusso m ²	Larghezza livello idrico m	Froude -
77T		129722.00	186.28	8.19	194.47	194.84	2.69	1530.79	689.46	0.62
76T		130682.00	185.20	7.26	192.46	193.05	3.41	1092.85	307.86	0.66
73T	monte briglia	131101.00	184.15	7.54	191.69	192.19	3.12	1368.60	370.12	0.78
73T	valle briglia	131108.00	182.76	8.68	191.44	191.83	2.76	1389.04	363.63	0.51
72T		131456.00	181.60	9.31	190.91	191.29	2.74	1349.26	359.78	0.50
71T		131871.00	181.60	8.55	190.15	190.66	3.17	1167.07	330.14	0.54
70T		132134.00	181.73	8.24	189.97	190.06	1.33	2789.57	808.84	0.34
1N		132634.00	181.21	7.31	188.52	188.76	2.16	2083.72	798.30	0.58
68Tm	ponte Pollenzo	132848.00	169.42	18.59	188.01	188.13	1.53	2475.54	645.73	0.30
68T	ponte Pollenzo	132859.00	169.42	18.38	187.80	188.12	2.51	1378.65	226.01	0.35
68Tv	ponte Pollenzo	132870.00	169.42	18.59	188.01	188.11	1.43	2474.97	645.69	0.30
67T		132885.00	167.51	20.15	187.66	188.10	2.93	1190.09	190.07	0.40
66T	monte briglia	133120.00	176.00	11.11	187.11	187.42	2.48	1479.17	211.60	0.30
65T	valle briglia	133157.00	176.00	10.85	186.85	187.19	2.58	1424.39	202.89	0.31
2N		133591.00	175.14	10.63	185.77	185.93	1.77	2068.01	520.00	0.32
64T		134041.00	175.08	9.17	184.25	184.49	2.15	2020.41	1024.18	0.52
3N		134841.00	173.30	8.72	182.02	182.12	1.39	2672.86	705.00	0.41
63T		135536.00	171.26	8.81	180.07	180.38	2.47	1523.39	474.94	0.47
4N		136286.00	166.35	12.95	179.30	179.32	0.70	5292.69	918.84	0.09
62T		137013.00	168.85	9.45	178.30	178.45	1.73	2153.80	706.64	0.32
61T		138415.00	166.77	8.45	175.22	176.37	4.74	708.18	114.03	0.61
60Tb		138965.00	167.92	5.65	173.57	173.78	2.03	1659.24	618.70	0.39
60T		140036.00	164.08	7.67	171.75	171.90	1.69	2298.21	621.88	0.50
59Tb		140669.00	164.26	6.71	170.97	171.11	1.63	3322.01	836.91	0.50
7N		141319.00	162.40	7.93	170.33	170.56	2.14	1514.57	499.73	0.39
59T		141832.00	161.03	8.78	169.81	169.87	1.06	3044.45	590.77	0.29
58Tb		142678.00	161.41	7.14	168.55	168.63	1.22	2977.13	681.40	0.37
58T		143274.00	158.16	9.97	168.13	168.21	1.23	4492.48	719.02	0.35



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Relazione idrologica idraulica - Fiume Tanaro e confluenze principali

Sezione N.	Manufatto -	Progressiva m	Quota fondo alveo m s.m.	Tirante m	Livello idrico m s.m.	Carico totale m s.m.	Velocità m/s	Area deflusso m ²	Larghezza livello idrico m	Froude -
57T		143924.00	157.33	9.69	167.02	167.29	2.30	2409.72	457.46	0.50
56Tm	ponte strallato Alba	143953.00	156.89	9.47	166.36	166.80	2.93	1247.45	198.46	0.40
56Tv	ponte strallato Alba	143973.00	156.89	9.24	166.13	166.61	3.06	1200.95	198.03	0.42
55T		144000.00	156.90	9.35	166.25	166.60	2.61	1916.76	468.14	0.57
54T		144585.00	155.84	8.79	164.63	165.01	2.72	1355.05	218.20	0.65
53Tm	ponte stradale e ferroviario Alba	144608.50	154.38	10.31	164.69	164.96	2.31	1595.29	194.18	0.26
53Tv	ponte stradale e ferroviario Alba	144621.50	154.38	9.67	164.05	164.37	2.50	1278.42	193.87	0.29
52T		144656.00	155.22	8.68	163.90	164.32	2.88	1420.13	208.22	0.45
51T		145519.00	153.02	9.03	162.05	162.39	2.59	1420.13	260.38	0.40
8N		146119.00	152.20	8.75	160.95	161.11	1.79	2036.38	440.00	0.32
50Tb		146750.00	151.53	7.94	159.47	160.03	3.30	922.12	143.13	0.41
50T		147720.00	151.18	6.82	158.00	158.10	1.41	2221.39	704.13	0.30
49Tb		148380.00	150.26	7.21	157.47	157.58	1.48	2136.66	573.70	0.30
49T		148945.00	149.00	7.11	156.11	156.93	4.01	665.57	125.95	0.56
48T		149669.00	147.02	7.58	154.60	154.84	2.17	2289.79	735.75	0.56
47T		150484.00	145.04	9.08	154.12	154.26	1.67	1910.36	440.02	0.33
45Tm	monte briglia	151101.00	143.62	9.55	153.17	153.37	2.00	1396.81	240.65	0.27
45Tv	valle briglia	151103.00	143.62	9.47	153.09	153.24	1.72	1377.44	240.65	0.28
44T		152116.00	143.04	7.80	150.84	151.04	2.00	1185.60	202.26	0.54
43Tm	ponte Neive	152162.00	141.67	8.95	150.62	150.80	1.88	1261.27	189.32	0.29
43Tv	ponte Neive	152170.00	141.67	8.90	150.57	150.75	1.89	1252.02	189.30	0.30
42T		152217.00	141.56	8.86	150.42	150.64	2.06	1152.22	178.27	0.26

Tabella 2 - Risultati della simulazione con portata PAI a tempo di ritorno 200 anni (valore al colmo 3700 m³/s in assenza casse di espansione).

Per le valutazioni in merito al comportamento idraulico del corso d'acqua di rimanda alle osservazioni relative all'analisi idraulica complessiva (con simulazione bidimensionale) descritta nel capitolo successivo.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Relazione idrologica idraulica - Fiume Tanaro e confluenze principali

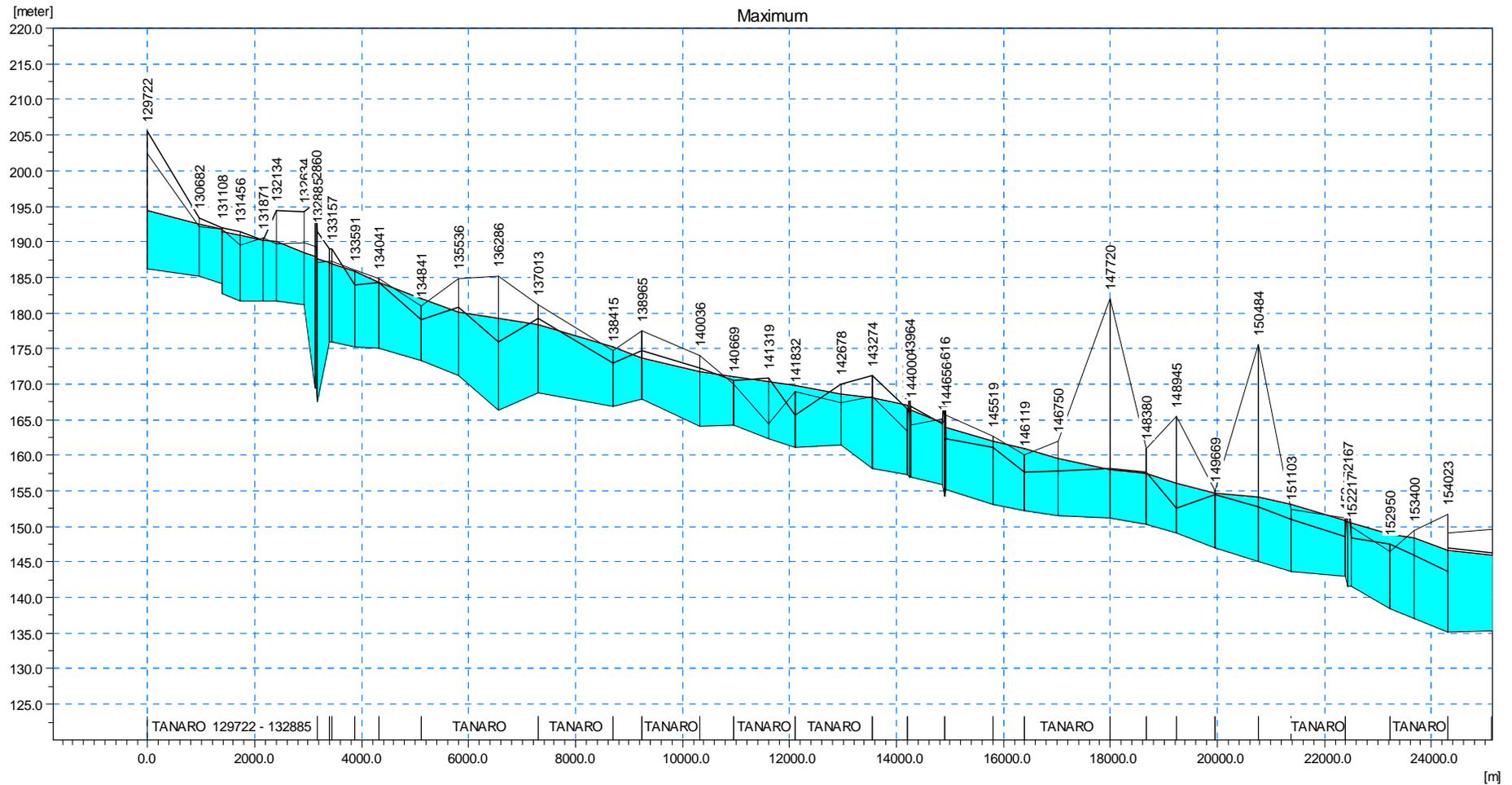


Figura 5 - Profilo idrometrico del Tanaro per la portata TR 200 anni, di valore al colmo pari a 3700 m³/s.

5. ANALISI IDRAULICA CON MODELLO BIDIMENSIONALE / ASTA DEL TANARO

5.1. PREMESSA

Nei paragrafi che seguono viene presentata l'analisi idraulica di dettaglio del fiume Tanaro in corrispondenza del centro abitato di Alba, interessato nella porzione a monte dalle nuove opere autostradali del lotto 2.6 (valle viadotto Talloria) e nel restante tratto dall'attuale tracciato della tangenziale. L'analisi è finalizzata a verificare le condizioni di sicurezza dell'autostrada in progetto rispetto al sistema arginale esistente. Per questo scopo, oltre all'analisi idrodinamica con schema quasi 2D descritta nel capitolo precedente, è stato costruito un modello idrodinamico bidimensionale a fondo fisso, utilizzando il codice di calcolo MIKE 21 del DHI Water Environment Health che risolve le equazioni del moto bidimensionali di de St.Venant.

L'estensione all'intero tratto interferente con il centro abitato di Alba e alle relative infrastrutture viarie consente di verificare le condizioni idrauliche di sicurezza non solo sul lotto autostradale 2.6 di nuova costruzione ma anche sul tratto della tangenziale di Alba che realizza il collegamento con il precedente lotto autostradale.

Con il modello idrodinamico bidimensionale sono stati simulati gli eventi di piena di progetto con tempo di ritorno 200 anni e 500 anni.

L'analisi accurata dei risultati delle simulazioni condotte ha consentito di verificare la compatibilità idraulica delle opere già realizzate e degli interventi in progetto.

5.2. ANALISI IDROLOGICA

Sono stati considerati gli eventi di piena duecentennale e cinquecentennale caratterizzati, come già evidenziato, dalle portate al colmo sull'asta del Tanaro sotto indicate:

- TR = 200 anni: portata al colmo $Q = 3700 \text{ m}^3/\text{s}$;
- TR = 500 anni: portata al colmo $Q = 4250 \text{ m}^3/\text{s}$;

Per le simulazioni in moto vario, gli idrogrammi di portata e livello da applicare al modello bidimensionale rispettivamente come condizione al contorno di monte e di valle sono stati estratti dai risultati del modello quasi-bidimensionale del fiume Tanaro sopra descritto, esteso verso valle fino a Masio. Nella Figura 6 sono rappresentati rispettivamente l'idrogramma di portata con tempo di ritorno 200 anni in corrispondenza della progressiva 139500 m (tra le sezioni d'alveo di rilievo 60Tb e 60T) e il corrispondente idrogramma di livello calcolato in corrispondenza della progressiva 148945 m (sezione d'alveo di rilievo 49T).

Nella Figura 7 sono rappresentati gli idrogrammi di portata e livello con tempo di ritorno 200 anni utilizzati direttamente come condizioni al contorno del modello bidimensionale, ottenuti a partire dai precedenti considerando una portata di inizializzazione costante pari a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ e limitando la durata complessiva dell'evento a 36 ore. Nella stessa figura sono anche riportati gli analoghi idrogrammi di piena con tempo di ritorno 500 anni determinati riscalandolo quelli duecentennali in modo da riprodurre i valori al colmo noti.

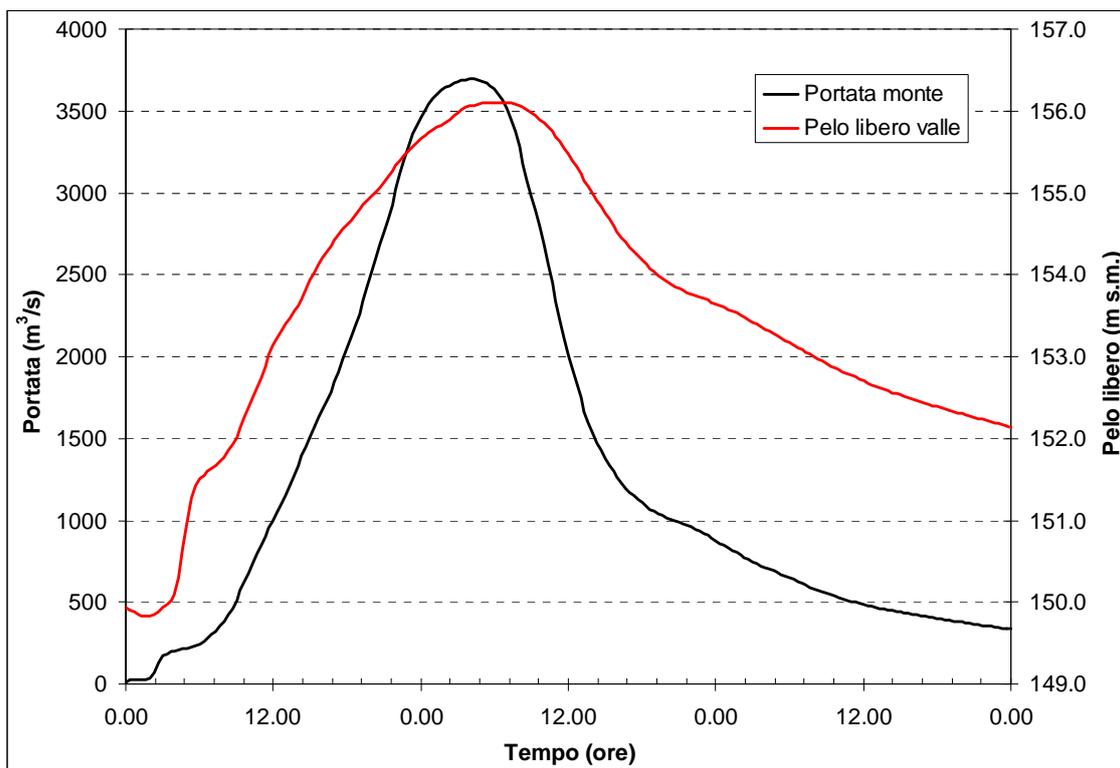


Figura 6 - Idrogrammi di portata e di livello con tempo di ritorno 200 anni utilizzati per la definizione delle condizioni al contorno del modello bidimensionale.

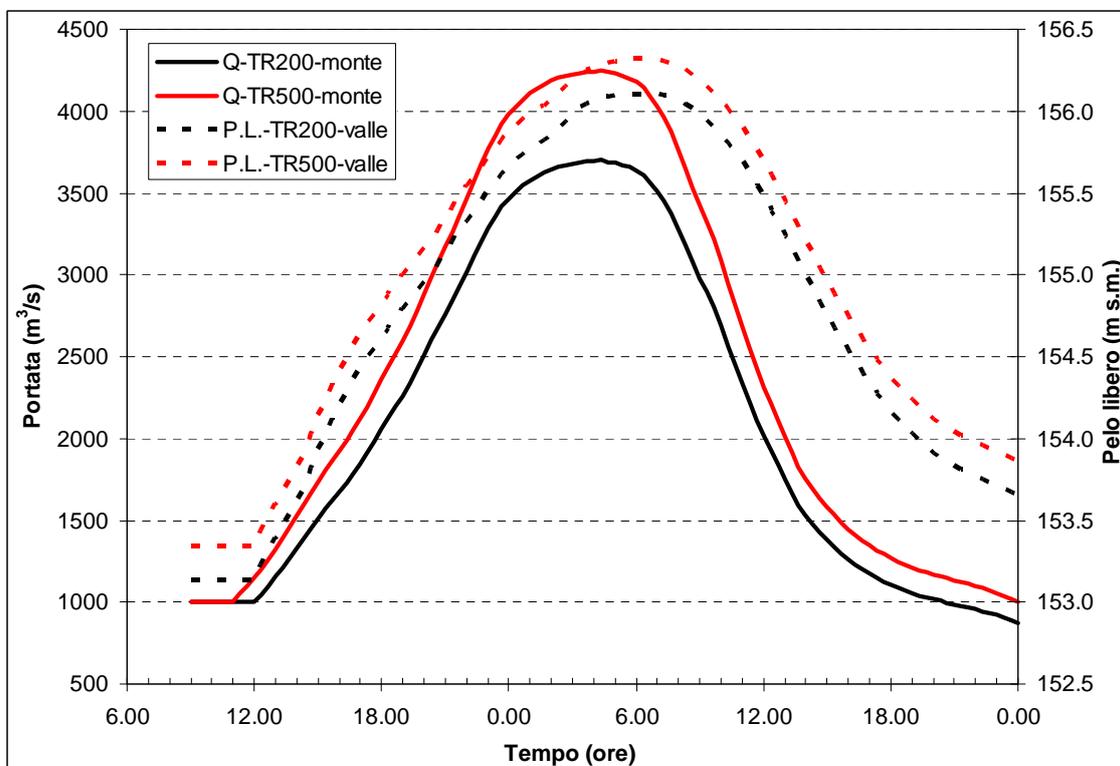


Figura 7 - Idrogrammi di portata e di livello utilizzati come condizioni al contorno del modello bidimensionale.

5.3. MESSA A PUNTO DEL MODELLO NUMERICO

5.3.1. Costruzione della griglia di calcolo del modello numerico 2D

Nel modello bidimensionale alle differenze finite la descrizione geometrica del territorio è eseguita definendo la quota media del terreno in ogni cella di calcolo. Tale valore viene calcolato, a partire dai dati rilevati, mediante tecniche di interpolazione.

La geometria della zona è stata ricostruita per mezzo delle informazioni altimetriche desunte dai rilievi tridimensionali dell'area realizzati per la progettazione del tracciato autostradale, integrati nelle aree scoperte dalle quote desunte dalla cartografia vettoriale disponibile in scala 1:5.000. I punti, in coordinate Gauss-Boaga ed elevazione, desunti dal rilievo sono stati utilizzati come base per la creazione di una reticolo a maglie quadrate su cui è stato applicato il modello di simulazione.

I corsi d'acqua naturali e artificiali sono stati ricostruiti in parte utilizzando le sezioni di rilievo e di progetto a disposizione e in parte ricostruendone la geometria in base alle quote di rilievo disponibili. Dopo una prima interpolazione automatica dei punti è stato necessario procedere manualmente ad una verifica accurata degli elementi geometrici "sovramontanti" (argini, rilevati stradali, difese spondali ecc.) e "sottomontanti" (alvei), apportando i dovuti correttivi ove necessario.

Fondamentale è stata inoltre la definizione della dimensione del passo della griglia, 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 si è scelto di adottare una griglia di calcolo a maglia 10x10 m in modo da mantenere sufficientemente elevato il grado di dettaglio dell'informazione fornita dal rilievo di origine e di consentire nel contempo l'esecuzione di scenari di simulazioni con tempi di calcolo dell'ordine di alcune ore.

La griglia di calcolo del modello a maglia 10x10 m presenta complessivamente 398 righe x 670 colonne (266660 punti di calcolo). Nella Figura 8 è rappresentata una corografia della zona di studio con evidenziato il contorno dell'area di applicazione del modello bidimensionale (modello 2D "Tanaro"). Nella stessa figura, per completezza di informazione, è anche ubicato il contorno del modello bidimensionale messo a punto per le verifiche idrauliche condotte sul nodo di confluenza del Talloria (v. par. 6).

Vista la conformazione rettangolare lunga e stretta dell'area in esame si è deciso di operare una rotazione della griglia di calcolo pari a 59° in modo da ridurre al minimo il numero di celle del modello ed avere un'orientazione del flusso prevalente da sinistra verso destra.

Nella Figura 9 è rappresentata 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 non allagabili (essenzialmente le aree con quota maggiore di 180 m s.m.). In verde scuro sono evidenziate le aree più depresse (alveo del Tanaro) mentre in marrone e giallo sono distinguibili i rilevati stradali e arginali, nonché le ulteriori aree in rilievo.

Rispetto al DTM di rilievo, è stata infine opportunamente modificata la zona di imbocco del modello in corrispondenza dell'alveo del fiume Tanaro per facilitare l'assegnazione della condizione al contorno di portata in ingresso al modello stesso. Modifiche locali alle quote del DTM sono state inoltre apportate in uscita per favorire l'assegnazione della condizione al contorno di valle.

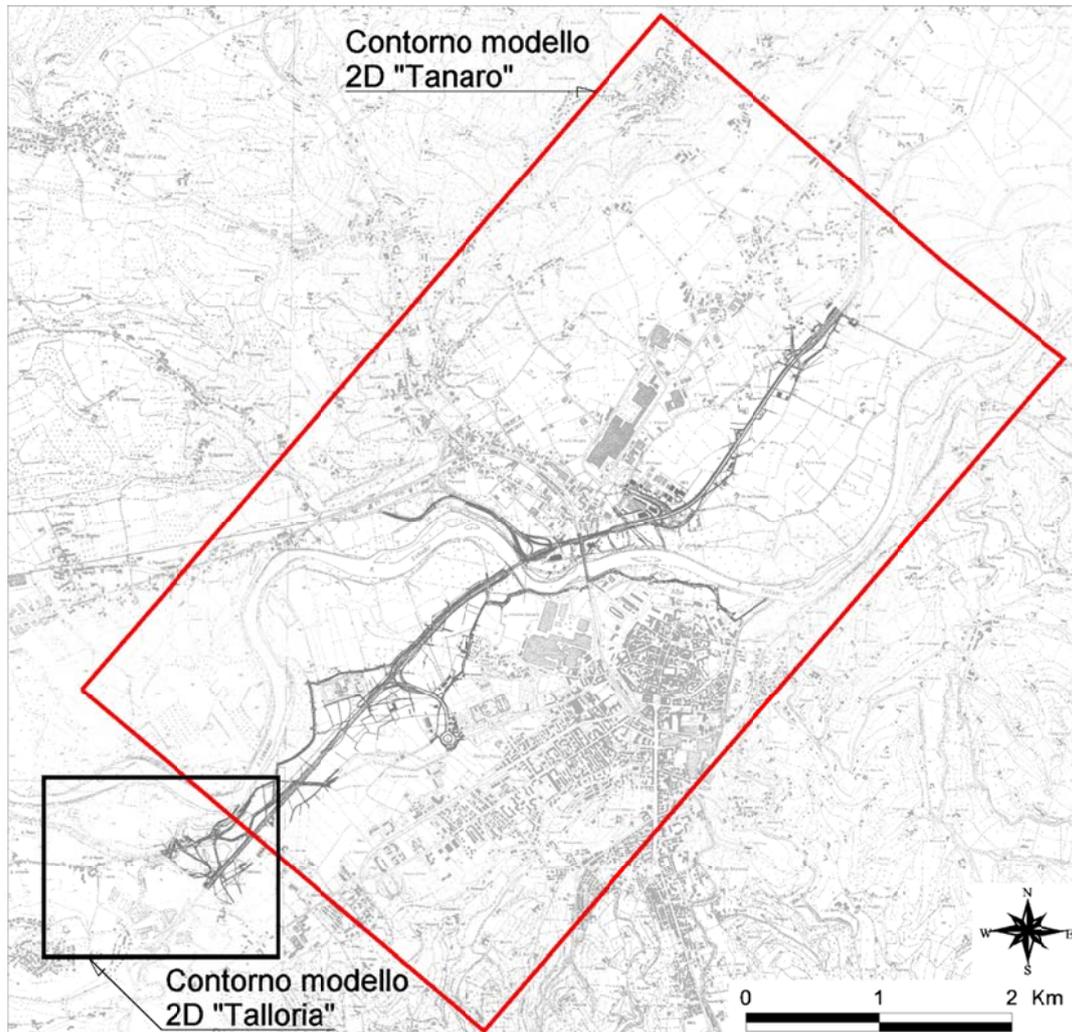


Figura 8 - Corografia dell'area oggetto di studio.

Nel modello sono stati rappresentati gli ingombri delle pile dei due ponti di Alba nel modo seguente (vedi Figura 9):

- per il ponte strallato su entrambe le sponde è stata inserita una cella di “non flusso” (di lato 10 m) che rispecchia le dimensioni reali delle pile presenti;
- per il ponte vecchio stradale-ferroviario che presenta 6 pile di circa 5 m di spessore si è deciso di introdurre 3 celle di “non flusso” (di lato 10 m) che dal punto di vista idraulico determinano un ingombro e un conseguente effetto di rigurgito, circa equivalente a quello reale.

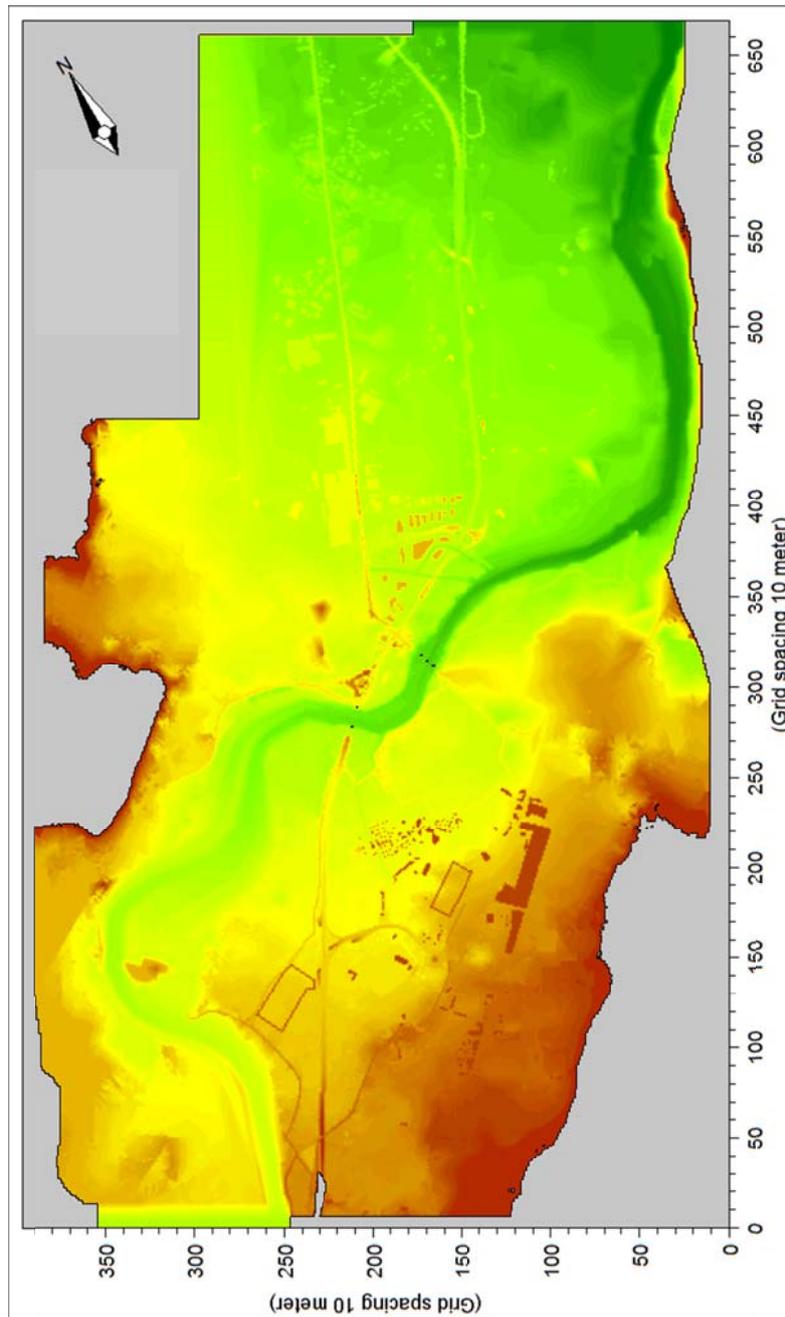


Figura 9 - Batimetria del modello 2D a maglia 10x10 m (situazione attuale).

5.3.2. Parametri del modello

Il modello di simulazione oltre alla riproduzione corretta della geometria del terreno 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 2,0 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 1,0 m²/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 e sulle golene e aree di allagamento. Tale parametro è difficilmente valutabile con precisione ed è abitualmente utilizzato per tarare il modello.

Nel caso in esame sono stati utilizzati coefficienti di scabrezza di Strickler, corrispondenti a quelli già adottati nei precedenti studi idraulici, opportunamente incrementati per tenere conto del fatto in un modello 2D sono già in tutto o almeno in gran parte direttamente considerati nelle equazioni del moto gli effetti di resistenza al moto indotti dalle condizioni di moto non-monodimensionali (turbolenza, moti vorticosi, sinuosità dell'alveo ecc.) che invece in un modello 1D devono essere necessariamente rappresentati mediante il ricorso ad un coefficiente globale di scabrezza inferiore (cui corrisponde una resistenza al moto maggiore).

Nella Figura 10 è riportata la distribuzione dei valori del coefficiente *c* di Strickler, assegnati al modello cella per cella. I valori, compresi tra 22 e 28 m^{1/3}/s per l'alveo inciso del Tanaro, pari a 10 m^{1/3}/s per le aree golenali e a 40 m^{1/3}/s per l'alveo sistemato del torrente Riddone, sono da considerare cautelativi.

5.3.3. Condizioni al contorno

Al modello sono state assegnate in generale le seguenti condizioni al contorno, successivamente descritte in maggior dettaglio nell'ambito della presentazione dei vari scenari di simulazione condotti:

- condizione al contorno di monte: portata al colmo costante nel tempo o idrogramma di piena in ingresso al modello;
- condizione al contorno di valle: livello idrico costante nel tempo o idrogramma di livello, entrambi desunti dai risultati del modello idrodinamico quasi-2D.

Le condizioni al contorno risultano in ogni caso applicate in punti sufficientemente lontani dalle aree di interesse e con i dovuti accorgimenti da poter ritenere del tutto trascurabili eventuali errori commessi nell'introduzione delle condizioni al contorno stesse.

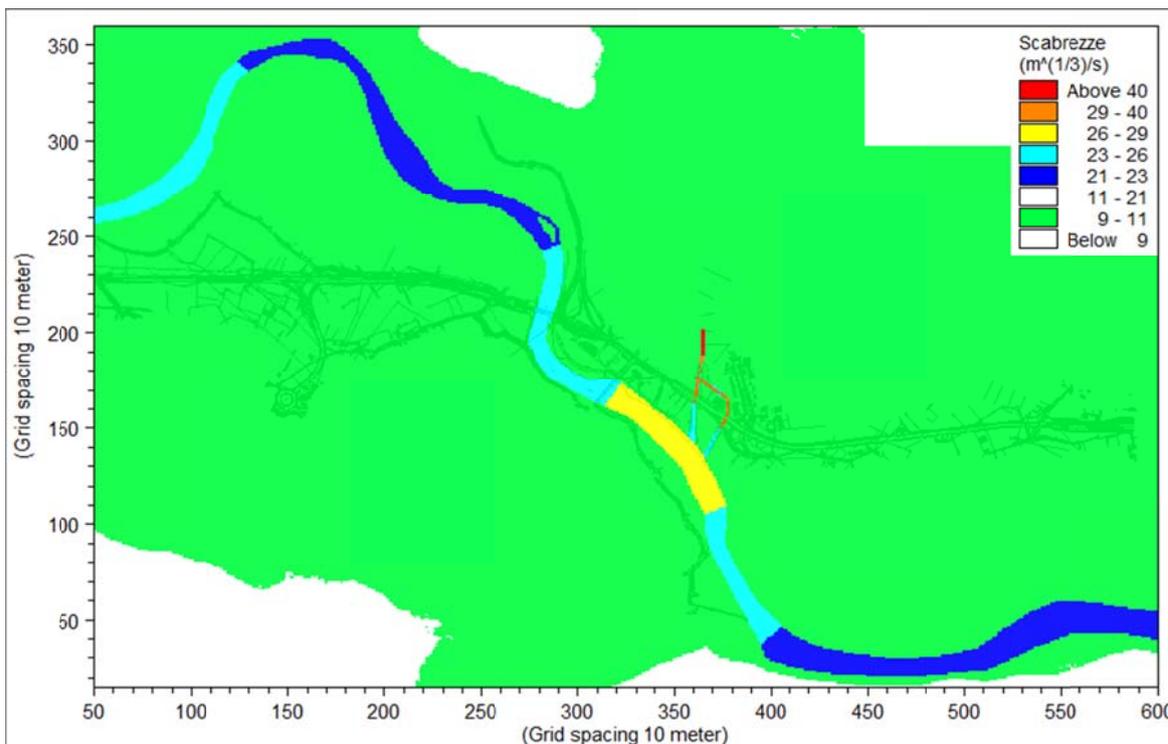


Figura 10 - Distribuzione dei coefficienti di scabrezza adottati nel modello.

5.3.4. Descrizione delle simulazioni e delle analisi idrauliche condotte

Con il modello 2D sono state condotte le seguenti simulazioni:

- evento di piena di progetto con tempo di ritorno 200 anni;
- evento di piena di progetto con tempo di ritorno 500 anni;

I risultati delle simulazioni ottenuti con il modello bidimensionale, oltre ai dati di ingresso e alle ipotesi di calcolo considerate, 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;
- campi di distribuzione delle velocità di deflusso;
- campi di distribuzione delle densità di portata.

5.3.5. Analisi dei risultati

Le simulazioni degli eventi di progetto con tempo di ritorno di 200 e di 500 anni sono state condotte cautelativamente considerando in ingresso al modello i valori delle portate al colmo dei due eventi e a valle, in uscita dal modello stesso, i valori corrispondenti di livello di piena tratti dai risultati delle simulazioni precedentemente condotte con il modello quasi-bidimensionale del Tanaro esteso fino a Masio.

In particolare si è considerato:

- per l'evento di piena di progetto con tempo di ritorno 200 anni: $Q_{\text{monte}} = 3700 \text{ m}^3/\text{s}$ – $h_{\text{valle}} = 156,11 \text{ m s.m.}$;
- per l'evento di piena di progetto con tempo di ritorno 500 anni: $Q_{\text{monte}} = 4250 \text{ m}^3/\text{s}$ – $h_{\text{valle}} = 156,32 \text{ m s.m.}$.

Le simulazioni sono state prolungate su un periodo di durata 6 ore sufficiente al raggiungimento delle volute condizioni di stazionarietà dei deflussi e dei livelli in tutto il tratto fluviale considerato.

Nella *Figura 11* è riportata la distribuzione delle altezze d'acqua rispetto al fondo alveo e al piano golenale indotte dal transito della portata al colmo di piena di progetto con tempo di ritorno 200 anni pari a $3700 \text{ m}^3/\text{s}$: le tonalità di azzurro più scure evidenziano le aree con tiranti idrici maggiori; nella stessa figura è rappresentato anche il campo dei vettori velocità di deflusso e sono indicati con linea rossa i limiti della fascia B.

Nella *Figura 12* è evidenziato il confronto tra il profilo longitudinale dei livelli di piena con tempo di ritorno 200 anni calcolato con il modello quasi-bidimensionale (codice di calcolo MIKE 11) e il corrispondente profilo longitudinale lungo l'asse dell'alveo del Tanaro calcolato con il modello bidimensionale (codice di calcolo MIKE 21). I livelli di piena sono stati letti sulle celle individuate dall'intersezione dell'asse fluviale con le sezioni trasversali d'alveo di rilievo. Nella stessa figura è stato inoltre riportato il confronto tra le quote di fondo delle sezioni d'alveo inserite nel modello MIKE 11 e le quote di thalweg relative alla batimetria del modello MIKE 11 in corrispondenza delle stesse sezioni.

Si può osservare come la corrispondenza tra i fondi alvei e tra i risultati dei due modelli sia buona. I maggiori scostamenti tra i profili di livello dei due modelli si hanno a monte del ponte strallato da attribuire essenzialmente ad una sovrastima, a favore di sicurezza, presente nel modello monodimensionale delle perdite di carico concentrate indotte dalle pile del ponte stesso e dal conseguente effetto di rigurgito che si risente verso monte. In realtà le pile del ponte strallato sono entrambe ubicate sulle golene per cui l'effetto di rigurgito da esse indotto è da ritenere circa trascurabile come calcolato con il modello bidimensionale.

I risultati forniti dal modello bidimensionale sono comunque da ritenere cautelativi anche nel tratto che si estende per circa 3 km a monte del ponte strallato, visti i valori piuttosto bassi dei coefficienti di scabrezza adottati, rispetto a quelli usualmente utilizzati nei modelli 2D ($30\text{-}40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ in alveo e $10\text{-}20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ in golena).

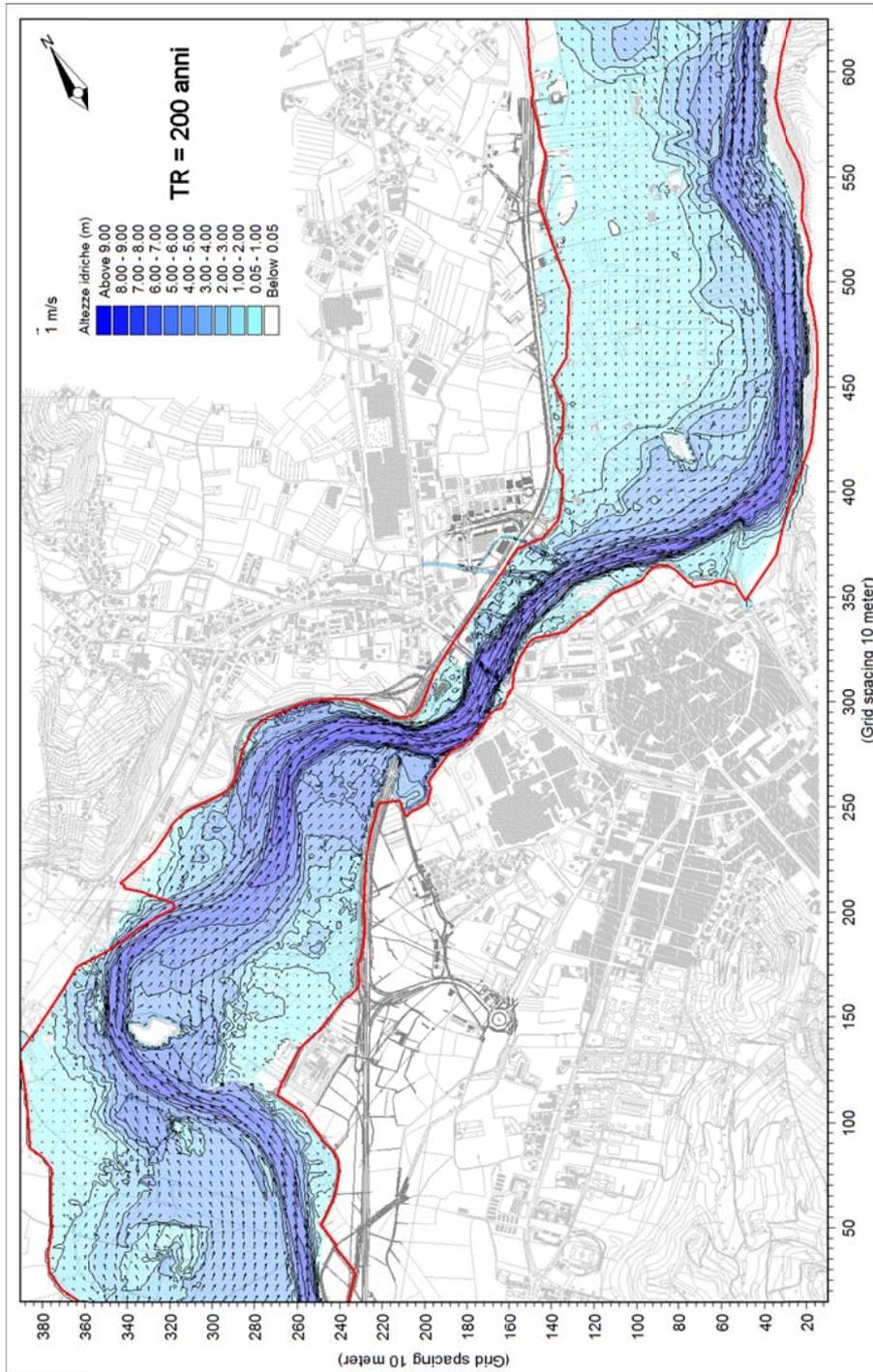


Figura 11 - TR = 200 anni: mappa dei tiranti e campo delle velocità di deflusso.

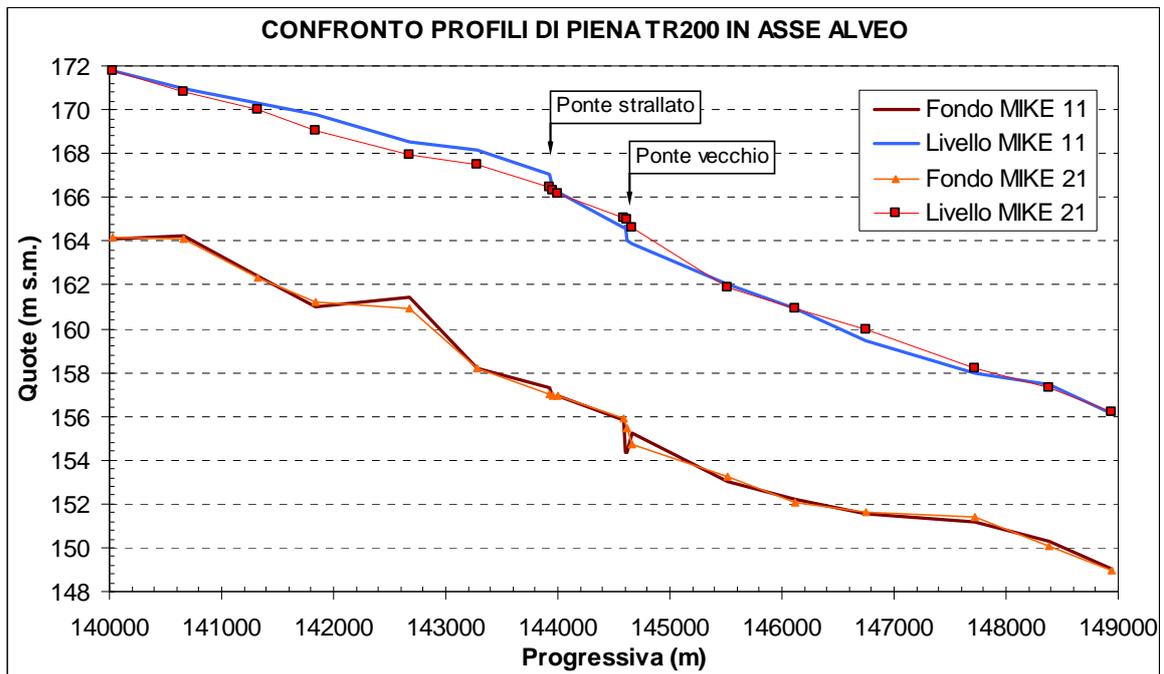


Figura 12 - TR = 200 anni: confronto con i risultati del modello quasi-2D (MIKE 11).

Nella *Figura 13* è riportata la distribuzione delle altezze d'acqua rispetto al fondo alveo e al piano golenale indotte dal transito della portata al colmo di piena di progetto con tempo di ritorno 500 anni pari a $4250 \text{ m}^3/\text{s}$.

Rispetto all'evento di piena con tempo di ritorno 200 anni che risulta tutto contenuto negli argini, in questo caso si osservano modeste esondazioni in sinistra orografica a monte del ponte strallato, in destra orografica a valle del ponte vecchio di Alba e in corrispondenza dell'alveo del torrente Riddone a monte della tangenziale di Alba per effetto del solo rigurgito indotto dai livelli del Tanaro (in questo scenario non si è infatti ipotizzato alcuna portata in ingresso all'alveo del torrente).

Nella *Figura 14* è rappresentata una mappa a curve di livello delle quote massime del pelo libero nella situazione attuale, per l'evento di piena con tempo di ritorno 200 anni, sull'intera estensione del modello, in base alla quale è possibile verificare le quote arginali esistenti.

Nella successiva *Figura 15* è riportata l'analoga mappa a curve di livello delle quote massime del pelo libero nel caso di evento di piena con tempo di ritorno 500 anni che risulta del tutto simile alla precedente: nella *Figura 16* è rappresentata la mappa delle differenze di livello tra i due eventi di piena, che risultano massime e dell'ordine dei 0,6 m a monte del ponte strallato e comprese tra circa 0,2 e 0,4 m a valle del ponte vecchio.

Nel seguito, visto che le simulazioni dei due eventi non differiscono in maniera molto evidente, vengono presentate le elaborazioni condotte solo sui risultati dell'evento con tempo di ritorno 200 anni.

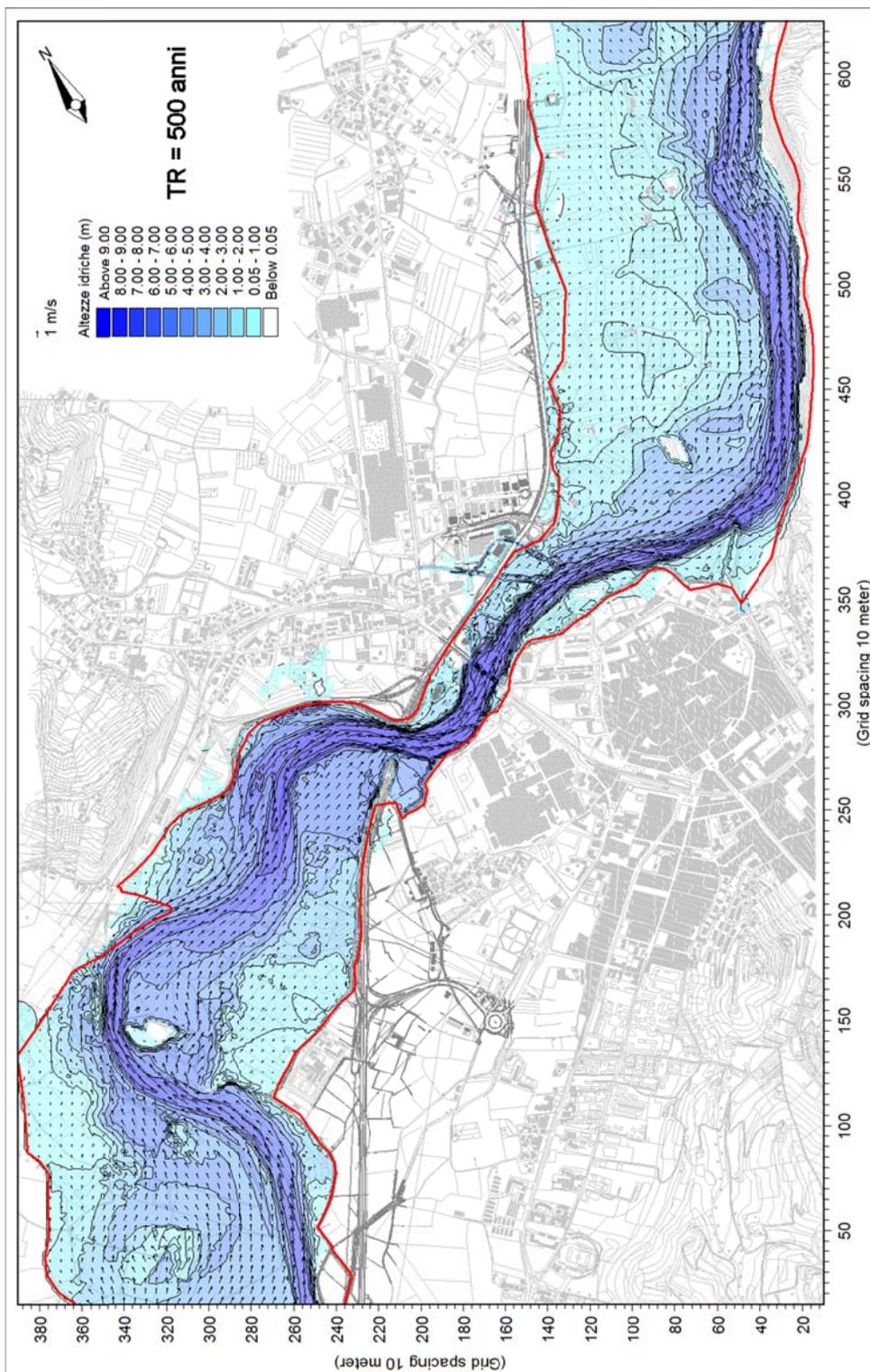


Figura 13 - TR = 500 anni: mappa dei tiranti e campo delle velocità di deflusso.

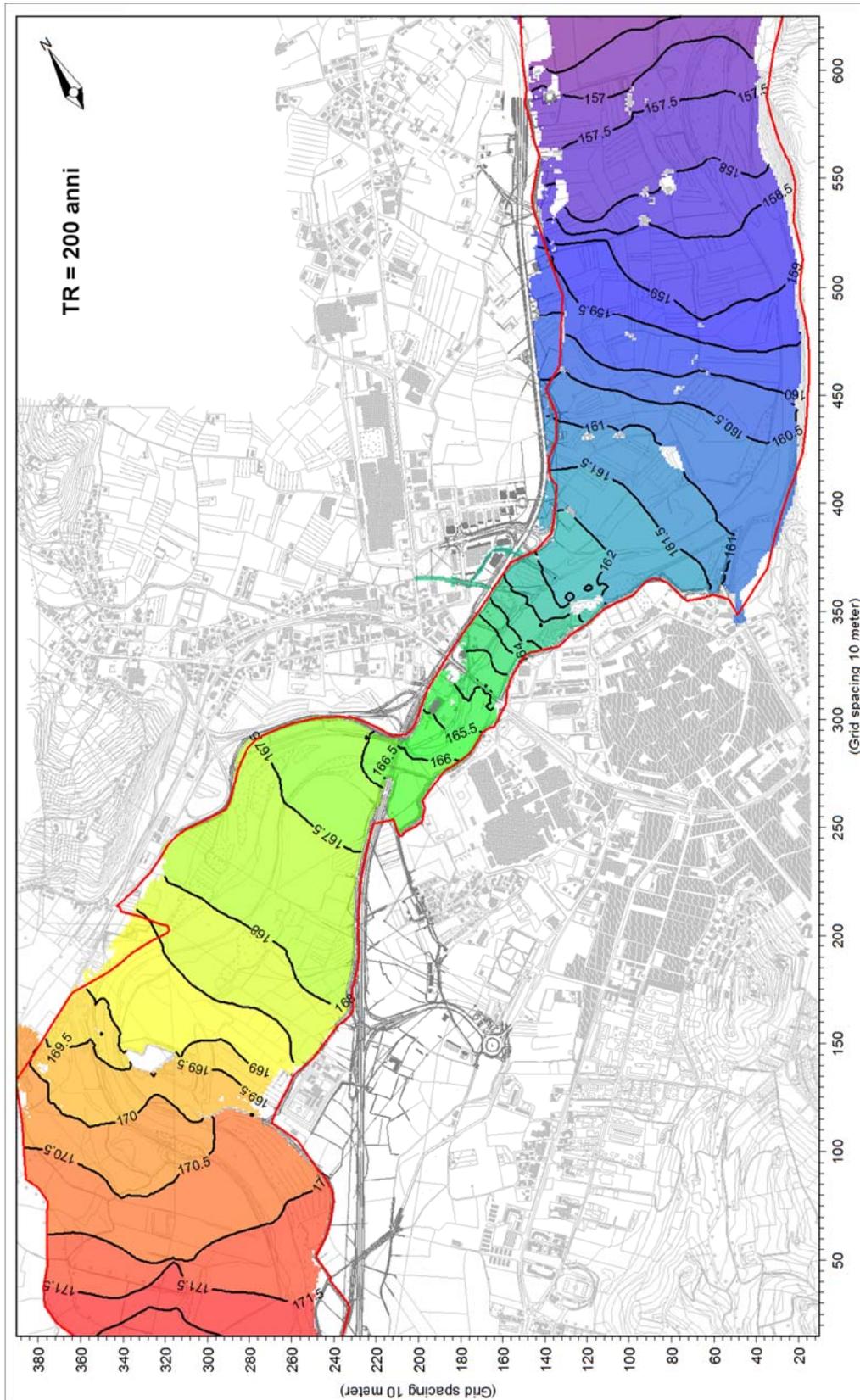


Figura 14 - TR = 200 anni: mappa delle quote di pelo libero.

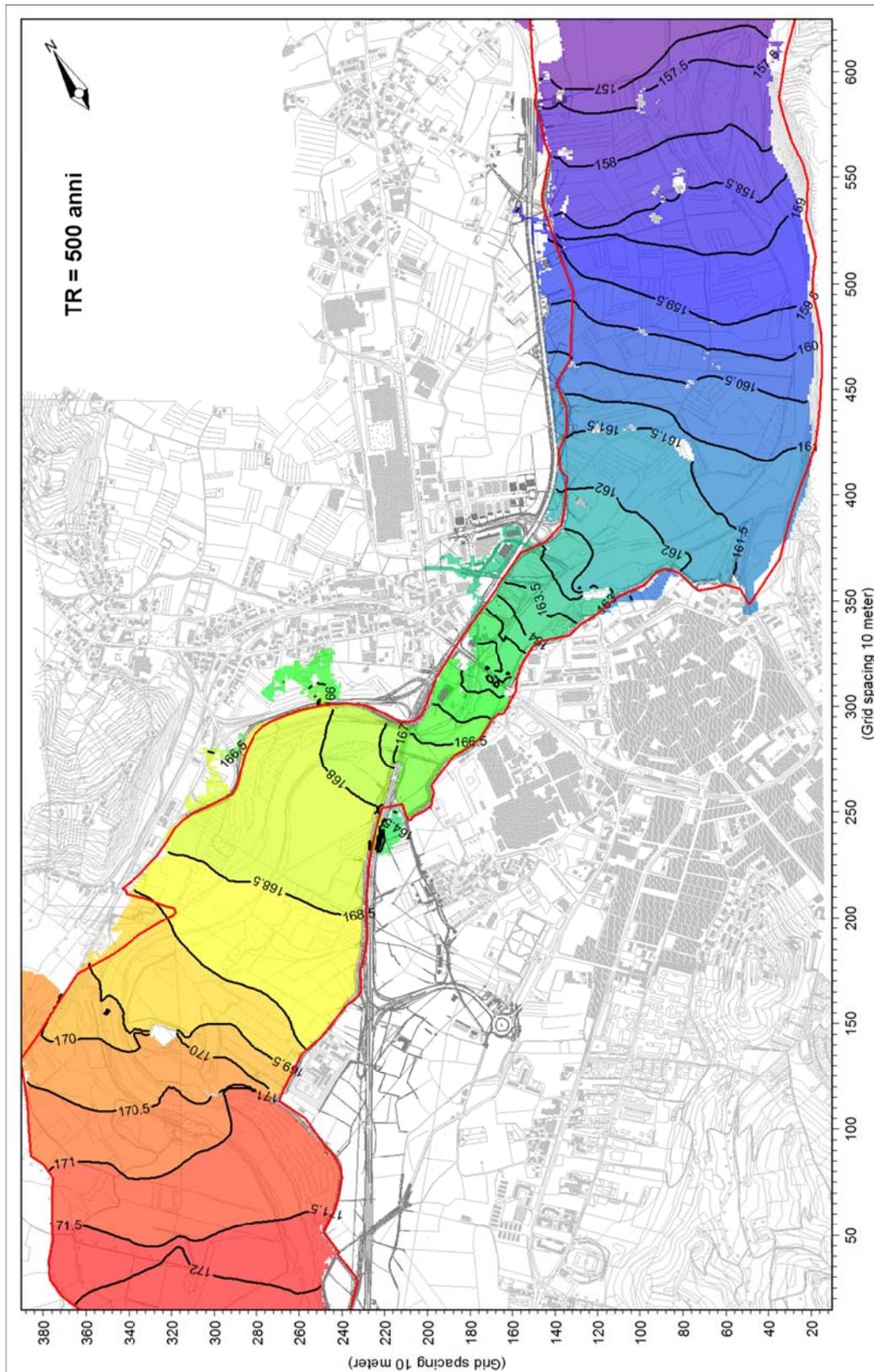


Figura 15 - TR = 500 anni: mappa delle quote di pelo libero.

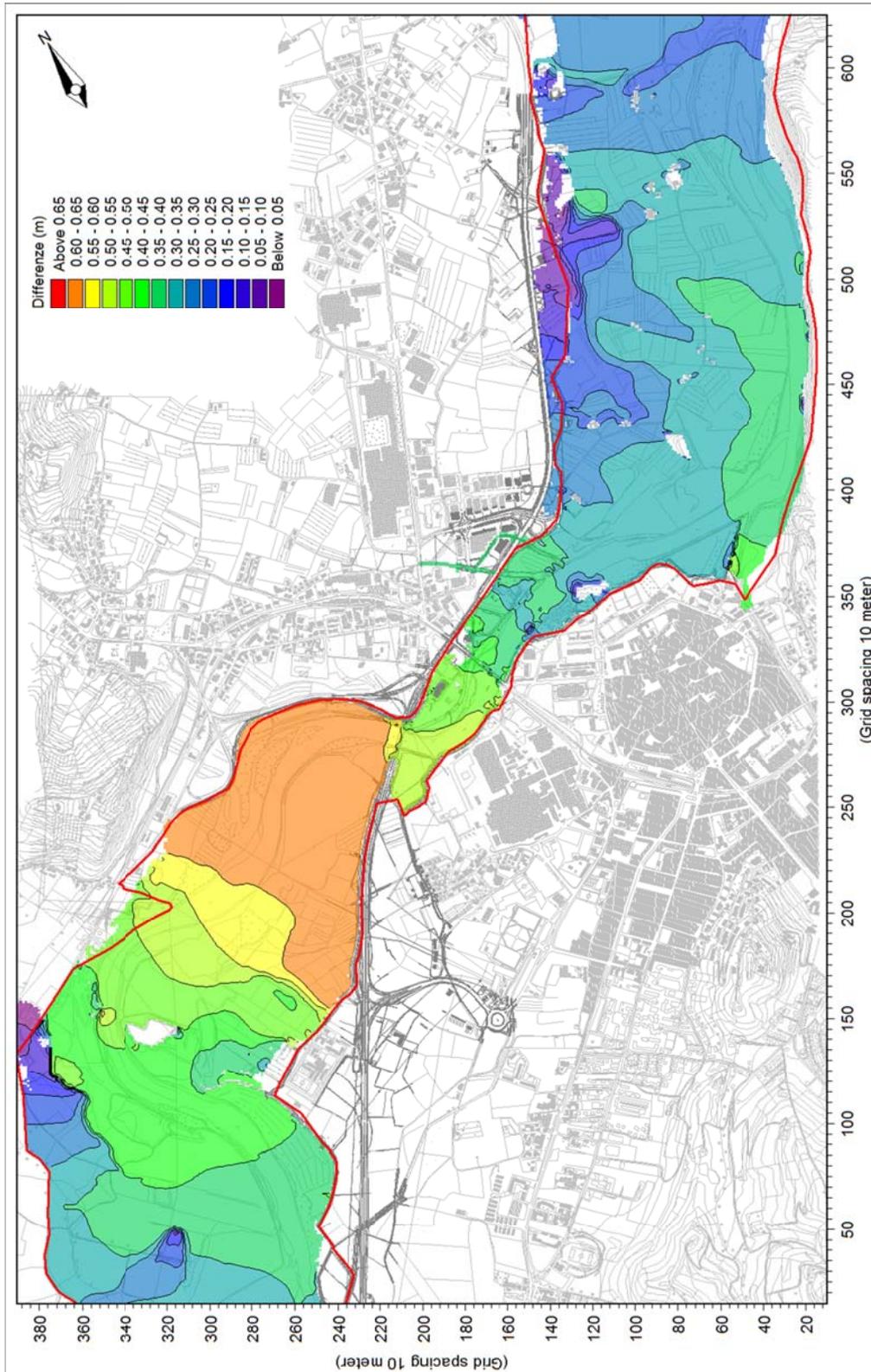


Figura 16 - Mappa delle differenze tra le quote di pelo libero dell'evento con TR = 500 anni e quelle relative all'evento con TR = 200 anni.

Nella *Figura 17* è rappresentata la distribuzione areale delle velocità massime di flusso in occasione dell'evento di piena con tempo di ritorno 200 anni considerato che evidenzia come i valori massimi delle stesse siano concentrati tutti in corrispondenza dell'alveo inciso del Tanaro e in particolar modo nei pressi dei due ponti di Alba, mentre sulle aree golenali le velocità di flusso si mantengono mediamente inferiori a 1,0 m/s.

Nella *Figura 18* è riportato un ingrandimento del precedente campo di velocità in corrispondenza dei ponti di Alba, nel quale sono indicati anche i vettori velocità: risultano evidenti gli effetti reali delle pile del ponte strallato e quelli "equivalenti" delle pile del ponte vecchio per il quale, come sopra detto, nel modello sono state introdotte 3 pile di ingombro equivalente alle 6 pile effettive del ponte.

Nella *Figura 19* è infine rappresentata una mappa della distribuzione areale della densità di portata ($m^3/s \cdot m$) che illustra molto chiaramente come il deflusso sia circa tutto concentrato nell'alveo inciso del Tanaro, e come nelle golene le densità di portata risultino generalmente inferiori a 2-4 $m^3/s \cdot m$.

Nella *Figura 20* è riportata una corografia con ubicazione degli argini esistenti, sulla quale sono indicate le progressive longitudinali a partire dall'estremità di monte di ognuno dei tre tratti considerati, denominati:

- "ARGINE 1" quello in destra orografica a monte del ponte strallato di Alba;
- "ARGINE 2" quello in destra orografica a valle dello stesso ponte strallato;
- "ARGINE 3" quello in sinistra orografica che prosegue con il rilevato della tangenziale di Alba.

Nelle successive *Figura 21*, *Figura 22* e *Figura 23* sono riportati i profili longitudinali delle quote di sommità degli argini e delle quote di pelo libero relative agli eventi con tempo di ritorno 200 e 500 anni, tratte dai risultati del modello bidimensionale in corrispondenza delle progressive a passo 100 m indicate nella *Figura 20* e poste in ascissa nei diagrammi stessi.

Si osservano alcune criticità riferibili a franchi della piena duecentennale rispetto alle sommità arginali inferiori al metro (si vedano anche le tavole grafiche "Planimetria e profilo idrico di piena lungo gli argini di Tanaro).

- per l'ARGINE 1 tra le progressive 1,9 e 2,1 km nei pressi delle Carceri e nel punto di innesto nel rilevato della tangenziale di Alba in prossimità della spalla destra del ponte strallato (franchi per TR 200 di 70-80 cm);
- per l'ARGINE 2 in corrispondenza dei cancelli di ingresso di un impianto sportivo (progressiva 1,5 km) e nel segmento terminale di affiancamento del torrente Cherasco che confluisce in Tanaro (si tratta in ogni caso di punti lontani dal tracciato autostradale, che non risulta condizionato dagli aspetti di rischio idraulico ad essi riferibili);
- per l'ARGINE 3 in vari punti a monte del ponte strallato (tra le progressive 0,0 e 1,3 km) e a valle del ponte vecchio in corrispondenza del viadotto della tangenziale (tra le progressive 1,8 e 2,0 km).

Da osservare nella *Figura 21* i notevoli abbassamenti di livello che si determinano in corrispondenza della progressiva 2,2 km per effetto della presenza di un pennello che allontana dall'argine il flusso principale della corrente allungando il percorso idraulico (si veda in particolare la *Figura 19*).

Infine, nella zona di confluenza del torrente Riddone, dove l'elemento principale di difesa dalle piene in sinistra Tanaro è costituito dal rilevato stesso della tangenziale di Alba, alcune rampe dello svincolo esistente di raccordo con la viabilità ordinaria sono posizionate internamente a tale argine, nel settore golenale esondabile (anche se



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Relazione idrologica idraulica - Fiume Tanaro e confluenze principali

esternamente alla fascia B del PAI). Le simulazioni bidimensionali hanno comunque evidenziato che i tracciati esistenti delle rampe non sono sostanzialmente interessati (se non in modo marginale nei punti più depressi) dalle esondazioni prodotte dall'evento di progetto duecentennale.

Le opere di attraversamento esistenti (ponte strallato sul fiume Tanaro e viadotto sul Riddone) sono ampiamente verificate rispetto alla piena duecentennale.

In particolare il ponte strallato presenta franchi variabili circa da 2 a 4 m e non costituisce ostacolo al deflusso avendo le pile ubicate nei settori golenali.

Il viadotto sul Riddone presenta analogamente franchi elevati (dell'ordine di 4-5 m) rispetto ai livelli di piena indotti dal Tanaro, e dallo stesso affluente (di cui viene illustrata l'analisi idraulica nel paragrafo successivo).

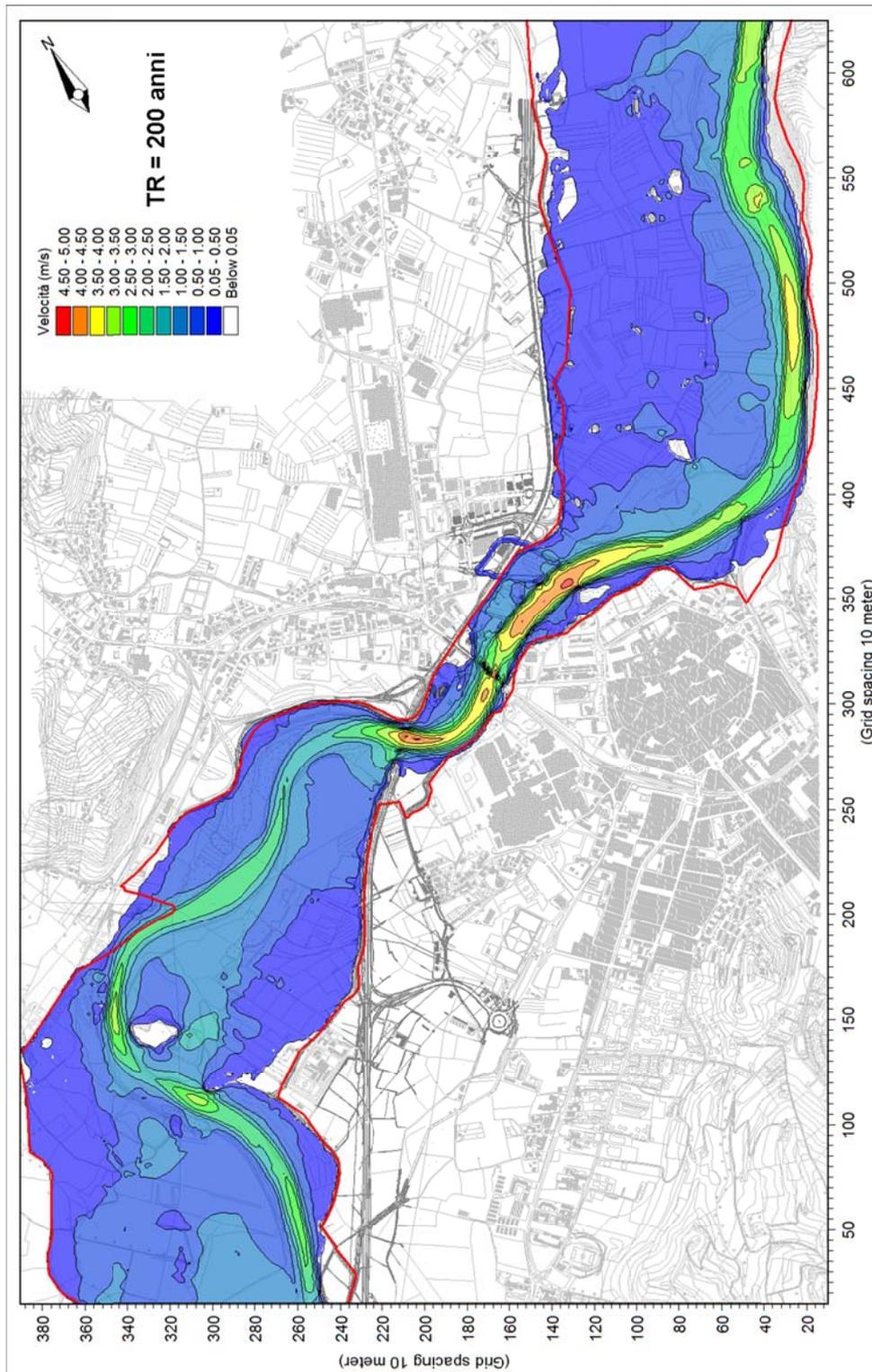


Figura 17 - TR = 200 anni - distribuzione delle velocità di deflusso al colmo di piena.

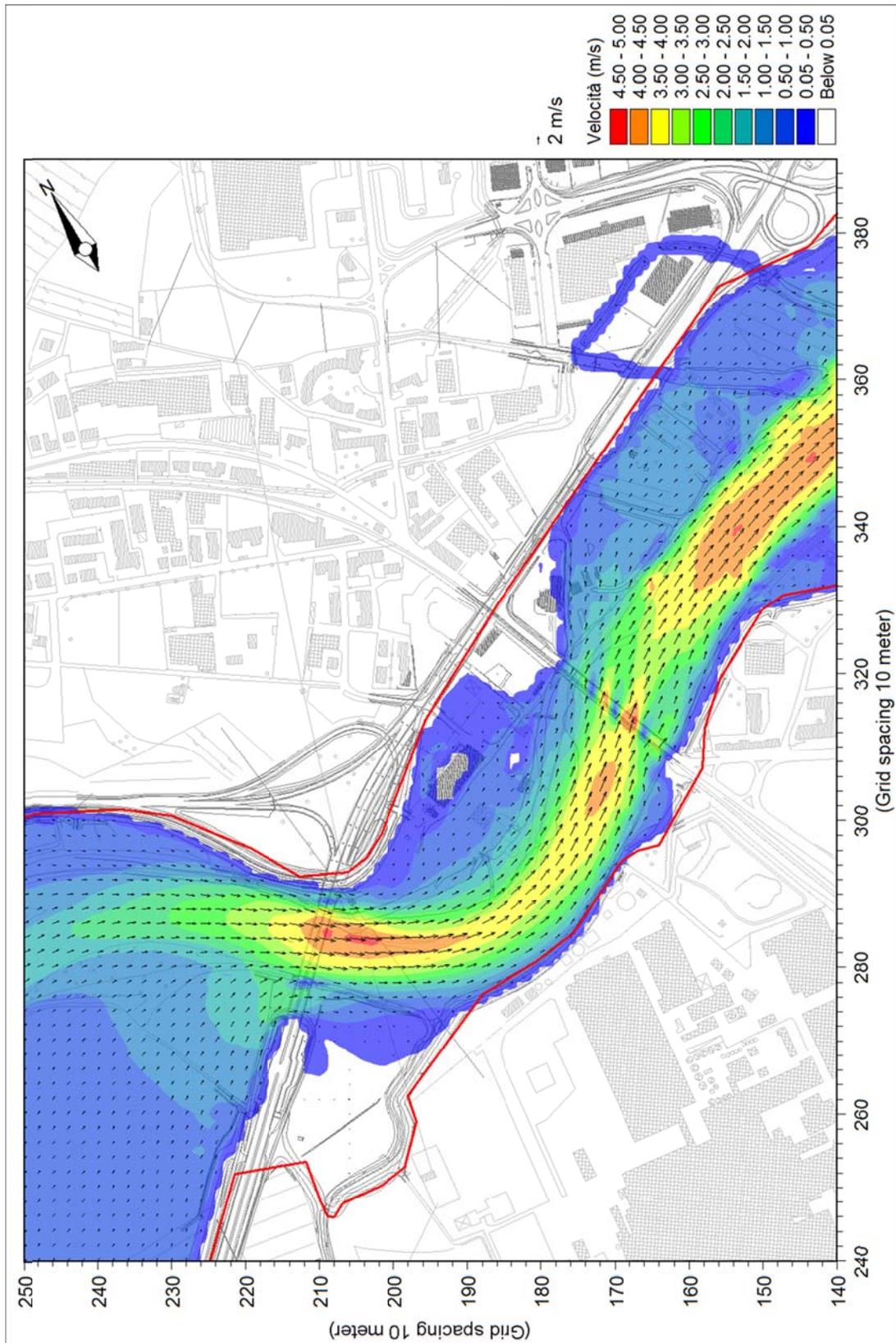


Figura 18 - TR = 200 anni - particolare del campo delle velocità di deflusso.

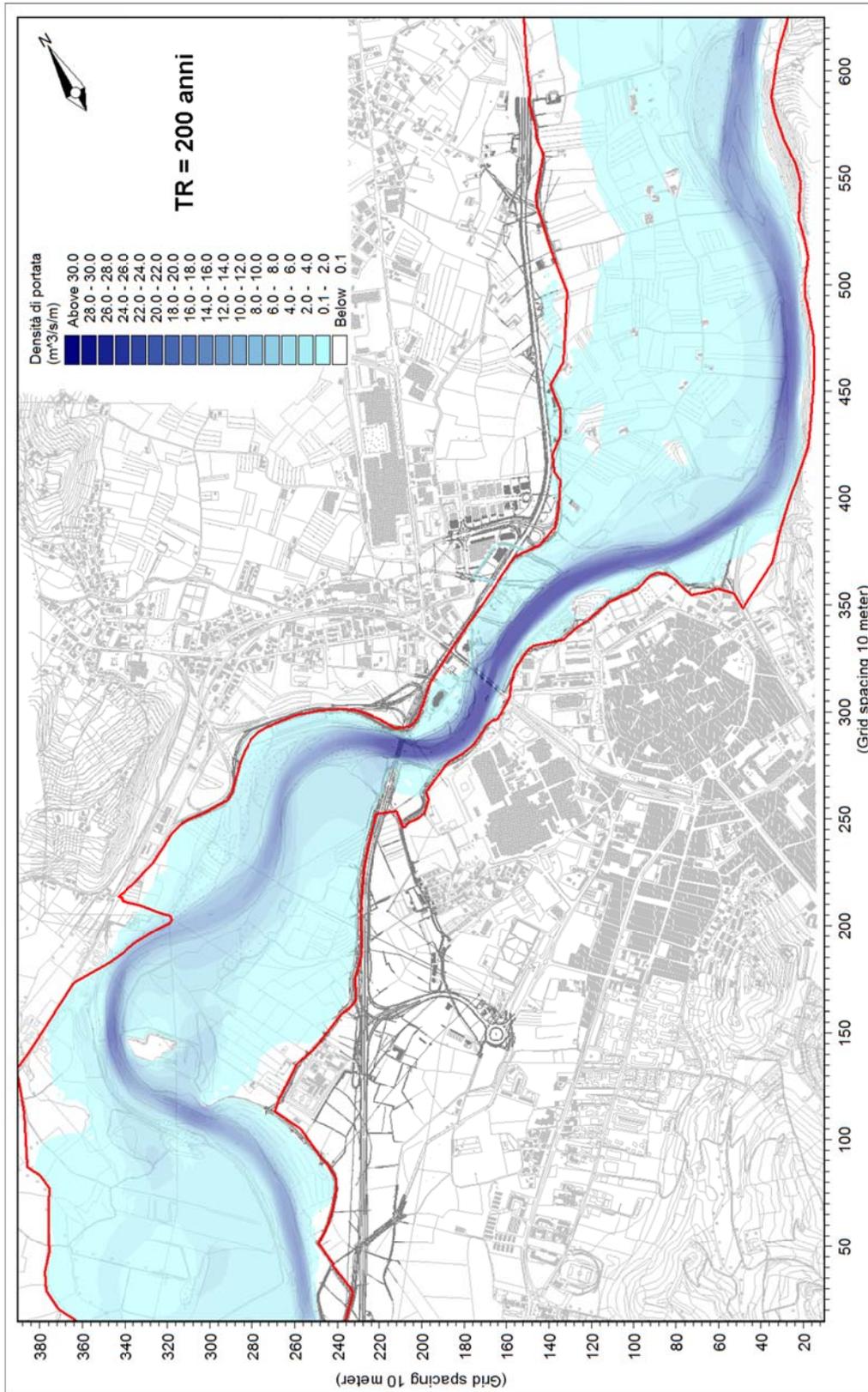


Figura 19 - TR = 200 anni: mappa delle densità di portata.

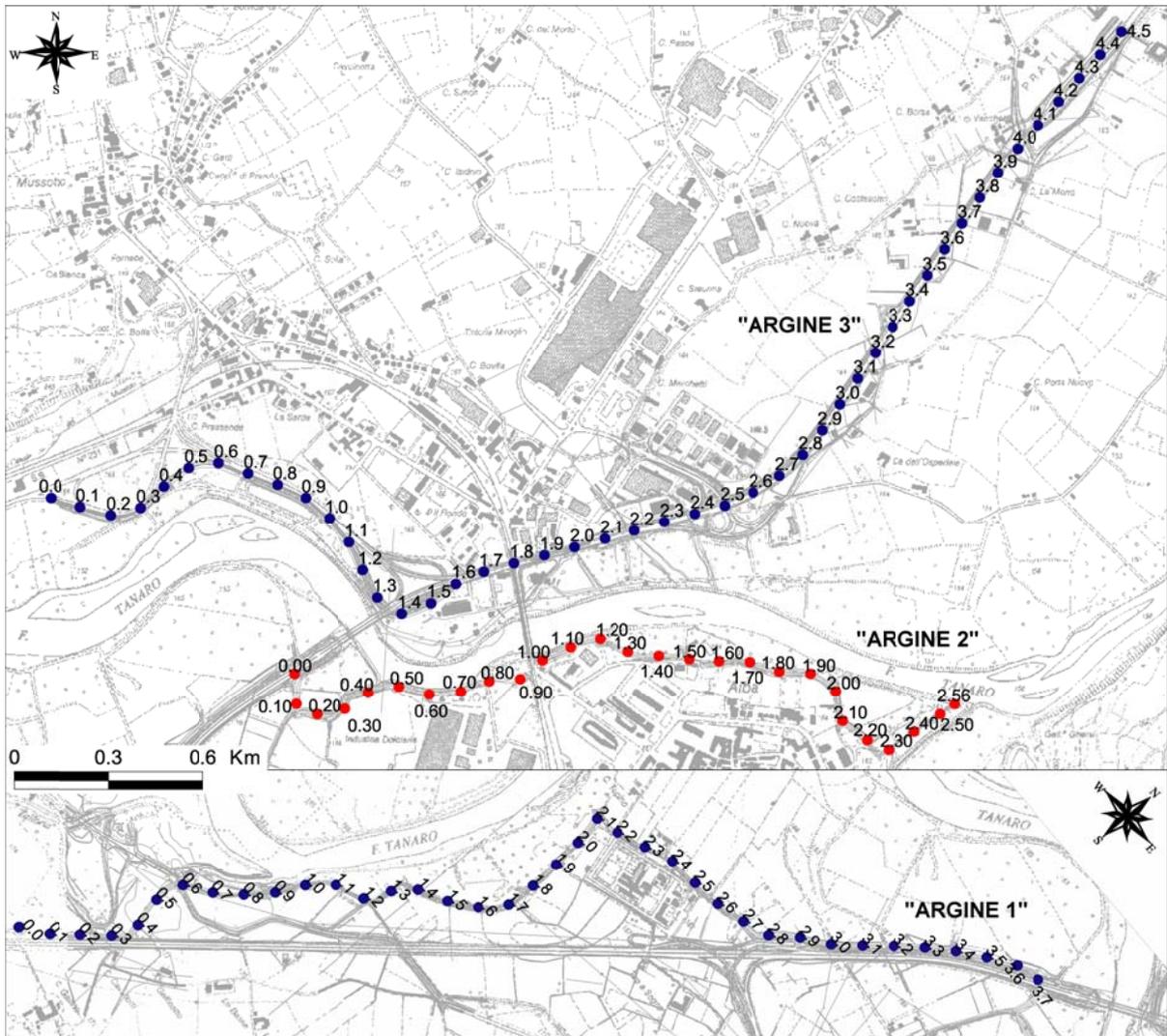


Figura 20 - Corografia con ubicazione argini e corrispondenti progressive.

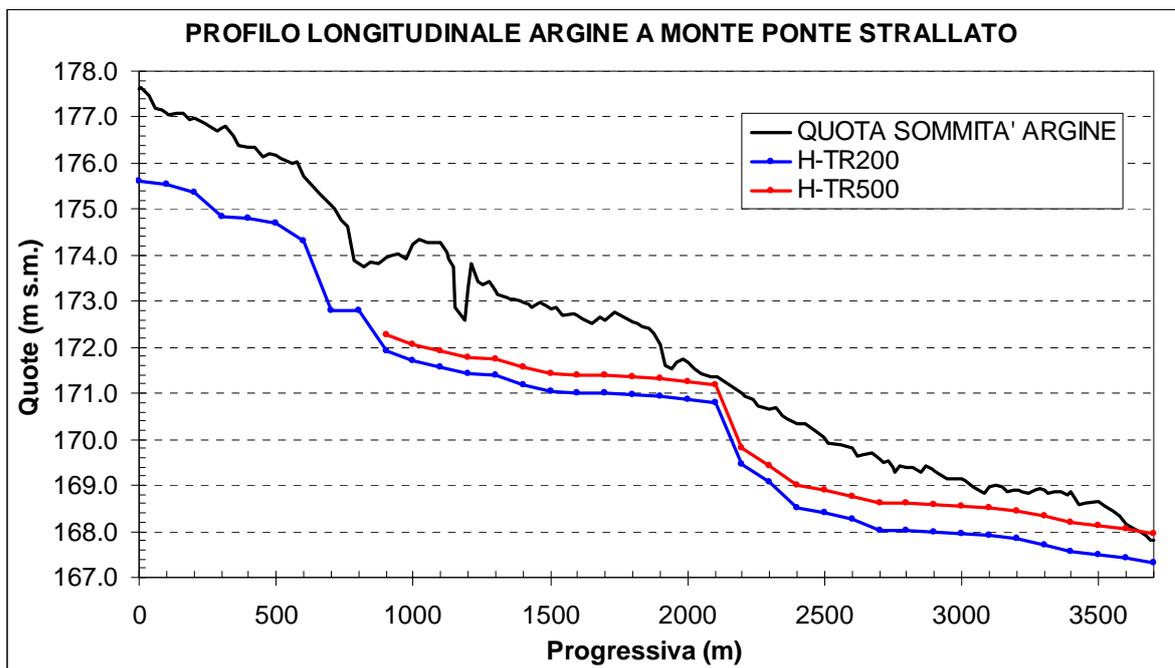


Figura 21 - Profilo longitudinale "ARGINE 1" (vedi Figura 20).

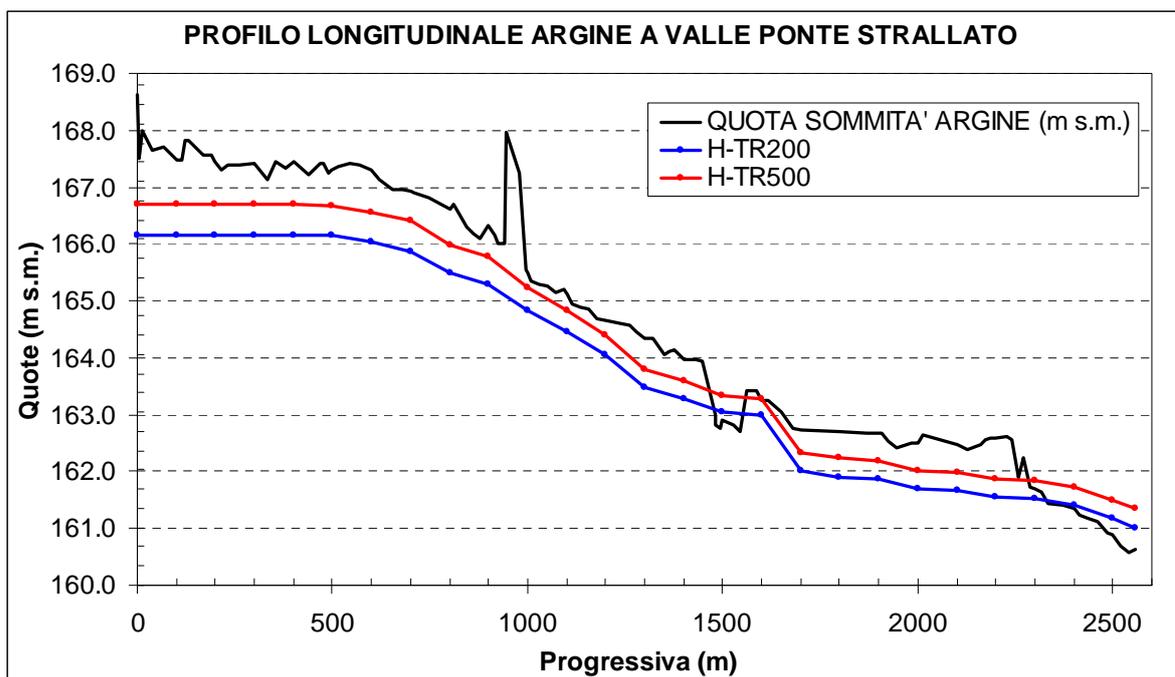


Figura 22 - Profilo longitudinale "ARGINE 2" (vedi Figura 20).

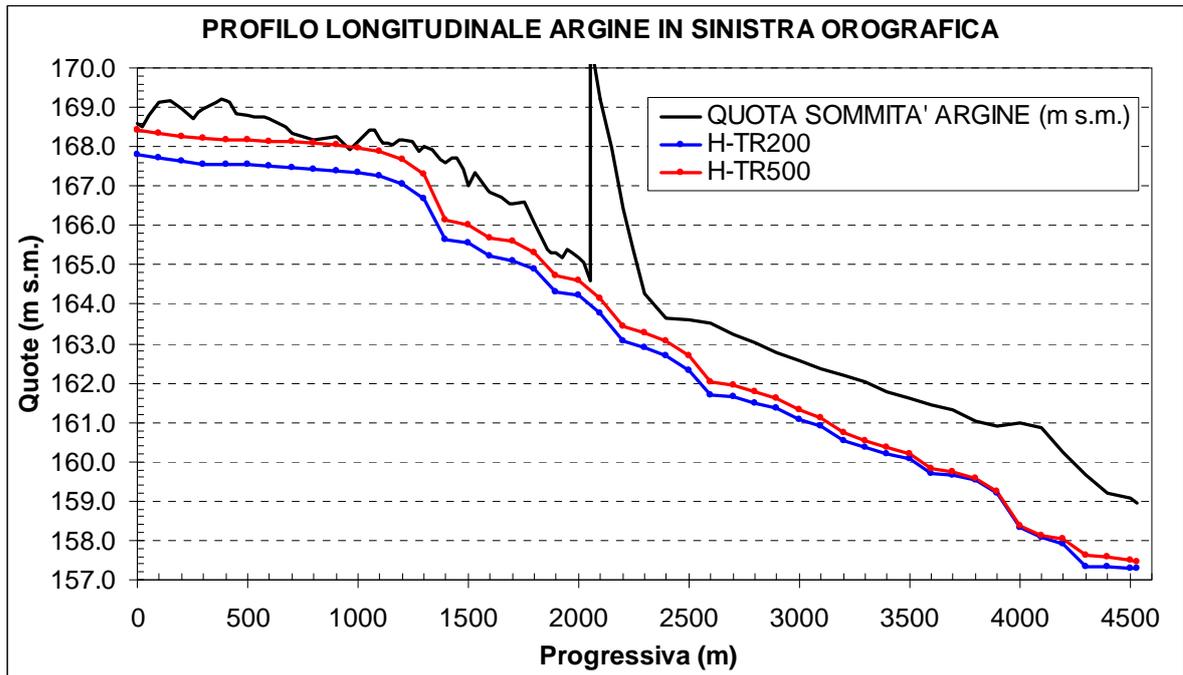


Figura 23 - Profilo longitudinale "ARGINE 3" (vedi Figura 20).

6. ANALISI IDROLOGICO-IDRAULICA / NODO DI CONFLUENZA DEL TALLORIA

6.1. INQUADRAMENTO

Nei paragrafi che seguono viene descritta l'analisi idraulica del nodo costituito dalla confluenza del torrente Talloria nel Tanaro, tenendo conto dell'interferenza indotta dalle opere esistenti e da quelle previste nel progetto di attraversamento del collegamento A6-A21 Asti-Cuneo.

Sull'area di indagine il progetto prevede, oltre al rilevato autostradale e alle pile del viadotto di attraversamento, una sistemazione idraulica dell'alveo del torrente Talloria nel tratto terminale e una deviazione del canale di Verduno. Risulta viceversa già realizzato l'argine in sponda destra Talloria, posizionato lungo il tracciato della tangenziale di Alba per impedire che le acque del torrente, come è avvenuto durante l'evento di piena del 1994, possano tracimare la sede stradale e quindi defluire verso Alba.

Per l'esecuzione dello studio è stato costruito un modello idrodinamico bidimensionale a fondo fisso, utilizzando il codice di calcolo MIKE 21 del DHI Water.Environment.Health che risolve le equazioni del moto bidimensionali di De St.Venant.

Con il modello idrodinamico bidimensionale sono stati simulati i seguenti due scenari di riferimento, entrambi in condizioni di evento di piena di progetto con tempo di ritorno 200 anni:

- 1) situazione attuale;
- 2) situazione di progetto con opere autostradali e sistemazione idraulica del torrente Talloria realizzate.

L'analisi accurata dei risultati delle simulazioni condotte ha consentito di verificare la compatibilità idraulica degli interventi in progetto.

6.2. ANALISI IDROLOGICA

Nell'ambito del "Progetto definitivo 2° e 3° lotto" degli "Interventi sul torrente Talloria - progetto esecutivo dello scolmatore e delle opere idraliche connesse a protezione della città di Alba" (giugno 1998) è stata condotta, mediante messa a punto ed applicazione di un modello idrodinamico monodimensionale, la verifica idraulica in moto permanente del tratto terminale del torrente Talloria fino alla confluenza in Tanaro considerando le seguenti ipotesi di calcolo:

- conformazione dell'alveo nella situazione di intervento ad opere completate;
- portata di piena con tempo di ritorno 200 anni $Q = 310 \text{ m}^3/\text{s}$ (condizione al contorno di monte);
- livello di piena in Tanaro a quota 173,28 m s.m. (condizione al contorno di valle) corrispondente al massimo livello di piena relativo all'evento alluvionale del novembre 1994, ricostruito nel "Sottoprogetto SP1 - Piene e naturalità degli alvei fluviali" delle "Attività di studio e ricerca a supporto della redazione del Piano di Bacino" redatto per conto dell'Autorità di Bacino del Fiume Po (giugno 1995).

Per le successive verifiche idrauliche del torrente Talloria nella configurazione di progetto prevista in prossimità dell'attraversamento dell'autostrada Asti-Cuneo (marzo 2002), il modello idrodinamico monodimensionale pregresso è stato opportunamente modificato e riadattato (in particolare riducendo lo sviluppo longitudinale dell'alveo

inciso nel tratto subito a monte del viadotto autostradale) e sono state considerate le seguenti ipotesi di calcolo:

- conformazione dell'alveo nella situazione di progetto ad opere completate;
- portate di piena con tempo di ritorno di 200 e 500 anni, rispettivamente $Q = 310 \text{ m}^3/\text{s}$ e $Q = 350 \text{ m}^3/\text{s}$;
- livello di piena in Tanaro, alla confluenza Talloria, con tempo di ritorno 200 anni a quota 173,08 m s.m., ottenuto con interpolazione lineare tra i valori del "profilo di piena del fiume Tanaro" riportati nella "Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica" - Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI).

Le portate di piena del torrente Talloria in tali studi erano state in particolare fornite dalla Regione Piemonte all'Amministrazione comunale di Alba con lettera prot. n. 3232/23 del 2 giugno 1998, nella quale venivano indicati i seguenti valori di assegnato tempo di ritorno, da maggiorare del 10% a causa delle incertezze connesse con il metodo utilizzato:

- $QTR50 = 238 \text{ m}^3/\text{s}$;
- $QTR100 = 261 \text{ m}^3/\text{s}$;
- $QTR200 = 283 \text{ m}^3/\text{s}$;
- $QTR500 = 314 \text{ m}^3/\text{s}$.

La citata direttiva del PAI, oltre a fornire il profilo di piena del Tanaro con tempo di ritorno 200 anni, da cui è stata tratta la condizione al contorno di valle per le simulazioni sul Talloria nello studio del 2002, definisce anche le portate di piena di assegnato tempo di ritorno di riferimento per le verifiche idrauliche. Per il Tanaro ad Alba vengono definite le seguenti portate di piena al colmo, determinate nell'ipotesi di realizzare casse di laminazione sul Tanaro a monte di Alba:

- $QTR20 = 2050 \text{ m}^3/\text{s}$;
- $QTR100 = 2750 \text{ m}^3/\text{s}$;
- $QTR200 = 3050 \text{ m}^3/\text{s}$;
- $QTR500 = 3400 \text{ m}^3/\text{s}$.

I livelli di piena bicentenaria riportati nella direttiva del PAI derivano invece da studi e progetti di sistemazione nei quali la portata di piena di riferimento considerata risulta sensibilmente maggiore, prossima a quella stimata per la piena del 1994 in tale tratto ($3700 \div 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Nell'ipotesi che le casse non vengano realizzate (situazione attuale), le portate di piena al colmo di progetto per il Tanaro ad Alba sono infatti ufficialmente le seguenti:

- $QTR200 = 3700 \text{ m}^3/\text{s}$;
- $QTR500 = 4250 \text{ m}^3/\text{s}$ (stima più accreditata della portata di piena del 1994 nel tratto in esame).

In uno studio di dettaglio del nodo Tanaro-Talloria condotto sempre nel 2002, ma con applicazione di un modello bidimensionale, le opere in progetto sono state verificate nell'ipotesi di considerare la concomitanza di un evento di piena con tempo di ritorno di 500 anni in ingresso nel Talloria ($Q = 350 \text{ m}^3/\text{s}$) e una concomitante condizione di piena nel Tanaro con portata bicentenaria ($3700 \text{ m}^3/\text{s}$).

Più recentemente, nello studio idrologico relativo al "Progetto esecutivo dei lavori di sistemazione idraulica del torrente Talloria - 4° lotto" (giugno 2007) sono state adottate le seguenti portate di progetto del Torrente Talloria alla confluenza in Tanaro:

- $QTR50 = 347 \text{ m}^3/\text{s}$;
- $QTR200 = 426 \text{ m}^3/\text{s}$;
- $QTR500 = 481 \text{ m}^3/\text{s}$.

Nel presente studio si è pertanto deciso di fare riferimento alla seguente ipotesi cautelativa di scenario di verifica idraulica:

- QTR200 = 426 m³/s in ingresso nel torrente Talloria;
- QTR200 = 3700 m³/s contemporaneamente defluente nel Tanaro con livelli calcolati, sempre nell'ambito del presente studio, mediante applicazione di un modello idrodinamico quasi-bidimensionale descritto nel precedente capitolo 3, esteso tra la foce Stura di Demonte e circa foce Belbo (Tanaro a Masio).

6.3. MESSA A PUNTO DEL MODELLO NUMERICO

6.3.1. Costruzione della griglia di calcolo del modello numerico 2D

La geometria del territorio è stata ricostruita con lo stesso procedimento descritto per il modello 2D dell'asta del Tanaro (v. par. 5.3.1).

Nel caso in esame si è scelto di adottare una griglia di calcolo a maglia 4x4 m in modo da mantenere il grado di dettaglio dell'informazione fornita dal rilievo di origine e da rappresentare con sufficiente precisione anche l'esatta ubicazione delle pile del viadotto.

La griglia di calcolo del modello a maglia 4x4 m presenta complessivamente 1070 righe x 523 colonne (559610 punti di calcolo). Nella *Figura 24* è rappresentata una corografia della zona di studio con evidenziato il contorno dell'area di applicazione del modello bidimensionale.

Nella *Figura 25* è rappresentata la batimetria (o geometria di input) complessiva del modello relativa alla situazione attuale mentre nella *Figura 26* è rappresentata la batimetria relativa allo scenario di progetto. In grigio sono evidenziate le zone escluse dal calcolo (celle inattive) perché considerate non allagabili (essenzialmente le aree con quota maggiore di 185 m s.m.). In verde scuro sono evidenziate le aree più depresse (alveo del Tanaro) mentre in marrone e giallo sono distinguibili i rilevati stradali e arginali, nonché le ulteriori aree in rilievo. Nelle figure, sovrapposte alla rappresentazione della batimetria, sono riportate le linee vettoriali rappresentanti gli elementi topografici (di rilievo e/o di progetto) di maggiore interesse.

Rispetto al DTM di rilievo, è stata infine opportunamente modificata la zona di imbocco del modello in corrispondenza dell'alveo del torrente Talloria per facilitare l'assegnazione della condizione al contorno di portata in ingresso al modello stesso. Modifiche locali alle quote del DTM sono state inoltre apportate lungo l'alveo del Tanaro per favorire l'assegnazione della condizione al contorno di valle.

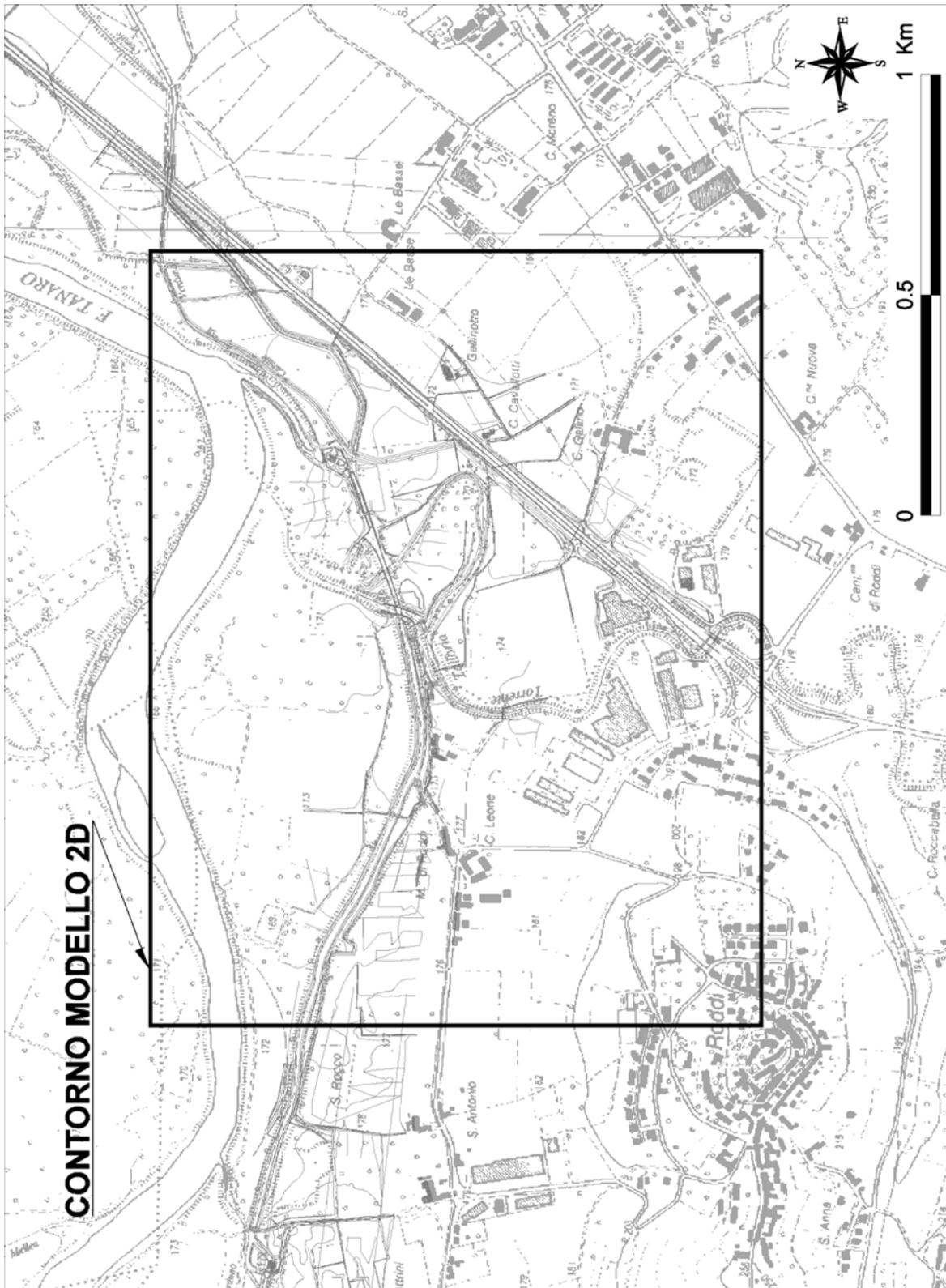


Figura 24 - Corografia del nodo Tanaro-Talloria oggetto di studio.

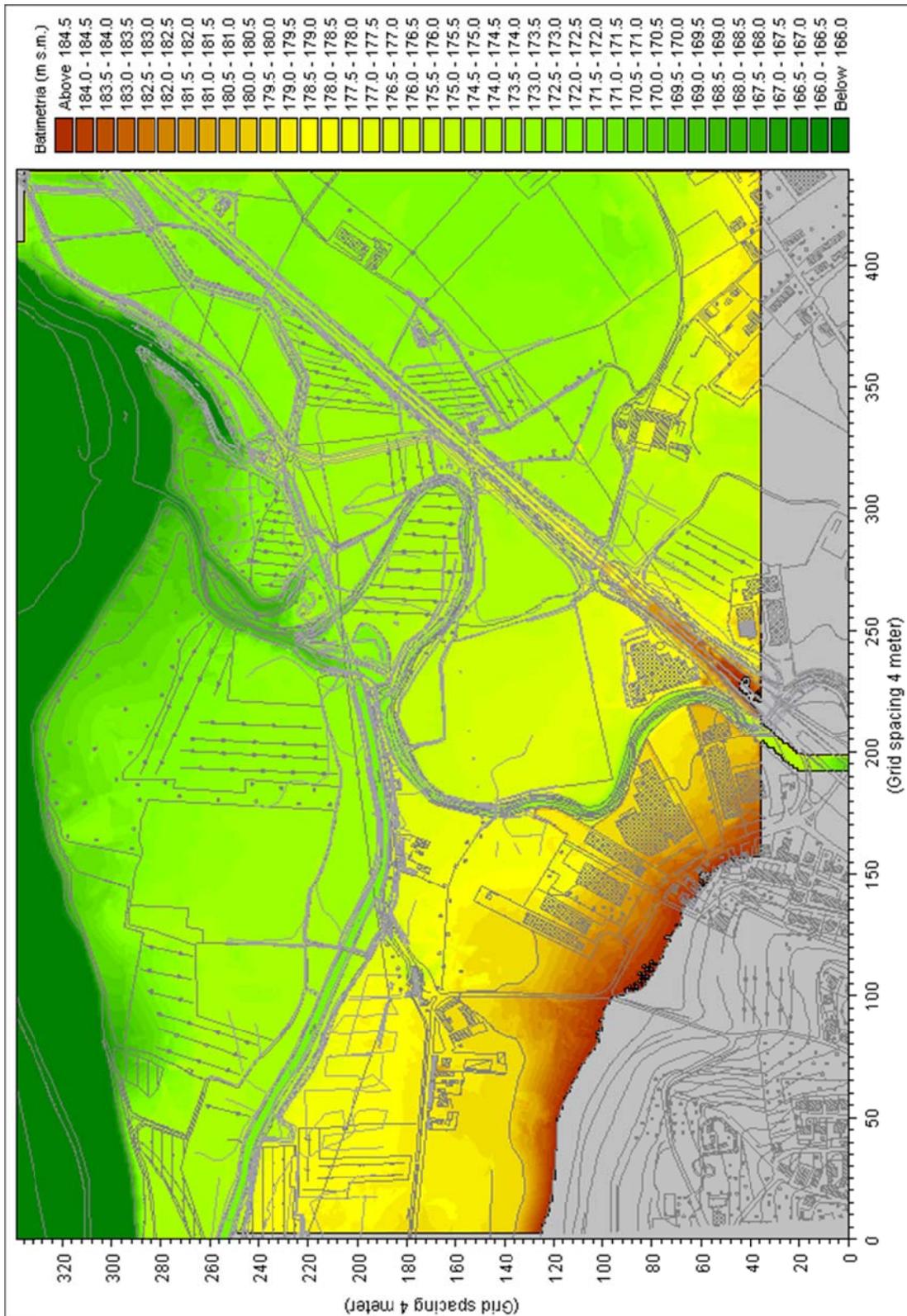


Figura 25 - Batimetria del modello 2D a maglia 4x4 m (situazione attuale).

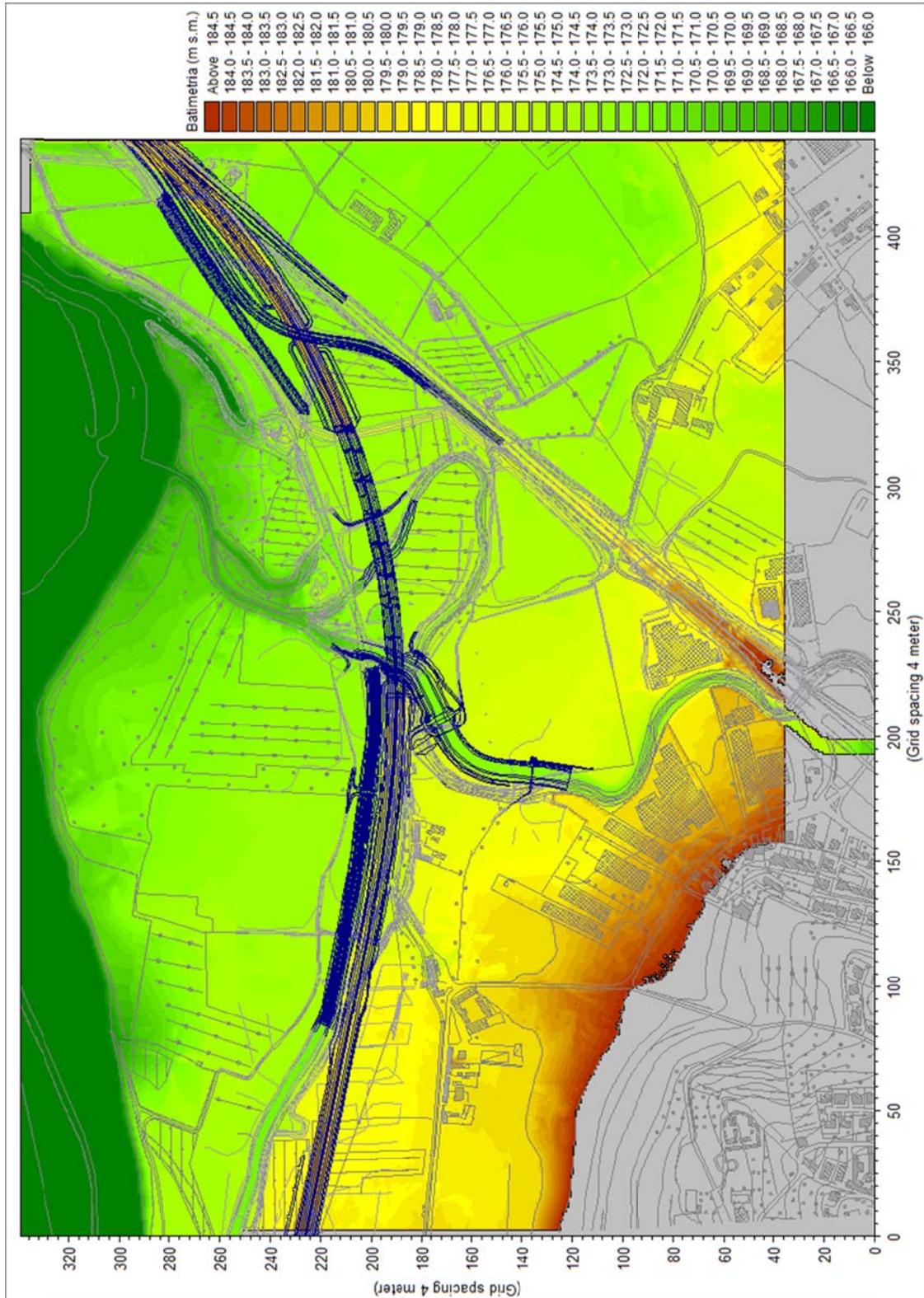


Figura 26 - Batimetria del modello 2D a maglia 4x4 m (scenario di progetto).

6.3.2. Parametri del modello

Il modello di simulazione oltre alla riproduzione corretta della geometria del terreno 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 0,5 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 $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$ 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 e sulle golene e aree di allagamento. Tale parametro è difficilmente valutabile con precisione ed è abitualmente utilizzato per tarare il modello.

Nel caso in esame sono stati utilizzati coefficienti di scabrezza di Strickler, corrispondenti a quelli già adottati nei precedenti studi idraulici, opportunamente incrementati per tenere conto del fatto in un modello 2D sono già in tutto o almeno in gran parte direttamente considerati nelle equazioni del moto gli effetti di resistenza al moto indotti dalle condizioni di moto non-monodimensionali (turbolenza, moti vorticosi, sinuosità dell'alveo ecc.) che invece in un modello 1D devono essere necessariamente rappresentati mediante il ricorso ad un coefficiente globale di scabrezza inferiore (cui corrisponde una resistenza al moto maggiore).

Relativamente alle scabrezze, in base agli stessi criteri espressi nel par. 5.3.1 per il modello 2D del Tanaro, sono stati considerati i seguenti valori cautelativi del coefficiente c di Strickler, assegnati cella per cella:

- $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per il fondo e le sponde delle risagomature d'alveo ed i rivestimenti in massi di cava sciolti;
- $50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per i rivestimenti in massi di cava cementati;
- $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per l'alveo abbandonato del Talloria;
- $10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per le aree golenali;
- $40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per l'alveo del canale di Verduno.

6.3.3. Condizioni al contorno

Al modello sono state assegnate le seguenti condizioni al contorno:

- condizione al contorno di monte: portata al colmo con $TR = 200$ anni pari a $426 \text{ m}^3/\text{s}$ in ingresso al modello;
- condizione al contorno di valle: profilo longitudinale dei livelli idrici con $TR = 200$ anni lungo il Tanaro, calcolato mediante il modello idrodinamico quasi-2D precedentemente citato (v. par. 4).

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

6.3.4. Descrizione delle simulazioni e delle analisi idrauliche condotte

Con il modello 2D sono state condotte le seguenti simulazioni:

- **SIM1**: situazione attuale;
- **SIM2**: situazione di progetto (geometria dei manufatti congruente con il progetto esecutivo).

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;
- campi di distribuzione delle velocità di deflusso;
- campi di distribuzione delle densità di portata.

6.4. RISULTATI DEGLI SCENARI DI SIMULAZIONE

6.4.1. Scenario SIM1 - situazione attuale

Nella *Figura 27* è riportata la distribuzione delle altezze d'acqua rispetto al fondo alveo e al piano golenale indotte dal transito di una portata al colmo di piena di progetto con tempo di ritorno 200 anni nel torrente Talloria pari a 426 m³/s, nell'ipotesi di concomitanza di una piena con stesso tempo di ritorno nel Tanaro: le tonalità di azzurro più scure evidenziano le aree con tiranti idrici maggiori; nella stessa figura è rappresentato anche il campo dei vettori velocità di deflusso. Nella *Figura 28* è riportato un ingrandimento della stessa rappresentazione nei pressi dell'area di intervento, in corrispondenza dell'attraversamento del canale di Verduno, con sovrapposto il campo dei vettori velocità di deflusso.

Risulta allagata tutta l'area golenale in destra orografica con altezze idriche dell'ordine dei 0,5÷1,0 m, contenute dal rilevato arginale di recente costruzione che corre in affiancamento alla tangenziale di Alba per poi svoltare perpendicolarmente al canale di Verduno e proseguire poi parallelamente al corso del Tanaro. In sinistra Talloria si verifica invece una modesta esondazione sul piano campagna con tiranti mediamente dell'ordine dei 0,2 m.

Nella *Figura 28* è rappresentata una mappa a curve di livello delle quote massime del pelo libero nella situazione attuale sull'intera estensione del modello, in base alla quale è possibile verificare le quote arginali esistenti. La concentrazione di curve di livello in corrispondenza dell'attraversamento dell'area golenale del Talloria da parte del canale di Verduno evidenzia come questo determini un effetto di rigurgito e condizioni di deflusso con funzionamento a "stramazzo" che separa distintamente l'area golenale di esondazione del Tanaro da quella di esondazione del Talloria. Nella *Figura 30* è riportato un ingrandimento della stessa rappresentazione nei pressi dell'area di intervento in modo da meglio evidenziare in tale zona le quote massime di pelo libero che si attestano su valori compresi tra 173,50 e 176,00 m s.m..

Nella *Figura 31* è rappresentata la distribuzione areale delle velocità di flusso al colmo dell'evento di piena di progetto considerato che evidenzia come i valori massimi delle stesse siano concentrati tutti in corrispondenza dell'alveo inciso del Talloria, mentre sulle aree golenali le velocità di flusso si mantengono mediamente inferiori a 1,0 m/s,



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Relazione idrologica idraulica - Fiume Tanaro e confluenze principali

con valori che arrivano fino a $2,0 \div 2,5$ m/s in corrispondenza del sormonto del canale di Verduno.

Nella *Figura 32* è infine rappresentata una mappa di distribuzione areale della densità di portata ($m^3/s \cdot m$) che illustra molto chiaramente come il deflusso avvenga in prevalenza nell'alveo inciso del Talloria, e come nella golena destra le densità di portata risultino generalmente inferiori a $1 m^3/s \cdot m$, con valori che raggiungono $3 \div 4 m^3/s \cdot m$ in corrispondenza del ramo secondario del Talloria.

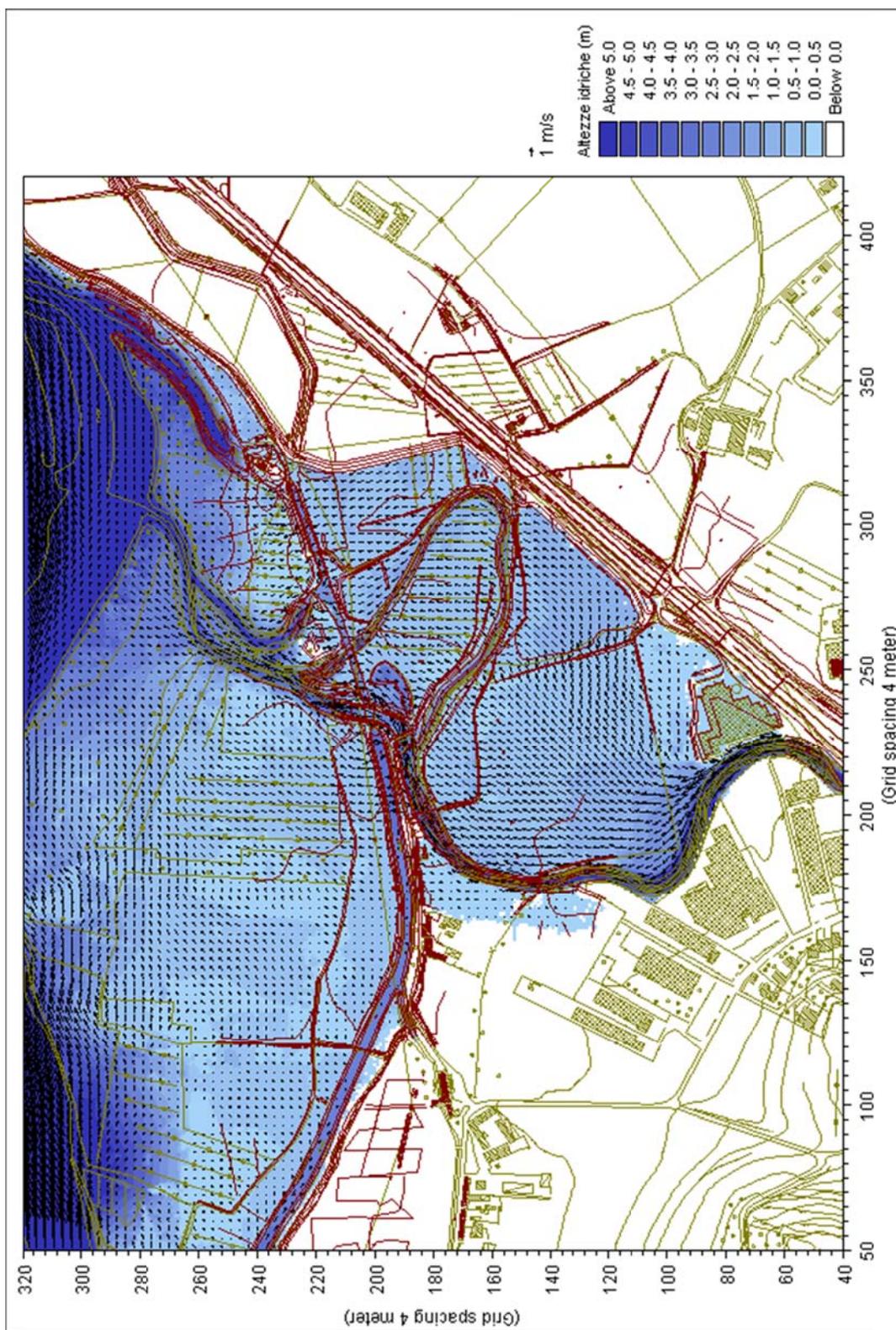


Figura 27 - Situazione attuale - mappa dei tiranti e campo delle velocità di deflusso.

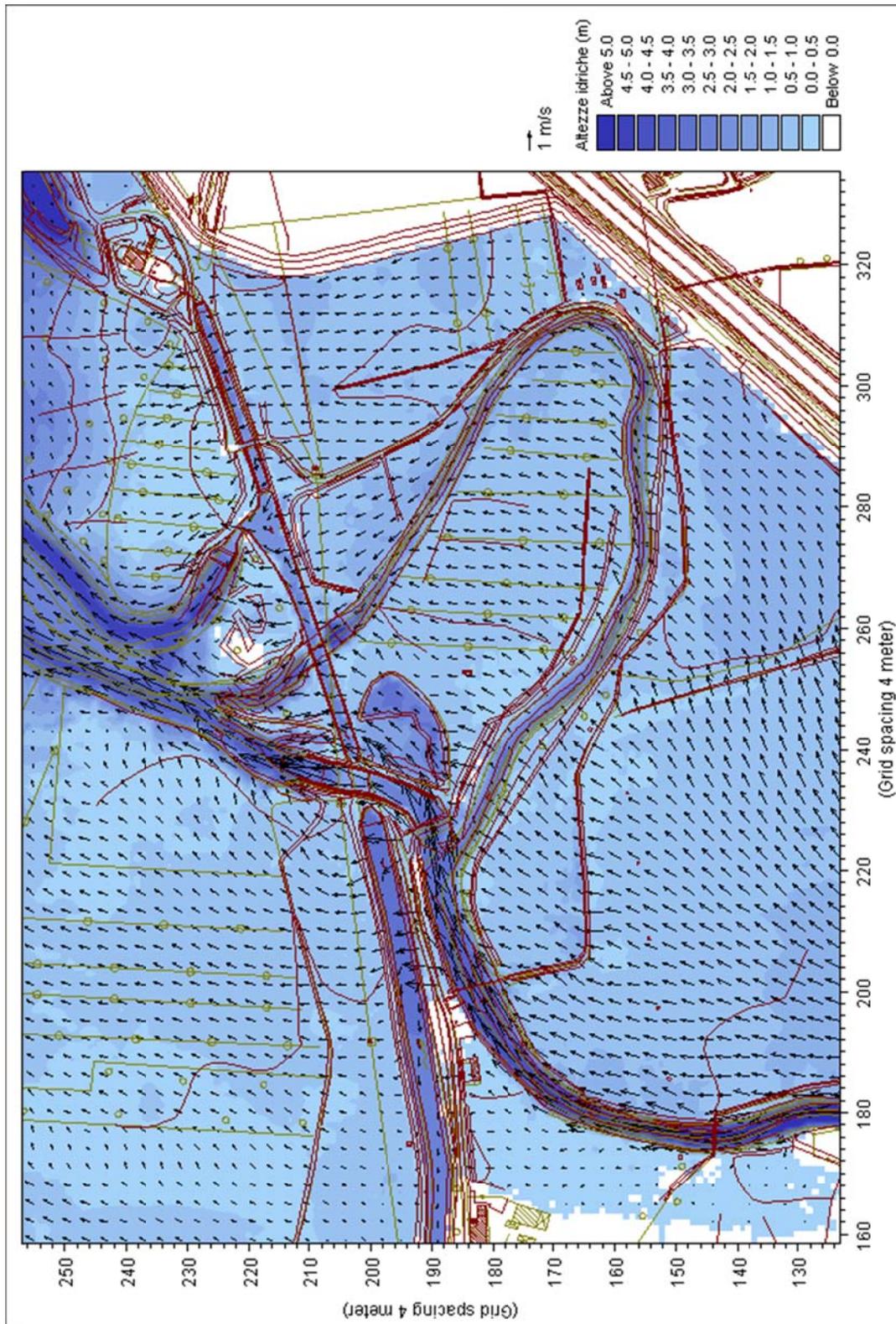


Figura 28 - Situazione attuale - particolare mappa dei tiranti e campo delle velocità di deflusso.

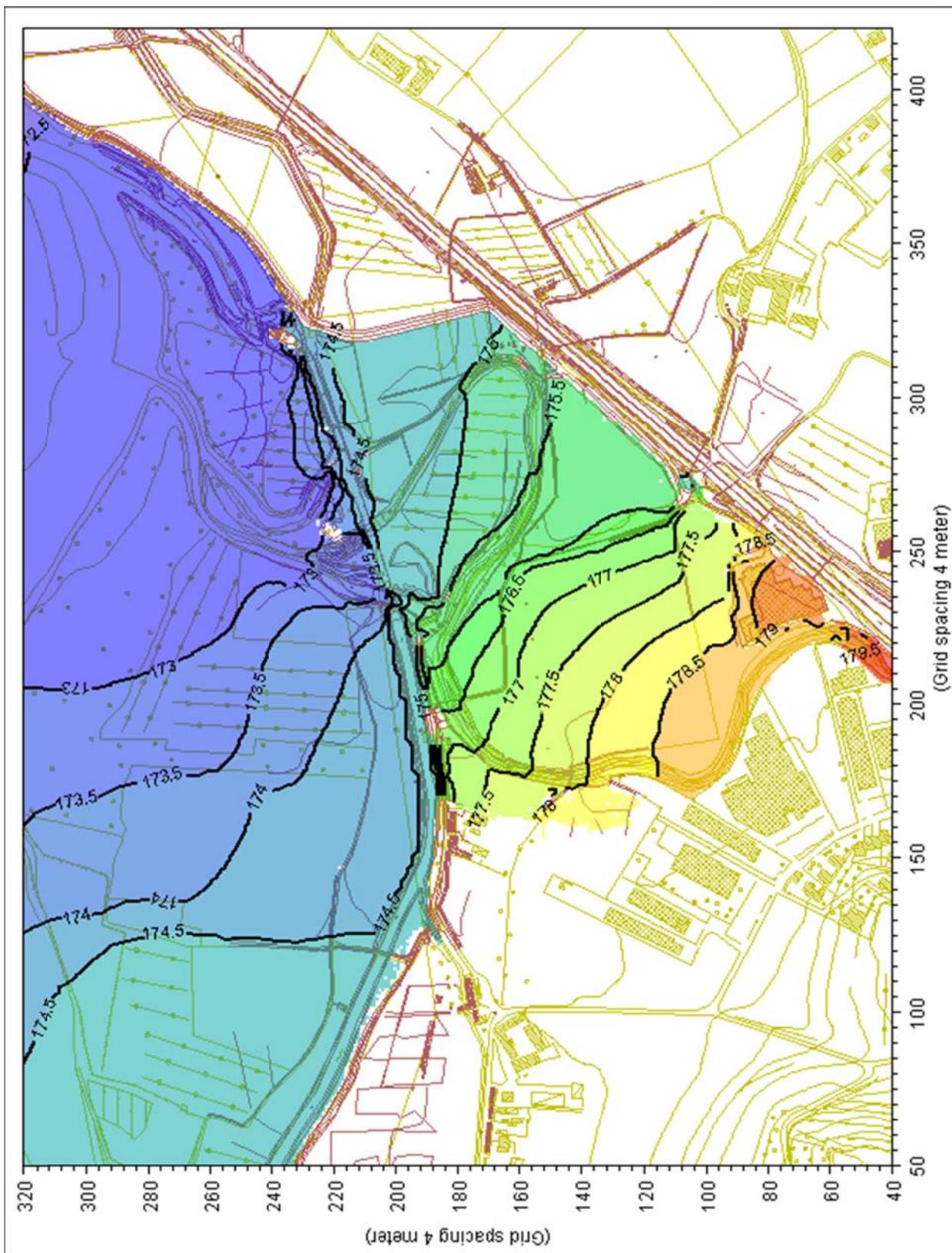


Figura 29 - Situazione attuale - mappa delle quote di pelo libero.

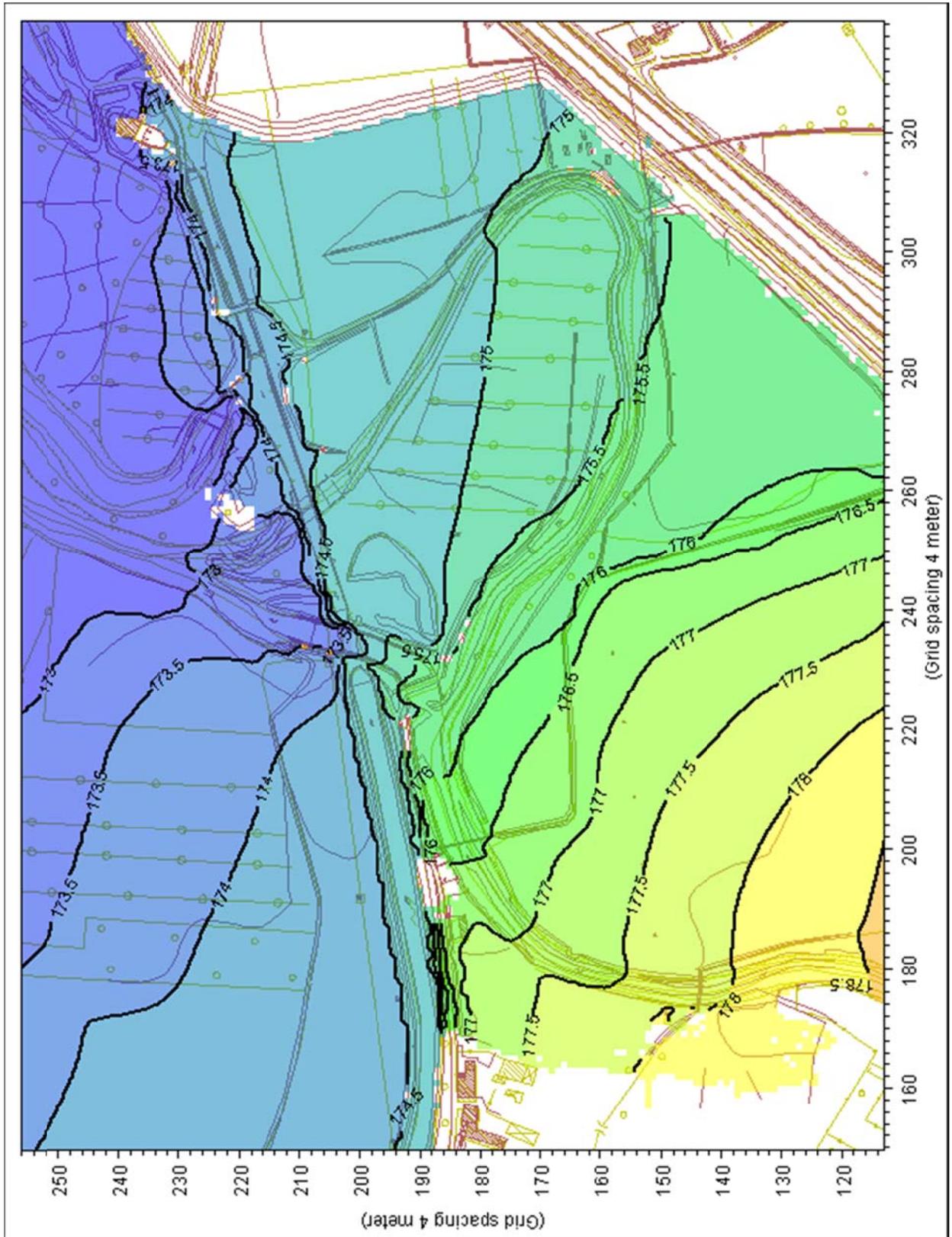


Figura 30 - Situazione attuale - particolare mappa delle quote di pelo libero.

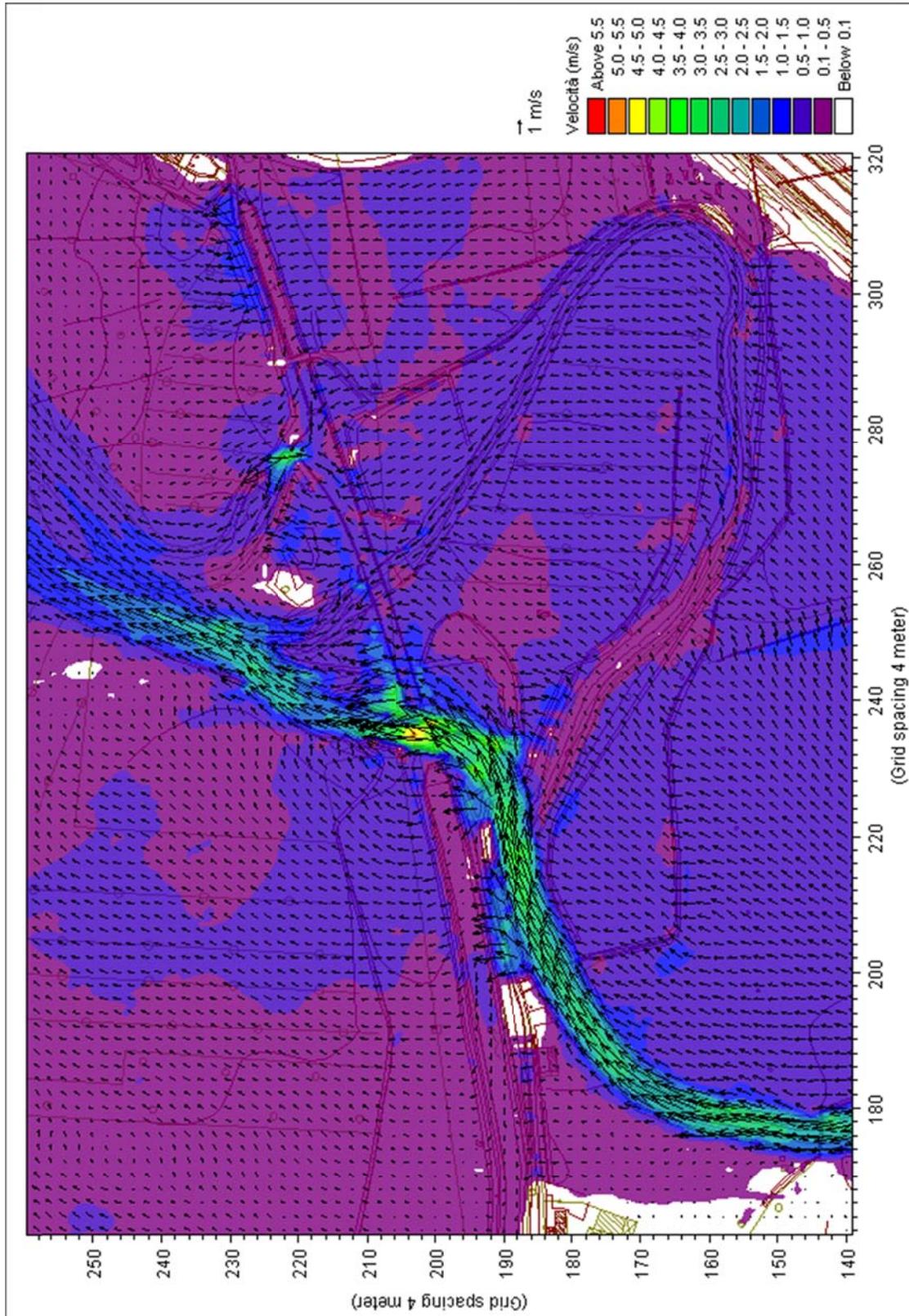


Figura 31 - Situazione attuale - particolare distribuzione delle velocità di deflusso.

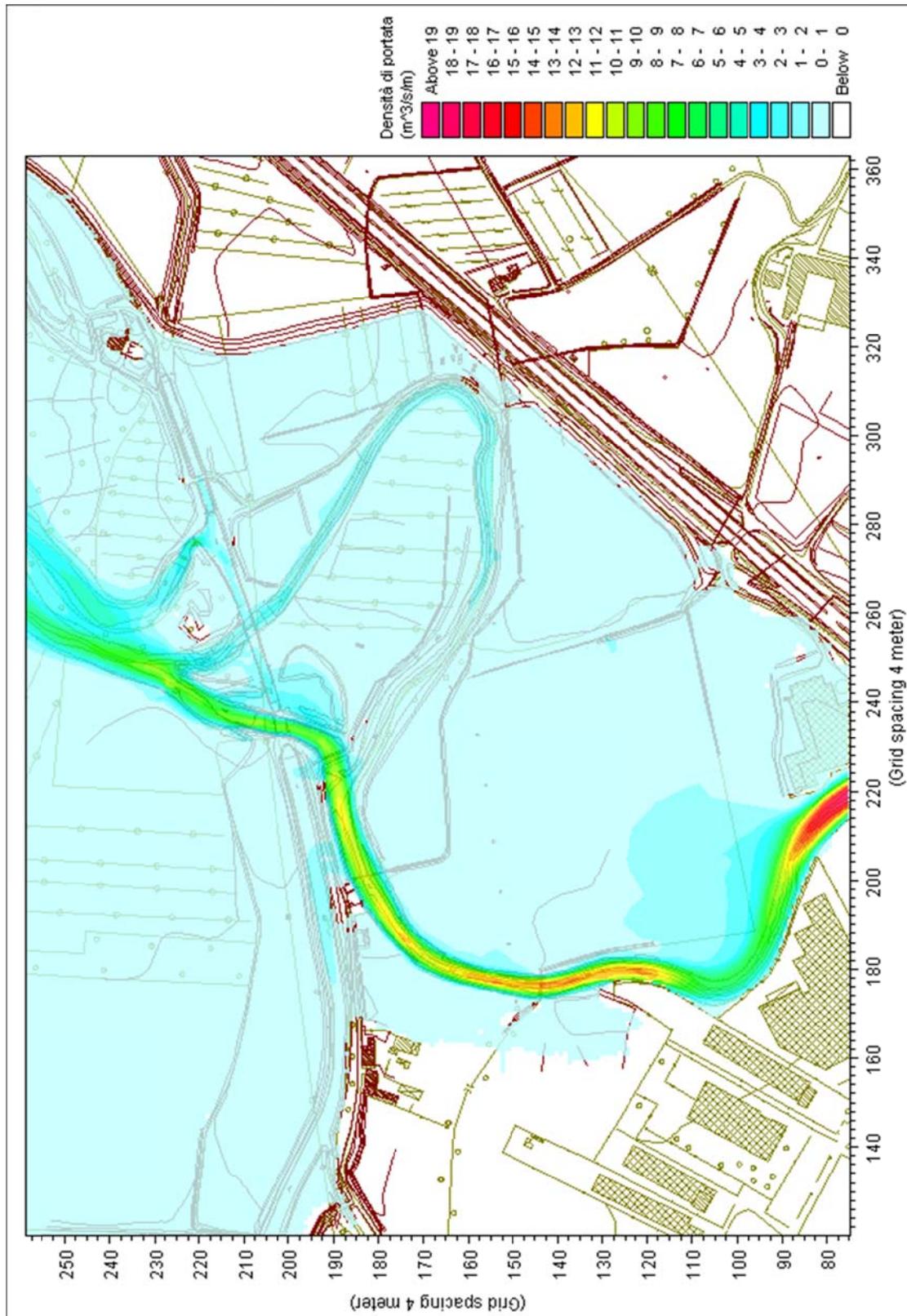


Figura 32 - Situazione attuale - mappa delle densità di portata

6.4.2. Scenario SIM2 - situazione di progetto

La simulazione dello scenario di progetto consente di analizzare gli effetti indotti dagli interventi di deviazione e sistemazione del tratto terminale del torrente Talloria, nonché di realizzazione del rilevato autostradale e del relativo viadotto di attraversamento che presenta 9 + 9 pile nell'area golenale di piena.

Al fine di agevolare i confronti con i risultati relativi alla simulazione della situazione attuale, sono state prodotte rappresentazioni grafiche dei risultati ottenuti del tutto analoghe a quelle riportate nel capitolo precedente.

Nella *Figura 33* è riportata la distribuzione delle altezze d'acqua nelle condizioni di piena considerate (tempo di ritorno 200 anni nel torrente Talloria pari a 426 m³/s e nel Tanaro pari a 3700 m³/s) sull'intera estensione dell'area modellizzata, con sovrapposto il campo dei vettori velocità di deflusso. Nella *Figura 34* è riportato il corrispondente ingrandimento della stessa rappresentazione nei pressi dell'area di intervento, in cui risultano evidenti le opere di sistemazione del torrente Talloria (linee grafiche in rosso), le opere di attraversamento autostradali e di deviazione del canale di Verduno (linee grafiche in marrone).

Le condizioni di deflusso sono simili a quelle descritte nella situazione attuale, ma in questo caso si osserva una maggiore concentrazione del flusso lungo l'alveo inciso del Talloria per effetto della sua incrementata capacità di portata a bordi pieni: ne conseguono pertanto altezze idriche in golena mediamente inferiori di 0,25÷0,40 m.

In sinistra orografica si verifica un limitato sormonto del tratto di monte della difesa di sponda in massi e dell'argine previsti in progetto con altezze d'acqua dell'ordine di 0,1÷0,2 m: i volumi esondati rientrerebbero però in alveo a tergo del successivo tratto di rilevato arginale defluendo tra quest'ultimo e la spalla sinistra del viadotto. La sistemazione in progetto del Talloria era stata infatti dimensionata in origine (progetto definitivo) per una portata di piena pari a 310 m³/s (vedi capitolo 6.2), mentre nel presente studio si è deciso per maggior cautela di verificare le opere autostradali in progetto considerando una portata di piena nel Talloria pari a 426 m³/s.

Nella *Figura 35* è rappresentata una mappa a curve di livello delle quote massime del pelo libero nella situazione di progetto sull'intera estensione del modello, mentre nella *Figura 36* è riportato un ingrandimento della stessa nei pressi della zona di intervento: in base a queste rappresentazioni è possibile verificare le quote di progetto degli interventi e di intradosso del viadotto.

Nella *Figura 37* è rappresentata la distribuzione areale delle velocità di flusso al colmo dell'evento di piena di progetto considerato che evidenzia come, rispetto alla situazione attuale, si incrementino le velocità nell'alveo inciso del Talloria mentre si riducano quelle relative ai deflussi golenali che risultano in gran parte inferiori a 0,5 m/s.

Nella *Figura 38* è infine rappresentata la mappa di distribuzione areale della densità di portata (m³/s·m) che illustra con ancora maggiore evidenza l'aumento di flusso nell'alveo sistemato del Talloria e la corrispondente diminuzione nell'area golenale in destra orografica.

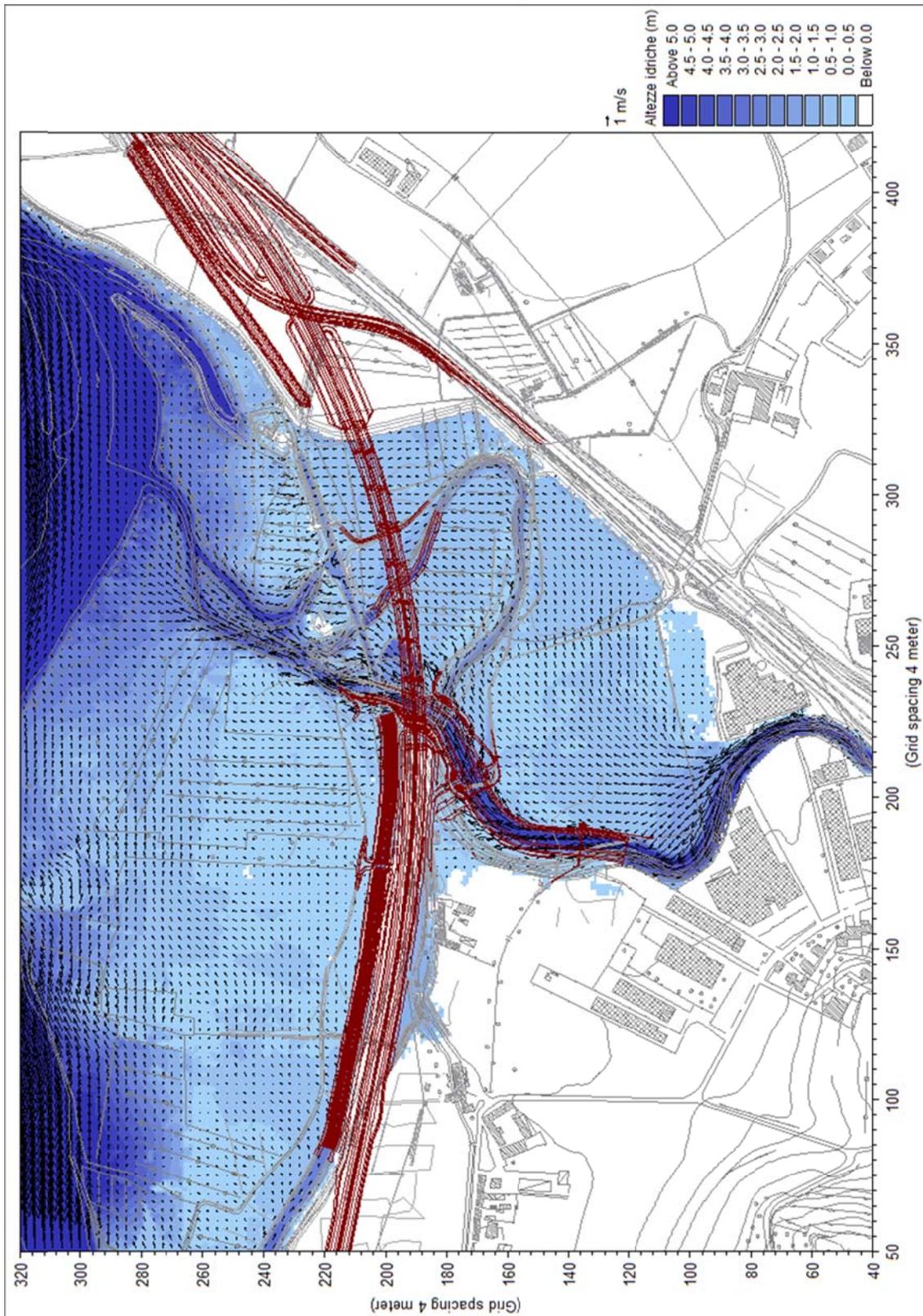


Figura 33 - Situazione di progetto - mappa dei tiranti e campo delle velocità di deflusso.

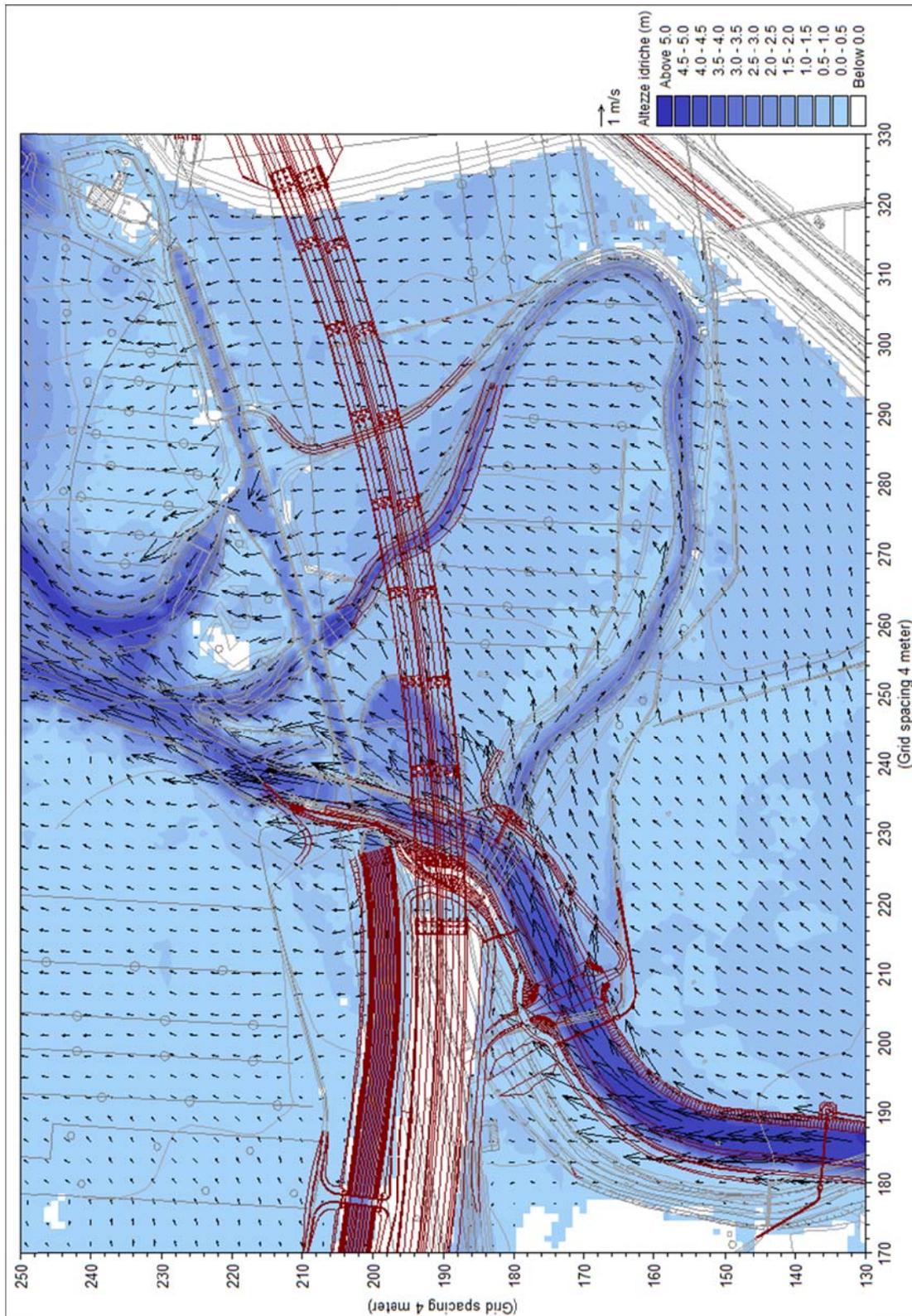


Figura 34 - Situazione di progetto - particolare mappa dei tiranti e campo delle velocità di deflusso.

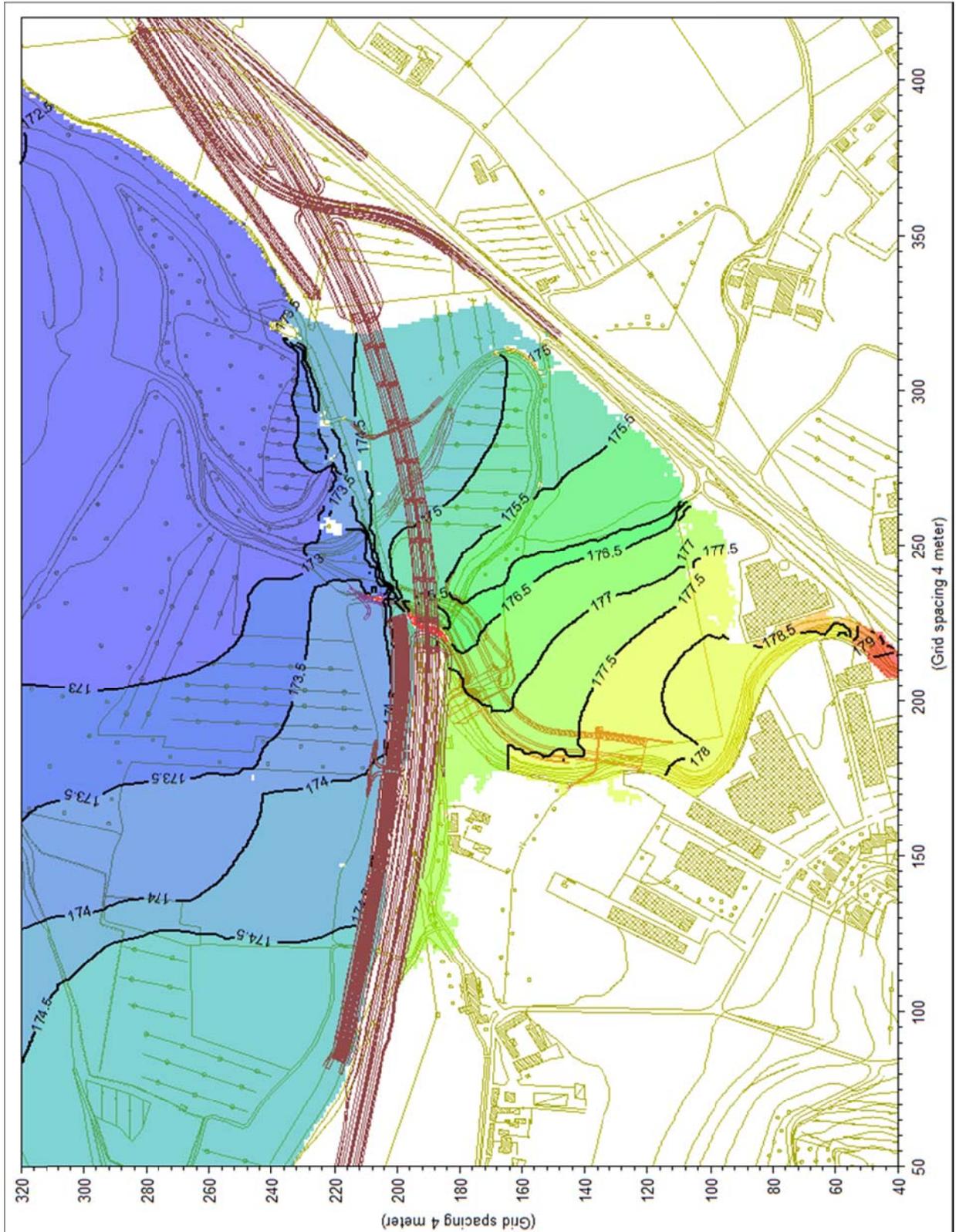


Figura 35 - Situazione di progetto - mappa delle quote di pelo libero

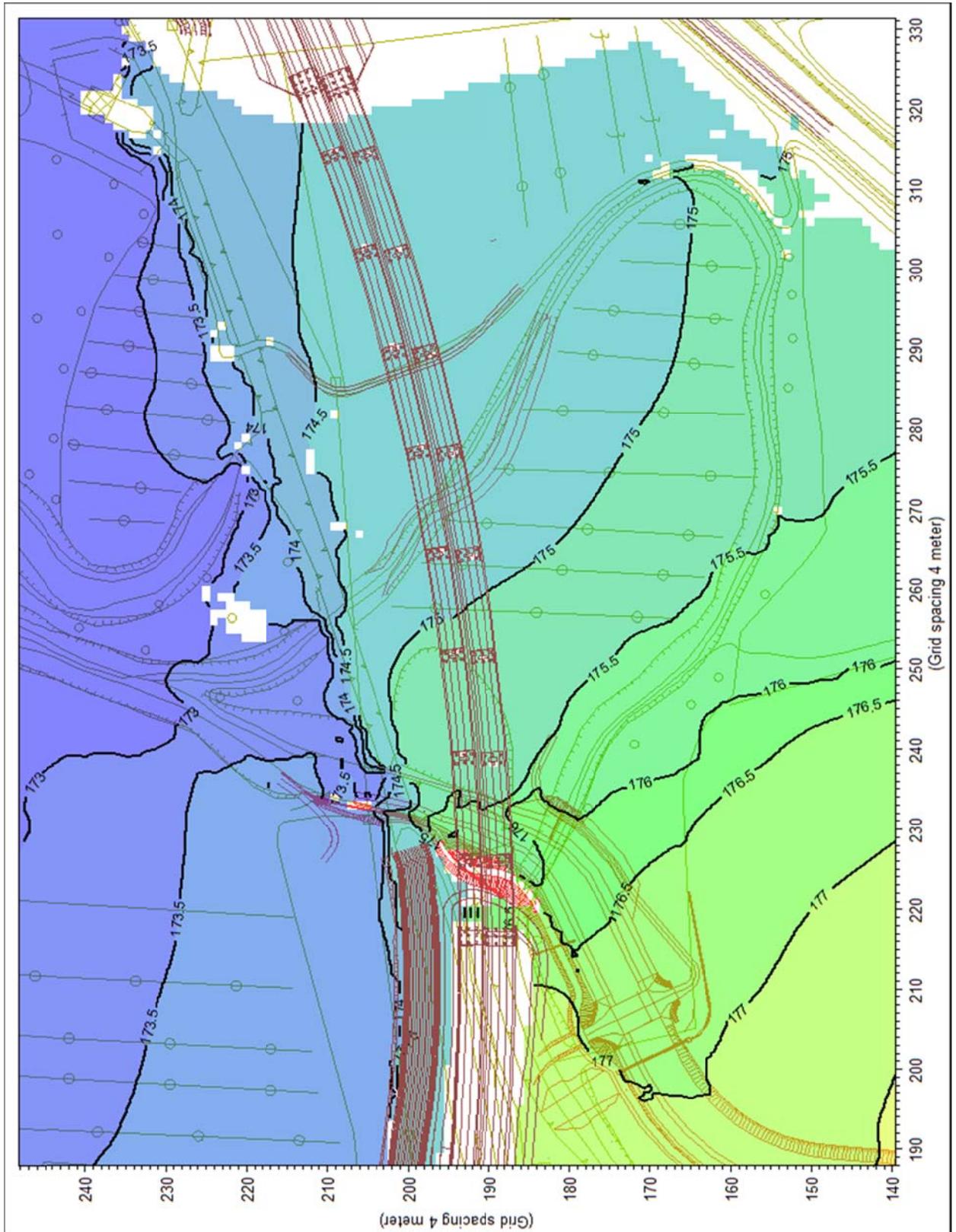


Figura 36 - Situazione di progetto - particolare mappa delle quote di pelo libero.

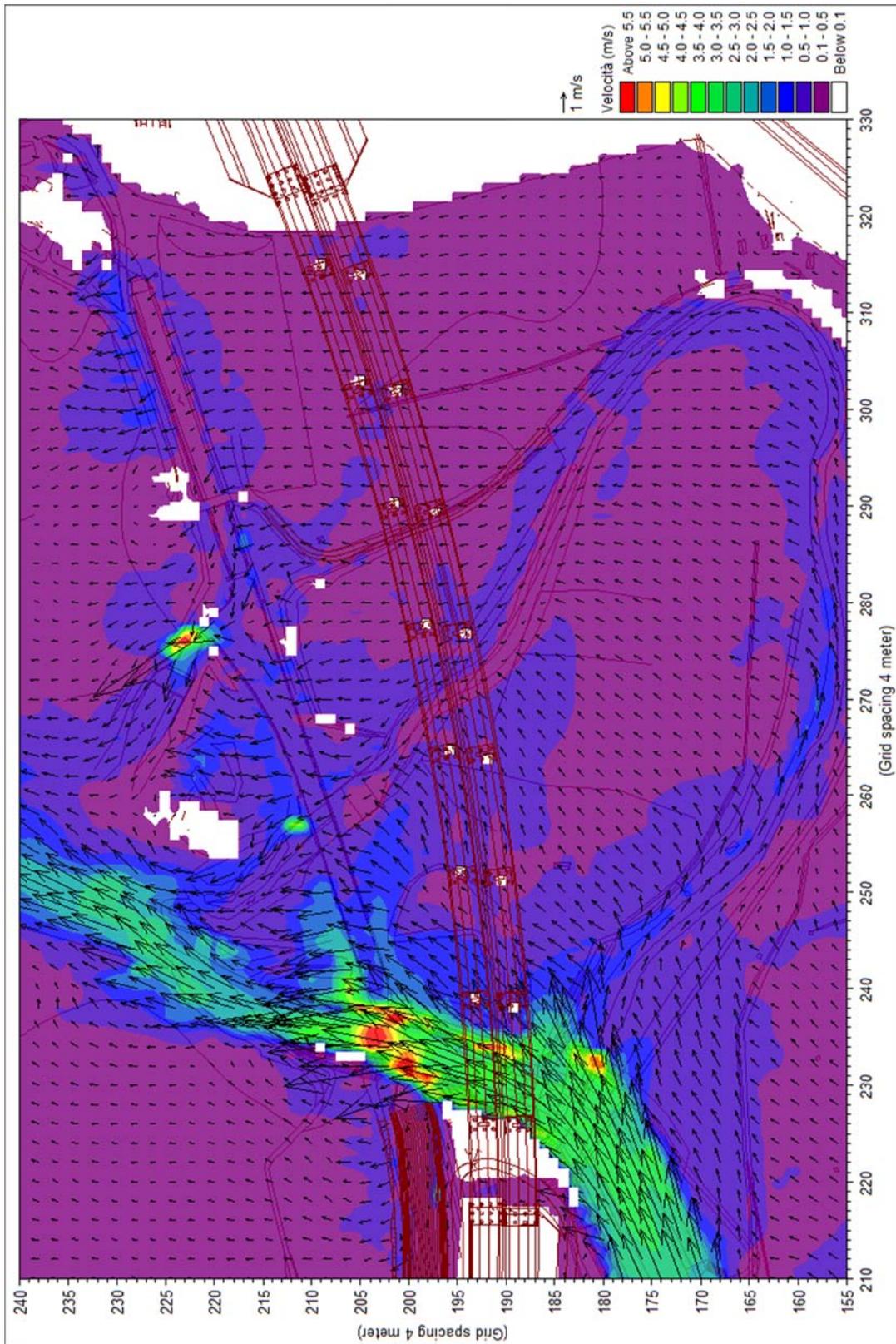


Figura 37 - Situazione di progetto - particolare distribuzione delle velocità di deflusso.

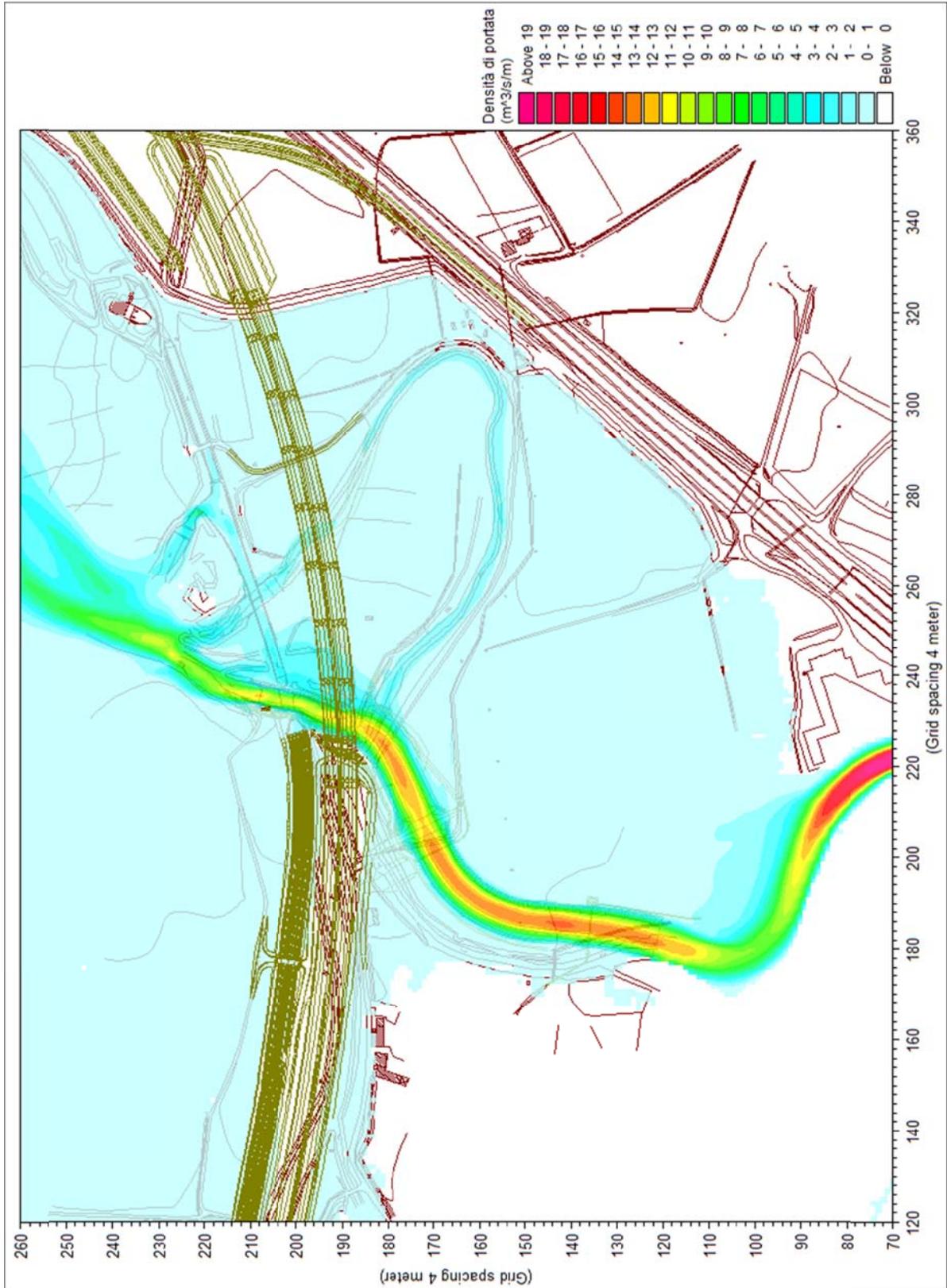


Figura 38 - Situazione di progetto - mappa delle densità di portata.

La concentrazione del flusso è pertanto massima in corrispondenza del Talloria e la disposizione delle pile risulta adeguatamente studiata in modo da non interferire con i filoni principali di corrente che si trovano, oltre che nell'alveo principale, anche in minor misura nel ramo parallelo.

L'interferenza tra le pile del viadotto presenti nell'area golenale ed il flusso di piena non desta preoccupazioni in quanto le velocità di corrente si mantengono su valori generalmente inferiori a 1 m/s. Adeguate tipologie di protezione delle fondazioni andranno comunque studiate, valutando con attenzione l'entità dello scalzamento potenzialmente prodotto dalla corrente (v. par. 6.6).

Nella Figura 39 è riportata l'ubicazione di una sezione longitudinale disposta lungo il filo di monte del viadotto in progetto, in corrispondenza della quale sono stati estratti i risultati delle simulazioni in termini di quote massime di pelo libero e velocità di deflusso in piena.

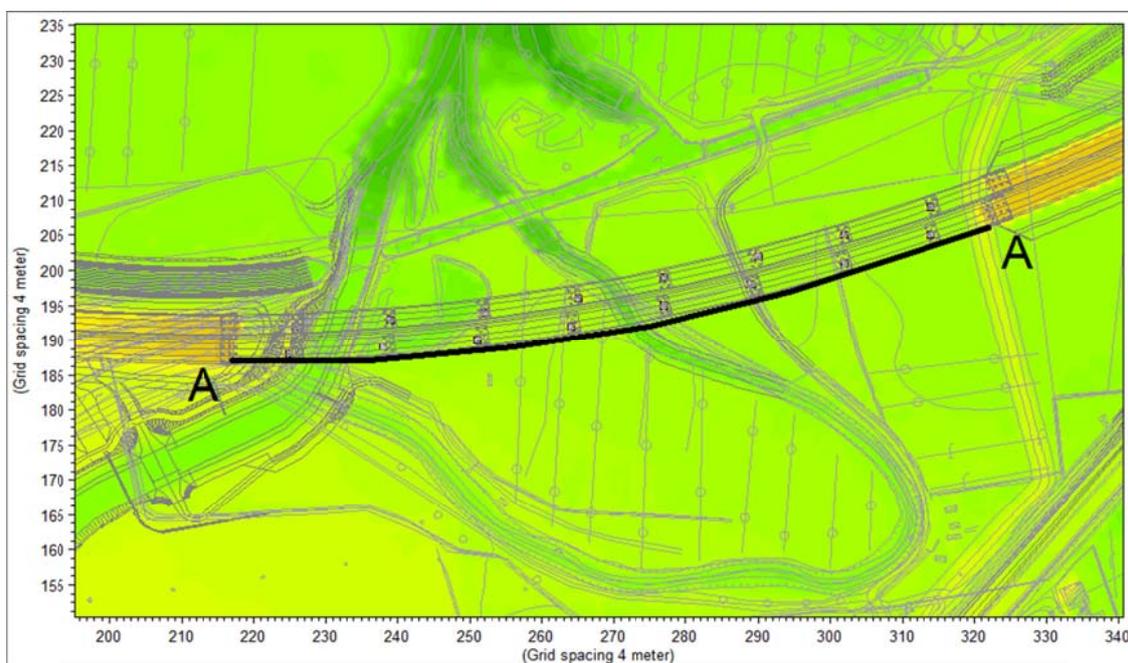


Figura 39 - Ubicazione della sezione longitudinale di estrazione dei risultati del modello.

La Figura 40 illustra il confronto tra gli andamenti del pelo libero lungo lo sviluppo della sezione A-A, relativi alle simulazioni della situazione attuale (SIM1) e dello scenario di progetto (SIM2), nell'ipotesi di deflusso della portata di piena di progetto considerata. Nella figura sono anche riportati a confronto gli andamenti del terreno nella situazione attuale e in quella futura (estratti dalle batimetrie degli scenari SIM1 e SIM2 rispettivamente).

Per effetto del restringimento indotto dalla presenza della spalla sinistra del viadotto, che è posizionata in corrispondenza dell'alveo inciso attuale del Talloria, si assiste in sinistra orografica ad un incremento dei livelli di piena, in parte compensata in destra orografica da una diminuzione dei livelli golenali.

Il livello massimo raggiunto dalla piena risulta pari a circa 176,2 m s.m.: considerando un franco di sicurezza di 1,00 m si ottiene pertanto una quota minima di intradosso del viadotto pari a 177,20 m s.m.

Nella *Figura 41* è riportato l'andamento delle velocità di deflusso lungo lo sviluppo della sezione A-A nella situazione di progetto: la velocità massima in alveo è pari a circa 3,4 m/s mentre in golaena le velocità massime si attestano su valori pari a 0,7 m/s; unica eccezione è la seconda pila che viene investita da un flusso di esondazione in curva che presenta una velocità massima circa equivalente a quella in alveo e pari a circa 3,4 m/s.

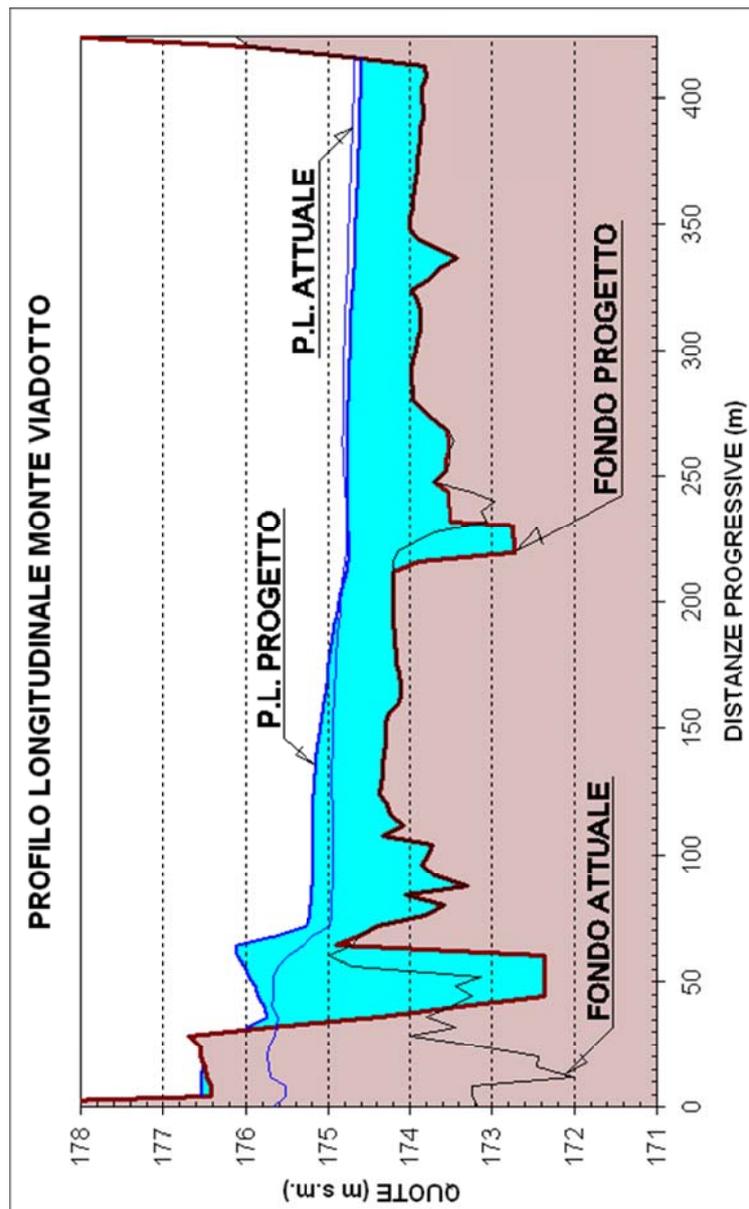


Figura 40 - Profilo longitudinale del pelo libero lungo il filo di monte del viadotto in progetto (sezione A-A).

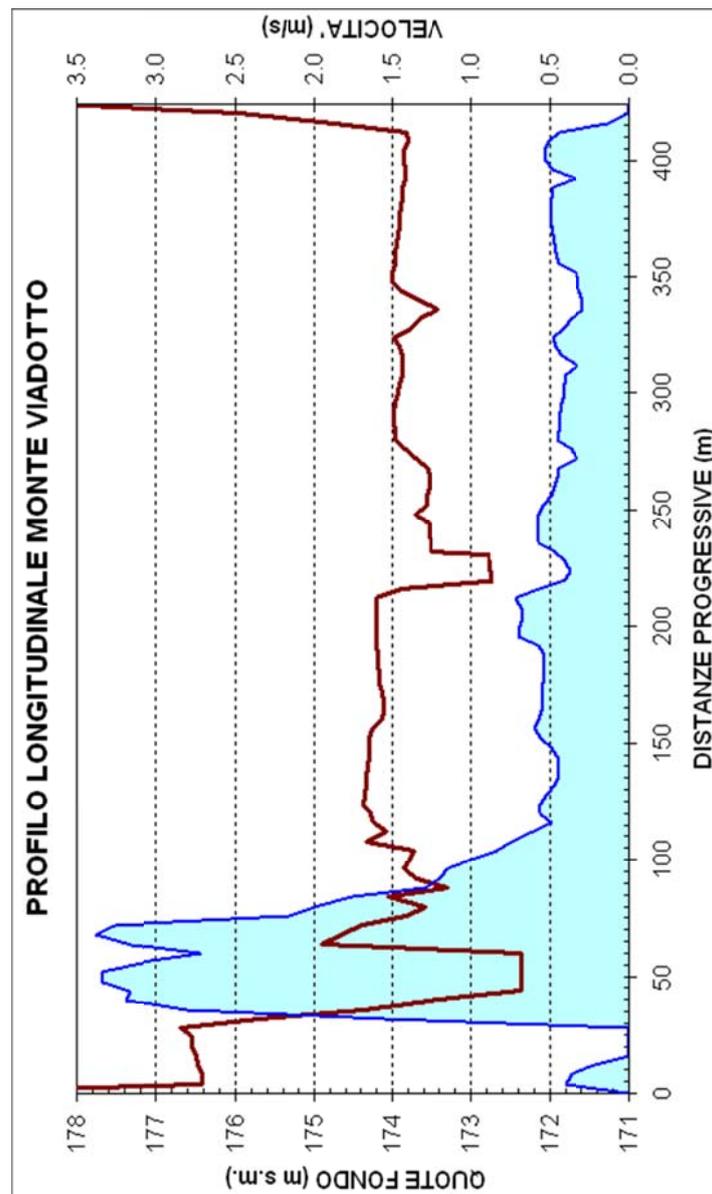


Figura 41 - Profilo longitudinale delle velocità lungo il filo di monte del viadotto in progetto (sezione A-A).

6.5. OSSERVAZIONI SUI RISULTATI DELL'ANALISI IDRODINAMICA E VARIANTI ALL'IMPOSTAZIONE PROGETTUALE

Le simulazioni effettuate con modello bidimensionale nel settore di confluenza Tanaro-Talloria nell'assetto attuale e in quello di progetto con la portata duecentennale del Talloria pari a $426 \text{ m}^3/\text{s}$ hanno evidenziato, in sintesi, quanto segue:

- il campo di flusso in corrispondenza dell'attraversamento autostradale in viadotto è simile a quello relativo alla situazione attuale, con una maggiore concentrazione del flusso nell'alveo inciso del Talloria, per effetto della incrementata capacità di portata conseguente alle opere di sistemazione idraulica in progetto: ne conseguono altezze idriche in golena mediamente inferiori di $0,25 \div 0,40 \text{ m}$;

- per quanto sopra osservato, le velocità nell'alveo inciso del Talloria si incrementano di $0,5 \div 1$ m/s rispetto alla situazione attuale, mentre nelle aree golenali queste si riducono fino a valori dell'ordine di $0,5$ m/s;
- i livelli idrici di piena di progetto in corrispondenza del viadotto subiscono un incremento rispetto allo stato attuale, in corrispondenza dell'alveo inciso, dell'ordine di $0,1 \div 0,5$ m per effetto della maggiore concentrazione di flusso e dell'interferenza con le spalle e le pile del viadotto, in parte compensato in destra da una riduzione dei livelli golenali; il franco rispetto alla quota minima di intradosso (circa 179,35 m s.m.) risulta di oltre 3,0 m rispetto al livello idrico massimo sulla sezione (presso la sponda sinistra) e di oltre 4,0 m rispetto al livello idrico medio sull'intera estensione del viadotto;
- le velocità di deflusso in corrispondenza dell'attraversamento raggiungono il valore massimo di 3,4 m/s nell'alveo inciso, mentre in golena si attestano su valori di circa 0,7 m/s;
- la disposizione delle pile è adeguatamente studiata in modo da minimizzare l'interferenza con i filoni principali di corrente.

Il sistema risulta pertanto sostanzialmente adeguato dal punto di vista idraulico, ad eccezione della modesta esondazione in sponda sinistra evidenziata nel capitolo precedente.

Per assicurare la sicurezza idraulica delle aree a tergo del tratto di esondazione, in cui sono presenti alcuni edifici ad uso abitativo, e dalle quali le acque potrebbero almeno in parte non riuscire a defluire via, restando bloccate dall'argine di Talloria (ove quest'ultimo si andasse in fase realizzativa a intestare sul rilevato di accesso al viadotto), si è deciso di modificare l'impostazione progettuale realizzando un sovrizzo dell'argine stesso, per un'altezza mediamente pari ad 1,0 m (cfr. specifici elaborati di progetto).

Sulla base di tale variante è stata aggiornata la simulazione di progetto, la quale mostra (come prevedibile, dato l'esiguo volume delle acque esondabili) una incidenza pressoché nulla di queste modifiche sulle caratteristiche idrodinamiche della corrente in corrispondenza del viadotto autostradale in progetto.

Di seguito vengono riportate, a titolo di esempio, le sole figure rappresentative dell'andamento di tiranti idrici e velocità sulla sezione immediatamente a monte del viadotto (rispettivamente *Figura 42* e *Figura 43*) e quelle descrittive della distribuzione spaziale di velocità e tiranti idrici nell'intera area modellizzata (*Figura 44*) e con uno zoom in corrispondenza del viadotto (*Figura 45*).

Per tutti gli altri parametri idrodinamici si può fare riferimento alle figure riportate nel capitolo precedente, in quanto le differenze risultano pressoché nulle.

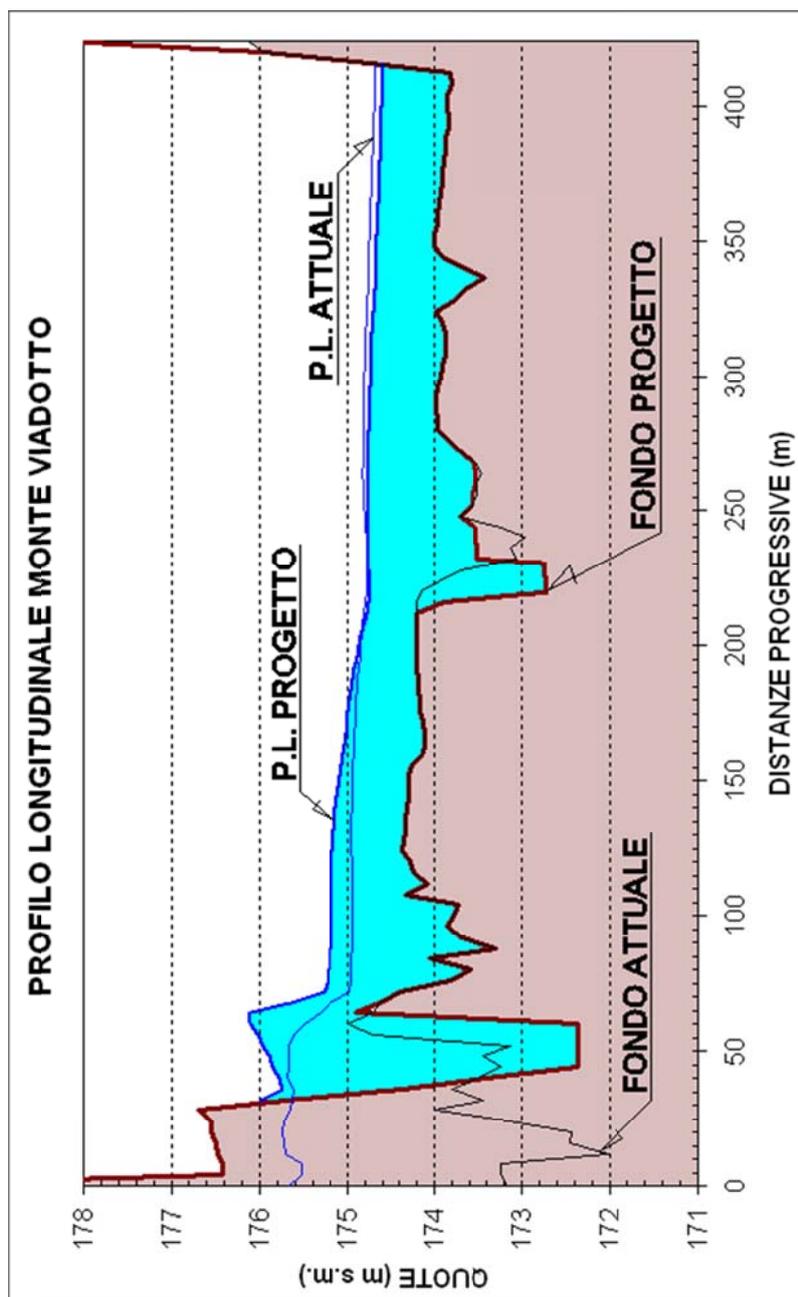


Figura 42 - Profilo longitudinale del pelo libero a monte del viadotto in progetto (sezione A-A, revisione).

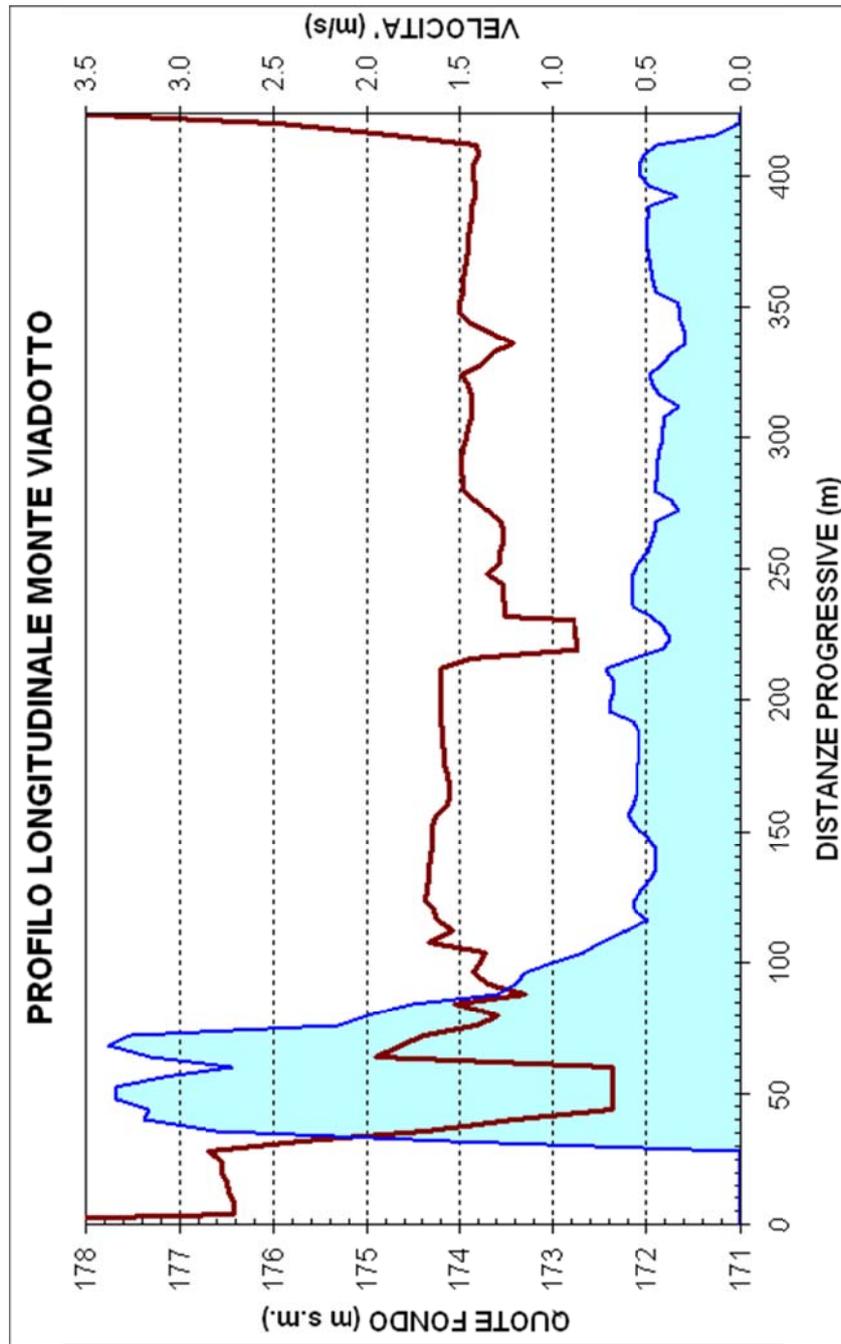


Figura 43 - Profilo longitudinale delle velocità a monte del viadotto in progetto (sezione A-A, revisione).

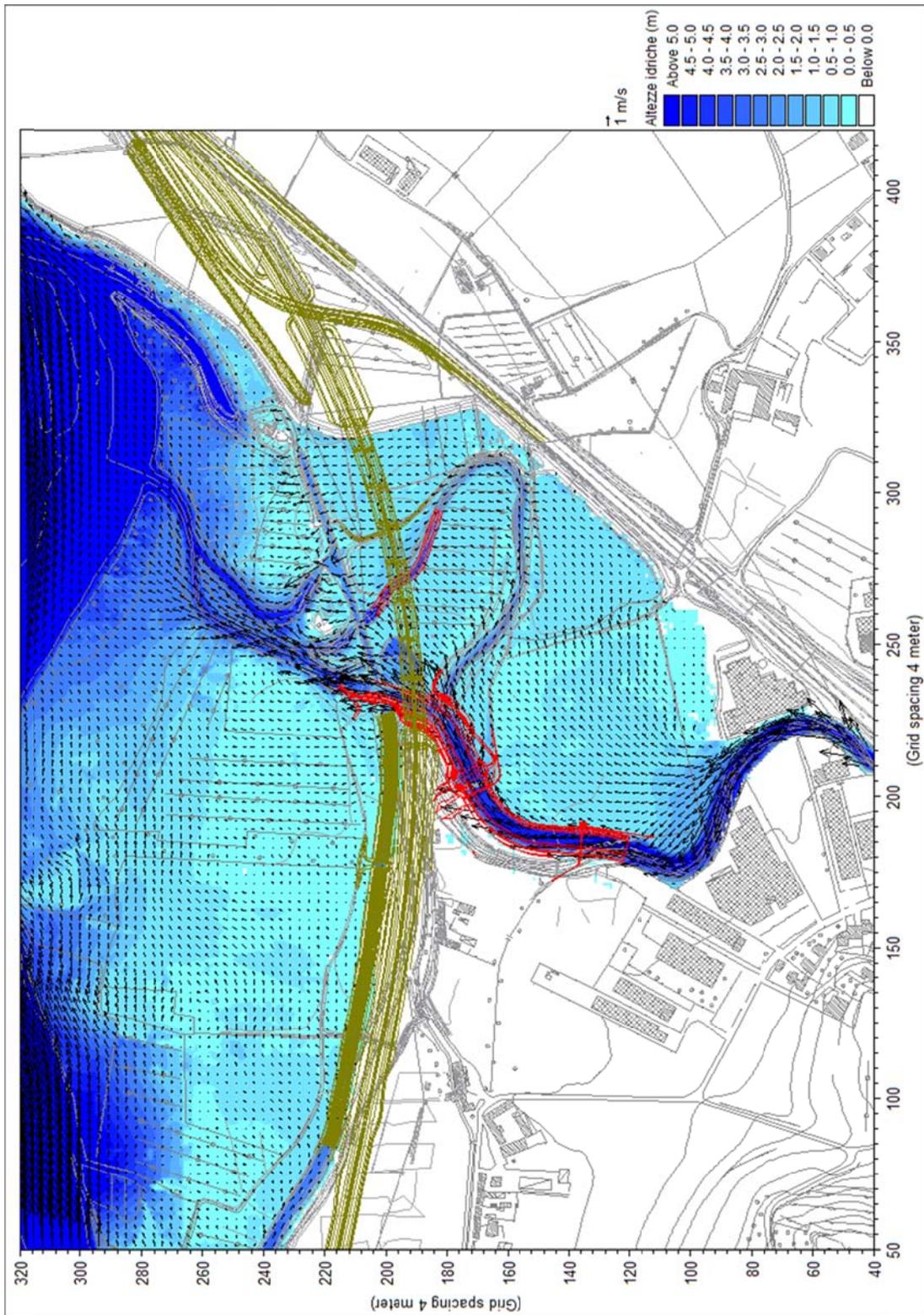


Figura 44 - Situazione di progetto (revisione) - mappa dei tiranti e campo delle velocità di deflusso.

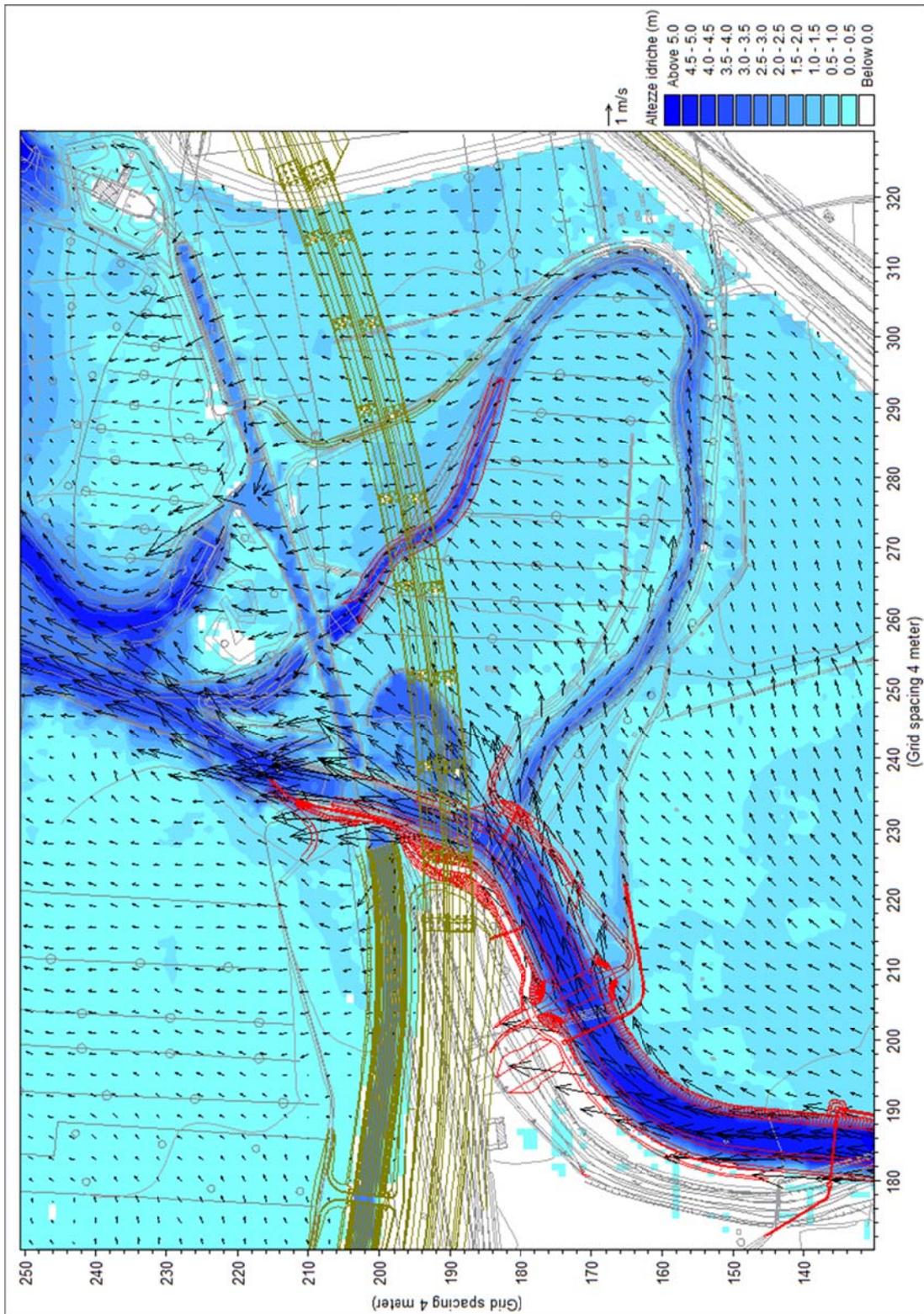


Figura 45 - Situazione di progetto (revisione) - particolare mappa dei tiranti e campo delle velocità di deflusso.

La *Tabella 3* fornisce infine i valori del livello idrico in corrispondenza di entrambe le sponde (SX: sinistra, DX: destra) della deviazione dell'alveo del torrente Talloria in corrispondenza del viadotto in progetto, nella configurazione definitiva delle opere.

Il numero della sezione e la distanza progressiva fanno riferimento ai corrispondenti elaborati progettuali, ai quali si rimanda per ogni dettaglio.

Sezione	Progressiva in asse [m]	P.L. sponda SX [m s.m.]	P.L. sponda DX [m s.m.]
1	2545,5	177,84	177,85
2	2575,5	177,77	177,78
3	2605,5	177,65	177,68
4	2635,5	177,47	177,48
5	2665,5	177,43	177,40
6	2710,5	177,41	177,20
7	2755,5	177,03	176,80
8	2785,5	176,95	176,81
9	2845,5	176,39	176,39
10	2860,5	176,17	176,39
11	2875,5	176,11	176,26
12	2890,5	176,00	176,14
13	2905,5	175,76	176,10
14	2935,5	175,70	175,51
15	2950,5	175,46	175,15
16	2965,5	174,08	174,95

Tabella 3 - Livelli idrici di progetto in corrispondenza delle due sponde lungo la deviazione del torrente Talloria in corrispondenza del viadotto in progetto (TR=200 anni, estrazione dal modello 2D).

6.6. ANALISI DELLO SCALZAMENTO DELLE PILE DEL PONTE SUL T.TALLORIA

Lo scalzamento delle pile dei ponti è un complesso fenomeno idraulico legato al trasporto solido e all'erosibilità del materiale di fondo.

Causa dell'erosione del fondo è il "vortice a ferro di cavallo" che si forma attorno alla pila per l'effetto localizzato della presenza di un ostacolo nella corrente idrica.

La dimensione del vortice e la massima profondità dell'erosione sono strettamente dipendenti dalle caratteristiche idrauliche della corrente, dalla forma geometrica dell'ostacolo e dalle caratteristiche del materiale di fondo alveo.

Il fenomeno di scalzamento è progressivo nel tempo ed è soggetto ad un'alternanza di condizioni di erosione e di deposito di materiale nella buca al piede della pila, determinata dal regime idrologico cui è soggetto il corso d'acqua e quindi dal manifestarsi di eventi caratterizzati da portate di entità differente.

La profondità massima che viene calcolata attraverso le formule rappresenta una condizione ultima di equilibrio cui tende il fenomeno: per tale motivo risulta sufficientemente cautelativo fare riferimento a condizioni idrodinamiche della corrente che abbiano probabilità di manifestarsi pari a quelle dell'evento di piena di progetto.

Sulla base di un'approfondita indagine di letteratura sulle formule empiriche ed i metodi di calcolo più diffusamente adottati per il calcolo della massima profondità di erosione prevedibile al piede delle pile dei ponti, sono stati scelti ed utilizzati i metodi di Yaroslavtziev, Holmes e Breusers descritti nell'allegato 3.

Rispetto ad una copiosa parte di formulazioni riportate in letteratura che spesso legano il massimo scalzamento solamente alle dimensioni trasversali dell'ostacolo in alveo, le formule adottate tengono conto sia delle caratteristiche idrodinamiche di deflusso della corrente di piena di riferimento, che della granulometria del materiale di fondo, che dello sviluppo longitudinale delle opere di fondazione.

6.6.1. Condizioni idrauliche di riferimento

Lo sviluppo del fenomeno di erosione al piede delle pile dei ponti è continuo nel tempo seguendo un trend di evoluzione temporale fortemente dipendente dalla variabilità delle condizioni idrologiche di contorno.

L'assegnazione di una portata di calcolo di riferimento risulta quindi problematica in quanto si tratta di assegnare una condizione sufficientemente cautelativa ma che al tempo stesso non abbia bassissima probabilità di manifestarsi.

La portata massima al colmo è un evento che si manifesta istantaneamente nel corso d'acqua, o almeno per il tempo di persistenza del colmo che è comunque una caratteristica idrologica molto differente da bacino a bacino dipendendo dalla fenomenologia di formazione dell'onda di piena: per queste caratteristiche non risulterebbe quindi teoricamente adeguata al calcolo dello scalzamento.

I fenomeni di erosione in alveo sono comandati, secondo l'accezione scientifica attuale, da un valore di portata, detto "dominante", che è quello che determina la massima movimentazione di materiale di fondo nel tempo.

Tale valore della portata (che ad esempio per corsi d'acqua con caratteristiche idrologiche pedemontane corrisponde generalmente al valore del deflusso che ha mediamente persistenza in alveo per un quarto dell'anno, cioè la portata di morbida Q91 sulla scala di durata delle portate) non tiene però in conto l'effetto di scalzamento prodotto da eventi puntuali nel tempo particolarmente gravosi.

In definitiva, al fine di fare riferimento ad una condizione idrologica sufficientemente gravosa ma non tale da corrispondere ad un eccesso di cautela nel sovradimensionamento delle opere, si è adottata come condizione idraulica di riferimento per il calcolo dello scalzamento quella prodotta dal transito in condizioni stazionarie della portata di piena di progetto.

I dati idrodinamici della corrente in corrispondenza delle pile del ponte sono stati pertanto desunti dalle simulazioni idrauliche condotte con modello bidimensionale in relazione all'evento di piena di progetto con tempo di ritorno 200 anni per il quale si è fatto riferimento alla seguente ipotesi cautelativa:

- QTR200 = 426 m³/s in ingresso nel torrente Talloria¹;
- QTR200 = 3700 m³/s contemporaneamente defluente nel Tanaro² con livelli calcolati mediante applicazione di un modello idrodinamico quasi-bidimensionale esteso tra la foce Stura di Demonte e circa foce Belbo (Tanaro a Masio).

¹ Portata di piena di progetto del torrente Talloria alla confluenza in Tanaro in base allo studio idrologico relativo al "Progetto esecutivo dei lavori di sistemazione idraulica del torrente Talloria - 4° lotto" (giugno 2007).

6.6.2. Schematizzazione geometrica

L'opera di attraversamento in esame del torrente Talloria prevede la realizzazione di due viadotti, uno per ogni senso di marcia. Entrambi i viadotti sono costituiti da nove campate: le due campate esterne hanno una luce di 35,00 m mentre quelle centrali misurano tutte 51,50 m.

Le pile presentano una sezione piena di forma ellittica, con dimensioni in pianta di 5,20x1,50 m per la direzione Asti e 4,40x1,50 m per la direzione Cuneo. Le fondazioni sono di tipo indiretto, costituite da palificate con pali di diametro 1,20 m, disposti ad un interasse minimo di 3,80 m in numero pari a 6. I plinti hanno tutti dimensioni in pianta pari a 10,60x7,00 m e altezza 2,20 m.

Vengono di seguito riportati i parametri idraulici utilizzati per le verifiche dello scalzamento delle pile e dei plinti del viadotto in progetto. I dati idraulici in corrispondenza delle pile sono stati ricavati dai risultati della simulazione idraulica condotta con modello bidimensionale; in particolare si osservino le seguenti figure:

- Figura 34 - mappa dei tiranti e campo delle velocità di deflusso;
- Figura 36 - mappa delle quote massime di pelo libero;
- Figura 37 - distribuzione delle velocità massime di deflusso;
- Figura 39 - ubicazione della sezione longitudinale A-A di estrazione dei risultati del modello;
- Figura 40 - profilo longitudinale del pelo libero lungo il filo di monte del viadotto in progetto (sezione A-A);
- Figura 41 - profilo longitudinale delle velocità lungo il filo di monte del viadotto in progetto (sezione A-A).

Per le verifiche di scalzamento si possono distinguere due differenti zone, caratterizzate dai seguenti parametri considerati nel calcolo dello scalzamento, con riferimento al colmo della portata con tempo di ritorno 200 anni pari a 426 m³/s:

- a) zona prossima all'alveo inciso sistemato del Talloria, la più sollecitata dal punto di vista idrodinamico, (v. elaborati grafici del progetto stradale):
 - quota fondo di riferimento = 172,40 m s.m.;
 - massima altezza d'acqua $Y = 3,1$ m (quota massima di pelo libero 175,50 m s.m.);
 - velocità massima della corrente $v = 3,4$ m/s;
- b) zona golenale, attualmente poco sollecitata dal punto di vista idrodinamico:
 - quota fondo di riferimento = 172,40 m s.m..
 - massima altezza d'acqua $Y = 2,6$ m (quota massima di pelo libero 175,00 m s.m.);
 - velocità media della corrente nel suo complesso $v = 0,8$ m/s.

La quota di fondo di riferimento corrisponde alla quota di progetto del fondo alveo principale sistemato anche se tutte le pile sono fondate nel settore golenale, in ragione della potenziale instabilità morfologica della zona attraversata.

Il calcolo dello scalzamento è stato effettuato considerando la dimensione effettiva delle pile e si è valutata quindi la quota dell'approfondimento massimo ipotizzabile, utilizzando le formule di calcolo sviluppate da Yaroslavtziev, Holmes e Breusers, descritte in dettaglio nell'allegato 3.

² Portata di piena di progetto del fiume Tanaro ad Alba nella situazione attuale (ipotesi di casse di laminazione non realizzate).

6.6.3. Calcolo dello scalzamento

I risultati prodotti dall'applicazione delle formule sono riportati nella *Tabella 4*: “S1” rappresenta l'entità della massima profondità di scalzamento ipotizzabile per effetto della pila e rispetto alla quota di fondo alveo.

Nell'allegato 4 sono riportate le tabelle di calcolo delle varie formule.

	S1 - Breusers (m)	S1 - Holmes (m)	S1 - Yarosl. (m)	S1 medio (m)
Pila 5,20x1,50 – zona a	2,18	1,81	4,40	2,80
Pila 4,40x1,50 – zona a	2,18	1,81	4,53	2,84
Pila 5,20x1,50 – zona b	2,11	0,88	0,38	1,12
Pila 4,40x1,50 – zona b	2,11	0,88	0,39	1,13

Tabella 4 - Risultati dell'applicazione delle formule di scalzamento per effetto della pila

Come massima profondità di scalzamento ipotizzabile per effetto delle pile si assume pertanto un valore pari a **2,85** m per le pile in zona “a” e pari a **1,15** m per le pile in zona “b” rispetto alla quota di fondo alveo di riferimento, considerando il valore medio fornito dalle varie formule applicate.

In tali condizioni il vortice a ferro di cavallo verrebbe ad intercettare la struttura dei plinti di fondazione con possibile innesco di un processo di erosione più marcato.

Cautelativamente il calcolo della massima profondità di scalzamento ipotizzabile rispetto alla quota di fondo alveo di riferimento è stato pertanto condotto considerando la geometria dei plinti.

La dimensione trasversale del plinto considerata è pari a 7,00 m mentre come dimensione longitudinale si è adottato un valore pari a 24,90 m corrispondente all'ingombro complessivo dei due plinti disposti in serie a breve distanza tra loro, tanto da poterli considerare ai fini dello scalzamento come un unico ostacolo.

I risultati prodotti dall'applicazione delle formule sono riportati nella *Tabella 5*: “S2” rappresenta l'entità della massima profondità di scalzamento ipotizzabile per effetto del doppio plinto, rispetto alle quote di fondo alveo di riferimento sopra definite.

	S2 - Breusers (m)	S2 - Holmes (m)	S2 - Yarosl. (m)	S2 medio (m)
Plinto L=24,9 m – zona a	7,57	3,90	9,24	6,90
Plinto L=24,9 m – zona b	6,47	1,89	0,66	3,01

Tabella 5 - Risultati dell'applicazione delle formule di scalzamento per effetto del plinto.

In questo caso, a favore di sicurezza, considerando che le ipotesi di scalzamento del plinto sono direttamente correlate alla stabilità stessa della struttura del ponte, è opportuno fare riferimento al valore massimo di calcolo delle tre formulazioni considerate e quindi adottare un'altezza di scalzamento pari a **9,30** m per la zona “a” e pari a **6,50** m per la zona “b”.

7. CONCLUSIONI

L'analisi idraulica dei tratti del fiume Tanaro e del torrente Talloria interessati dal lotto in progetto del collegamento stradale A6-A21 Asti-Cuneo è stata finalizzata a verificare il grado di sicurezza dell'infrastruttura autostradale in relazione all'attuale assetto del sistema di arginature a protezione del rischio idraulico.

Lo studio del fiume Tanaro è stato condotto mediante la messa a punto, taratura e applicazione di un modello idrodinamico bidimensionale a fondo fisso, esteso all'intero tratto fluviale interagente con il tratto autostradale di attraversamento di Alba appoggiato a un modello quasi-bidimensionale di maggiore estensione (da confluenza Stura di Demonte a Masio).

Sono stati simulati gli eventi di piena di progetto con tempo di ritorno rispettivamente pari a 200 e 500 anni;

Nel tratto a monte della confluenza del torrente Talloria, simulato mediante modello quasi-2D, non sono state riscontrate criticità idrauliche: i livelli massimi di piena non giungono ad interessare il tracciato dell'autostrada in progetto, in quanto essa anche nei tratti planimetricamente più prossimi al Tanaro si sviluppa al di sopra di un terrazzamento fluviale posizionato ad una quota mediamente più elevata di 2-3 m rispetto ai livelli idrici.

In generale si confermano le aree di esondazione in sponda destra definite dalle fasce B e B di progetto del PAI, osservando però come il franco rispetto alla sponda lato fiume del canale di Verduno sia spesso minimo (circa 20 cm) per cui sia opportuno considerare tale canale sempre incluso nelle aree di esondazione.

Nel tratto del Tanaro a valle della confluenza del Talloria, analizzato con modello bidimensionale, l'analisi accurata dei risultati delle simulazioni condotte ha evidenziato la presenza lungo gli argini recentemente realizzati di alcuni tratti critici, in corrispondenza dei quali il franco di sicurezza rispetto all'evento di piena duecentennale è inferiore al metro.

I deflussi di piena risultano comunque sempre contenuti all'interno del sistema arginale e non interessano pertanto il tracciato autostradale in esame che si sviluppa esternamente alle arginature.

Nel nodo di confluenza Tanaro Talloria, analizzato per l'evento duecentennale del Talloria con uno specifico modello bidimensionale allineato sulle condizioni al contorno del modello 2D del Tanaro, sono stati osservati i seguenti elementi che caratterizzano principalmente l'assetto idraulico attuale e di progetto:

- il campo di flusso in corrispondenza dell'attraversamento autostradale in viadotto è simile a quello relativo alla situazione attuale, con una maggiore concentrazione del flusso nell'alveo inciso del Talloria, per effetto della incrementata capacità di portata conseguente alle opere di sistemazione idraulica in progetto: ne conseguono altezze idriche in golena mediamente inferiori di 0,25÷0,40 m;
- per quanto sopra osservato, le velocità nell'alveo inciso del Talloria si incrementano di 0,5÷1 m/s rispetto alla situazione attuale, mentre nelle aree golenali queste si riducono fino a valori dell'ordine di 0,5 m/s;
- i livelli idrici di piena di progetto in corrispondenza del viadotto subiscono un incremento rispetto allo stato attuale, in corrispondenza dell'alveo inciso, dell'ordine di 0,1÷0,5 m per effetto della maggiore concentrazione di flusso e dell'interferenza con le spalle e le pile del viadotto, in parte compensato in destra da una riduzione dei livelli golenali; il franco rispetto alla quota minima di intradosso (circa 179,35 m



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Relazione idrologica idraulica - Fiume Tanaro e confluenze principali

s.m.) risulta di oltre 3,0 m rispetto al livello idrico massimo sulla sezione (presso la sponda sinistra) e di oltre 4,0 m rispetto al livello idrico medio sull'intera estensione del viadotto;

- le velocità di deflusso in corrispondenza dell'attraversamento raggiungono il valore massimo di 3,4 m/s nell'alveo inciso, mentre in golena si attestano su valori di circa 0,7 m/s;
- la disposizione delle pile è adeguatamente studiata in modo da minimizzare l'interferenza con i filoni principali di corrente.

Per quanto sopra osservato il sistema risulta adeguato dal punto di vista idraulico; un modesto elemento di criticità relativo a una limitata esondazione in sinistra Talloria per sormonto di un tratto arginale nel precedente assetto di progetto (v. par. 6.4.2) è stata risolta adeguando opportunamente il progetto dell'opera di contenimento.



ALLEGATO 1 - Descrizione del codice di calcolo MIKE 11-HD (modulo idrodinamico)

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

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

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

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

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

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

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

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 adottata (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:

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

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 Dx e Dt di calcolo siano definiti in modo tale che la corrente si muova di uno spazio Dx in un tempo maggiore di Dt, e cioè:

$$V *Dt < Dx$$

dove V è velocità media della corrente.

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

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

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



ALLEGATO 2 - Descrizione del codice di calcolo 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:

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

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

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

nelle quali:

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

- $p_a(x,y,t)$ = pressione atmosferica;
 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:

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

2. oppure dipendente dalla velocità locale:

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

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.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Relazione idrologica idraulica - Fiume Tanaro e confluenze principali

La condizione iniziale è rappresentata da una situazione di "quiete", nel senso che tutte le componenti delle forzanti sono nulle (portate, velocità, livelli) e variano poi linearmente nel tempo fino a raggiungere il valore assegnato in un tempo prefissato. Questa tecnica, detta del "soft start" consente di eliminare eventuali brusche oscillazioni iniziali della soluzione che potrebbero presentarsi per problemi di stabilità numerica. Al termine del "soft start" si verifica che la situazione ottenuta sia di effettiva stazionarietà.

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



ALLEGATO 3 - DESCRIZIONE DELLE FORMULE DI CALCOLO DELL'EROSIONE ALLA BASE DELLE PILE DI PONTE

1. FORMULA DI YAROSLAVTZIEV

Yaroslavtziev elaborando numerosi dati di scalzamento raccolti nell'ex Unione Sovietica è pervenuto alla seguente formula:

$$S = K_v \cdot K_f \cdot (e + K_h) \cdot \frac{v_0^2}{g} - 30 \cdot D85 \quad [1]$$

nella quale:

S = profondità di scalzamento a partire dal fondo alveo medio locale;

K_v = funzione del rapporto tra il termine cinetico della corrente e la larghezza efficace della pila:

$$K_v = f\left(\frac{v_0^2}{g \cdot bl}\right); \quad [2]$$

K_h = funzione del rapporto tra l'altezza media della corrente e la larghezza efficace della pila:

$$K_h = f\left(\frac{Y_0}{bl}\right); \quad [3]$$

K_f = funzione del rapporto di forma della pila (lunghezza fratto larghezza) e dell'angolo di attacco della corrente:

$$K_f = f\left(\frac{l}{b}, \alpha\right) \quad [4]$$

v_0 = velocità della corrente di piena;

Y_0 = altezza d'acqua della corrente di piena sul fondo naturale di riferimento;

b = larghezza della pila;

l = lunghezza della pila;

α = angolo di attacco della corrente;

bl = larghezza efficace della pila:

$$bl = (l-b) \sin \alpha + b \quad [5]$$

e = parametro che assume valore 1,0 per pile in alveo e 0,6 per pile in golena;

D85 = dimensione caratteristica del materiale di fondo.

Per l'applicazione sistematica della formula è stato necessario interpolare linearmente, mediante procedura automatica di calcolo, tra i valori della tabella di Yaroslavtziev che rappresentano l'espressione di K_f [4], e monomizzare le espressioni di K_v [2] e di K_h [3] a partire dai grafici riportati nella pubblicazione originale dell'autore (da MAGINI, R. & REMEDIA, G. "Fondazioni in alvei mobili. Scalzamento localizzato per sistemi di pile e tecniche di fondazione", XX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Padova, 1986).

L'espressione [2] è riportata in un diagramma con asse delle ordinate logaritmico ed asse delle ascisse parabolico del terzo ordine; la forma monomia risulta la seguente:

$$K_v = 10^{\left[-0.283 \cdot \left(\frac{v_0^2}{g \cdot bl} \right)^{\frac{1}{3}} + 0.024 \right]} \quad [6]$$

L'espressione [3] è riportata in un diagramma semilogaritmico sull'asse delle ordinate; la forma monomia risulta la seguente:

$$K_h = 10^{\left[-0.281 \left(\frac{Y_0}{b_l}\right) + 0.096\right]} \quad [7]$$

L'applicazione del metodo di calcolo è stato effettuato sia in riferimento alla forma completa dell'espressione [1], sia tralasciando da tale espressione il secondo termine, dipendente dal diametro caratteristico del materiale, che determina una consistente riduzione della quota di scavo.

I risultati ottenuti con questa ipotesi appaiono adeguatamente cautelativi anche in relazione alla discreta variabilità del fuso granulometrico del materiale di fondo, per il quale anche pezzature piuttosto grossolane come diametro medio possono non essere in grado di assicurare un efficace effetto di "armoring" nei confronti dell'asporto di fine.

2. FORMULA DI HOLMES

Holmes elaborando i dati del rilevamento diretto dello scalzamento di 36 ponti crollati in Nuova Zelanda è pervenuto alla seguente formula:

$$H_s = H_{sl} + d_{so}, \quad [8]$$

nella quale:

H_s = profondità di scalzamento valutata dalla quota di pelo libero della piena di riferimento;

H_{sl} = profondità dello scalzamento medio del fondo in corrispondenza della pila dovuto all'erosione generalizzata del fondo;

d_{so} = profondità dell'erosione localizzata ai piedi della pila a partire dalla quota prodotta da H_{sl} .

Il termine H_{sl} è il maggiore tra i valori forniti dalle due seguenti espressioni:

$$H_{sl} = Y_0 \quad [9]$$

$$H_{sl} = y_r \cdot \frac{V_{o'}}{\left(\sqrt{g \cdot \frac{A}{B}} \cdot K_H\right)} \quad [10]$$

nelle quali:

Y_0 = profondità della corrente di piena indisturbata;

y_r = differenza tra il livello idrico medio ed il livello di piena;

A = area della sezione trasversale della corrente indisturbata;

B = larghezza della sezione trasversale;

$V_{o'}$ = velocità caratteristica della corrente in piena:

$$V_{o'} = \frac{Q}{A} \cdot \left[\frac{Y_0}{\frac{A}{B}}\right]^{\frac{2}{3}} \cdot C_H; \quad [11]$$

Q = portata di piena di calcolo;

C_H = parametro che vale 1,2 per correnti convergenti e 1,0 negli altri casi;

K_H = parametro che rappresenta la capacità di trasporto della corrente:

$$K_H = \sqrt{\frac{B}{B_r}}, \text{ nella quale:} \quad [12]$$

$$B_r = 4.85 \cdot \sqrt{Q}. \quad [13]$$

Il termine H_{si} diventa efficace solamente quando si manifesta un reale e consistente abbassamento generalizzato del fondo, cioè quando:

$$\left(\frac{y_r \cdot V_o'}{\left(\sqrt{g \cdot \frac{A}{B}} \cdot K_H \right)} - Y_o \right) > 0. \quad [14]$$

Il termine d_{so} è dato dalla seguente espressione:

$$d_{so} = 0.8 \cdot \sqrt{(V_o' \cdot b)}, \quad [15]$$

nella quale:

b = dimensione trasversale caratteristica della pila, data dall'espressione:

$$b = b' \cdot f3; \quad [16]$$

b' = larghezza della pila;

l = lunghezza della pila;

α = angolo di attacco della corrente;

$f3$ = parametro di forma della pila:

$$f3 = f(l/b, \alpha). \quad [17]$$

Il parametro $f3$ è dato da un diagramma riportato in bibliografia da diversi Autori: per angolo di attacco della corrente nullo ($\alpha=0$) il parametro $f3$ vale 1.

Nell'applicazione sistematica della formula, al fine di assumere condizioni cautelative di verifica, si è considerato sempre un valore di y_r pari ad Y_o , considerando totalmente l'effetto della piena di riferimento.

3. FORMULA DI BREUSERS

La formula di Breusers è una delle espressioni recenti più diffusamente applicate nell'ingegneria per la valutazione dell'erosione localizzata al piede delle pile.

In effetti l'impostazione del metodo di calcolo e la dipendenza del fenomeno da una serie ben definita di caratteristiche idrauliche, geometriche e sedimentologiche del sito rappresentano lo stato più avanzato della pratica di calcolo, rimanendo i singoli parametri che determinano lo scalzamento oggetto di continue revisioni alla luce di nuovi risultati su sperimentazioni modellistiche di laboratorio e di nuovi dati di campo.

La formula proposta da Breusers è la seguente:

$$d_s = 2 \cdot b \cdot \tanh\left(\frac{Y_0}{b}\right) \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4, \quad [18]$$

nella quale:

d_s = profondità di scalzamento a partire dal fondo alveo medio locale;

Y_0 = profondità media della corrente indisturbata;

b = larghezza della pila;

f_1 = parametro che tiene conto della capacità erosiva della corrente in rapporto alla velocità critica di trasporto:

$$f_1 = f(U/U_c):$$

$$f_1 = 0 \quad \text{per } U/U_c < 0,5;$$

$$f_1 = 2(U/U_c) - 1 \quad \text{per } 0,5 < U/U_c < 1,0;$$

$$f_1 = 1 \quad \text{per } U/U_c > 1,0; \quad [19]$$

U = velocità della corrente indisturbata;

U_c = velocità critica della corrente:

$$U_c = 5 \cdot \sqrt{D}; \quad [20]$$

D = diametro caratteristico del materiale;

f_2 = parametro che tiene conto della forma della pila:

$$f_2 = f(\text{pila}):$$

$$f_2 = 1 \quad \text{per pila circolare};$$

$$f_2 = 0,75 \quad \text{per pila sagomata idraulicamente};$$

$$f_2 = 1,30 \quad \text{per pila rettangolare}; \quad [21]$$

f_3 = parametro di forma della pila:

$$f_3 = f(l/b, \alpha); \quad [22]$$

f_4 = parametro che tiene conto dell' "effetto gruppo" e cioè della mutua vicinanza tra le pile attraverso il rapporto tra la larghezza della singola pila e l'interasse (da Elliot e Baker):

$$f_4 = f(x/b):$$

$$f_4 = 1 + \frac{1,79}{\left(\frac{x}{b} - 1\right)^{0,695}} \quad \text{per } x/b < 4;$$

$$f_4 = 2,95 - 0,278 \cdot \left(\frac{x}{b}\right) \quad \text{per } 4 < x/b < 7;$$

$$f_4 = 1 \quad \text{per } x/b > 7; \quad [23]$$

Il parametro f_3 è dato da un diagramma riportato in bibliografia da diversi Autori: per angolo di attacco della corrente nullo ($\alpha=0$) il parametro f_3 vale 1.



ALLEGATO 4 - TABELLE DI CALCOLO DELLO SCALZAMENTO DELLE PILE E DEI PLINTI DEL PONTE



**Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Relazione idrologica idraulica - Fiume Tanaro e confluenze principali**

Talloria

EROSIONE PRODOTTA DA: PILA - Zona "a"

FORMULA DI BREUSERS $S = 2.18$ (m)

DATI DI INPUT:		
PORTATA (Q)	(m ³ /s)	426
LIVELLO (Y ₀)	(m)	3.10
VELOCITA' MEDIA (U)	(m/s)	3.40
ANGOLO DI INCIDENZA (ALFA)	(°)	0
LARGHEZZA DELLA PILA (b)	(m)	1.50
LUNGHEZZA DELLA PILA (l)	(m)	5.20
DIAMETRO DEL MATERIALE DI FONDO (D)	(m)	0.00100
INTERASSE TRA LE PILE (x)	(m)	51.50
FORMA PILA (FP)		1
<small>(circolare FP=0; stream-lined FP=1; rettangolare FP=2)</small>		

PARAMETRI INTERMEDI:	
$U_c = 5 * D =$	0.158
$U / U_c =$	21.50
$f_1(U/U_c) =$	1.00
$l/b =$	3.47
$f_2(FP) =$	0.75
$f_3(ALFA, b/l) =$	1.00 $f_3=f(ALFA, b/l)$ vedere tabella
$x/b =$	34.33
$f_4(x/b) =$	1.00 (da Elliot e Baker, non valida per sistemi di pile circolari)

FORMULA :	
$Y_0/b =$	2.07
$\tanh(Y_0/b) =$	0.97
$ds = b * f_1 * 2 * \tanh(Y_0/b) * f_2 * f_3 * f_4 =$	2.18 (m)

TABELLA f3 in funzione di ALFA e di l/b
CALCOLO DI f3 (interpolazione da grafico di Breusers) :

ALFA	l/b							
	2	4	6	8	10	12	14	16
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
15	1.25	1.50	1.75	2.00	2.20	2.40	2.70	2.90
30	1.40	1.90	2.40	2.80	3.10	3.40	3.80	4.10
45	1.45	2.20	2.70	3.20	3.80	4.10	4.60	5.05
60	1.50	2.40	3.10	3.70	4.20	4.80	5.20	5.80
75	1.55	2.60	3.30	4.00	4.70	5.20	5.80	6.40
90	1.60	2.70	3.60	4.20	5.00	5.60	6.20	7.00
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	1.25	1.50	1.75	2.00	2.20	2.40	2.70	2.90
ALFA								
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
l/b								
3.47	2	4						
f3								
1.00	1.00	1.00						



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Relazione idrologica idraulica - Fiume Tanaro e confluenze principali

Talloria

EROSIONE PRODOTTA DA: **PILA - Zona "a"**

FORMULA DI HOLMES **S= 1.81 (m)**

DATI DI INPUT:		
PORTATA MASSIMA (Q)	(m ³ /s)	426
LIVELLO DI PIENA (Y _o)	(m)	3.10
LIVELLO MEDIO (Y _m)	(m)	0.00
LIVELLO DI CALCOLO (Y _r =Y _o -Y _m)	(m)	3.10
AREA DELLA SEZIONE (A)	(m ²)	125.30
LARGHEZZA DELLA SEZIONE (B)	(m)	40.42
ANGOLO DI INCIDENZA (ALFA)	(°)	0
LARGHEZZA DELLA PILA (b')	(m)	1.50
LUNGHEZZA DELLA PILA (l)	(m)	5.20
CORRENTE CONVERG. (0) O NON CONVERG. (1)		1

PARAMETRI INTERMEDI:	
CH =	1.00
Br =	100.10
V _{o'} =	3.40
KH =	0.64
l/b' =	3.47
F3 =	1.00
b =	1.50

FORMULA :	
$Y_r * V_o / [(g * A / B)^{0.5} * KH] - Y_o =$	-0.09 (< 0)
H _{sl1} =	3.10 (m)
$H_{sl2} = Y_r * V_o / [(g * A / B)^{0.5} * KH] =$	3.01 (m)
H _{sl} = (0; max (H _{sl1} , H _{sl2})) =	0.00 (m)
$d_{so} = 0.8 * (V_o * b)^{0.5} =$	1.81 (m)
H_s = H_{sl} + d_{so} =	1.81 (m)

TABELLA f3 in funzione di ALFA e di B/L
CALCOLO DI f3 (interpolazione da grafico di Breusers)

nota: la formula è stata sviluppata per la verifica di pile su plinti fondati su pali;
b' è la dimensione trasversale della pila: per pile su pali, b' è il diametro del
singolo palo moltiplicato per il numero dei pali più uno.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Relazione idrologica idraulica - Fiume Tanaro e confluenze principali

Talloria

EROSIONE PRODOTTA DA: PILA - Zona "a"

FORMULA DI YAROVLASTZIEV **S = 4.40** (m)

DATI DI INPUT:

VELOCITA' MEDIA CORRENTE (V_o) =	(m/s)	3.40
ALTEZZA ACQUA (Y_o)	(m)	3.10
LARGHEZZA DELLA PILA (b)	(m)	1.50
LUNGHEZZA DELLA PILA (l)	(m)	5.20
ANGOLO DI INCIDENZA (ALFA)	(°)	0
LARGHEZZA EFFICACE DELLA PILA (bl)	(m)	1.50
PILE IN ALVEO (1) O GOLENA (0)		1
DIAMETRO DEL MATERIALE DI FONDO (D85)	(m)	0.00100

PARAMETRI INTERMEDI:

e =	0.60		
Y_o/bl =	2.07	K_h =	0.33
$V_o^2/(g*bl)$ =	0.79	K_v =	0.58
l/b =	3.47	K_f =	6.95

FORMULA :

1 - con contributo materiale di fondo:

$$S = K_v * K_f * (e + K_h) * V_o^2 / g - 30 * D85 = 4.37 \text{ (m)}$$

2 - senza contributo materiale di fondo (cioè se $D85 < 0.5$ cm):

$$S = K_v * K_f * (e + K_h) * V_o^2 / g = 4.40 \text{ (m)}$$

CALCOLO DI K_f (interpolazione da Tabella di Yaroslavtziev) :

ALFA	l/b				
	0	2	4	8	12
0	8.50	7.50	6.75	5.90	5.20
10	8.70	7.70	6.80	6.10	5.30
20	9.00	7.80	7.10	6.20	5.60
30	10.30	8.80	7.50	6.30	5.70
40	11.20	9.20	7.90	6.70	5.90
0	8.50	7.50	6.75	5.90	5.20
10	8.70	7.70	6.80	6.10	5.30
ALFA					
0	8.50	7.50	6.75	5.90	5.20
l/b					
3.47	2	4			
Kf					
6.95	7.50	6.75			

CALCOLO DI K_h (formula monomia $K_h = f(Y_o/bl)$) :

$$K_h = 10^{-(0.281 * Y_o/bl + 0.096)} = 0.33$$

CALCOLO DI K_v (formula monomia $K_v = f(V_o^2/(g*bl))$) :

$$K_v = 10^{-(0.283 * (V_o^2/(g*bl))^{1/3} + 0.024)} = 0.58$$

nota: la formula è stata sviluppata per la verifica di pile su plinti fondati su pali



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Relazione idrologica idraulica - Fiume Tanaro e confluenze principali

Talloria

EROSIONE PRODotta DA: PILA - zona "b"

FORMULA DI BREUSERS **S = 2.11 (m)**

DATI DI INPUT:		
PORTATA (Q)	(m ³ /s)	426
LIVELLO (Y ₀)	(m)	2.60
VELOCITA' MEDIA (U)	(m/s)	0.80
ANGOLO DI INCIDENZA (ALFA)	(°)	0
LARGHEZZA DELLA PILA (b)	(m)	1.50
LUNGHEZZA DELLA PILA (l)	(m)	5.20
DIAMETRO DEL MATERIALE DI FONDO (D)	(m)	0.00100
INTERASSE TRA LE PILE (x)	(m)	51.50
FORMA PILA (FP)		1
<small>(circolare FP=0; stream-lined FP=1; rettangolare FP=2)</small>		

PARAMETRI INTERMEDI:	
U _c = 5*D =	0.158
U / U _c =	5.06
f1(U/U _c) =	1.00
l/b =	3.47
f2(FP) =	0.75
f3(ALFA, b/l) =	1.00 f3=f(ALFA, b/l) vedere tabella
x/b =	34.33
f4(x/b) =	1.00 (da Elliot e Baker, non valida per sistemi di pile circolari)

FORMULA :	
Y ₀ /b =	1.73
tanh(Y ₀ /b) =	0.94
ds = b*f1*2*tanh(Y₀/b)*f2*f3*f4 =	2.11 (m)

TABELLA f3 in funzione di ALFA e di l/B

CALCOLO DI f3 (interpolazione da grafico di Breusers) :

ALFA	l/b							
	2	4	6	8	10	12	14	16
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
15	1.25	1.50	1.75	2.00	2.20	2.40	2.70	2.90
30	1.40	1.90	2.40	2.80	3.10	3.40	3.80	4.10
45	1.45	2.20	2.70	3.20	3.80	4.10	4.60	5.05
60	1.50	2.40	3.10	3.70	4.20	4.80	5.20	5.80
75	1.55	2.60	3.30	4.00	4.70	5.20	5.80	6.40
90	1.60	2.70	3.60	4.20	5.00	5.60	6.20	7.00
ALFA	0	10	20	30	40	50	60	70
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	1.25	1.50	1.75	2.00	2.20	2.40	2.70	2.90
ALFA	0	10	20	30	40	50	60	70
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
l/b	3.47	4						
f3	1.00	1.00						



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Relazione idrologica idraulica - Fiume Tanaro e confluenze principali

Talloria

EROSIONE PRODOTTA DA: **PILA - zona "b"**

FORMULA DI HOLMES **S= 0.88 (m)**

DATI DI INPUT:

PORTATA MASSIMA (Q)	(m ³ /s)	426
LIVELLO DI PIENA (Y _o)	(m)	2.60
LIVELLO MEDIO (Y _m)	(m)	0.00
LIVELLO DI CALCOLO (Y _r =Y _o -Y _m)	(m)	2.60
AREA DELLA SEZIONE (A)	(m ²)	532.52
LARGHEZZA DELLA SEZIONE (B)	(m)	204.83
ANGOLO DI INCIDENZA (ALFA)	(°)	0
LARGHEZZA DELLA PILA (b')	(m)	1.50
LUNGHEZZA DELLA PILA (l)	(m)	5.20
CORRENTE CONVERG. (0) O NON CONVERG. (1)		1

PARAMETRI INTERMEDI:

CH =	1.00
Br =	100.10
V _{o'} =	0.80
KH =	1.43
l/b' =	3.47
F3 =	1.00
b =	1.50

FORMULA :

$Y_r * V_o' / [(g * A / B)^{0.5} * KH] - Y_o =$	-2.31 (< 0)
H _{sl1} =	2.60 (m)
$H_{sl2} = Y_r * V_o' / [(g * A / B)^{0.5} * KH] =$	0.29 (m)
H _{sl} = (0; max (H _{sl1} , H _{sl2})) =	0.00 (m)
$d_{so} = 0.8 * (V_o' * b)^{0.5} =$	0.88 (m)
H_s = H_{sl} + d_{so} =	0.88 (m)

TABELLA f3 in funzione di ALFA e di B/L

CALCOLO DI f3 (interpolazione da grafico di Breusers)

nota: la formula è stata sviluppata per la verifica di pile su plinti fondati su pali;
b' è la dimensione trasversale della pila: per pile su pali, b' è il diametro del
singolo palo moltiplicato per il numero dei pali più uno.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Relazione idrologica idraulica - Fiume Tanaro e confluenze principali

Talloria

EROSIONE PRODotta DA: PILA - zona "b"

FORMULA DI YAROVLASTZIEV **S = 0.38** (m)

DATI DI INPUT:

VELOCITA' MEDIA CORRENTE (V_o) =	(m/s)	0.80
ALTEZZA ACQUA (Y_o)	(m)	2.60
LARGHEZZA DELLA PILA (b)	(m)	1.50
LUNGHEZZA DELLA PILA (l)	(m)	5.20
ANGOLO DI INCIDENZA (ALFA)	(°)	0
LARGHEZZA EFFICACE DELLA PILA (bl)	(m)	1.50
PILE IN ALVEO (1) O GOLENA (0)		1
DIAMETRO DEL MATERIALE DI FONDO (D85)	(m)	0.00100

PARAMETRI INTERMEDI:

e =	0.60		
Y_o/bl =	1.73	K_h =	0.41
$V_o^2/(g*bl)$ =	0.04	K_v =	0.84
l/b =	3.47	K_f =	6.95

FORMULA :

1 - con contributo materiale di fondo:

$$S = K_v * K_f * (e + K_h) * V_o^2 / g - 30 * D85 = \quad \mathbf{0.35 \text{ (m)}}$$

2 - senza contributo materiale di fondo (cioè se $D85 < 0.5$ cm):

$$S = K_v * K_f * (e + K_h) * V_o^2 / g = \quad \mathbf{0.38 \text{ (m)}}$$

CALCOLO DI K_f (interpolazione da Tabella di Yaroslavtziev) :

ALFA	l/b				
	0	2	4	8	12
0	8.50	7.50	6.75	5.90	5.20
10	8.70	7.70	6.80	6.10	5.30
20	9.00	7.80	7.10	6.20	5.60
30	10.30	8.80	7.50	6.30	5.70
40	11.20	9.20	7.90	6.70	5.90
0	8.50	7.50	6.75	5.90	5.20
10	8.70	7.70	6.80	6.10	5.30
ALFA					
0	8.50	7.50	6.75	5.90	5.20
l/b					
3.47	2	4			
Kf					
6.95	7.50	6.75			

CALCOLO DI K_h (formula monomia $K_h = f(Y_o/bl)$) :

$$K_h = 10^{-0.281 * Y_o/bl + 0.096} = \quad \mathbf{0.41}$$

CALCOLO DI K_v (formula monomia $K_v = f(V_o^2/(g*bl))$) :

$$K_v = 10^{-0.283 * (V_o^2/(g*bl))^{1/3} + 0.024} = \quad \mathbf{0.84}$$

nota: la formula è stata sviluppata per la verifica di pile su plinti fondati su pali



**Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
 PROGETTO ESECUTIVO
 Relazione idrologica idraulica - Fiume Tanaro e confluenze principali**

Talloria

EROSIONE PRODOTTA DA: PLINTO - zona "a"

FORMULA DI BREUSERS **S = 7.57 (m)**

DATI DI INPUT:		
PORTATA (Q)	(m ³ /s)	426
LIVELLO (Y ₀)	(m)	3.10
VELOCITA' MEDIA (U)	(m/s)	3.40
ANGOLO DI INCIDENZA (ALFA)	(°)	0
LARGHEZZA DELLA PILA (b)	(m)	7.00
LUNGHEZZA DELLA PILA (l)	(m)	24.90
DIAMETRO DEL MATERIALE DI FONDO (D)	(m)	0.00100
INTERASSE TRA LE PILE (x)	(m)	51.50
FORMA PILA (FP)		2
<small>(circolare FP=0; stream-lined FP=1; rettangolare FP=2)</small>		

PARAMETRI INTERMEDI:	
U _c = 5*D =	0.158
U / U _c =	21.50
f ₁ (U/U _c) =	1.00
l/b =	3.56
f ₂ (FP) =	1.30
f ₃ (ALFA, b/l) =	1.00 f ₃ =f(ALFA, b/l) vedere tabella
x/b =	7.36
f ₄ (x/b) =	1.00 (da Elliot e Baker, non valida per sistemi di pile circolari)

FORMULA :	
Y ₀ /b =	0.44
tanh(Y ₀ /b) =	0.42
ds = b*f₁*2*tanh(Y₀/b)*f₂*f₃*f₄ =	7.57 (m)

TABELLA f3 in funzione di ALFA e di l/b

CALCOLO DI f3 (interpolazione da grafico di Breusers) :

ALFA	l/b							
	2	4	6	8	10	12	14	16
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
15	1.25	1.50	1.75	2.00	2.20	2.40	2.70	2.90
30	1.40	1.90	2.40	2.80	3.10	3.40	3.80	4.10
45	1.45	2.20	2.70	3.20	3.80	4.10	4.60	5.05
60	1.50	2.40	3.10	3.70	4.20	4.80	5.20	5.80
75	1.55	2.60	3.30	4.00	4.70	5.20	5.80	6.40
90	1.60	2.70	3.60	4.20	5.00	5.60	6.20	7.00
ALFA	0	10	20	30	40	50	60	70
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	1.25	1.50	1.75	2.00	2.20	2.40	2.70	2.90
ALFA	0	10	20	30	40	50	60	70
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
l/b	3.56	4						
f3	1.00	1.00						



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Relazione idrologica idraulica - Fiume Tanaro e confluenze principali

Talloria

EROSIONE PRODOTTA DA: PLINTO - zona "a"

FORMULA DI HOLMES S= 3.90 (m)

DATI DI INPUT:

PORTATA MASSIMA (Q)	(m ³ /s)	426
LIVELLO DI PIENA (Y _o)	(m)	3.10
LIVELLO MEDIO (Y _m)	(m)	0.00
LIVELLO DI CALCOLO (Y _r =Y _o -Y _m)	(m)	3.10
AREA DELLA SEZIONE (A)	(m ²)	125.30
LARGHEZZA DELLA SEZIONE (B)	(m)	40.42
ANGOLO DI INCIDENZA (ALFA)	(°)	0
LARGHEZZA DELLA PILA (b')	(m)	7.00
LUNGHEZZA DELLA PILA (l)	(m)	24.90
CORRENTE CONVERG. (0) O NON CONVERG. (1)		1

PARAMETRI INTERMEDI:

CH =	1.00
Br =	100.10
V _{o'} =	3.40
KH =	0.64
l/b' =	3.56
F3 =	1.00
b =	7.00

FORMULA :

$Y_r * V_o' / [(g * A / B)^{0.5} * KH] - Y_o =$	-0.09 (< 0)
H _{sl1} =	3.10 (m)
$H_{sl2} = Y_r * V_o' / [(g * A / B)^{0.5} * KH] =$	3.01 (m)
H _{sl} = (0; max (H _{sl1} , H _{sl2})) =	0.00 (m)
$d_{so} = 0.8 * (V_o' * b)^{0.5} =$	3.90 (m)
H_s = H_{sl} + d_{so} =	3.90 (m)

TABELLA f3 in funzione di ALFA e di B/L

CALCOLO DI f3 (interpolazione da grafico di Breusers)

nota: la formula è stata sviluppata per la verifica di pile su plinti fondati su pali;
b' è la dimensione trasversale della pila: per pile su pali, b' è il diametro del
singolo palo moltiplicato per il numero dei pali più uno.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Relazione idrologica idraulica - Fiume Tanaro e confluenze principali

Talloria

EROSIONE PRODotta DA: PLINTO - zona "a"

FORMULA DI YAROVLASTZIEV **S = 9.24** (m)

DATI DI INPUT:

VELOCITA' MEDIA CORRENTE (V_o) =	(m/s)	3.40
ALTEZZA ACQUA (Y_o)	(m)	3.10
LARGHEZZA DELLA PILA (b)	(m)	7.00
LUNGHEZZA DELLA PILA (l)	(m)	24.90
ANGOLO DI INCIDENZA (ALFA)	(°)	0
LARGHEZZA EFFICACE DELLA PILA (bl)	(m)	7.00
PILE IN ALVEO (1) O GOLENA (0)		1
DIAMETRO DEL MATERIALE DI FONDO (D85)	(m)	0.00100

PARAMETRI INTERMEDI:

e =	0.60		
Y_o/bl =	0.44	K_h =	0.94
$V_o^2/(g*bl)$ =	0.17	K_v =	0.74
l/b =	3.56	K_f =	6.92

FORMULA :

1 - con contributo materiale di fondo:

$$S = K_v * K_f * (e + K_h) * V_o^2 / g - 30 * D85 = 9.21 \text{ (m)}$$

2 - senza contributo materiale di fondo (cioè se $D85 < 0.5$ m):

$$S = K_v * K_f * (e + K_h) * V_o^2 / g = 9.24 \text{ (m)}$$

CALCOLO DI K_f (interpolazione da Tabella di Yaroslavtziev) :

ALFA	l/b				
	0	2	4	8	12
0	8.50	7.50	6.75	5.90	5.20
10	8.70	7.70	6.80	6.10	5.30
20	9.00	7.80	7.10	6.20	5.60
30	10.30	8.80	7.50	6.30	5.70
40	11.20	9.20	7.90	6.70	5.90
0	8.50	7.50	6.75	5.90	5.20
10	8.70	7.70	6.80	6.10	5.30
ALFA					
0	8.50	7.50	6.75	5.90	5.20
l/b					
3.56	2	4			
Kf					
6.92	7.50	6.75			

CALCOLO DI K_h (formula monomia $K_h = f(Y_o/bl)$) :

$$K_h = 10^{-(0.281 * Y_o/bl + 0.096)} = 0.94$$

CALCOLO DI K_v (formula monomia $K_v = f(V_o^2/g*bl)$) :

$$K_v = 10^{-(0.283 * (V_o^2/g*bl)^{1/3} + 0.024)} = 0.74$$

nota: la formula è stata sviluppata per la verifica di pile su plinti fondati su pali



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Relazione idrologica idraulica - Fiume Tanaro e confluenze principali

Talloria

EROSIONE PRODOTTA DA: PLINTO - zona "b"

FORMULA DI BREUSERS **S = 6.47 (m)**

DATI DI INPUT:

PORTATA (Q)	(m ³ /s)	426
LIVELLO (Y ₀)	(m)	2.60
VELOCITA' MEDIA (U)	(m/s)	0.80
ANGOLO DI INCIDENZA (ALFA)	(°)	0
LARGHEZZA DELLA PILA (b)	(m)	7.00
LUNGHEZZA DELLA PILA (l)	(m)	24.90
DIAMETRO DEL MATERIALE DI FONDO (D)	(m)	0.00100
INTERASSE TRA LE PILE (x)	(m)	51.50
FORMA PILA (FP)		2
<small>(circolare FP=0; stream-lined FP=1; rettangolare FP=2)</small>		

PARAMETRI INTERMEDI:

U _c = 5*D =	0.158
U / U _c =	5.06
f ₁ (U/U _c) =	1.00
l/b =	3.56
f ₂ (FP) =	1.30
f ₃ (ALFA, b/l) =	1.00 f ₃ =f(ALFA, b/l) vedere tabella
x/b =	7.36
f ₄ (x/b) =	1.00 (da Elliot e Baker, non valida per sistemi di pile circolari)

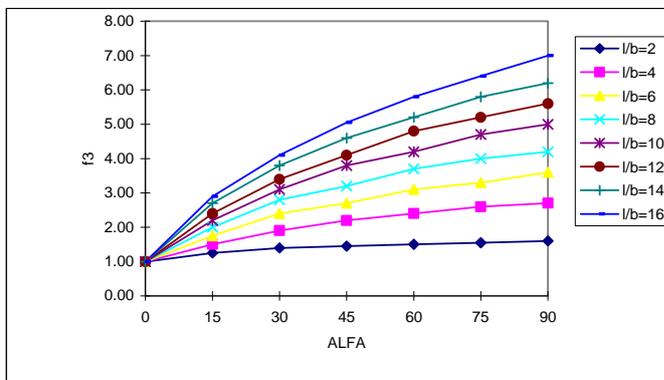
FORMULA :

Y ₀ /b =	0.37
tanh(Y ₀ /b) =	0.36
ds = b*f₁*2*tanh(Y₀/b)*f₂*f₃*f₄ =	6.47 (m)

TABELLA f3 in funzione di ALFA e di l/B

CALCOLO DI f3 (interpolazione da grafico di Breusers) :

ALFA	l/b							
	2	4	6	8	10	12	14	16
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
15	1.25	1.50	1.75	2.00	2.20	2.40	2.70	2.90
30	1.40	1.90	2.40	2.80	3.10	3.40	3.80	4.10
45	1.45	2.20	2.70	3.20	3.80	4.10	4.60	5.05
60	1.50	2.40	3.10	3.70	4.20	4.80	5.20	5.80
75	1.55	2.60	3.30	4.00	4.70	5.20	5.80	6.40
90	1.60	2.70	3.60	4.20	5.00	5.60	6.20	7.00
ALFA	0	10	20	30	40	50	60	70
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	1.25	1.50	1.75	2.00	2.20	2.40	2.70	2.90
ALFA	0	10	20	30	40	50	60	70
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
l/b	3.56	2	4	6	8	10	12	14
f3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00





Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Relazione idrologica idraulica - Fiume Tanaro e confluenze principali

Talloria

EROSIONE PRODOTTA DA: PLINTO - zona "b"

FORMULA DI HOLMES S= 1.89 (m)

DATI DI INPUT:		
PORTATA MASSIMA (Q)	(m ³ /s)	426
LIVELLO DI PIENA (Y _o)	(m)	2.60
LIVELLO MEDIO (Y _m)	(m)	0.00
LIVELLO DI CALCOLO (Y _r =Y _o -Y _m)	(m)	2.60
AREA DELLA SEZIONE (A)	(m ²)	532.52
LARGHEZZA DELLA SEZIONE (B)	(m)	204.83
ANGOLO DI INCIDENZA (ALFA)	(°)	0
LARGHEZZA DELLA PILA (b')	(m)	7.00
LUNGHEZZA DELLA PILA (l)	(m)	24.90
CORRENTE CONVERG. (0) O NON CONVERG. (1)		1

PARAMETRI INTERMEDI:	
CH =	1.00
Br =	100.10
V _{o'} =	0.80
KH =	1.43
l/b' =	3.56
F3 =	1.00
b =	7.00

FORMULA :	
$Y_r * V_o / [(g * A / B)^{0.5} * KH] - Y_o =$	-2.31 (< 0)
H _{sl1} =	2.60 (m)
$H_{sl2} = Y_r * V_o / [(g * A / B)^{0.5} * KH] =$	0.29 (m)
H _{sl} = (0; max (H _{sl1} , H _{sl2})) =	0.00 (m)
$d_{so} = 0.8 * (V_o * b)^{0.5} =$	1.89 (m)
H_s = H_{sl} + d_{so} =	1.89 (m)

TABELLA f3 in funzione di ALFA e di B/L	
CALCOLO DI f3 (interpolazione da grafico di Breusers)	

nota: la formula è stata sviluppata per la verifica di pile su plinti fondati su pali;
b' è la dimensione trasversale della pila: per pile su pali, b' è il diametro del
singolo palo moltiplicato per il numero dei pali più uno.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Relazione idrologica idraulica - Fiume Tanaro e confluenze principali

Talloria

EROSIONE PRODotta DA: PLINTO - zona "b"

FORMULA DI YAROVLASTZIEV **S = 0.66** (m)

DATI DI INPUT:

VELOCITA' MEDIA CORRENTE (V_o) =	(m/s)	0.80
ALTEZZA ACQUA (Y_o)	(m)	2.60
LARGHEZZA DELLA PILA (b)	(m)	7.00
LUNGHEZZA DELLA PILA (l)	(m)	24.90
ANGOLO DI INCIDENZA (ALFA)	(°)	0
LARGHEZZA EFFICACE DELLA PILA (bl)	(m)	7.00
PILE IN ALVEO (1) O GOLENA (0)		1
DIAMETRO DEL MATERIALE DI FONDO (D85)	(m)	0.00100

PARAMETRI INTERMEDI:

e =	0.60		
Y_o/bl =	0.37	K_h =	0.98
$V_o^2/(g*bl)$ =	0.01	K_v =	0.92
l/b =	3.56	K_f =	6.92

FORMULA :

1 - con contributo materiale di fondo:

$$S = K_v * K_f * (e + K_h) * V_o^2 / g - 30 * D85 = 0.63 \text{ (m)}$$

2 - senza contributo materiale di fondo (cioè se $D85 < 0.5$ cm):

$$S = K_v * K_f * (e + K_h) * V_o^2 / g = 0.66 \text{ (m)}$$

CALCOLO DI K_f (interpolazione da Tabella di Yaroslavtziev) :

ALFA	l/b				
	0	2	4	8	12
0	8.50	7.50	6.75	5.90	5.20
10	8.70	7.70	6.80	6.10	5.30
20	9.00	7.80	7.10	6.20	5.60
30	10.30	8.80	7.50	6.30	5.70
40	11.20	9.20	7.90	6.70	5.90
0	8.50	7.50	6.75	5.90	5.20
10	8.70	7.70	6.80	6.10	5.30
ALFA					
0	8.50	7.50	6.75	5.90	5.20
l/b					
3.56	2	4			
Kf					
6.92	7.50	6.75			

CALCOLO DI K_h (formula monomia $K_h = f(Y_o/bl)$) :

$$K_h = 10^{-(0.281 * Y_o/bl + 0.096)} = 0.98$$

CALCOLO DI K_v (formula monomia $K_v = f(V_o^2/(g*bl))$) :

$$K_v = 10^{-(0.283 * (V_o^2/(g*bl))^{1/3} + 0.024)} = 0.92$$

nota: la formula è stata sviluppata per la verifica di pile su plinti fondati su pali