

Committente:

**Comuni di Spilimbergo, San Daniele del Friuli,
Dignano, Pinzano e Ragogna**

**Simulazione matematica della
transizione di un'onda di piena
centennale sul medio e basso
Tagliamento**

Deflusso di massima piena sul tratto Pinzano-foce

Ing. Paolo Reggiani, Ph.D.

Ir. Eelco Verschelling

Relazione Tecnica

Novembre 2005

Contents

1	Introduzione	1—1
2	Nozioni geografiche sul Tagliamento.....	2—1
2.1	Nozioni geografiche sul bacino imbrifero	2—1
2.2	Il corso superiore	2—2
2.3	Il corso medio e inferiore.....	2—3
3	Simulazione delle condizioni idrauliche.....	3—1
3.1	Descrizione del modello matematico.....	3—1
3.2	Equazioni di moto vario in un canale	3—1
3.3	Modellazione di manufatti.....	3—2
3.4	Condizioni al contorno.....	3—3
3.4.1	Condizione al contorno a monte	3—3
3.4.2	Condizione al contorno a valle	3—4
4	Schematizzazione del fiume	4—1
4.1	Geometria dell'alveo	4—1
4.2	Il canale scolmatore Cavrato.....	4—3
4.3	La scabrezza idraulica delle sezioni.....	4—6
4.4	Ponti.....	4—7
4.4.1	Ponti a monte di Latisana	4—7
4.4.2	Ponti presso Latisana	4—10
4.4.2.1	Il ponte ferroviario della Venezia-Trieste	4—10
4.4.2.2	Il ponte stradale della SS. 14	4—12
4.4.2.3	Ponti a valle di Latisana.....	4—12
5	Simulazione dei deflussi di massima piena	5—1

5.1	I casi simulati.....	5—1
5.2	L'idrogramma di piena.....	5—2
6	Risultati.....	6—1
7	La transizione dell'onda di piena in presenza delle casse d'espansione	7—5
8	Conclusioni e raccomandazioni	8—6
8.1	Premesse	8—6
8.2	Conclusioni	8—7
9	Bibliografia	9—1

I Introduzione

Il 10 Agosto 2005 WL | Delft Hydraulics ricevette l'incarico dal Comune di Spilimbergo di effettuare una modellazione matematica sulle condizioni di deflusso del medio e basso Tagliamento durante eventi di piena eccezionale.

Seguendo le specifiche dell'ente committente, il lavoro di consulenza riguarda l'effettuazione di una simulazione del deflusso di un evento di massima piena con tempo di ritorno di 100 anni sul tratto del fiume Tagliamento compreso fra la località di Pinzano (km progressivo 83,685 alla foce) e la foce (km progressivo 0,000).

L'incarico tecnico è dettato dalla richiesta da parte del committente di un'investigazione indipendente e di carattere tecnico-scientifico sulla necessità della costruzione di tre casse d'espansione ed un'opera di presa nel letto del Tagliamento sui territori comunali di Pinzano e Spilimbergo. Tali casse sono state concepite dal *Piano Stralcio per la Sicurezza Idraulica del Medio e Basso Tagliamento* (al quale sarà fatto riferimento nel presente documento come "*Piano Stralcio*"), preparato dall'*Autorità di Bacino dei Fiumi dell'Alto Adriatico* come testo legge guida su una serie d'interventi idraulici ritenuti necessari al fine di proteggere alcuni abitati sul basso Tagliamento dal pericolo di tracimazione degli argini in caso d'eventi di massima piena.

Eventi di piena di tale dimensione erano già stati registrati negli anni 1965 e 1966. In particolare l'evento del 1966 aveva causato il collasso di un argine nei pressi della frazione Ronchis, dando luogo all'inondazione di vari abitati, compreso il paese di Latisana, causando la perdita di vite umane.

A monte di Latisana la sezione del Tagliamento si restringe bruscamente. L'ampia golena con aree utilizzate a scopo agricolo si riduce a monte di Latisana ad una sezione a doppio, trapezio. Il Tagliamento scorre fra due alti argini diaframmati e rivestiti con lastre di calcestruzzo. Tale tratto costituisce un vero e proprio "collo di bottiglia" che contribuisce in modo notevole ad esporre l'abitato al rischio di tracimazione durante un evento di piena estremo.

A Latisana il fiume viene inoltre attraversato da un ponte ferroviario della linea Venezia-Trieste. Il lato inferiore dell'impalcato del ponte si trova ad una quota di 10,22 m sul medio mare. Tale quota risulta notevolmente inferiore all'altezza massima effettiva dell'argine in quel punto (12 metri circa). La presenza del ponte rischia di impedire il deflusso delle acque in caso di un evento di piena eccezionale, con tempo di ritorno di 100 anni e rispettiva portata massima a Latisana nell'ordine di 4400 m³/s. Dato il fatto che vari palazzi residenziali sono stati costruiti nell'immediata vicinanza dell'argine maestro (anche dopo la piena del 1966), una tracimazione causerebbe danni notevoli.

Le casse d'espansione prevedono la realizzazione di un'invaso complessivo di 30 milioni di m^3 nel greto del Tagliamento, sui territori comunali di Pinzano e Spilimbergo. Secondo il progetto, il volume d'invaso sarebbe utilizzato al fine di laminare un'onda di piena di progetto da $4600 m^3/s$ a $4000 m^3/s$ circa.

La portata residua in alveo di $4000 m^3/s$ con tre casse in funzione è considerata sufficientemente bassa da potere transitare per la sezione critica di Latisana, a condizione che siano stati eseguiti una serie d'interventi di calibratura idraulica dell'alveo a valle di Latisana (vedi paragrafi seguenti). Nel caso della realizzazione della sola cassa 1 (volume d'invaso di 12 milioni di m^3) la portata residua in alveo a valle della cassa prevista dal progetto preliminare è di $4400 m^3/s$ circa.

I volumi delle casse vengono realizzati tramite argini, da costruirsi in alveo, ed opportunamente fondati su diaframmi impermeabili, da installare nel materasso alluvionale del Tagliamento.

Il volume in eccesso della piena verrebbe invasato nei volumi delle casse tramite due tipi di opere di presa: *a)* una galleria a monte della stretta di Pinzano, o *b)* una traversa fluviale a valle della stretta. La scelta definitiva del tipo di opera di presa da realizzare non è stata ancora stabilita a livello del progetto preliminare.

Oltre alla realizzazione delle casse d'espansione, le opere di sistemazione idraulica del Tagliamento previste dal *Piano Stralcio* suggeriscono la calibratura dell'alveo a valle di Latisana. Il canale scolmatore Cavrato dovrebbe provvedere alla deviazione di $2500 m^3/s$ di portata dal Tagliamento verso il mare Adriatico sul territorio Veneto. Il transito di tale portata richiede una serie di interventi sulla sezione, sugli argini del canale e sull'incile rispetto allo stato presente.

La massima portata residua che può transitare nell'alveo del Tagliamento a valle dell'incile del canale Cavrato è in parte una funzione dalla quota del livello del mare alla foce, dato il fatto che viene ad instaurarsi un profilo di rigurgito verso monte e controllato a valle dal livello del mare. La portata massima transitabile allo stato attuale è stimata pari a $1500 m^3/s$ per un livello attorno ai 1.5 m sul medio mare. Per questo motivo il canale Cavrato secondo il *Piano Stralcio* verrebbe attivato per portate in alveo uguali o maggiori a $1500 m^3/s$.

L'area del Tagliamento interessata dalla costruzione delle casse e relative opere idrauliche è stato classificato *Sito di Importanza Comunitaria (SIC) "Greto del Tagliamento"*. Il Tagliamento in questo tratto è considerato un ecosistema fluviale di alto valore paesaggistico. Il progetto NATURA 2000 che l'Unione Europea ha attuato in ottemperanza della Direttiva "HABITAT", no. 43 del 1992, prevede un elenco di siti definiti di importanza Comunitaria, sul quale esercitare le azioni di tutela e conservazione naturalistica previste dalla Direttiva succitata. Il tratto di Greto del Tagliamento, compreso tra la stretta di Pinzano ed il ponte di Dignano, circa 11 km più a valle, è stato appunto inserito nei SIC dalla Regione Friuli Venezia Giulia.

Vari esperti hanno segnalato l'alto valore naturalistico e paesaggistico della golena del Tagliamento compresa tra i ponti di Pinzano e Dignano, ed hanno osservato che un

intervento in quella zona comprometterebbe la funzionalità dell'ecosistema fiume, riducendone il valore ricreativo e paesaggistico della zona.

Uno studio della simulazione del deflusso dell'onda di piena del *Piano Stralcio* (picco massimo di 4600 m³/s) tramite i modelli matematici *Mike11* (Danish Hydraulics Institute) e *HEC-RAS* (U.S. Army Corps of Engineers) eseguito presso l'Università di Bologna dal Prof. Todini (Tesi di laurea dell'Ing. E. Monzoni, 2004) indica che l'onda è in grado di transitare per la sezione di Latisana con un franco di sicurezza da ritenersi sufficiente, a patto che siano soddisfatte le condizioni seguenti

1. Il canale scolmatore Cavrato è calibrato in modo tale da essere in grado di deviare una portata di 2500 m³/s dal Tagliamento,
2. Il ponte ferroviario a Latisana viene sollevato rispetto allo stato attuale, come già previsto dalle Ferrovie dello Stato.
3. Il tratto del Tagliamento a valle dell'incile del Cavrato è sistemato in modo da consentire il deflusso di 1900 m³/s di portata in alveo.

La richiesta del committente alla WL | Delft Hydraulics è di eseguire una simulazione del medio e basso Tagliamento tramite un modello matematico, col fine di verificare se la portata di riferimento, stabilita dal *Piano Stralcio* come dato di progetto per il dimensionamento delle casse, sia in grado di transitare per i vari punti identificati "critici" da un punto di vista della sicurezza idraulica, senza esporre le zone limitrofe a pericolo di inondazione.

Nel caso in cui il modello matematico dimostrasse che il livello massimo raggiunto delle acque a Latisana è tale da garantire un passaggio sicuro dell'onda di piena, confermando i risultati numerici ottenuti dalle simulazioni precedenti, è possibile concludere che esistono delle alternative alla costruzione delle casse e agli interventi previsti sul *Sito di Interesse Comunitario*, senza compromettere la sicurezza idraulica a Latisana.

La presente relazione tecnica descrive il modello matematico, riporta l'impostazione delle simulazioni, analizza i risultati numerici e ne riporta le conclusioni tecniche. Si osserva che le simulazioni sono state effettuate con un modello matematico allo stato dell'arte (SOBEK, WL | Delft Hydraulics) basato sulle equazioni di De Saint Venant. Le simulazioni sono perciò ripetibili e verificabili, assicurando la trasparenza e l'oggettività dell'analisi e dei risultati qui riportati.

2 Nozioni geografiche sul Tagliamento

2.1 Nozioni geografiche sul bacino imbrifero

Il Tagliamento è il più importante fiume della regione Friuli-Venezia-Giulia, la cui asta principale si estende per una lunghezza totale di 178 km. Nasce al confine tra le province di Belluno (Lorenzago di Cadore) e Udine (Forni di Sopra), presso il Passo della Mauria. Nel primo tratto attraversa la Carina, la parte settentrionale della provincia di Udine, poi costituisce il confine tra questa e la provincia di Pordenone prima e la Provincia di Venezia in seguito, sfociando infine nel Golfo di Venezia tra Lignano Sabbiadoro (provincia di Udine) e Bibione (provincia di Venezia).

Il suo bacino imbrifero si estende su un' area complessiva di 2871 km². La forma del bacino è paragonabile a quella di un imbuto, con un largo recipiente nella fascia montana, una strettoia nella fascia prealpina ed un lungo e sinuoso canale di pianura.

Il bacino montano del Tagliamento comprende circa 2433 km² di superficie dei quali circa 1870 si trovano a monte della confluenza col Fella ed i rimanenti 563 nella zona pedemontana che si estende a monte della confluenza col torrente Cosa. Il bacino si trova quasi interamente nelle alpi Carniche e nelle altre vallate montane friulane (per l' 86 % in provincia di Udine) e per il resto nella provincia di Belluno e di Venezia.

Il regime del fiume è molto irregolare, quasi torrentizio. La sua portata media è di 92 m³/s a Pinzano e di 70 m³/s alla foce, ma la sua portata massima nel periodo di piena può essere considerevolmente maggiore. Il massimo storico è stato registrato a 4000 m³/s a Venzone durante la piena disastrosa del novembre 1966.

Le principali località poste sulle sue rive sono (risalendo lungo il fiume dalla foce verso monte), Latisana e San Michele al Tagliamento. Nelle immediate vicinanze del fiume si trovano le seguenti località: Tolmezzo, Gemona del Friuli, San Daniele del Friuli, Spilimbergo, Casarsa della Delizia, Codroipo e San Vito al Tagliamento.



Figura 1: Immagine da satellite riportante parte del corso del medio e basso Tagliamento

2.2 Il corso superiore

La sorgente del Tagliamento si trova a 1195 m.s.l.m., fra le province di Belluno e quella di Udine, a nord ovest di Forni di Sopra nei pressi del passo della Mauria. Il suo corso inizialmente è orientato in direzione ovest-est, parallelamente alla catena delle Alpi Carniche. Il suo primo affluente notevole è il Lumiei, che si immette nel Tagliamento dalla sinistra, a 26 km dalla sorgente. A partire da questo punto la vallata principale si allarga nettamente e diventa meno montagnosa. Poco prima di Villa Santina, riceve il Digano, poi il But, nei dintorni di Tolmezzo.

Ad (247 m.s.l.m.), a 56 km dalla sorgente, il Tagliamento riceve il Fella, il suo principale affluente, che ne determina quasi il raddoppio della portata d'acqua. Poi il corso d'acqua si dirige bruscamente verso sud-ovest, e si allarga considerevolmente nel giro di qualche chilometro nella piana di Osoppo. Nella parte meridionale di questa scorre il canale Ledra che raccoglie le acque infiltrate nel materasso ghiaioso del fiume. Più a valle, il Tagliamento riceve da destra il torrente Arzino, il suo letto si restringe poi nettamente nella stretta di Pinzano.

2.3 Il corso medio e inferiore

Superato Pinzano al Tagliamento, il letto del fiume, orientato ormai verso sud, comincia a distendersi nella pianura raggiungendo tre chilometri di larghezza nei pressi di Spilimbergo, ramificandosi. Il suo alveo ghiaioso molto permeabile ed infossato nella pianura circostante, assorbe quasi totalmente le sue acque.

Nel suo corso inferiore, a partire da e della Delizia, il Tagliamento viene alimentato da parte delle sue acque perse in precedenza e che qui riemergono in risorgive. Il letto si restringe nettamente (180 m di larghezza) e comincia a formare dei meandri, data la diminuzione di pendenza. Il letto viene completamente invaso dalle acque soltanto durante le piene, mentre durante i periodi di deflusso normale il fiume occupa soltanto dei solchi mutevoli, incisi sul materiale ghiaioso del letto.

Prima di sfociare nell'Adriatico, riceve le acque di un piccolo fiume di risorgiva, il Armo. In questa zona i dislivelli fra la pianura ed il letto vanno man-mano diminuendo, tanto che il fiume è caratterizzato dalla presenza d'argini, che si sono dovuti rialzare col passare del tempo. A partire da Madriso il fiume assume un andamento meandriforme con una sezione dell'alveo molto più ridotta. In corrispondenza di Latisana la larghezza si riduce a 180 m.

Alla foce il Tagliamento forma un delta che delimita, a sud, la laguna di Marano e quella di Caorle. L'ultimo tratto del fiume si può descrivere come fortemente canalizzato e sistemato tra due argini.



Figura 2: L'alveo del Tagliamento a valle di Pinzano. Si nota il materasso ghiaioso ed il percorso meandriforme del fiume.

3 Simulazione delle condizioni idrauliche

3.1 Descrizione del modello matematico

La simulazione della situazione di progetto viene effettuata tramite l'applicazione di un modello matematico, in grado di riprodurre i processi dinamici relativi al moto unidimensionale in un canale a pelo libero.

Il modello impiegato per le simulazioni è il SOBEK 1D (vedi bibliografia), sviluppato dalla WL | Delft Hydraulics e attualmente utilizzato sia nel contesto di progetti di consulenza internazionali che per l'impostazione di sistemi di previsione delle piene, richiedenti la simulazione del moto nei canali a pelo libero in tempo reale.

SOBEK permette la simulazione sia di moti subcritici che di moti supercritici ed è basato sulla soluzione numerica delle equazioni complete non-lineari ed accoppiate di De Saint-Venant, utilizzando uno schema alle differenze finite di tipo implicito. Il moto viene descritto in nodi alterni lungo le linee di corrente e questo fa sì che possano essere tenute in adeguata considerazione singolarità idrauliche come rotture d'argine, soglie, stramazzi, passaggi sotto ponti, luci rigurgitate e sommerse, ecc.. SOBEK inoltre consente anche la modellazione matematica di sistemi fluviali in modo bidimensionale.

Il modello SOBEK costituisce uno strumento di calcolo allo stato dell'arte, ampiamente descritto e discusso in diverse pubblicazioni scientifiche e ben noto a livello internazionale (vedi Bibliografia).

L'impostazione del modello matematico richiede l'inserimento di una serie di dati geometrici quali la sezione dell'alveo espressa in termini di coppie di coordinate descrittive la sagoma della sezione stessa.

Il principale parametro idrodinamico da inserire nel modello è la *scabrezza idraulica* dell'alveo, espressa in termini di un numero di Manning o di Gauckler-Strickler, e scelto in base alla scabrezza del materiale presente sul fondo alveo.

3.2 Equazioni di moto vario in un canale

Le equazioni che descrivono il moto unidirezionale in un canale a pelo libero, chiamate *Equazioni di De Saint Venant*, si basano sulle seguenti ipotesi:

- fluido incomprimibile ed omogeneo;
- pendenze di fondo piccole, così che il coseno dell'angolo formato con l'orizzontale possa essere assunto pari a 1;

- lunghezze d'onda grandi rispetto all'altezza d'acqua, ciò che permette di assumere la corrente con direzione sempre parallela al fondo (la componente d'accelerazione verticale può essere considerata trascurabile e la pressione distribuita con legge idrostatica lungo la verticale);
- moto subcritico (i moti supercritici vengono simulati sotto condizioni restrittive successivamente esposte).

Le equazioni di De Saint Venant si compongono *i)* dall'equazione di continuità e *ii)* l'equazione di bilancio di quantità di moto, che vengono applicate ad un assegnato tronco del fiume. Nell'ipotesi di fluido incomprimibile, l'equazione di continuità si scrive come:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} - q_e = 0 \quad (1)$$

dove:

- Q è la portata fluviale
- A è l'area bagnata
- q_e è la portata per unità di larghezza dovuta agli apporti o emungimenti laterali
- x è la coordinata seguente l'asse del canale
- t è il tempo

L'equazione di conservazione della quantità di moto si scrive come:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (AV)}{\partial t} + g \cdot A \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (2)$$

dove:

- V è la velocità;
- Q è la portata;
- S_f è la pendenza del fondo alveo.
- z è la quota del pelo libero

Le equazioni (1) e (2) sono di tipo differenziale, non-lineari ed accoppiate. In SOBEK esse sono risolte tramite uno schema numerico implicito alle differenze finite.

3.3 Modellazione di manufatti

Il modello SOBEK permette di rappresentare una serie di manufatti, quali ponti di vario tipo, sfioratori laterali, soglie di fondo, orifizi e simili. Questi manufatti causano delle perdite di carico idraulico localizzate o delle derivazioni, che influiscono sulla dinamica dell'onda di piena in transito, instaurando un profilo di rigurgito a monte.

L'analisi dell'effetto dei ponti in condizioni di moto vario è effettuata in SOBEK con due approcci alternativi: il primo si esplica sottraendo dall'area bagnata l'area occupata dalle spalle e dalle pile della struttura; il perimetro bagnato risulta incrementato sempre per la presenza del ponte e, conseguentemente, si ha una riduzione della capacità di portata. Si preferisce questa procedura nei casi di spalle non troppo alte e facilmente sommergibili.

Il secondo approccio considera invece la sezione attuale del ponte, imponendo una condizione interna, con la definizione di relazioni $Q-h$ (portata-altezza idrica) in sostituzione alle equazioni di moto vario.

3.4 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno necessarie per la risoluzione delle equazioni del moto, sono date dall'imposizione della portata e/o del livello del pelo libero ai due estremi del dominio di calcolo. In regime di moto vario, le condizioni al contorno possono essere definite in SOBEK imponendo il rispetto della scala di deflusso in moto uniforme, oppure mediante la specifica di un idrogramma, ovvero un'altezza idrometrica nota; oppure, in ultima analisi, imponendo sia l'idrogramma che l'altezza assegnata.

3.4.1 Condizione al contorno a monte

Nel presente caso di studio, riguardante l'analisi del transito di un'onda di piena, la condizione al contorno a monte viene imposta tramite l'idrogramma di piena a Pinzano utilizzato nel *Piano Stralcio*. Per riprodurre gli stessi effetti di piena scelti per il progetto delle casse d'espansione, è stato usato l'idrogramma di piena calcolato dal Prof Maione e pubblicato sul Piano Stralcio. Tale idrogramma è stato ottenuto dall'idrogramma registrato a Venzone durante la piena del 1966 e riportato in Figura 3, aumentandolo del 20%. Tale aumento è stato apportato per tenere conto del contributo delle aree drenanti fra Venzone e Pinzano ed è da considerarsi estremamente cautelativo.

L'idrogramma di progetto è stato infine ottenuto risagomando l'idrogramma aumentato del 20%, aggiungendo dei volumi di deflusso notevoli, e non necessariamente giustificabili da un punto di vista dei processi afflussi-deflussi nel bacino imbrifero.

In ogni caso sarebbe necessario eseguire delle modellazioni afflussi-deflussi tramite un modello idrologico e con vari scenari di precipitazione per trarre delle conclusioni definitive sulla forma più adeguata da considerare per l'idrogramma di piena a Pinzano. Secondo l'idrogramma di progetto delle casse d'espansione la portata di picco dell'idrogramma a Pinzano risulta pari a $4600 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 3).

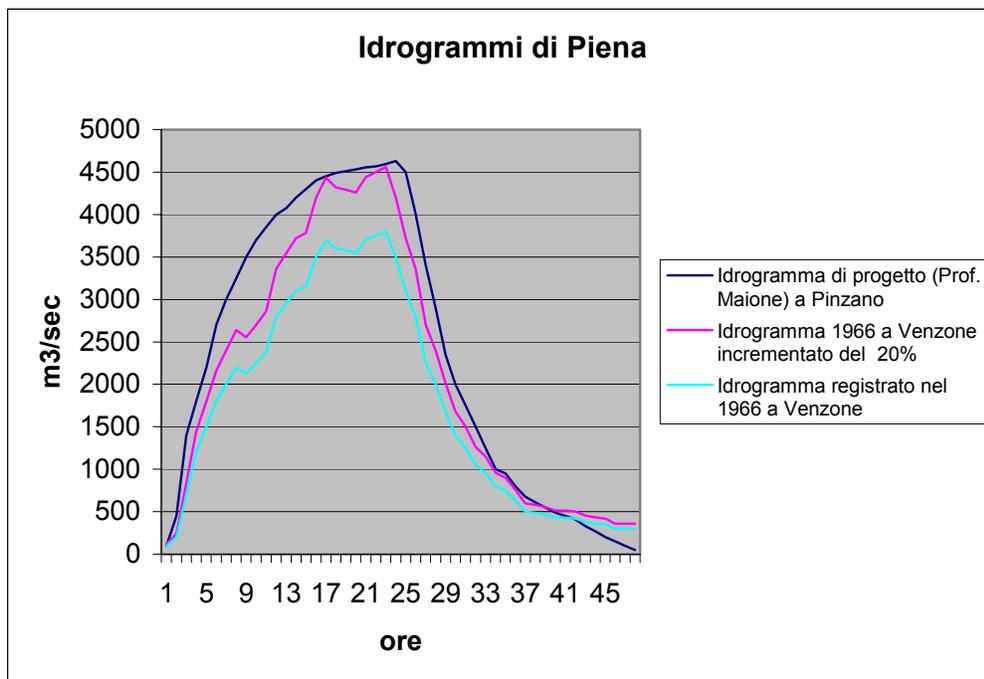


Figura 3: Idrogramma di progetto, usato come condizione al contorno a monte

3.4.2 Condizione al contorno a valle

La condizione al contorno a valle (a mare) viene imposta in termini di un massimo livello sopra il medio mare (quota zero). Per tenere conto di condizioni di estrema avversità meteorologica, in cui il vento di Scirocco contribuisce all'innalzamento del livello del mare sull'alto Adriatico, le simulazioni sono state effettuate per tre valori del livello del mare, indicati in Tabella 1.

Tabella 1: Quote del mare usate come condizione al contorno a valle

Simulazione	Livello sopra quota medio mare (condizione al contorno)
Caso 1	1,00 m
Caso 2	1,50 m
Caso 2	2,00 m

Il livello più alto di 2,0 m sopra il medio mare, scelto per il caso 3, è ancora superiore al massimo registrato a Venezia durante la piena del 1966 e pari a 1,94 m. Le condizioni al contorno a valle vengono imposte sia alla foce del Tagliamento che allo sbocco del canale Cavrato.

Si osserva che per via dei moti delle maree durante un evento di piena di durata superiore a 24 ore, è praticamente impossibile che s'instauri un innalzamento costante di 2,0 metri sul medio mare. La decisione di ipotizzare un innalzamento costante durante tutto il periodo di deflusso assicura una condizione idraulica estremamente penalizzante e perciò assai cautelativa al fine della valutazione del rischio.

4 Schematizzazione del fiume

Il tratto del fiume studiato nella presente relazione tecnica si trova fra il chilometro progressivo 83,685 sul ponte di Pinzano e la foce sul mare Adriatico (km progressivo 0,00). Una rappresentazione matematica della realtà fisica richiede l'inserimento di una serie di dati geometrici e idraulici, richiesti per la schematizzazione del dominio spaziale di calcolo e per la rappresentazione parametrica di perdite di carico idraulico distribuite e localizzate, quali la scabrezza e le perdite localizzate causate dalla presenza di manufatti. L'inserimento di tale informazione richiede un serie di passi operativi, che vengono descritti in dettaglio nei paragrafi successivi.

4.1 Geometria dell'alveo

Al fine di inserire la geometria del tronco principale del Tagliamento fra Pinzano e la foce, sono stati utilizzati i dati relativi alla geometria del fiume, provenienti dai rilievi disponibili (Barigazzi 1982, GEOTOP 2001), preferendo, ove possibile, i dati più recenti (da Pinzano a Dignano).

Il rilevamento topografico originale, effettuato in scala 1:10000 dalla ditta Barigazzi di Parma nel 1982 per conto del Genio Civile di Udine, comprendeva 190 sezioni per uno sviluppo complessivo di 83,685 km, dalla stretta di Pinzano alla foce. I dati di ogni sezione sono stati singolarmente esaminati perché sono stati utilizzati solo i punti di sezione fino al confine naturale costituito dagli argini maestri, anche se il rilievo in alcune situazioni si estende ben al di là delle stesse. Un fiume come il Tagliamento, con una morfologia in continua evoluzione, presenta notevoli mutazioni di sezione e di scabrezza (in particolare rispetto al rilevamento Barigazzi).

Quest'importante osservazione trova riscontro nel modello utilizzato perché, in seconda analisi, sono state modificate, nel tratto da Pinzano al Ponte di Dignano, il numero e la forma delle sezioni che costituivano il fiume, appoggiandosi ad un rilievo molto più recente, datato Marzo 2001 e commissionato dall'Autorità di Bacino alla ditta GEOTOP SAS di Treviso. Tale rilievo, in scala 1:5000, prevede l'aggiornamento delle sezioni da Pioverno a Dignano ed è stato effettuato utilizzando, ove ancora esistenti, i pilastri di riferimento delle sezioni utilizzati dalla ditta Barigazzi.

Preferendo i dati più recenti, le sezioni da Ponte di Dignano (sezione identificata come 149b nel rilevamento Barigazzi) a Pinzano (sezione 171b), si sono ridotte da 25 a 15, portando il numero totale delle sezioni utilizzate da 174 a 164. La sostituzione di queste sezioni, effettuata in un tratto dove il fiume raggiunge la massima larghezza (circa 3 km), ha comportato una più precisa valutazione dell'effetto di laminazione naturale del fiume, che risulta maggiore nel caso si utilizzino le sezioni più recenti, perché queste ultime, in alcuni tratti più estese di oltre 1 km rispetto alle originarie, coprono anche ampie aree golenali.



Figura 4: Le sezioni lungo la parte bassa il Tagliamento ed il canale Cavrato, posizionate su un'immagine da satellite (Landsat TM).

Tracciata la rete in planimetria e definito il suo sviluppo complessivo (83,685 km) tutte le sezioni trasversali sono state riferite all'asta fluviale. Le sezioni sono inoltre stata posizionata in planimetria, utilizzando le coordinate UTM del baricentro della sezione. Le sezioni sono infine state posizionate su un'immagine satellitare LANDSAT-TM (Figura 4).

La Figure 5 riporta la sezione critica di Latisana all'altezza del ponte ferroviario della linea Venezia-Trieste, rilevata dalla ditta Barigazzi. I dati sono stati trasformati in formato digitale e visualizzate con un apposito software grafico.

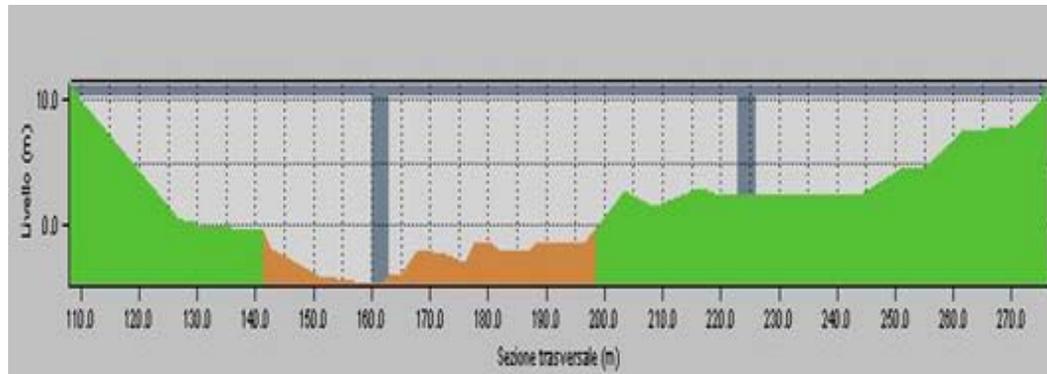


Figura 5: La sezione del Tagliamento in corrispondenza del ponte FS della linea Venezia-Trieste presso Latisana.

4.2 Il canale scolmatore Cavrato

Per il Cavrato si è previsto il seguente funzionamento nel progetto del *Piano Stralcio*:

- Per portate in alveo inferiori a $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ la soglia all'incile del Cavrato non viene tracimata ed il canale rimane secco.
- Per portate in alveo superiori a $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ una portata pari alla differenza tra portata transitante e $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ (fino ad un massimo di $2500 \text{ m}^3/\text{s}$) tracima la soglia inserita all'incile del canale e viene deviata verso il mare Adriatico.

L'incile del canale si trova ad una distanza di 18,675 km dalla foce e a 8,525 km a valle di Latisana, in immediata vicinanza dell'abitato di Cesarolo. Il Cavrato si trova attualmente in uno stato da richiedere una calibratura idraulica onde permettere il passaggio della portata di $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ prevista dal *Piano Stralcio*.

Tale intervento necessita una risagomatura della sezione trasversale, il rafforzamento degli argini in una serie di punti deboli e l'allontanamento di particolari tipi di vegetazione (e.g. pioppeti) con lo scopo di ridurre la scabrezza idraulica. Risulta inoltre necessaria un'opportuna risagomatura dell'incile installandovi una soglia scolmatrice, che richiede un'accurata progettazione.



Figura 6: La traccia del canale scolmatore Cavrato vista da satellite (Landsat TM)

Al fine della modellazione matematica, ed in assenza d'informazioni dettagliate sul progetto di calibratura, il canale è stato rappresentato da un punto di vista geometrico in termini di una sezione-tipo a doppio trapezio, larga 500 m in media, come indicato nel *Piano Stralcio* ed intravedibile da immagini satellitari. La sagoma della sezione-tipo è rapportata in Figura 7.

Il fondo del canale di bonifica rivestito in conglomerato cementizio e situato al centro della sezione-tipo è stato fissato a -1.0 m rispetto alla quota di medio mare.

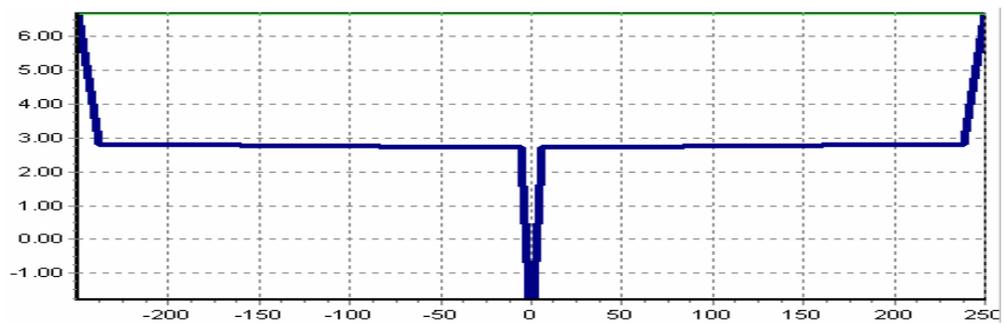


Figura 7: Una sezione-tipo assunta per il canale scolmatore Cavrato

L'attivazione del Cavrato è stata rappresentata nel modello matematico utilizzando una soluzione che prevede l'introduzione di una sezione artificiale di controllo nel Tagliamento all'altezza dell'incile (a 18,675 km dalla foce).

Una volta superata una determinata portata di soglia in alveo, fissata a $1500 \text{ m}^3/\text{s}$, avviene uno scollo graduale dal Tagliamento verso il canale fino a raggiungere un valore massimo di $2500 \text{ m}^3/\text{s}$, cioè il valore limite imposto dalle condizioni geometriche e fisiche del canale. Tale situazione corrisponde ad una completa calibratura idraulica del Cavrato, così come previsto nel *Piano Stralcio* proposto dall'*Autorità di Bacino*.



Figura 8: L'incile del canale Cavrato allo stato attuale (Settembre 2005) visto da satellite (Landsat TM). Si nota al centro il canale di bonifica tracciante l'asse del Cavrato.

La lunghezza della soglia dello scolmatore è stata assunta pari a 500 m , mentre la quota della soglia è stata scelta come parametro di progetto ed è stimata per approssimazioni successive (3 metri sul medio mare circa), approssimando la situazione nella quale si avvera una deviazione non oltre i $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ di portata attraverso il canale scolmatore.

Tabella 2: Valori di Manning riportati in letteratura per vari tipi di canali (Chow)

Fiumi naturali		Canali in terra	
alveo liscio e rettilineo	0,030	liscio	0,022
alvei più comuni	0,035	ghiaioso	0,025
per fiumi a moto lento ed in presenza di conche profonde	0,040	presenza di vegetazione erbacea	0,030
		sassoso e presenza di massi	0,035

Si osserva che il presente studio non mira ad una progettazione ottimale dell'incile, la quale richiede ulteriori investigazioni onde trovare il rapporto ottimale fra la lunghezza dello scolmatore e l'altezza della soglia. In sede della progettazione ottimale dell'opera è necessario approfondire ulteriormente quest'argomento.

4.3 La scabrezza idraulica delle sezioni

Per il modello matematico di moto unidimensionale in un canale a pelo libero, la scelta del valore di scabrezza di Manning è d'importanza notevole, perché esso ha un impatto sulla dinamica dell'onda di piena e perciò e sull'altezza dei tiranti in corrispondenza dei punti critici. Il parametro di Manning è stato tabulato per vari tipi di canali. Tabella 2 ne riporta alcuni dei valori riscontrati in letteratura per i canali naturali e canali in terra.

Per la presente modello matematico del Tagliamento sono stati adottati due diversi valori di scabrezza di Manning. Il cambiamento della scabrezza è stato assegnato in corrispondenza del cambio netto di pendenza del Tagliamento, facilmente individuabile dal profilo longitudinale riportato in Figura 9.

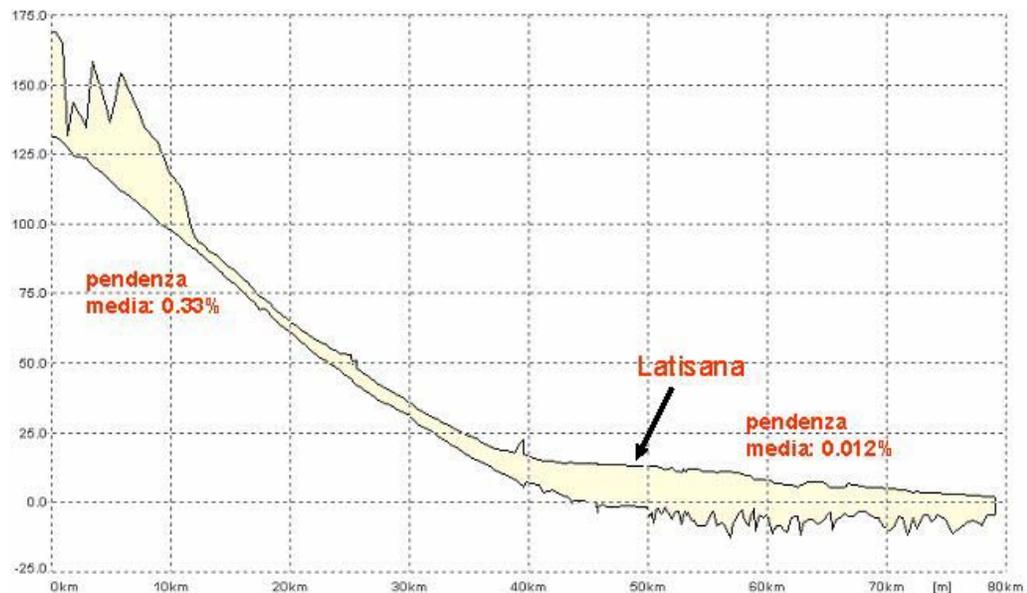


Figura 9: profilo longitudinale del fiume. La linea inferiore corrisponde alla quota fondo alveo, mentre la linea superiore la quota della sponda dell'argine maestro.

a) Per il tratto fra Pinzano a monte della stretta di Latisana (lunghezza complessiva di 56,5 km), il fiume scorre su un materasso ghiaioso, in presenza di salici, campi ed altri tipi di arbusti in golenia. Le golene sono inoltre utilizzate in gran parte per la produzione agricola, con estesi campi di mais e piantagioni di pioppi.

Sul suddetto tratto si sono perciò adottati valori tipici del coefficiente di Manning pari a $0,032 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ e $0,035 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$. Dato che il fiume su quel tratto esibisce caratteristiche tipiche per i torrenti, con una pendenza media pari al 3.3%, l'impatto di un'oscillazione del coefficiente di Manning del 10 % attorno al valore stabilito è da considerarsi minimo. Infatti, data la forte pendenza dell'alveo, l'onda si sposta in moto traslatorio, con effetti di laminazione piuttosto ridotti. L'onda in quel tratto esibisce un comportamento detto di tipo "cinematico".



Figura 10: Il fondo ghiaioso (scabrezza di Manning pari a $0,033 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$) dell'alveo del Tagliamento in vicinanza del ponte della Strada Statale 13, collegante Casarsa della Delizia e Codroipo.

b) Per il tratto di fiume da Latisana alla foce (lunghezza totale di 27.2 km) è stato adottato un valore di scabrezza di Manning di riferimento pari a $0,035 \text{ m}^{-1/3}$. Tale valore è da considerarsi molto cautelativo per fiumi di pianura ed alvei piuttosto lisci e sabbiosi. Per il canale scolmatore Cavrato si è imposto il medesimo valore di scabrezza.

Nel suddetto tratto del fiume, situato interamente in pianura, con pendenze di fondo alveo medie pari a 0.12%, l'incidenza del coefficiente di Manning sulla dinamica dell'onda e sulla laminazione risulta non trascurabile. Questo fatto è valido con maggiore ragione per la sezione critica di Latisana, dove la luce fra il pelo libero massimo durante un evento di piena e la parte inferiore dell'impalcato del ponte ferroviario risulta significativamente ridotta per gli effetti di rigurgito da valle. La scelta di un valore di Manning elevato contribuisce ad amplificare gli effetti della resistenza al moto e perciò dell'innalzamento del pelo libero a monte.

4.4 Ponti

4.4.1 Ponti a monte di Latisana

Sul tratto in esame il Tagliamento è attraversato da una serie di ponti delle principali arterie di viabilità stradale e ferroviaria. Sul tratto Pinzano-Latisana si tratta del ponte di Pinzano,

visibile in Figura 11, e demarcante il limite superiore della zona del presente studio idraulico.

A valle del Ponte di Pinzano si trova il ponte di Dignano della strada provinciale 464. Tale ponte è costituito da una serie di archi in cemento ed è rappresentato in Figura 12.



Figura 11: Il ponte di Pinzano. Il ponte demarca il limite superiore del tratto di fiume modellato matematicamente.

A valle del Ponte di Dignano si riscontrano, in mutua vicinanza, il ponte della strada statale 13, ed il ponte ferroviario della linea Pordenone-Udine, visibile in Figura 13. Più a valle si trovano un alto ponte stradale sulla congiungente (strada provinciale) fra Portogruaro e Udine ed il ponte Autostradale dell'A4 Mestre-Trieste.

Questi cinque ponti sono ubicati nella parte a forte pendenza del Tagliamento (pendenza media del 3.3%), in punti dove il greto del fiume è largo. Il ponte di Pinzano è costituito da un grande arco di cemento, fondato sui versanti rocciosi della stretta di Pinzano. La sua presenza non comporta alcun interferenza al deflusso naturale delle acque, anche in casi di piena estrema.

Le perdite di carico idraulico localizzate, dovute alla presenza di questi manufatti, ha un impatto assolutamente trascurabile sulla dinamica di deflusso. Per tale ragione la loro rappresentazione esplicita è stata omessa dalla schematizzazione matematica del Tagliamento.



Figura 12: Il ponte di Dignano sulla strada provinciale 464 fra Spilimbergo e Dignano



Figura 13: Il ponte della SS 13, fra Casarsa della Delizia e Codroipo.

4.4.2 Ponti presso Latisana

In corrispondenza di Latisana vi sono due ponti di elevata importanza da un punto di vista idraulico. Il primo è il ponte ferroviario della linea Venezia-Trieste, il secondo è il ponte della strada statale 14, congiungente Portogruaro e Latisana.

4.4.2.1 Il ponte ferroviario della Venezia-Trieste

Tale ponte, costituito da una struttura in acciaio, fu ricostruito nel 1947 dopo i bombardamenti della guerra. Esso poggia su due pilastri, fondati in alveo e sui due argini del fiume, all'altezza del centro dell'abitato, come ben visibile in Figura 14.



Figura 14: Il ponte ferroviario FFSS presso Latisana. Esso demarca la sezione critica. Allo stato presente (Settembre 2005) la trave principale del ponte si trova a quota 10,22 m sul medio mare.

L'impalcatura di sostegno della struttura in acciaio si trova ad una quota assoluta di 10,22 metri sul livello di medio mare. Al tempo della costruzione del ponte esso attraversava l'argine al punto più alto (11,16 m). Dopo l'evento di piena del 1966 l'argine del fiume fu rialzato e rinforzato su ambo i lati tramite un muretto in calcestruzzo alto 1 metro circa, senza però sollevare anche il ponte e la massicciata della ferrovia.

Ciò fece sì che allo stato attuale la massicciata si trova incassata nell'argine, creando un'incisione nel muretto di protezione (una sull'argine destro e una sull'argine sinistro) laddove i binari intersecano l'argine. L'incisione della massicciata della ferrovia è ben visibile in Figura 15.



Figura 15: Il ponte ferroviario della linea Venezia-Trieste presso Latisana . Si nota come la struttura risulti incassata nell'argine, causando un'incisione nel muretto di protezione.

Al momento dell'esecuzione del presente studio sembra essere stato approvato un progetto per il sollevamento del ponte di rispetto alla quota attuale, portando il punto più basso della struttura portante ad una quota di circa 12,00 metri sopra il livello di medio mare (quota argine includendo il muretto di protezione). L'intervento consentirebbe la chiusura delle incisioni nel muretto di protezione sulla cima dell'argine e contribuirebbe alla riduzione del rischio di formazione di un profilo di rigurgito a monte dovuto alla presenza della struttura, permettendo un libero deflusso delle acque in condizioni di piena.

I calcoli idraulici effettuati in questo studio tengono conto sia del ponte allo stato attuale, sia del ponte rialzato rispetto alla sua posizione attuale.

4.4.2.2 Il ponte stradale della SS. 14

Questo ponte attraversa il Tagliamento qualche centinaio di metri più a valle del ponte Ferroviario. La struttura è di costruzione recente e posa su quattro pilastri situati in alveo (vedi Figura 16). L'altezza dell'arco del ponte è significativamente più alta rispetto a quella del ponte ferroviario, e non causa intralcio al deflusso delle acque anche in situazioni di piena estrema. La presenza della struttura è stata modellata come un ponte a 4 pile lisce in calcestruzzo, comportando rispettive perdite di carico localizzate.



Figura 16: Il ponte della strada statale 14 nei pressi di Latisana.

4.4.2.3 Ponti a valle di Latisana

Fra Latisana e la foce vi è un solo ponte, situato nei pressi dell'abitato di Bevazzana, in immediata prossimità di Lignano Sabbia d'oro e Bibione. Si tratta di una struttura in calcestruzzo di costruzione recente e di dimensioni tali, da non causare alcuna restrizione al deflusso delle acque. Per questo motivo tale ponte è stato omesso dalla schematizzazione del modello matematico. Inoltre in quel punto il fiume in caso di piena di progetto, con il canale scolmatore Cavrato in pieno funzionamento, transitano non più di $1900 \text{ m}^3/\text{s}$.

5 Simulazione dei deflussi di massima piena

5.1 I casi simulati

Le simulazioni numeriche sono state effettuate, selezionando vari “casi” in base a diversi parametri di scabrezza, le portate massime ammesse sul canale Civrato e le condizioni al contorno a valle (livello medio mare). I risultati numerici sono espressi in termini di portate massime (espresse in m^3/s) e quote del pelo libero massime (espresse in metri sul medio mare) raggiunte in determinate sezioni durante la transizione dell'onda di piena. I vari casi sono definiti come indicato nella Tabella 2 sottostante.

I cinque casi proposti si distinguono per le seguenti caratteristiche:

Per i **casi 1, 2 e 3** è stato assunto un valore di scabrezza di Manning pari a $0,035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ sul tratto a monte, e di $0,035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ sul tratto fra Latisana e la foce. Tale coefficiente di scabrezza è da considerarsi sul limite alto, ed è stato scelto date le presenti condizioni di elevata scabrezza dovute alla presenza di notevole quantità di vegetazione in alveo (specialmente sul lato Veneto in corrispondenza di Latisana) e di scarsa manutenzione delle aree golenali da un punto di vista della sicurezza idraulica.

I tre casi si distinguono essenzialmente per il livello sul medio mare assunto come condizione al contorno a valle e il profilo di rigurgito a monte, che ne risulta di conseguenza. È ovvio che aumentando il tirante sul medio mare da un livello di 1,0 metri verso un livello di 2,0 m, le condizioni a monte peggiorano progressivamente.

Il livello a valle di 2,0 m è da considerarsi estremamente cautelativo, essendo esso più alto del massimo livello registrata a Venezia durante l'inondazione del 1966. Il caso 3 è da considerarsi il più penalizzante tra i 5 casi selezionati. Tale caso è considerato come “*caso di riferimento*”.

Il **caso 4** mantiene come condizione al contorno un livello a valle di 2,0 metri sul medio mare, mentre si assume un coefficiente di Manning pari a $0,032 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ sul tratto del fiume fra Latisana alla Foce, cioè assumendo che la scabrezza sul tratto a valle di Latisana sia inferiore rispetto ai casi 1-3 (riducendo la scabrezza dell'alveo tramite lavori di manutenzione e rimozione della vegetazione arbustiva).

Il **caso 5** infine assume una scabrezza di $0,035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ sul tratto a monte di Latisana, ed una scabrezza pari a $0,035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ sul tratto a valle di Latisana ed un tirante alla foce pari a 2 m sul medio mare. La principale differenza rispetto ai casi 1-4 consiste nel fatto che si assume una calibratura del canale scolmatore, che permette un deflusso eccezionale di $2700 \text{ m}^3/\text{s}$. Ciò risulta in una portata massima residua nel Tagliamento pari a $1700 \text{ m}^3/\text{s}$, assicurando livelli di massima inferiori su tratto a valle dell'incile.

Tabella 2: Casi di simulazioni effettuate

Caso simulazione	livello sul medio mare	Scabrezza (tratto a monte di Latisana)	Scabrezza (tratto a valle di Latisana)	portata massima canale scolmatore Cavrato
caso 1 (come caso 3 con livello del mare a 1,0 m)	1,00 m	0,035 m ^{-1/3} s	0,035 m ^{-1/3} s	2500 m ³ /s
caso 2 (come caso 3 con livello del mare a 1.5 m)	1,50 m	0,035 m ^{-1/3} s	0,035 m ^{-1/3} s	2500 m ³ /s
caso 3 (caso di riferimento)	2,00 m	0,035 m ^{-1/3} s	0,035 m ^{-1/3} s	2500 m ³ /s
caso 4 (come caso 3 + alveo a valle liscio)	2,00 m	0,035 m ^{-1/3} s	0,032 m ^{-1/3} s	2500 m ³ /s
caso 5 (come caso 3 + portata del Cavrato aumentata)	2,00 m	0,035 m ^{-1/3} s	0,035 m ^{-1/3} s	2700 m ³ /s

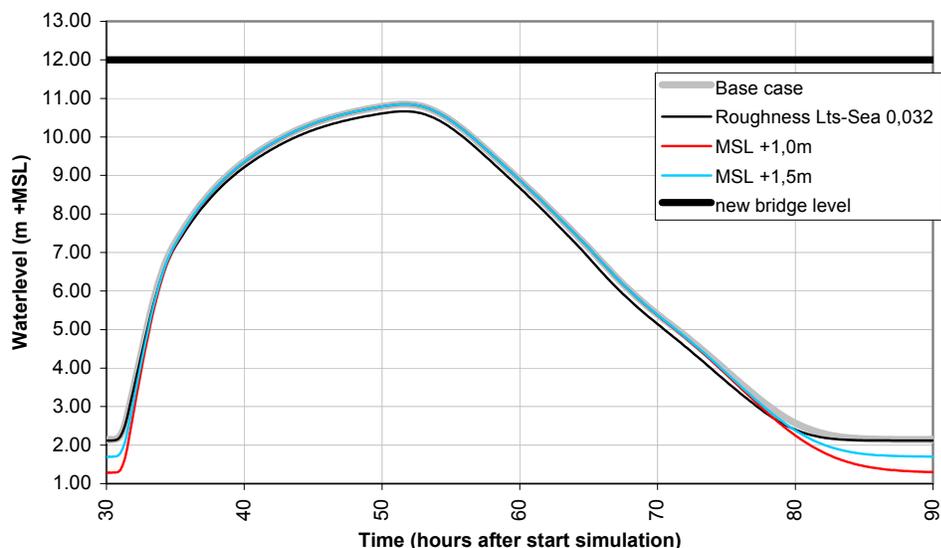
5.2 L'idrogramma di piena

In tutti i cinque casi si è utilizzato come condizione al contorno a monte l'idrogramma di piena (assunto per un tempo di ritorno centenario dal *Piano Stralcio*) registrato a Venzone durante la piena del 1966, successivamente aumentato del 20% e poi risagomato dal prof. Maione ed utilizzato dal *Piano Stralcio* per il dimensionamento delle casse d'espansione. Tale idrogramma esibisce una portata massima di 4600 m³/s ed è riportato in Figura 3.

6 Risultati

I risultati numerici delle simulazione sono riportati nei grafici sottostanti.

Figura 17 mostra i massimi livelli della superficie di pelo libero raggiunti a Latisana (Ponte Ferroviario FS) durante il deflusso dell'evento di massima piena di progetto indicato in Figura 3. I casi rappresentati in Figura sono il caso 1 (quota mare a +1,0 metri sul medio mare), il caso 2 (quota mare a +1.5 metri sul medio mare) ed il caso 3 (quota mare a +2,0 metri sul medio mare), considerato caso "di riferimento". Per questi tre casi il coefficiente di scabrezza di Manning è stato impostato pari a $0,035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$, cioè ad un valore di alta scabrezza e perciò assai cautelativo.



F

Figura 17: Le portate massime al ponte di Latisana per i casi di studio 1-4. La linea solida orizzontale indica la quota sul medio mare del ponte ferroviario alzato di 2 metri rispetto allo stato attuale.

Dalla figura si nota che la condizione al contorno imposta a valle (cioè la quota sul medio mare) non ha pressoché alcun impatto sulla quota massima raggiunta a Latisana durante il deflusso dell'evento di piena.

In Figura 17 è riportato inoltre l'andamento del livello del pelo libero per il caso 4, in cui la scabrezza del tratto Latisana-foce è stato posto pari a $0,032 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$. Una tale scabrezza richiede opere di calibratura idraulica e manutenzione dell'alveo (rimozione di vegetazione in golena provocante alta resistenza al moto) da eseguire sull'alveo allo stato attuale. Si nota inoltre che riducendo la scabrezza, il pelo libero massimo a Latisana per il caso 4 si riduce leggermente rispetto ai casi 1-3 precedenti, a 10,65 m..

In Figura 18, riportante il solo picco di portata a Latisana, mostra che in tutti i quattro casi di studio si raggiungono livelli del pelo libero massime (10,85m) superiori all'attuale quota dell'impalcato del ponte ferroviario (pari a 10,22 m), il che sottolinea l'importanza di un sollevamento del ponte ai fini di garantire un deflusso libero delle acque. In tutti i tre casi il livello massimo rimane sotto la quota della sommità degli argini a Latisana (12,00 m), assicurando un franco di 1,15 m circa.

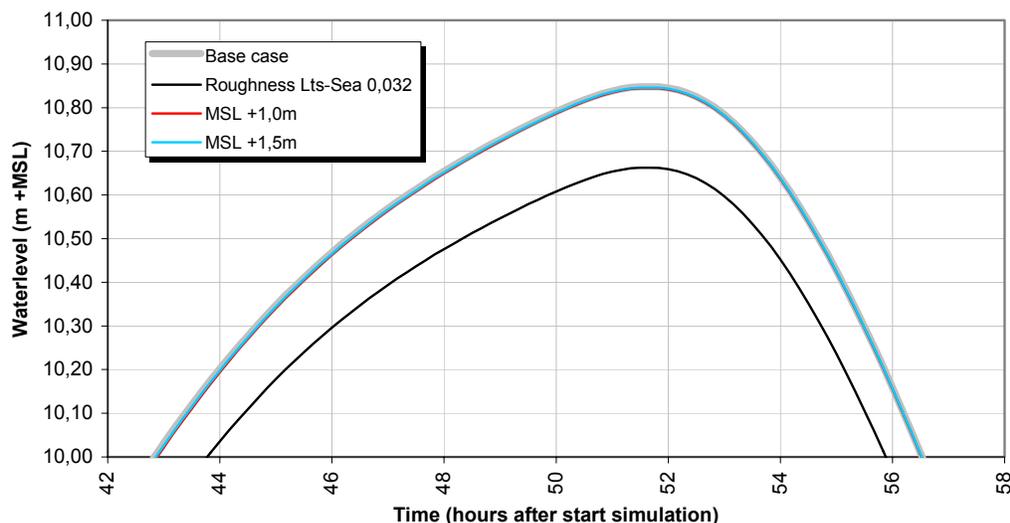


Figura 18: Il picco di portate massime al ponte di Latisana per i casi di studio 1-4.

Dai calcoli eseguiti si può concludere che, in assenza delle casse d'espansione e a condizione di *i*) un sollevamento del ponte ferroviario e di *ii*) una buona manutenzione dell'alveo mirato alla riduzione della scabrezza, la sicurezza idraulica a Latisana è assicurata per l'evento di massima piena con tempo di ritorno di 100 anni previsto dal *Piano Stralcio*.

Figura 19 riporta la ripartizione delle portate in corrispondenza dell'incile del canale Cavrato. La deviazione è stata ottenuta assumendo una lunghezza della soglia scolmatrice pari a 500 metri e approssimando l'altezza di soglia dell'incile in modo tale da assicurare un deflusso per il canale scolmatore Cavrato pari a 2500 m³/s. Si osserva che l'incile del Cavrato deve in pratica essere ottimizzato, trovando una combinazione ottimale fra lunghezza ed altezza dell'incile, onde assicurare un'entrata in funzione del canale scolmatore durante il passaggio del picco di piena. Il presente studio non è mirato all'ottimizzazione di tale soglia, la quale è soggetto di uno studio da eseguirsi in sede di progetto.

La ripartizione delle portate è stata eseguita per i vari casi studio, ottenendo grafici del tutto simili. Figura 19 perciò riporta i risultati per il caso di riferimento (caso 3). Si nota che durante l'evento di piena giungono 4400 m³/s all'incile, il che permette di concludere che l'effetto di laminazione fra Pinzano e l'incile Latisana/incile del Cavrato è di soli 200 m³/s su un tratto lungo 56 km. Una laminazione così contenuta è dovuta essenzialmente alla forte pendenza dell'alveo sul tratto Pinzano-Latisana, il quale determina il carattere "cinematico" dell'onda. In effetti l'onda fra Pinzano e Latisana subisce un moto traslatorio, con effetti di diffusione dell'onda assai contenuti.

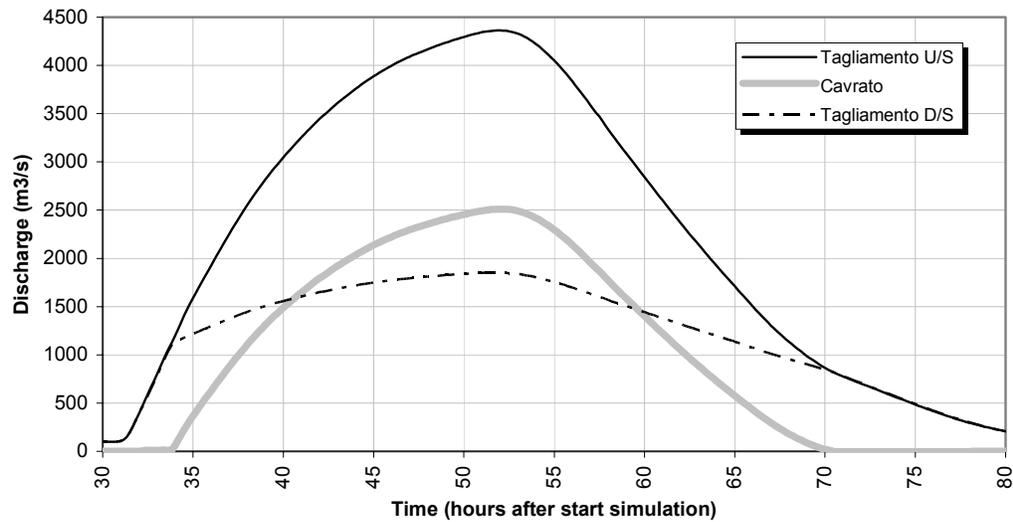


Figure 19: Ripartizione delle portate all'incile del canale scolmatore Cavrato situato a 18,675 km dalla foce.

Le portate massime rimanente in alveo del Tagliamento a valle dell'incile è di 1900 m³/s. Tale portata viene convogliata per il Tagliamento, fortemente canalizzato sull'ultimo tratto alla foce, ove la sezione del fiume è completamente arginata. Gli argini maestro esibiscono una livello massima quota non-uniforme lungo il percorso, con notevoli depressioni in alcuni punti, che sono da considerarsi assai *critici* durante un evento di piena.

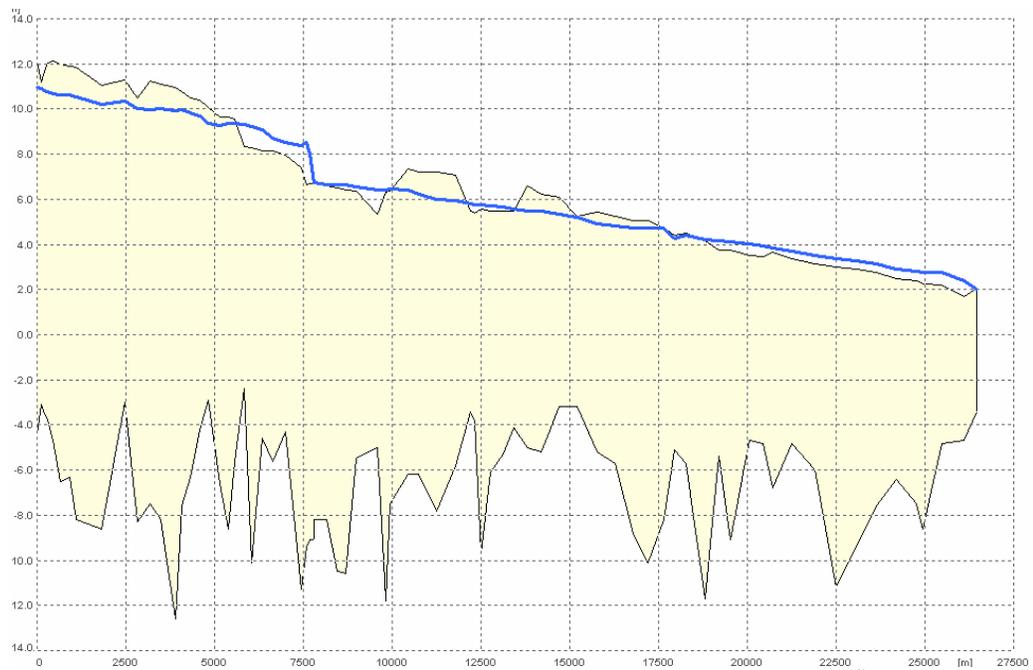


Figure 20: Massimi della superficie libera per scabrezza Manning pari a 0,035 m^{-1/3}s ed un livello del mare a valle a +2,0 sul medio mare (caso 3).

Tali punti richiedono degli interventi di innalzamento dell'argine maestro, mirati a renderne uniforme la quota massima. Figura 20 riporta i massimi livelli durante un evento di deflusso, assumendo una scabrezza di Manning pari a $0,035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ ed una condizione al contorno a valle pari a +2,0 metri sul medio mare (caso 3 di riferimento). È evidente che senza manutenzione dell'alveo (i.e. riduzione della scabrezza idraulica) e senza l'innalzamento dei punti bassi dell'argine lungo il percorso, la portata massima di $1900 \text{ m}^3/\text{s}$ non può transitarvi senza causare delle tracimazioni sul basso Tagliamento a valle dell'incile.

In Figura 21 è riportato l'andamento del livello massimo del pelo libero a valle di Latisana assumendo una scabrezza di Manning pari a $0,032 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ ed una condizione al contorno a valle pari a +2,0 metri sul medio mare. Si nota un notevole miglioramento dell'andamento dei massimi della superficie libera dovuto alla riduzione della scabrezza idraulica. Anche in questo caso un innalzamento della sommità dell'argine nei punti depressi risulta inevitabile.

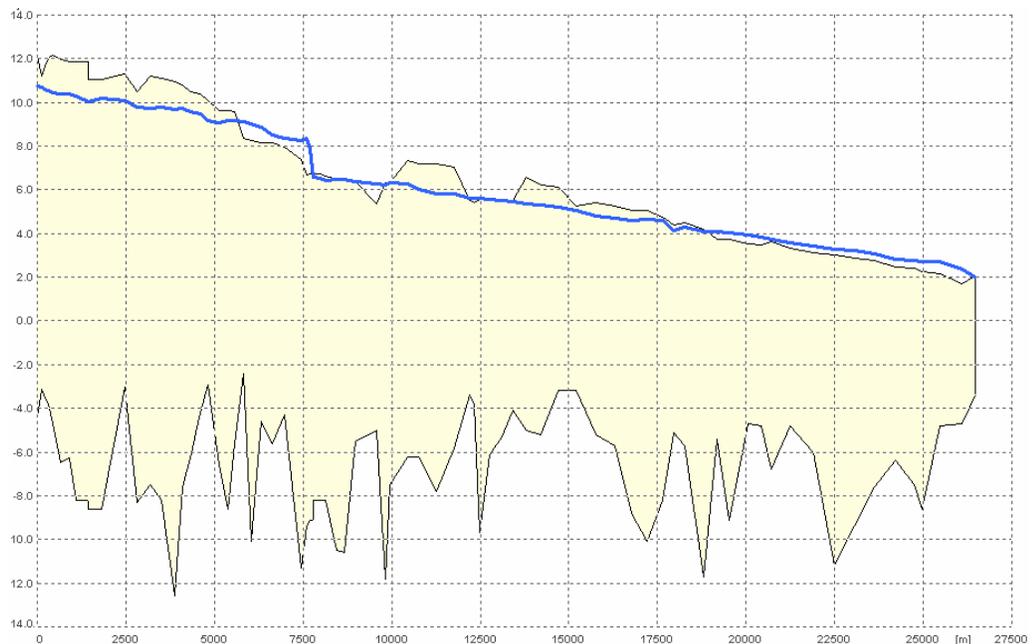


Figure 21: Massimi della superficie libera per scabrezza Manning pari a $0,032 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ ed un livello del mare a valle a +2,0 sul medio mare (caso 4).

Figura 22 riporta l'andamento del livello massimo del pelo libero a valle di Latisana, assumendo valori della scabrezza di Manning pari a $0,035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ ed una condizione al contorno a valle pari a +1,0 metri sul medio mare. Si nota che anche in questo caso, sebbene in modo sostanzialmente ridotto, il livello della superficie libera eccede la quota dell'argine in assenza di interventi localizzati di innalzamento della quota massima.

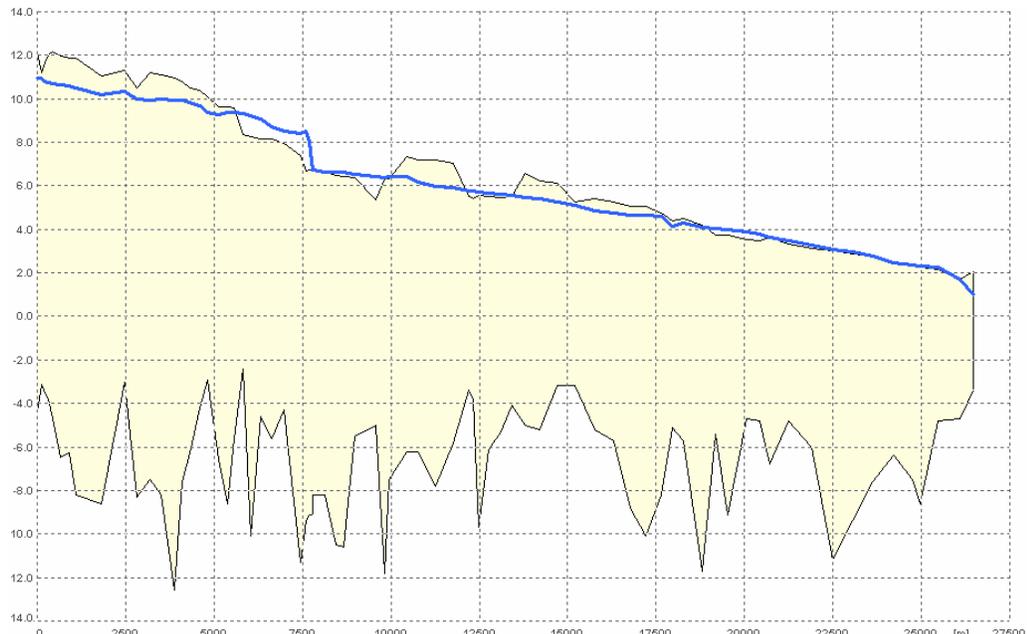


Figure 22: Massimi della superficie libera per scabrezza Manning pari a $0,035 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ed un livello del mare a valle pari a $+1,0$ sul medio mare (caso 1).

7 La transizione dell'onda di piena in presenza delle casse d'espansione

Dato che l'onda di piena di progetto in assenza delle casse può transitare per Latisana dopo che il ponte ferroviario della Venezia-Trieste sia stato sollevato e l'alveo a valle opportunamente calibrato, non risulta necessario eseguire ulteriori verifiche di deflusso per portate inferiori tenenti conto degli effetti di laminazione delle casse.

Perciò è stato concordato con il cliente di non eseguire esplicitamente simulazioni di deflusso con le casse d'espansione in azione.

Si ritiene comunque importante osservare che in caso della realizzazione della sola cassa numero 1 (volume di invaso pari a 12 milioni di m^3), la portata residua nell'alveo del Tagliamento rimane di $4400 \text{ m}^3/\text{s}$ circa (vedi progetto preliminare). Considerando un effetto di laminazione naturale fra Pinzano e Latisana pari a $200 \text{ m}^3/\text{s}$ (appurato dalle simulazioni precedenti), la portata massima raggiungente Latisana in tal caso è $4200 \text{ m}^3/\text{s}$. Il passaggio di tale portata richiede comunque il sollevamento del ponte ferroviario.

I $4200 \text{ m}^3/\text{s}$ raggiungono infine l'incile del Cavrato, dove, in caso di corretto funzionamento, ne vengono deviati $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ per il canale scolmatore. La portata residua in alveo pari a $1700 \text{ m}^3/\text{s}$ non è però in grado di transitare per la parte bassa del Tagliamento allo stato attuale senza causare delle tracimazioni dell'argine e conseguenti esondazioni in vari punti. Ciò è stato appurato con la simulazione del caso 5 in Tabella 2, che prevede un deflusso di $1700 \text{ m}^3/\text{s}$ per il Tagliamento a valle dell'incile. L'involuppo dei massimi livelli del pelo libero è riportato in Figura 23.

Questo fatto evidenzia che, indipendentemente dalla realizzazione della sola cassa numero 1, la calibratura del basso Tagliamento risulta indispensabile. Senza di essa la sicurezza idraulica non è assicurata.

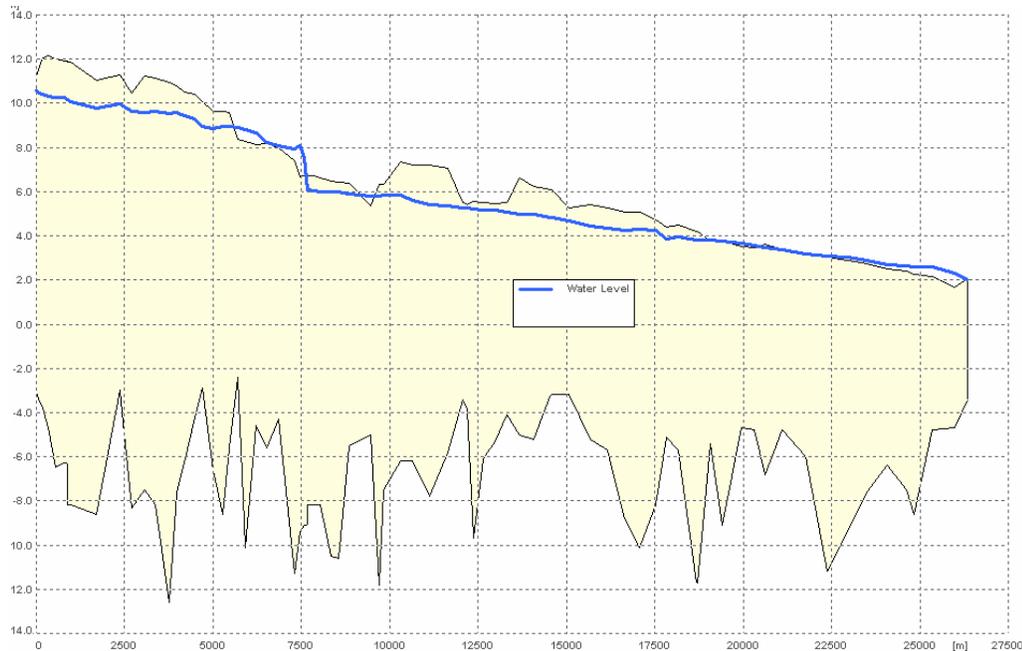


Figure 23: Massimi della superficie libera per scabrezza Manning pari a $0,035 \text{ m}^{-1/3}$ s, diversione di $2700 \text{ m}^3/\text{s}$ per il canale scolmatore Cavrato ed un livello del mare pari a $+2,0$ sul medio mare (caso 5).

8 Conclusioni e raccomandazioni

8.1 Premesse

Prima di presentare le conclusioni del presente studio, si ritiene necessario evidenziare una serie di premesse importanti:

- Il presente studio idraulico riporta una simulazione numerica uni-dimensionale della propagazione dell'onda di progetto a Pinzano stabilita dal Prof. Maione ed utilizzata per il dimensionamento delle casse d'espansione, come riportato sul *Piano Stralcio*.
- Le simulazioni numeriche effettuate sul medio e basso Tagliamento sono state effettuate in base alle sezioni rilevate dalla ditta Barigazzi nel 1982. Si assume che la forma dell'alveo allo stato attuale non sia cambiato in modo sostanziale rispetto a quel rilevamento.
- Il presente studio è stato eseguito senza una taratura approfondita del modello data l'assenza di scale di deflusso e misure di portate per particolari eventi di riferimento, dati essenziali per una taratura.

- L'incertezza sulla simulazione idraulica del fiume dovuta alla mancanza di misure è stata compensata effettuando un'analisi di sensitività del modello rispetto alla scabrezza idraulica e la condizione al contorno a valle basata su delle scelte dei parametri e del livello del mare *molto* cautelativi.
- Il presente studio *non prevede alcuna* analisi di stabilità degli argini. I risultati qui riportati *non sono applicabili* per il caso in cui avvenga un collasso degli argini in qualsiasi punto lungo il tratto di fiume in esame.
- Il presente studio non tiene conto della presenza di acque sotterranee nel materasso alluvionale, specialmente dato il fatto che l'interazione fra il fiume ed i moti di falda avviene su scale temporali assai più lunghe rispetto a quelle al deflusso di un'onda di piena.
- Il presente studio non costituisce in alcun modo una valutazione d'impatto ambientale, né del progetto delle casse né delle opzioni qui presentate. Una confronto completo delle varie soluzioni idrauliche richiede un'analisi addizionale di tipo socio-economico ed ecologico. Tali analisi non sono state effettuate in sede del presente studio.



Figure 24: situazione dell'alveo o presso Latisana, vista da satellite (Landsat TM).

8.2 Conclusioni

Date le premesse di cui sopra, si possono riassumere gli esiti dello studio nei seguenti punti:

1. In assenza delle casse d'espansione a Pinzano/Spilimbergo ed in presenza di un livello del mare alla foce pari a 2 metri sopra il medio mare, la piena massima di progetto stabilita dal *Piano Stralcio* (picco di $4600 \text{ m}^3/\text{s}$), transita per la sezione di Latisana (ponte Ferrovie dello Stato) raggiungendo una quota del pelo libero massima di 10.85m sul medio mare a patto che siano verificate le condizioni idrauliche a valle di Latisana specificate sotto.

2. La portata massima a Latisana risulta pari a $4400 \text{ m}^3/\text{s}$, implicando una laminazione di $200 \text{ m}^3/\text{s}$ circa sul Tratto Pinzano-Latisana.
3. L'abbassamento del pelo libero a Latisana al livello 10,85m, cioè sotto la cima dell'argine, in assenza delle casse d'espansione è frutto del deflusso per il canale scolmatore Cavrato e dell'ottimizzazione delle condizioni di deflusso in Tagliamento a valle di Latisana (riduzione della scabrezza idraulica).
4. Si può concludere che esistono varie alternative alla costruzione delle casse d'espansione nel Greto del Tagliamento al fine di assicurare la sicurezza idraulica di Latisana per l'onda di progetto, a patto che siano verificate le seguenti condizioni sul tratto del fiume compreso fra Latisana ed il mare (circa km 27,500 e km 0,00):
 - L'alveo del fiume da Latisana alla foce e nel canale scolmatore Cavrato deve essere calibrato in modo tale da portare la scabrezza di Manning ad un valore effettivo pari o inferiore a $0,035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ (preferibilmente a $0,032 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$). Dalla Figura 24 è evidente che l'alveo del fiume in corrispondenza di Latisana è stato pulito sulla sponda in sinistra orografica (lato Friuli-Venezia-Giulia), mentre la golena in destra orografica (lato Veneto) è coperta da un fitto manto vegetale di salici ed altri arbusti. La vegetazione contribuisce ad un aumento della scabrezza e inevitabilmente all'innalzamento della superficie di pelo libero. Si dubita che allo stato attuale si raggiungano dei valori di scabrezza effettiva pari o inferiori a $0,035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ sul basso Tagliamento.
 - Il tratto del Tagliamento a valle dell'incile del Cavrato richiede ulteriori lavori di innalzamento localizzato dell'argine maestro per permettere il passaggio di una portata massima residua pari a $1900 \text{ m}^3/\text{s}$, stabilita dal presente studio.
 - Il ponte ferroviario della linea Venezia-Trieste deve essere sollevato, portando la quota della parte più bassa dell'impalcato della struttura alla quota della sommità dell'argine (12,00 m.s.m.m); allo stato attuale la quota di massima piena è superiore alla quota inferiore dell'impalcato della struttura. Tale intervento permette peraltro di chiudere le incisioni nel muretto di protezione (vedi Figura 15), aumentando il franco di sicurezza. Va inoltre considerato che la struttura del ponte allo stato attuale costituisce uno sbarramento al transito dei tronchi e delle ramaglie trasportate dalle acque, comportando una progressiva ostruzione delle luci di passaggio e conseguente ricollo delle acque.
 - Il canale Cavrato deve essere calibrato in modo tale da consentire un passaggio di $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ d'acqua, come previsto dal *Piano Stralcio*. Tale deviazione contribuisce ad abbassare il profilo di rigurgito a monte, riducendo la quota della superficie di pelo libero in corrispondenza di Latisana. Tale calibratura richiede la messa in sesto del canale, portandolo ad una sezione di larghezza media pari a 500 metri, e riducendo la scabrezza idraulica ad un valore pari o inferiore a $0,035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$. È inoltre suggerita una calibratura dell'incile, per esempio tramite una soglia sfiorante, che consenta di attivare il canale scolmatore al raggiungimento di una portata-soglia in alveo del Tagliamento pari a $1500 \text{ m}^3/\text{s}$.

5. La sicurezza idraulica a Latisana può essere incrementata efficacemente con interventi mirati sul basso Tagliamento, in termini di calibratura idraulica dell'alveo del Tagliamento e del canale scolmatore Cavrato e tramite una attenta manutenzione delle golene e rimozione di vegetazione in alveo sul tratto a valle di Latisana.
6. Senza un buon funzionamento del canale Cavrato la piena di progetto causerebbe inevitabilmente delle tracimazioni a valle dell'incile, sia in presenza delle casse d'espansione, che in loro assenza. Una messa in sesto di tale tratto tramite un opportuno rafforzamento degli argini e calibratura idraulica è ritenuto essenziale onde prevenire inondazioni sul basso Tagliamento (zona di Bibione, Lignano Sabbia d'Oro).
7. In ogni caso, e indipendentemente dalla messa in sicurezza di Latisana, il tratto del Tagliamento a valle dell'incile del Cavrato richiede degli interventi di calibratura idraulica mirati a permettere il passaggio di una portata massima di $1900 \text{ m}^3/\text{s}$ prevista dal presente studio. Dalla modellazione risulta che allo stato attuale ciò è impossibile, dato che le sommità arginali risultano inferiori in alcuni punti rispetto alle quote necessarie alla sicurezza. La scabrezza idraulica allo stato attuale supera con alta probabilità il valore raccomandato di $0,035 \text{ m}^{-1/3}$ per la presenza di fitta vegetazione nelle zone golenali.
8. Come alternativa al punto precedente (aumentare la portata massima transitabile in Tagliamento a valle dell'incile a $1900 \text{ m}^3/\text{s}$) è possibile incrementare la portata massima deviata per il canale scolmatore Cavrato, portandola a $2700 \text{ m}^3/\text{s}$. Tale intervento ridurrebbe la portata massima residua nel Tagliamento, a valle dell'incile, ad un massimo di $1700 \text{ m}^3/\text{s}$.
9. Il funzionamento di progetto sia delle casse d'espansione che della presente soluzione basata esclusivamente sulla calibratura del canale scolmatore e del tratto di fiume a valle di Latisana richiede un'adeguata e regolare gestione del sistema (manutenzione dell'imbocco delle varie opere, delle soglie scolmatrici e dell'incile del Cavrato, pulizia dell'alveo, gestione della scabrezza idraulica ecc.). In caso di mancato adempimento dei lavori di manutenzione e di un'adeguata gestione del sistema non può esserne garantito il corretto funzionamento.
10. Il modello matematico è stato messo a disposizione del Committente. Le simulazioni sono verificabili e ripetibili con qualsiasi strumento di calcolo paragonabile al modello utilizzato (Sobek 1-D), utilizzando gli stessi parametri idrodinamici e le medesime sezioni.
11. La simulazione effettuata in sede del presente progetto è la più completa possibile con riferimento a correnti a pelo libero uni-dimensionali. Data l'alta densità di dati geometrici a disposizione, una simulazione del sistema effettuata tramite la soluzione delle equazioni di De Saint Venant è considerata del tutto sufficiente per l'investigazione richiesta dal committente.

9 Bibliografia

Arscott, D. B., K. Tockner & J. V. Ward (2000), Aquatic habitat diversity along the corridor of an Alpine floodplain river (Fiume Tagliamento, Italy). *Archiv für Hydrobiologie* 149: 679-704.

Autorità di bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione (1997), Piano di bacino del fiume Tagliamento. Piano stralcio per la sicurezza idraulica del Medio e basso corso”.

Chow, V.T. (1959). *Open Channel Hydraulics*, McGrawHill, New York.

De Saint Venant, B. (1871). Théorie du Mouvement NonPermanent des Eaux avec Application aux Crues des Rivières et à l'Introduction des Marées dans leur Lit, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, **73**, pp. 148154, 237240.

Gurnell, A.M., G.E. Petts, D.M. Hannah, B.P.G. Smith, P.J. Edwards, J. Kollmann, J.V. Ward and K. Tockner. (2000), Wood storage within the active zone of a large European gravel-bed river. *Geomorphology* 34: 55-72.

Henderson, F.M. (1966). *Open Channel Flow*, McMillan Company, New York.

Monzoni, E. Analisi Comparativa di modelli di propagazione di piena, Tesi di Laurea, Università degli studi di Bologna, 2004.

Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Direzione Ccedntrale Ambiente e Lavori Pubblici, servizio idraulica. Progettazione preliminare delle opere di laminazione delle piene nel medio corso del fiume Tagliamento.

Stelling, G.S and A. Verwey, Numerical Flood Simulation , *Encyclopedia of Hydrological Sciences* , John Wiley & Sons Ltd., (in press).

Stelling, G.S. and Duinmeijer, S.P.A. (2003). A staggered conservative scheme for every Froude number in rapidly varied shallow water flows. *Int. J. for Numer. Meth. Fluids*, 43, 13291354.

WL|Delft Hydraulics, SOBEK user Manual.