

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

<b>1</b>	<b>Introduzione .....</b>	<b>1—1</b>
<b>2</b>	<b>Nozioni geografiche sul Tagliamento.....</b>	<b>2—1</b>
	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
<b>3</b>	<b>Simulazione delle condizioni idrauliche.....</b>	<b>3—1</b>
	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
<b>4</b>	<b>Schematizzazione del fiume .....</b>	<b>4—1</b>
	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
<b>5</b>	<b>Simulazione dei deflussi di massima piena .....</b>	<b>5—1</b>

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

## 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 m<sup>3</sup>/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<sup>3</sup> 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<sup>3</sup>/s a 4000 m<sup>3</sup>/s circa.

La portata residua in alveo di 4000 m<sup>3</sup>/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<sup>3</sup>) la portata residua in alveo a valle della cassa prevista dal progetto preliminare è di 4400 m<sup>3</sup>/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 invaso 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<sup>3</sup>/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<sup>3</sup>/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<sup>3</sup>/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 gola 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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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 km<sup>2</sup>. 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 km<sup>2</sup> 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 m<sup>3</sup>/s a Pinzano e di 70 m<sup>3</sup>/s alla foce, ma la sua portata massima nel periodo di piena può essere considerevolmente maggiore. Il massimo storico è stato registrato a 4000 m<sup>3</sup>/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 descriventi 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 m<sup>3</sup>/s (Figura 3).

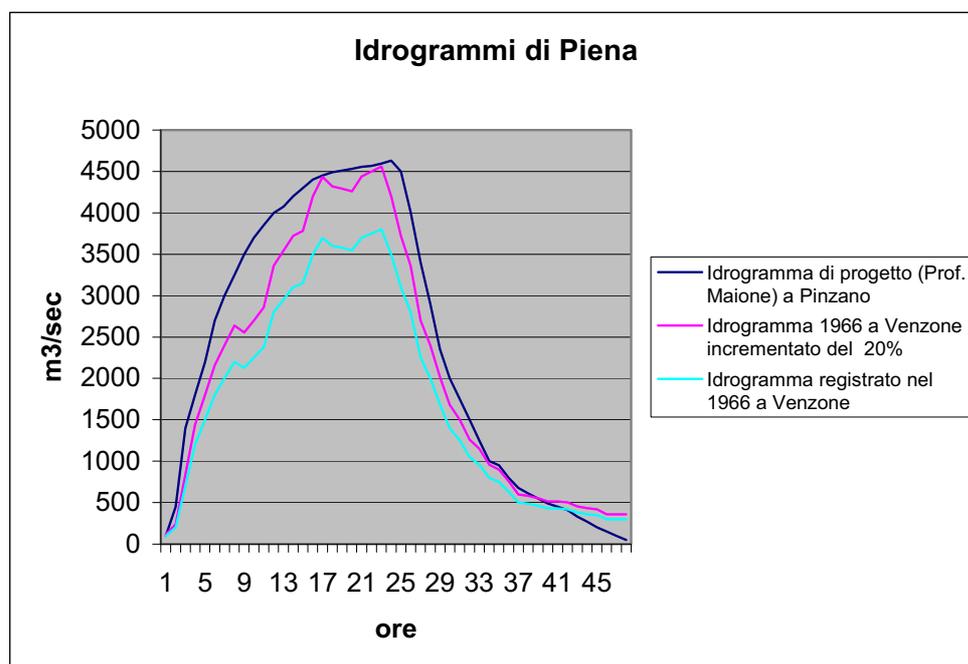


Figura 3: Idrogramma di progetto, usato come condizione al contorno a monte

### 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 state posizionate 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.

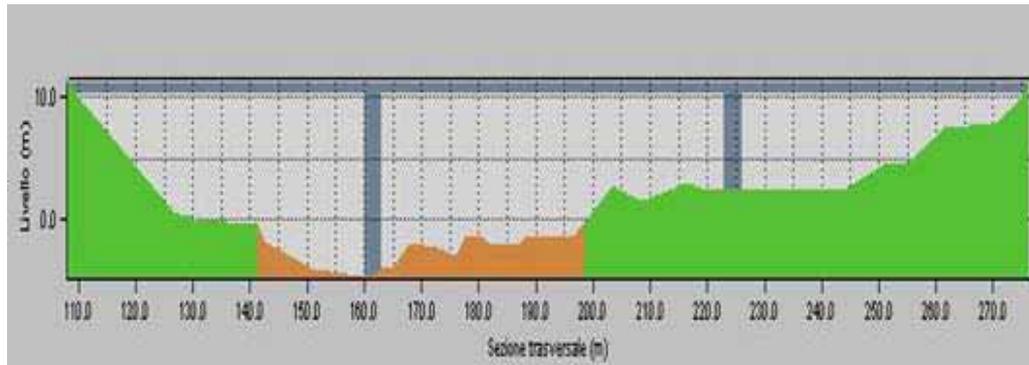


Figura 5: La sezione del Tagliamento in corrispondenza del ponte FS della linea Venezia-Trieste presso Latisana.

## 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.

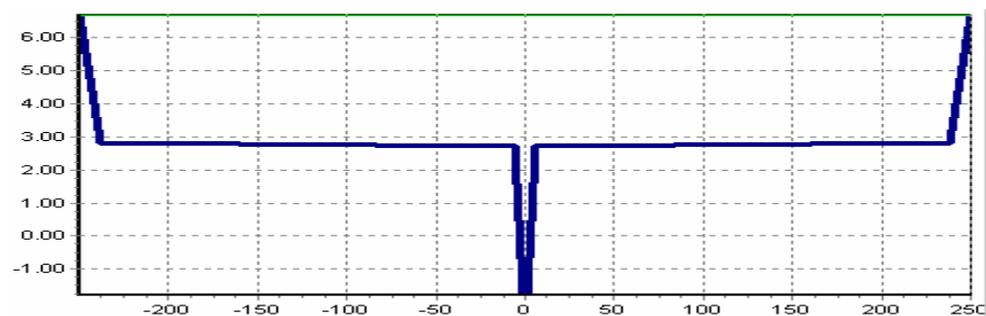


Figura 7: Una sezione-tipo assunta per il canale scolmatore Cavrato

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 scolmo 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 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.

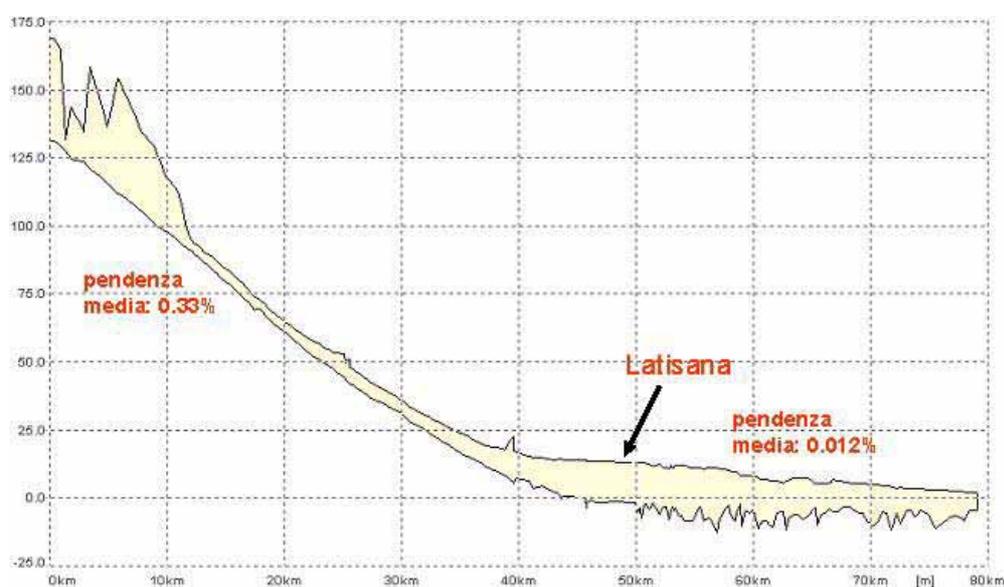


Figura 9: profilo longitudinale del fiume. La line inferiore corrisponde alla quota fondo alveo, mentre la linea superiore la quota della sponda dell'argine maestro.

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 golena. 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.

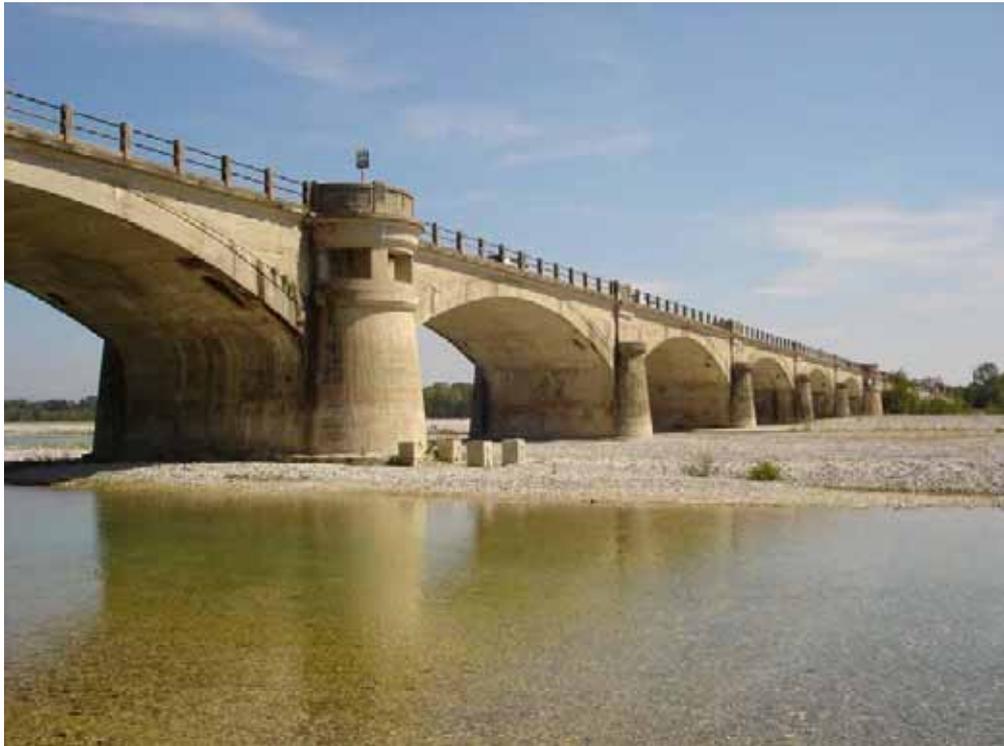


Figura 12: Il ponte di Dignano sulla strada provinciale 464 fra Spilimbergo e Dignano



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 omissso 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 Cavrato e le condizioni al contorno a valle (livello medio mare). I risultati numerici sono espressi in termini di portate massime (espresse in  $\text{m}^3/\text{s}$ ) 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 <sup>-1/3</sup> s	0,035 m <sup>-1/3</sup> s	2500 m <sup>3</sup> /s
caso 2 (come caso 3 con livello del mare a 1.5 m)	1,50 m	0,035 m <sup>-1/3</sup> s	0,035 m <sup>-1/3</sup> s	2500 m <sup>3</sup> /s
caso 3 (caso di riferimento)	2,00 m	0,035 m <sup>-1/3</sup> s	0,035 m <sup>-1/3</sup> s	2500 m <sup>3</sup> /s
caso 4 (come caso 3 + alveo a valle liscio)	2,00 m	0,035 m <sup>-1/3</sup> s	0,032 m <sup>-1/3</sup> s	2500 m <sup>3</sup> /s
caso 5 (come caso 3 + portata del Cavrato aumentata)	2,00 m	0,035 m <sup>-1/3</sup> s	0,035 m <sup>-1/3</sup> s	2700 m <sup>3</sup> /s

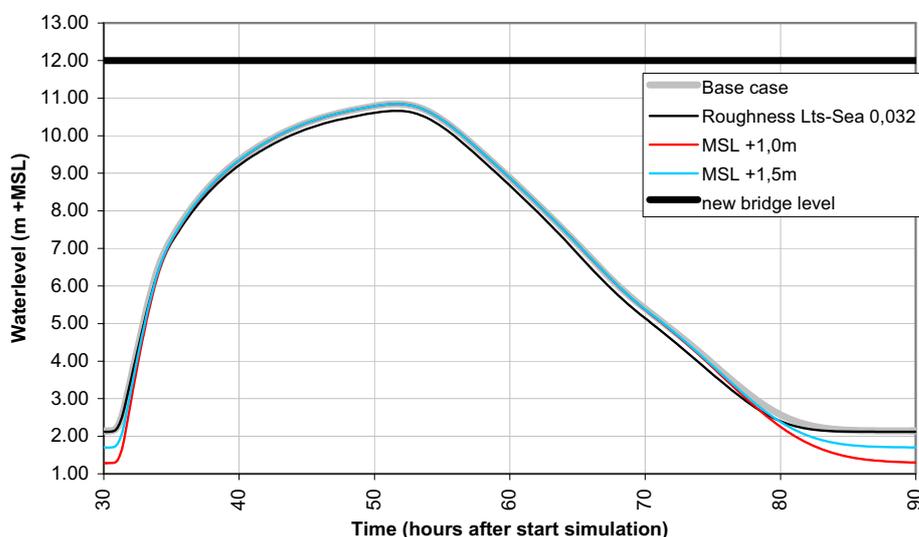
## 5.2 L'idrogramma di piena

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 m<sup>3</sup>/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  $0,035 \text{ m}^{-1/3}$ 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  $0,032 \text{ m}^{-1/3}$ s. Una tale scabrezza richiede opere di calibratura idraulica e manutenzione dell'alveo (rimozione di vegetazione in golenia 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.

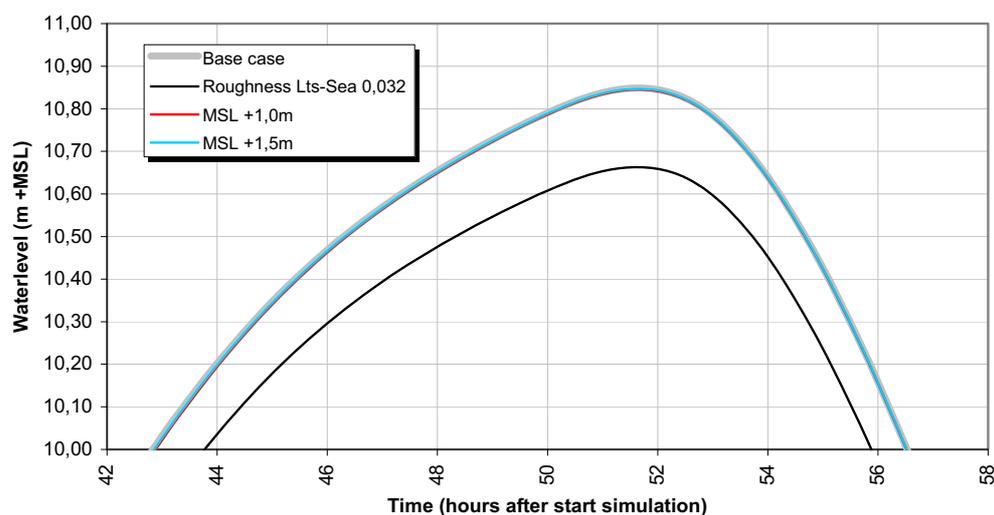


Figura 18: Il picco di portate massime al ponte di Latisana per i casi di studio 1-4.

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 mirata 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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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.

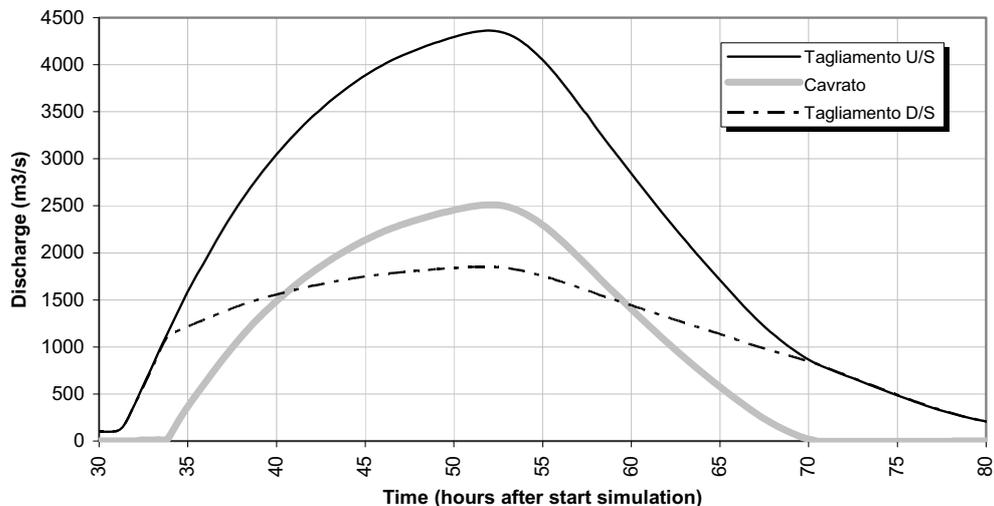


Figure 19: Ripartizione delle portate all'incile del canale scolmatore Cavrato situato a 18,675 km dalla foce.

Le portata massima rimanente in alveo del Tagliamento a valle dell'incile è di 1900 m<sup>3</sup>/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.

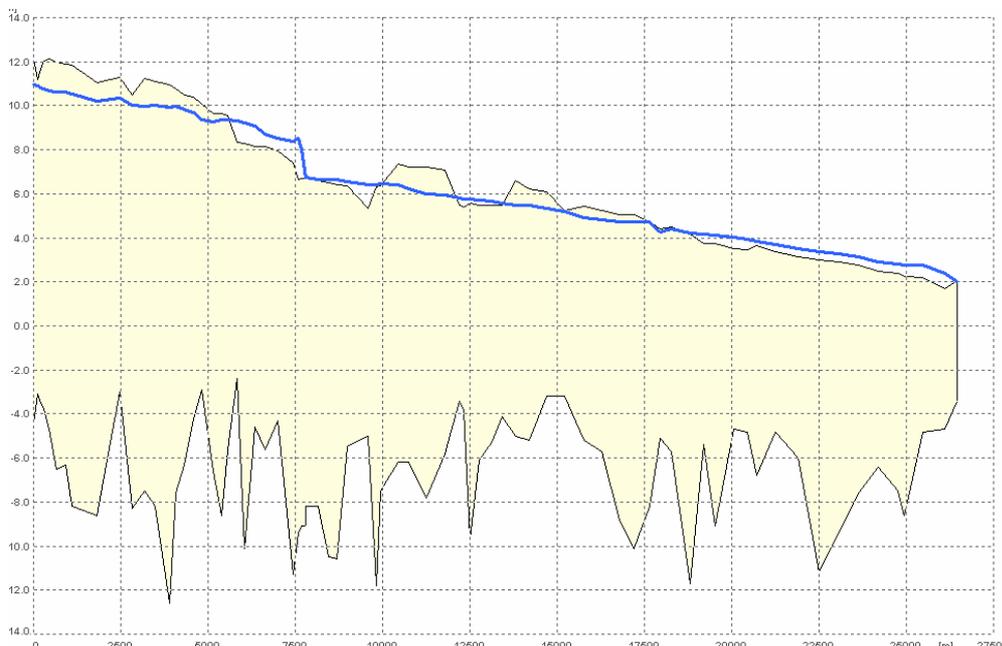


Figure 20: Massimi della superficie libera per scabrezza Manning pari a 0,035 m<sup>-1/3</sup>s ed un livello del mare a valle a +2,0 sul medio mare (caso 3).

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  $0,035 \text{ m}^{-1/3}$  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  $0,032 \text{ m}^{-1/3}$  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  $0,032 \text{ m}^{-1/3}$  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  $0,035 \text{ m}^{-1/3}$  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.

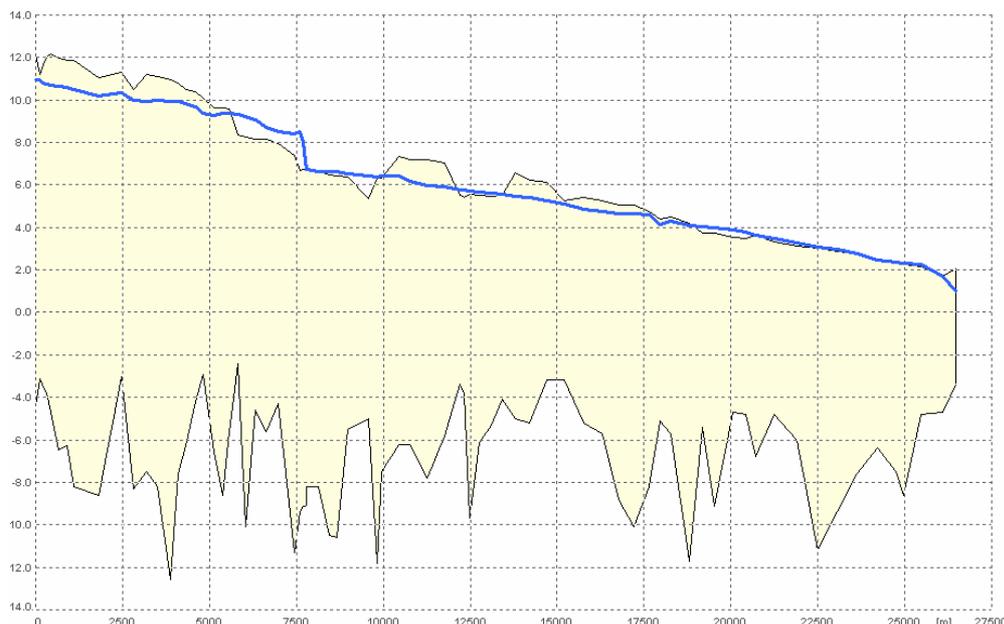


Figure 22: Massimi della superficie libera per scabrezza Manning pari a  $0,035 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$  ed un livello del mare a valle pari a  $+1,0$  sul medio mare (caso 1).

## 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  $\text{m}^3$ ), 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  $0,035 \text{ m}^{-1/3}$ , 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 m<sup>3</sup>/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.); 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'imbuco 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

Arcscott, 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.

# **PROPOSTA "ALTRA" PER IL TAGLIAMENTO**

## **PENSANT PAL TILIMENT**

*Pensando per il Tagliamento*

*Ing. Gianni Sergio Pascoli*

***Udine, luglio 2010***

*(rielaborazione di una idea già espressa nel 2002)*

*STAMPA INTEGRATA OTTOBRE 2010*

## SGARDUF pal TILIMENT

*Lo scompiglio per il Tagliamento*

Premessa, ovvero le varie posizioni e/o proposte percepite dall'uomo della strada:

- sbarramento alla stretta di Pinzano-Ragogna (*riedizione parziale del lago morenico*);
- casse di espansione a valle della stretta Pinzano-Ragogna in numero variabile da 1 a 3 a seconda del prevalere delle varie opinioni tecnico-politico-popolari (*riproposta di uno o più bacini artificiali di contenimento; in sostanza si sposta a valle una sorta di riedizione parziale del lago morenico fissando un ipotetico "dev'essere" per il volume di acqua da contenere*);
- rinforzo ed innalzamento degli argini a Latisana, sollevamento a quota maggiore del ponte ferroviario esistente (*è la naturale risposta all'esigenza di agevolare il deflusso a mare della portata dei fiume attraverso l'estuario esistente*);
- ricalibratura del canale Cavrato per ricostituire condizioni minime di delta per lo sbocco a mare del Tagliamento (*si svilupperebbe nell'area del Friuli storico che fu assegnata alla provincia di Venezia nel 1838 per motivi di equilibrio politico, senza alcuna considerazione per la continuità fisico-ambientale del territorio. L'attuale potere politico subordina la possibilità di eseguire tale ricalibratura a preliminari interventi di regimazione e/o opere da eseguirsi a monte nell'asta del fiume*);
- è convinzione di autorevoli esperti che, con le opere di sopraelevazione degli argini ed innalzamento del ponte ferroviario a Latisana, opere già fatte, un'onda di piena eccezionale come quella verificatasi nel 1966 transirebbe senza creare danni;
- **proposta ALTRA vuole essere aggiuntiva e cautelativa del parere di sufficienza delle opere già eseguite. Tende a recuperare parte della capacità di espansione, drenaggio e deflusso a mare dell'antico, originario delta ghiaioso del Tagliamento intervenendo nel tratto Pinzano-Ragogna > Varmo-risultive. Non quindi una soluzione da "bacchetta magica", ma una proposta sinergica ed economicamente sostenibile che, sommata alla ricalibratura del canale Cavrato, costituisce una ragionevole e realistica integrazione delle opere già realizzate all'altezza di Latisana.**

## L'incanto del Tagliamento

Il grande fiume del Friuli, nel suo lungo percorso dai monti al mare, attraversa zone dalle caratteristiche fisico-geografiche fra di loro molto differenti e ben definite:

- **incassato fra i monti;**
- **a fondo valle** con i primi slarghi per accogliere gli affluenti;
- **al primo piano** ove l'acqua può deporre, ma solo per un po' di tempo, le ghiaie strappate alla roccia, arrotondate e levigate dallo sfregamento nelle correnti veloci;
- **il sollievo dell'ampio letto** dopo la stretta di Pinzano-Ragogna. Pendenze modeste rispetto ad un torrente montano ma rilevanti rispetto ad un ordinario fiume in pianura, che invogliano l'acqua ad impigrirsi ed a trasformare a tratti le correnti da veloci a lente ed a depositare il bianco fardello di oro calcareo strappato alle rocce di Carnia;
- **l'attraversamento dell'alta pianura** alluvionale dallo spesso materasso di ghiaia permeabile fino alle falde profonde che sono una ricchezza umile ma preziosa. E l'acqua v`a, spartita in mille rivoli sempre pi`u esili a permeare il letto di ghiaia. Sotto scorre il liquore della vita, sopra si sbiancano al sole le ghiaie. La discesa alla purezza domanda tempo e spazio. L'acqua lo sa ed ogni singola goccia si prende tutto il tempo necessario. Ogni rivolo d'acqua sa di avere spazio fino alla bassa pianura friulana e, tranquilla, si avvia a correre sotto. Ma senza fretta, tanto lo sa che, di sopra, le sue sorelle acque, dal tempo dei tempi, hanno preparato, sagge e previdenti, per ogni necessit`a, una larga striscia di terreno drenante (*quella che i vecchi chiamavano "il laviu des montanis" - l'alveo delle montane*). L`i il secco avanza e a volte regna perch`e la ghiaia non si lava ogni mattina e la vita verde che invade l'alveo lo indurisce con isolette di bosco spontaneo opposte all'acqua delle montane, a spartirne pi`u che a trattenerne i flutti;
- **la bassa friulana** con le sue terre argillose. Le acque al di sotto degli strati argillosi, sempre pi`u compresse, cercano sollievo nelle risorgive e nei pozzi artesiani. Quelle che ancora non sono scese in falda continuano a permeare le ghiaie trasportate, ma il deposito si fa sempre meno consistente finch`e l'acqua,

lenta ma non pigra, torna alla luce del sole in un letto argilloso sempre più stretto, sempre meno permeabile, sempre più sinuoso per la poca pendenza;

- **finalmente alla foce.** La corrente è stanca, il trasporto solido si fa di sabbia e di limo, già si sente il salso del mare, ma per arrivarci si deve fare conoscenza con la sabbia che le maree mandano incontro a saluto.

La parte centrale della zona prealpina del Friuli, compresa tra le Prealpi Carniche e quelle Giulie, è caratterizzata dall'ampio **anfiteatro morenico** del Tagliamento, che, nonostante una struttura alquanto eterogenea, può comunque essere considerata un complesso impermeabile che ferma il deflusso nella falda del Tagliamento e genera varie zone di risorgiva, quali ad esempio quelle di Bars e di Molin del Cucco. A nord della morena compaiono infatti diverse sorgenti con portate significative, in parte utilizzate a scopi irrigui, che danno origine a numerosi corsi d'acqua periodici dei quali solo il Corno e il Cormor superano la barriera morenica e raggiungono l'area delle risorgive mentre gli altri disperdono le loro acque nei terreni alluvionali permeabili dell'alta pianura orientale.

La zona di **media pianura** è composta da un enorme deposito alluvionale costituito prevalentemente da ghiaie molto permeabili, derivato dalla rapida erosione dei bacini montani a seguito del sollevamento della catena montuosa. Il **materasso ghiaioso**, che raggiunge anche spessori dell'ordine dei 700 m nella zona sud-occidentale, è **fortemente permeabile** e causa l'assorbimento di gran parte dei corsi d'acqua che vi scorrono. Il deposito alluvionale diviene sede di una falda di composizione chimica e profondità dal piano di campagna estremamente variabili a causa della eterogeneità dei terreni e dei cospicui prelievi per scopi civili e irrigui. Peraltro parte delle acque di falda risalgono in superficie nella zona denominata "**fascia delle risorgive**" dove l'incontro del deposito ghiaioso con i terreni di tipo sabbioso e argilloso sensibilmente meno permeabili della bassa pianura causa l'affioramento di notevoli quantità d'acqua (*dell'ordine del  $m^3/s$  per km*) che alimentano una serie di rii e canali che confluiscono in collettori di dimensioni più consistenti.

La fascia delle risorgive può essere suddivisa in due sistemi distinti. Il sistema che occupa la **destra (ovest) del Tagliamento** viene alimentato soprattutto dalle acque del Meduna e del Cellina ed è caratterizzato da una serie di sorgenti piccole e disseminate sul territorio che, nelle zone a maggiore concentrazione, danno origine

ad alcuni piccoli laghi quali ad esempio quelli di Burida e di Guarnieri. Le risorgive poste a **sinistra (est) del Tagliamento** sono rifornite prevalentemente dalle infiltrazioni dello stesso Tagliamento, dell'Isonzo e di altri corsi nel materasso alluvionale ghiaioso della pianura oltre che da acque provenienti dall'anfiteatro morenico del Tagliamento. Le acque delle sorgenti vengono raccolte principalmente dai fiumi Stella e Torsa e più a valle vengono drenate da numerosi canali di bonifica.

L'area posta a sud della fascia delle risorgive, che costituisce la **bassa pianura** friulana, è una zona pressoché pianeggiante e uniforme, nettamente distinta anche per la sua topografia dalla media pianura, molto ricca di acque e sottoposta nel passato ad ingenti interventi di bonifica che ne hanno alterato significativamente l'assetto morfologico e idrologico naturale e che rendono praticamente impossibile determinare i bilanci idrici naturali o la provenienza stessa delle acque le quali risultano dal mescolamento di acque all'origine profondamente diverse.

Focalizzando l'attenzione sul Tagliamento si osserva che le sue acque disperse nel sottosuolo si dispongono in una formazione a triangolo che ha il vertice superiore a Pinzano e quelli inferiori a Palmanova e nella zona di risorgiva del fiume Sile (Casarsa della Delizia). L'entità della dispersione è pari a  $6 \text{ m}^3/\text{sec}$  lungo la sponda destra e  $24 \text{ m}^3/\text{sec}$  lungo la sponda sinistra: quest'ultima in gran parte alimenta le risorgive del fiume Stella, mentre la parte restante scorre ancora sotto le ghiaie del letto del fiume ed emerge gradualmente in piccoli rivoli nella bassa pianura. Si può avere un'idea dell'importanza del contributo fornito dal Tagliamento alla formazione delle falde se si tiene presente che nell'alta pianura posta tra il fiume ed il meridiano che passa per Udine, l'afflusso meteorico che alimenta le falde è di soli  $18 \text{ m}^3/\text{sec}$  contro i citati  $24 \text{ m}^3/\text{sec}$  provenienti dal Tagliamento stesso.

Questo è il complesso e naturale deflusso dell'acqua che rende unico il Tagliamento. Oggi di quell'originario delta di ghiaie di ere passate non ci rimane che un tratto di letto notevolmente ampio. In un equilibrio consolidato da millenni il fiume si è naturalmente adeguato a sopportare anche i periodi di intensa e prolungata piovosità espandendo il corso attivo delle acque entro l'ampia golena che delimita il suo alveo nel tratto che va dalla stretta di Pinzano-Ragogna all'altezza di Varmo-S.Paolo dove iniziano ad evidenziarsi le caratteristiche della bassa friulana.

L'espansione delle acque produce il rallentamento della corrente e dà maggior tempo alla massa d'acqua di filtrare sino alla falda profonda. Questa naturale risposta del

fiume è in genere sufficiente a far sì che la portata che si presenta nel tratto terminale, con letto argilloso, bassa pendenza e sezione molto più ristretta che a monte, possa essere contenuta dall'estuario fino allo sbocco al mare. Il fattore ***tempo di permanenza nella zona drenante*** assume importanza determinante in quanto ad esso è direttamente legata la quantità di acqua che espandendosi si sottrae al subitaneo picco dell'onda di piena eccezionale ed anche la frazione di portata che riesce a percolare nelle falde più profonde sottraendosi così al volume che va successivamente ad interessare l'estuario.

In linea teorica l'altezza del pelo libero dell'acqua in un canale è correlata a molti fattori: la quantità d'acqua che deve passare, la sezione, la pendenza, la scabrosità della sezione e quindi la velocità, passaggi da correnti lente a veloci, risalti e turbolenze locali, ecc. Tempo, quantità d'acqua, sua velocità ed ampiezza del letto sono fattori determinanti.

Il sistema Tagliamento è soggetto a situazioni critiche nel caso di piovosità eccezionali ripetute in tempi molto brevi, cioè a seguito di nubifragi ripetuti. Accade così che:

- a. il **tratto iniziale** incassato o di fondo valle con gli slarghi degli affluenti, riceve volumi d'acqua eccezionali non trattiene dai declivi montani, cui negli ultimi decenni si è posta scarsa attenzione;
- b. il **primo tratto in piano**, fra Venzona e Pinzano-Ragogna, imbibito e saturato ben presto il deposito di ghiaie depositato sopra lo strato non permeabile dell'antico lago morenico, perde l'ordinaria capacità di rallentamento della corrente la quale, subitanea e con tutta la sua massa d'acqua, si presenta alla stretta di Pinzano-Ragogna dove la sezione ristretta ed una maggiore pendenza localizzata determinano un ulteriore incremento della velocità della corrente e del trasporto solido;
- c. **all'attraversamento dell'alta pianura** con l'ampio letto drenante resta, tutto intero, il compito di rallentare la corsa delle acque e trattenerle per quel tanto da permettere la possibile percolazione nelle falde. I rivoli a corrente veloce e le isolette rilevate di materiale inerte coperto da vegetazione spontanea disposte longitudinalmente all'alveo, agiscono nel verso di determinare una forte limitazione dell'ampiezza del letto attivo ed un incremento della velocità dei singoli *branchi* che va a sommarsi agli effetti non trascurabili della sensibile

pendenza longitudinale del fiume. Il fenomeno si autoesalta ed allorché la portata *montana* tende ad occupare *la porzione attiva dell'alveo del fiume*, lo fa in tempi brevi e con correnti veloci. Per questa acqua che scorre velocemente non c'è il tempo per espandersi in golena e tantomeno di percolare nelle falde sotterranee; l'ampia, antica golena drenante con tutta la sua lunghezza e larghezza è come se non esistesse;

d. **alla bassa friulana**, dove il letto si restringe ed il fondo diviene non permeabile, si presenta una ***massa d'acqua*** così valutabile:

- *portata* alla stretta Pinzano-Ragogna
- + *apporto* idrico del bacino nel tratto Pinzano-Ragogna > Varmo-S.Paolo
- *quantità percolata* in falda in frazione dalla superficie di alveo attivo nella tratta Pinzano-Ragogna > Varmo-S.Paolo.

Questa *massa d'acqua* può essere solo contenuta entro gli argini dell'estuario ed agevolata nel suo deflusso al mare pena la tracimazione ed il conseguente disastro.

Di fronte alle piene straordinarie ed eccezionali, che potrebbero ripresentarsi coi tempi di ritorno indicati dagli annali statistici, ci si può porre con due atteggiamenti differenti:

- il primo, più immediato ed istintivo è quello di contrasto. In buona sostanza, si ritiene di poter imporre regole al fiume, visto che non si può comandare alla pioggia;
- il secondo, più meditato ma non rassegnato, è quello di aiutare il fiume secondo la sua natura nel senso di incrementarne la capacità di risposta naturale fino alla possibilità di sostenere l'evento eccezionale cercando di ridurre e rallentare la *massa d'acqua* di quel tanto di tempo che lasci sperare nel cessare dei nubifragi.

L'idea di fermare l'acqua con una diga alla stretta di Pinzano-Ragogna, andava nel senso di utilizzare, a modo di polmone liquido, la porzione terminale del primo tratto di percorso in piano del fiume (*quasi una riedizione del lago morenico di epoca interglaciale*). La quantità d'acqua lasciata tracimare alla stretta di Pinzano ed immessa nell'ampio letto che attraversa l'alta pianura alluvionale, sarebbe risultata ridotta. Malauguratamente la scarsa permeabilità della piana a monte di Pinzano-Ragogna, sommata alla enorme quantità di inerti colà trasportati, avrebbero

determinato il riempimento dell'invaso in tempi molto brevi. Riempito l'invaso a ridosso della diga, si sarebbe ritornati alle condizioni idrauliche preesistenti, aggravate dalla accelerazione della corrente d'acqua stramazata. Comunque, nell'ipotesi favorevole, si otterrebbe il solo risultato di ritardare per un certo tempo il presentarsi del fronte della massa d'acqua all'estuario.

Si è sentito parlare molto, ma potuto vedere piuttosto poco, di casse di espansione. Per quanto è dato sapere, l'idea è di realizzare alcuni (1, 2, 3 o 4) "grossi catini" da incassare in serie lungo l'alveo del fiume. A monte verrebbe realizzata una briglia con il compito di parzializzare le portate di piena indirizzando parte dell'acqua nelle vasche cui è affidato il compito di contenerla. La corrente ordinaria invece, sfiorerebbe la briglia per essere incanalata in un alveo attivo ristretto, progettualmente definito. In quanto tempo verrebbero riempite, e quindi rese inefficaci le vasche? Ed il fondo diverrebbe stagno per effetto della deposizione di materiale inerte sottile? Trascorse quelle poche ore di rallentamento della portata di piena, ci si troverebbe di nuovo a confidare nella risposta naturale del fiume, con l'aggravante di avere annullato la sua capacità drenante per tutta la superficie di alveo interessata dalle vasche ed avere indotto una sensibile accelerazione della corrente nella parte di alveo destinato, per progetto, ad essere ordinariamente attivo. La corrente nell'alveo progettato attivo, accelerata da ben prima dell'entrata in funzione delle casse, ridurrebbe da subito la possibilità di espansione della portata in golena. Praticamente annullerebbe ogni capacità di percolazione in falda e, con la sua velocità concentrata, non potrebbe che incrementare i fenomeni di erosione ed incasso dei bracci attivi del fiume; convogliato ed esaltato il trasporto solido di ogni genere.

Con il ritardo del solo tempo di riempimento delle vasche (quante ore?), alla sezione Varmo-S.Paolo della bassa friulana, si presenterebbe una **massa d'acqua** così valutabile:

- portata alla stretta di Pinzano-Ragogna
- + apporto idrico nel tratto Pinzano-Ragogna > Varmo-S.Paolo
- quantità percolata in falda in frazione ridotta dalla parte drenante e volumi espansi nel letto attivo del tratto fine delle casse di espansione > sezione Varmo-S.Paolo.

Quindi una massa d'acqua forse maggiore di quella che si può temere nelle condizioni di naturale risposta del fiume (valutata al punto d.), con il solo ritardo di

un certo lasso di tempo richiesto dal riempimento delle casse, il che comporta l'attenuazione del picco di piena. Ciò lascia pensare che cercare di imporre la legge dell'uomo ad un fiume come il Tagliamento, può produrre risultati anche peggiori degli eventi eccezionali cui si pensa di porre rimedio.

Proviamo ora a pensare di affrontare il problema per altro verso. Cioè cercando di recuperare interamente e semmai incrementare la naturale capacità di risposta del fiume alle piene straordinarie al fine di poter fronteggiare anche quelle eccezionali con tempi di ritorno molto lunghi. L'idea ruota su tre fattori cardine, che sono stati individuati nella preliminare analisi del comportamento ordinario del fiume:

1. tempo di permanenza dell'acqua nella zona drenante dell'alveo ed incremento della sua attuale capacità drenante quale conseguenza della cercata ed indotta massima espansione del volume di piena entro la golena originaria;
2. controllo del flusso entro argini interni ed esterni, prevedendo la possibilità di sfioramento degli argini interni da parte di portate eccezionali, entro le eventuali zone di allagamento controllato;
3. agevolare ed incrementare le capacità di deflusso a mare.

Quest'ultimo fattore vale per ogni fiume per cui, anche per il Tagliamento, sarà opportuno incrementare la capacità di deflusso al mare mediante:

- l'eliminazione di ogni ostacolo alla corrente entro l'alveo dell'estuario;
- l'aumento della sezione di deflusso, ottenibile con una nuova calibratura del canale Cavrato;
- la riattivazione delle chiaviche di buona memoria e dei relativi canali scolmatori ed ogni altro fattore che può ricondursi al delta originario.

Per quanto attiene il tempo di permanenza dell'acqua nella zona drenante si consideri che, del delta ghiaioso originario, c'è ancora una superficie a disposizione entro l'alveo che può essere chiamata a collaborare ancorché, al giorno d'oggi, si riscontrino dannosi rilevamenti di materiale inerte spontaneamente ricoperto di vegetazione ed anche dei pennelli repellenti realizzati con la funzione di acquisire dei terreni golenali all'agricoltura.

La presenza umana ha portato progressivamente a limitare il letto del Tagliamento entro una fascia ghiaiosa apparente della larghezza abbastanza costante di circa 2 chilometri e lunga 35, il che comporta una superficie di 70 km<sup>2</sup>. È stato stimato che

una superficie di circa 10 km<sup>2</sup> sia occupata da isolotti di inerti consolidati da vegetazione spontanea. Quindi si può pensare di poter contare su una larga fascia della superficie di 60 km<sup>2</sup> per agevolare la naturale risposta del fiume alle piene. L'idea non è né nuova né originale, se è vero che esistono reliquati di arginelli sia sulla sponda destra che su quella sinistra. Si rende necessario ripristinare il sistema degli argini per delimitare e contenere la zona di espansione delle acque nel tratto Pinzano-Ragogna > Varmo-S.Paolo entro cui intervenire.

La proposta alternativa a diga o casse di espansione si inserisce in questo tratto del corso del fiume e, interessando specificatamente le progressive da Ragogna a Casarsa, punta a:

- ***incrementare il tempo di permanenza dell'acqua nella intera zona drenante del corso del Tagliamento, mediante la pronta espansione fino ad occupare l'intera area golenale e favorire nel tempo più lungo la percolazione nelle falde più profonde. Comunque la proposta tende a dilazionare e frazionare l'arrivo della massa d'acqua all'estuario con conseguente attenuazione del picco di piena.***
- Altri studi attengono:
- controllare il flusso entro argini, interni ed esterni, avendo previsto la possibilità di sfioramento degli argini interni, da parte di portate eccezionali, entro zone di allagamento programmato nella zona a valle (drenante fino a Varmo e poi non più drenante);
- agevolare ed incrementare le capacità di deflusso a mare dell'attuale estuario del fiume riattivando le possibili condizioni di delta.

Per incrementare il tempo di permanenza il modo è quello di operare sui branchi veloci obbligandoli ad allargarsi fino eventualmente ad occupare tutta la sezione disponibile dell'alveo; necessariamente la corrente ridurrà la sua velocità ed il tempo di permanenza risulterà maggiore. L'idea innovativa per una soluzione propria ed acconcia all'unicità del Tagliamento, è che a questo risultato può concorrere la frangia non saturata della falda freatica che scorre superficialmente appena sotto le ghiaie del letto, chiamandola a collaborare per l'espandere della corrente mediante l'inserimento nell'alveo ghiaioso di una **palancolata** che intercetti e parializzi la falda sub-ghiaia (per 2, 3, 4 metri) obbligando l'acqua di superficie a pelo libero ad

espandersi lateralmente fino dal primo presentarsi della portata di piena del fiume e quindi a rallentare ed attenuare il picco successivo. Contemporaneamente, a monte della palancolata, verrà interessata anche una non trascurabile quantità di acqua contenuta entro il letto ghiaioso. Il labbro superiore della palancolata determina la quota di sfioro costante per tutta la sezione trasversale dell'alveo, salvo i punti di modesto ribassamento o innalzamento (30÷50 cm) là dove scorrono, o si stabilisce che sarà opportuno far scorrere, i branchi per assicurare le condizioni di vitalità del fiume in tempo di piovosità e portata ordinaria.

Il profilo trasversale della sezione tipo dell'alveo presenta un andamento irregolare conseguente alla presenza degli isolotti naturali esistenti formati da inerti più o meno incoerenti. Rispetto al labbro superiore della palancolata si avranno inizialmente dei rilevati e delle depressioni che verranno pareggiati naturalmente con il susseguirsi delle piene ordinarie, che porteranno al pareggiamento dell'alveo per un certo tratto a valle ed il rimodellamento degli isolotti a monte.

Si ritiene che l'effetto dell'infissione della palancolata si esaurisca entro una fascia trasversale della larghezza di 3÷4 km . Ciò comporta che, per interessare la zona drenante del corso del Tagliamento in modo significativo, sarà opportuno ripetere più volte l'intervento di espansione e contenimento, potendo prevedere altresì anche una sezione di controllo e misura.

Osservando la cartografia tecnica si ritiene di poter ragionevolmente proporre la localizzazione degli interventi con palancolate e sezione di controllo come segue:

#### **Palancolate di ripartizione con sfioramento orientato dei branchi :**

- **traversa palancolata** di Aonedis (progressiva  $\approx$  4 km dal ponte Pinzano) (4 km);
- **traversa palancolata** di Carpacco (progressiva  $\approx$  7,5 km dal ponte Pinzano) (3,5 km);
- **traversa palancolata** in corrispondenza del ponte di Dignano (a valle) (progressiva  $\approx$  11,5 km dal ponte Pinzano) (4 km);
- **traversa di controllo, sfioro e rilascio della portata** da realizzarsi con un ponte di nuova costruzione cui affidare anche la funzione sinergica di collegamento stradale fra la Cimpello-Sequals e la Strada Statale n. 463 (a nord di S.Odorico) (progressiva  $\approx$  15 km dal ponte Pinzano) (3,5 km);

- **traversa palancolata** in corrispondenza del ponte FF.SS. di Casarsa (a valle) (progressiva  $\approx$  25 km dal ponte Pinzano) (10 km).

La trasversale Belgrado-Varmo è posta alla progressiva  $\approx$  33 km dal ponte Pinzano ed a circa 8-10 km dalla traversa di Casarsa. In quel tratto di alveo ancora ampio è pensabile una zona di esondazione dagli argini interni, contenuta entro argini esterni.

**Interventi integrativi per aumentare la rugosità utile dell'alveo compreso fra le sezioni delle palancolate:** si pensi ad una possibile e compatibile rimodellazione dell'alveo non attivo in bassure, non così profonde da raggiungere la quota piezometrica lateralmente depressa delle ordinarie falde sotterranee entro il letto ghiaioso (profondità  $1 \div 1,50$  m), con i perimetri a scarpata, appena rilevati, di pendenze modeste, (frazione dell'angolo di attrito interno degli inerti in mucchio) che verranno naturalmente compattati e rinforzati dalla inevitabile vegetazione spontanea. La disposizione delle bassure con estrazione di manutenzione compatibile, realizzerebbe quasi una sequenza di "atolli" con aperture di sfioro disposte sotto-corrente ai margini del letto attivo in modo da non essere investiti direttamente ma riempiti in momenti succedentisi. L'acqua che riempie progressivamente le bassure, per risalienza dal fondo o per sfioramento dalla bocca dell'"atollo", subisce un rallentamento, se non proprio un ristagno, nella successione degli invasi. Allorquando il pelo libero dell'onda di piena perviene a sommergere i cigli delle depressioni, si ripristinerebbero le condizioni di corrente veloce, ma solo per la quota superiore ai cigli stessi. Nelle depressioni l'acqua permarrebbe poi in condizioni tali da darsi il tempo per la percolazione nelle falde. È infatti conoscenza ed esperienza comune che l'acqua ruscellante scorre, mentre l'acqua cheta bagna e penetra in profondità.

In termini idraulici si tratta di aumentare la scabrezza di un canale ottenendo l'effetto di ridurre la velocità della corrente e lasciare inalterate le caratteristiche drenanti del fondo.

Riporto **alcune domande e dubbi** sorte da chiacchierate e discussioni:

***Come fa a stare in piedi la struttura? Ho risposto che riceve una eguale spinta davanti e dietro dalla ghiaia. Eppure mi hanno detto che al ritmo di trasporto***

***conosciuto dei materiali solidi ci vorrebbero tantissimi anni per pareggiare il livello della ghiaia attorno al manufatto.***

La struttura ipotizzata, riproducibile più volte (tre in corrispondenza dei ponti, a monte piuttosto che a valle?) è in sostanza una **palancolata** (ricerca con Google) interamente infissa nel letto ghiaioso del fiume. Ciò comporta che in condizioni non operative (si può dire "a secco", ma in realtà con la presenza a poca profondità di una falda freatica satura e della sua relativa superiore frangia di risalita solo capillare) la presenza di ghiaia sulle due facce della parete fornisce due spinte uguali e contrarie mentre, in condizioni operative, con l'arrivo di una corrente di acqua, si determina una pressione idraulica sulla faccia a monte che va aumentando linearmente con la profondità ma che non sarà in grado di vincere la spinta fornita dalla massa di ghiaia a valle della palancolata. La palancolata ha una profondità limitata (2, 3, 4 metri) per cui con l'arrivo della corrente fluida avrà inizio anche il fenomeno del sifonamento dell'ostacolo che tende a creare anche a valle una pressione idraulica che, se il sistema idraulico fosse a regime statico, tenderebbe ad eguagliare quella a monte. È un principio generale che un sistema di forze tende a porsi nella posizione di minimo dell'energia. Ciò porta a considerare che in una situazione dinamica il singolo filetto fluido, allorché incontra l'ostacolo della parete, a monte della palancolata dovrà accumularsi ed aumentare la sua quota piezometrica finché questa non sarà sufficiente a fornirgli l'energia per la risalita di sifonamento a valle. Contemporaneamente quella stessa prevalenza piezometrica porterà l'acqua a cercare una via di fuga anche lateralmente e quindi ad espandersi sulla faccia a monte della parete palancolata. Il sistema di forze nel suo tendere a condizioni di regime (minimo di energia) spingerà gradualmente l'acqua ad interessare trasversalmente l'intero letto del fiume per tutto il tempo in cui si presenta un incremento della portata di piena.

Va considerato che le palancolate sono usualmente utilizzate per creare delle pareti impermeabili allorché si eseguono opere di fondazioni in presenza di acqua, si creano banchine in bacini portuali, si consolidano sponde fluviali, ecc. In tutti questi casi che comportano anche notevoli differenze di pressione e fenomeni di sifonamento da tenere sotto controllo, si rende necessario un particolare studio delle opere di stabilità sia di fondazione che di coronamento. Nel caso dell'utilizzo qui proposto si cerca piuttosto la continuità trasversale nel letto ghiaioso garantita dal sistema di aggraffaggio dei singoli elementi metallici che consentono anche una buona flessibilità ed adattabilità alle mutevoli condizioni del vincolo intrinseco del terreno ghiaioso in cui sono infisse. Il filo superiore della palancolata orizzontale per tutta la sezione trasversale del letto, determina lo sfioro allorché la corrente di acqua raggiunge le condizioni di energia sopra indicate dapprima localmente ed infine su tutta la sezione. Le correnti che sfiorano determinano, con il loro trasporto solido, la modificazione dell'aspetto superficiale del *gravâr* con possibile demolizione e ricomposizione degli isolotti di ghiaia meno consolidati. I tempi di tali modificazioni sono legati alla frequenza ed intensità delle piene del Tagliamento, in quanto non è previsto alcun intervento di movimento di terra all'infuori di quelli necessari per

l'infissione delle palancolate. Per assicurare il mantenimento di un regime idraulico naturale e di minimo flusso vitale del fiume in condizioni di piovosità ordinaria, il labbro superiore della palancolata presenterà alcuni abbassamenti locali dell'ordine dei 30÷50 cm da posizionarsi con criteri di valutazione naturalistica in corrispondenza degli ordinari bracci liquidi del fiume (i *brancs*).

In terreni mediamente argillosi le palancole vengono infisse per pressione, in questo caso, data la natura ghiaiosa, sarà necessario utilizzare un escavatore idoneo a lavorare in sezione ristretta (p.e. un escavatore a nastro dotato di pareti laterali antifranamento).

***L'acqua potrebbe passare al di sotto della struttura scavando in qualche modo alla sua base? Penso di sì, ma non so se sarà pericoloso. Basterà una sola di queste palancolate? Credo di no.***

Certamente sarà presente il fenomeno del sifonamento del diaframma palancolato ma, considerata la profondità del punto di svincolo dall'ostacolo, la natura estremamente permeabile del terreno e che la corrente sotterranea profonda sarà lenta (proprio perché quella in superficie è libera), non vedo motivi di preoccupazione nel caso della palancolata.

Una palancolata può produrre effetti entro un tratto limitato a monte ed a valle e quindi sarà necessario disporre più di una per poter interessare una tratta significativa del corso del Tagliamento, ma il costo della singola palancolata è contenuto e l'impatto ambientale minimo.

Per contro, un ponte di nuova costruzione, cui affidare un analogo compito di diaframma e ripartizione, richiede opere di intercettazione, sfioro e rilascio della corrente che diventano tanto più consistenti quanto più da una ulteriore briglia con funzione di controllo dell'efficacia del sistema delle palancolate a monte ci si avvicina alla sostanza di una vera e propria diga.

Con ciò intendo dire che la realizzazione di un ponte ex novo, con le funzioni di sfioro, misurazione e controllo delle portate non si contrappone alla infissione di due-tre sezioni di palancolata a monte, ma può risultare necessario, efficace ed efficiente proprio grazie alla loro presenza ed al conseguente interessamento dell'intero letto del fiume senza dover assumere le caratteristiche proprie di una diga. Infatti la realizzazione di un ponte che inglobi la sostanza di una diga di sbarramento con relativo invaso a monte e scarichi di fondo non farebbe altro che rinnovare tutti i problemi e le ostilità incontrate allorché si proponeva prima lo sbarramento alla stretta di Pinzano e poi le casse di espansione. Ciò che non stava bene ad una popolazione rivierasca difficilmente sarà accettato di buon grado da un'altra popolazione solo qualche chilometro più a valle.

***Si può capire quanti m<sup>3</sup> di acqua si riuscirebbero a rallentare?***

Non è facile rispondere ad una tale domanda a motivo della presenza di molte variabili nel sistema e della mancanza di dati sperimentali certi circa le condizioni locali di permeabilità del letto che determina l'assorbimento in falda freatica. Gli unici

dati attendibili di assorbimento e riaffioro nella zona delle risultive lasciano intendere che solo parte delle acque transitate alla stretta di Pinzano riemergono e confluiscono nell'estuario di Latisana-Lignano. Del resto, in mancanza di misurazioni attendibili nel tempo, la stessa individuazione della portata del fiume si presta a non poche dubbiezze.

Restando al sistema di regimazione ipotizzato ho prudentemente stimato degli ordini di grandezza dell'efficacia, ricomprendendo sia i ***volumi sollecitati a collaborare*** trattenuti direttamente dalla palancolata che quelli di riempimento delle bassure a monte:

DIRETTRICE	LARGHEZZA EFFICACE	RIMONTA	PROFONDITÀ PALANCOLA	VOLUME INTERESSATO
Aonedis	m 2.000	m 1.100	m 3	m <sup>3</sup> 6.600.000
Carpacco	m 2.500	m 1.100	m 3	m <sup>3</sup> 6.600.000
Ponte Dignano	m 1.000	m 1.200	m 3	m <sup>3</sup> 3.600.000
Cosa-S.Odorico	m 2.000	m 1.300	m 3	m <sup>3</sup> 7.800.000
Ponte Casarsa	m 900	m 1.100	m 3	m <sup>3</sup> 2.970.000
			<b>TOTALE</b>	<b>m<sup>3</sup> 27.000.000</b>

I ***volumi sollecitati a collaborare***, sopra stimati entro il letto ghiaioso, verrebbero a trovarsi in condizione di falda satura in concomitanza delle piene eccezionali-ordinarie intendendo con tale termine quelle che possono verificarsi con frequenza annuale mentre le più frequenti piene ordinarie interessano volumi notevolmente inferiori.

La corrente a pelo libero, indotta ad espandersi lateralmente, andrebbe ad erodere i depositi di inerti non stabilizzati posti a quota superiore al labbro della palancolata ottenendo il risultato di allargare il letto del fiume, riavvicinandolo all'ampiezza naturale dell'alveo. Considerati i diversi ordini di grandezza della velocità di scorrimento della corrente a pelo libero, del moto verso valle nella esigua porzione di falda entro le ghiaie superficiali e dei tempi di percolazione in falda più profonda, i soli effetti apprezzabili sarebbero l'allargamento dell'alveo e l'attenuazione iniziale della portata di piena di quei volumi d'acqua che andranno a saturare la frangia capillare disposta lateralmente ai rami sempre attivi del fiume. Peraltro l'aumento di sezione della corrente libera comporta la riduzione della sua velocità, con conseguente attenuazione del picco dell'onda di piena.

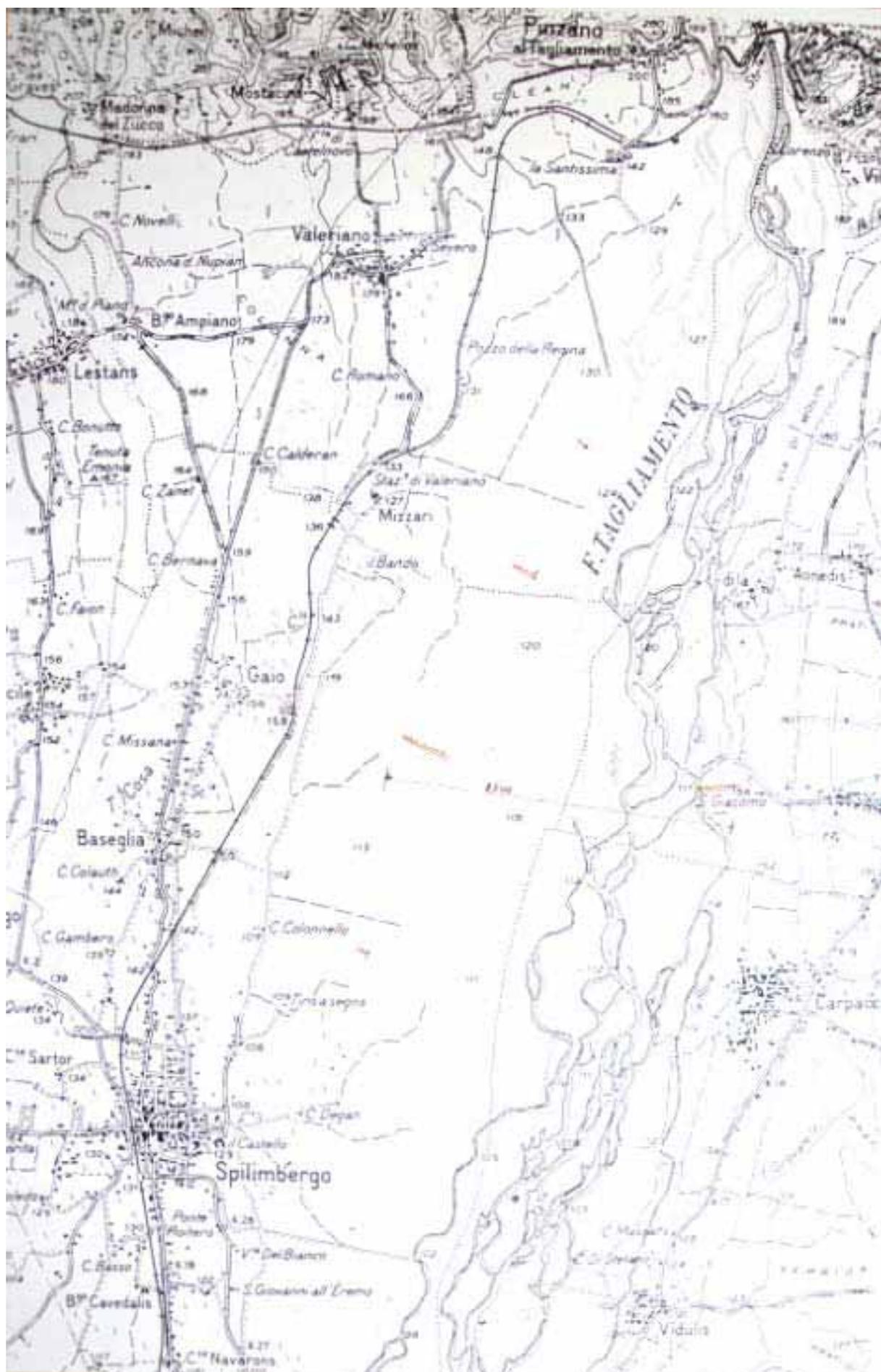
Il susseguirsi delle piene ordinarie, straordinarie-ordinarie e straordinarie (frequenza decennale) porterebbe ad un progressivo rimodellamento dell'alveo entro l'ampiezza delimitata dal recupero-ripristino-rinforzo degli argini esterni e del greto.

I **pennelli attualmente esistenti** entro l'alveo del fiume agiscono in direzione opposta a quella delle palancolate poichè restringono il letto attivo, inducono aumento di velocità della corrente ed incrementano l'erosione in profondità dei bracci attivi, portando con ciò ad una limitazione della sezione utilizzabile in occasione di piene straordinarie od eccezionali (frequenza pluridecennale). Quei pennelli furono a suo tempo costruiti per recuperare terreni seminativi con la finalità di sopperire alla necessità nazionale di granaglie. Si tratta di valutare se attualmente sussista una tale penuria di granaglie o se prevalga l'esigenza di sicurezza non dimenticando che un accurato studio degli argini e la differenziazione delle loro altezze può tuttavia salvaguardare all'agricoltura alcune porzioni marginali dell'ampia golena fluviale.

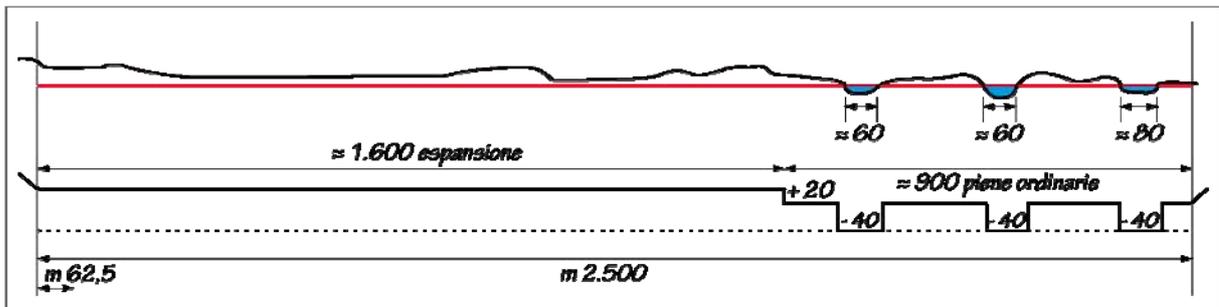
Per cercare di quantificare il contributo della singola palancolata, in relazione all'esigenza di **contenimento e rallentamento del picco di una piena eccezionale**, pare ragionevole porre a confronto le condizioni di deflusso normale con quelle di piena ad una progressiva del fiume che presenti caratteristiche rappresentative della tratta su cui si ipotizza l'intervento.

A titolo di esempio si prende in considerazione una trasversale a monte della direttrice Carpacco-Baseglia e per la finalità esplicativa, stante la mutevolezza del greto del Tagliamento, si fa riferimento ad una carta topografica in scala 1:50.000. La larghezza dell'alveo è di 2.500 metri, la pendenza media del fiume risulta di 3,3 m/km, vi sono rappresentati tre bracci attivi ed una serie di risalti di materiale inerte. Vi sono rappresentati i pennelli repellenti che restringono l'ampiezza dell'alveo attivo. I tre bracci attivi, disposti parallelamente alla sponda lato Carpacco, sono rappresentati con una larghezza totale di circa 200 metri.

L'andamento dei risalti di inerti lascia intuire che la falda a pelo libero di subalveo presenta, per la sua depressione piezometrica trasversale, una fascia di saturazione di ampiezza valutabile in 900 metri, oltre i quali la superficie freatica sfuma verso la zona di aerazione tramite una frangia che lascia un volume non trascurabile di inerti suscettibili di saturazione. La residua ampiezza del letto ( $2.500 - 900 = 1.600$  metri) stimando lo spessore della frangia in  $50 \div 70$  cm (equivalente in acqua a 40 cm) porta ad un volume apprezzabile di inerti non saturati posti a quota inferiore del labbro di palancolata, mentre a quota superiore, se le piene straordinarie hanno prodotto l'allargamento sperato dell'alveo attivo entro gli argini consolidati, si ha una ulteriore sezione disponibile all'espansione della portata di piena.

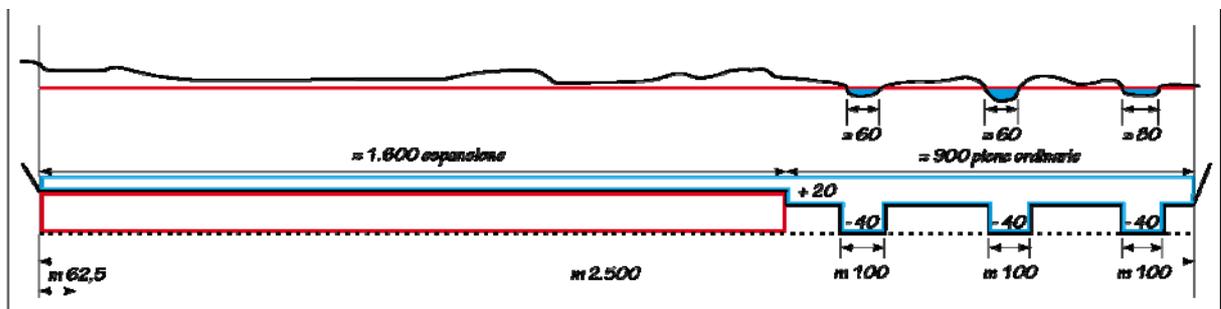


Per stimare i volumi d'acqua che si può pensare di trattenere e/o rallentare, appare ragionevole non considerare la frazione di alveo già impegnata dalla piena ordinaria e porre l'attenzione sulla parte di alveo allargato considerandolo alla stregua di un invaso di espansione con sfioratore laterale. Non essendoci una perimetrazione a valle solo l'acqua di saturazione verrà effettivamente trattenuta mentre la portata superficiale verrà rallentata a motivo dell'espansione attenuando il picco dell'onda di piena. L'efflusso in falda dell'acqua trattenuta nella frangia in origine non satura avverrà in tempi più lunghi ma, considerata la permeabilità del greto, con effetti non del tutto trascurabili.



- Andamento trasversale tipico con tre bracci attivi e risalti di inerti; livello di riferimento (*n.b.: quote non in scala per rendere leggibile la rappresentazione*).
- Labbro superiore della palancolata con tre ribassamenti per la continuità delle portate vitali del fiume; quota rialzata di espansione laterale; risalto degli argini esterni.

Astraendo dalla velocità di deflusso, indispensabile per valutare le portate, e considerando a titolo esplicativo i volumi unitari di progressiva che si presentano nella sezione di riferimento:



- Volume nell'alveo delle piene ordinarie in ipotesi:  $0,5 \times 900 = 450 \text{ m}^3/\text{m}$  di progressiva.
- Volume trattenuto in frangia:  $0,4 \times 1.600 = 640 \text{ m}^3/\text{m}$  di progressiva.
- Volume della corrente espansa a pelo libero:  $0,6 \times 1.600 = 960 \text{ m}^3/\text{m}$  di progressiva.

Quindi un volume rallentato di  $1.600 \text{ m}^3/\text{m}$  di progressiva nella sezione a lato della sezione corrispondente alla porzione di letto interessata per ipotesi dalle piene ordinarie a fronte del volume totale per unità di progressiva che si presenta alla sezione di riferimento:  $450 + 1.600 = 2.050$ .

Appare evidente l'importanza percentuale dell'allargamento dell'alveo alla sua primitiva estensione.

Volendo stimare i volumi rallentati nell'allargamento dell'alveo, si deve considerare che nella soluzione "Altra" si ipotizza l'infissione di 5 sezioni di sfioramento-ripartizione distanziate fra di loro di circa 4 km le prime 4 e di 8 km la quinta. Le caratteristiche trasversali sono sensibilmente uniformi, compresa la percentuale di alveo interessata dalle piene ordinarie, con la sola variante della larghezza della sezione.

Il conteggio di stima sommaria comporta:

DIRETRICE	LARGHEZZA ALVEO	LARGHEZZA ESPANSIONE	INTERVALLO	ALTEZZA CORRENTE	VOLUME DISPONIBILE PER ESPANSIONE
Aonedis	m 2.000	m 1.600	m 4.000	m 0,5	m <sup>3</sup> 3.200.000
Carpacco	m 2.500	m 1.600	m 4.000	m 0,5	m <sup>3</sup> 3.200.000
Ponte Dignano	m 1.000	m 640	m 4.000	m 0,5	m <sup>3</sup> 1.280.000
Cosa-S.Odorico	m 2.000	m 1.600	m 4.000	m 0,5	m <sup>3</sup> 3.200.000
Ponte Casarsa	m 900	m 600	m 8.000	m 0,5	m <sup>3</sup> 1.800.000
				<b>TOTALE</b>	<b>m<sup>3</sup> 12.680.000</b>

Quindi, nella tratta Ponte di Pinzano-ponte di Casarsa, con una corrente a pelo libero di soli 50 cm di altezza, si avrebbe un volume disponibile per espansione laterale pari a 12.680.000 m<sup>3</sup>, cui va sommata l'acqua trattenuta della frangia di falda saturata al primo insorgere del fenomeno di piena.

DIRETRICE	LARGHEZZA ALVEO	LARGHEZZA ESPANSIONE	INTERVALLO	ALTEZZA FRANGIA	VOLUME TRATTENUTO NELLA FRANGIA
Aonedis	m 2.000	m 1.600	m 4.000	m 0,4	m <sup>3</sup> 2.560.000
Carpacco	m 2.500	m 1.600	m 4.000	m 0,4	m <sup>3</sup> 2.560.000
Ponte Dignano	m 1.000	m 640	m 4.000	m 0,4	m <sup>3</sup> 1.024.000
Cosa-S.Odorico	m 2.000	m 1.600	m 4.000	m 0,4	m <sup>3</sup> 2.560.000
Ponte Casarsa	m 900	m 600	m 8.000	m 0,4	m <sup>3</sup> 1.920.000
				<b>TOTALE</b>	<b>m<sup>3</sup> 10.624.000</b>

**La stima sommaria fa ritenere che nella tratta ponte di Pinzano-Ponte di Casarsa si potrebbe trattenere o rallentare un'onda di piena eccezionale dell'ordine di 23.304.000 m<sup>3</sup>.**



*La trasversale Belgrado–Varmo è posta alla progressiva  $\approx 33$  km dal ponte Pinzano ed a circa 8-10 km dal ponte di Casarsa. In quel tratto la gola del Tagliamento è ancora ampia ed è quindi pensabile una zona di esondazione dagli argini interni, contenuta da argini esterni.*



***Poiché si tratta di spendere tanto danaro pubblico per risolvere un problema, non si potrebbe metterlo in sinergia con altri problemi ?***

Voglio fare alcune considerazioni su due problemi di cui in Friuli si parla da tempo.

- 1. *Collegamento fra le strade Cimpello Sequals – Strada Statale 463***
- 2. *Controllo e contenimento delle portate di piena del Tagliamento***

Sono problemi apparentemente estranei fra di loro eppure non è difficile intuire gli aspetti che influiscono sugli equilibri e sull'assetto del territorio dell'alta pianura friulana rendendoli complementari e meritevoli, pur nel rispetto della peculiarità delle differenti materie, di essere considerati con una visione unitaria nella ricerca dell'economicità e dell'efficacia delle soluzioni proposte.

**• Collegamento fra le strade Cimpello Sequals – Strada Statale 463.**

Da alcuni anni si discute circa l'opportunità di completare la strada pedemontana Sequals–Gemona, sul suo tracciato e sulle sue funzioni di collegamento, convogliamento e partizione del traffico pesante locale sulla destra e sulla sinistra del Tagliamento. Le varie soluzioni ipotizzate incontrano opposizioni dettate dal timore che nella nuova strada prevalgano le funzioni di scorrimento veloce e che essa, travalicando il ruolo di convogliamento territoriale, finisca col divenire una bretella di raccordo ed una comoda scorciatoia ad uso della viabilità di livello superiore (autostrade). Ciò comporterebbe dimensioni di traffico considerevoli, imporrebbe soluzioni costruttive di notevole impatto su un territorio dagli equilibri già delicati ed in ultima analisi, all'economia locale, porterebbe un vantaggio assai limitato.

Si ritiene che un collegamento fra la Cimpello-Sequals e la Strada Statale 463 fra lo svincolo di S.Giorgio della Richinvelda e S.Odorico (in uno snodo da realizzarsi a nord dell'abitato) consentirebbe una migliore integrazione fra le viabilità sulla destra e sulla sinistra del Tagliamento, un più facile convogliamento del traffico pesante locale ed una risposta più modulata alla opportunità di una bretella di raccordo alternativa della grande viabilità autostradale. Un tale collegamento comporterebbe una considerevole riduzione del volume di traffico pesante che attualmente attraversa il ponte e l'abitato di Dignano.

**• Controllo, rallentamento e contenimento delle portate di piena del Tagliamento.**

Sono più di trenta anni che si parla di soluzioni per contenere le piene ordinarie del fiume e ridurre al minimo i danni causati da quelle straordinarie. Nel caso di specie sono state ipotizzate grandi dighe e/o grandi casse atte a trattenere l'acqua che si ipotizza in eccesso. Dispiace, a me che ho fatto studi di ingegneria, ammettere che molte volte un tecnico, quanto più ha studiato la tecnica delle costruzioni tanto più è convinto di poter trovare la soluzione perfetta, capace di risolvere il problema come fosse un colpo di bacchetta magica. Purtroppo la realtà della natura non ha conoscenza, considerazione e rispetto delle ambizioni e delle illusioni umane e continua imperterrita a rispettare solo le sue regole. È la mente umana che deve

umilmente piegarsi all'osservazione della natura e da questa trarre insegnamenti favorendo e non contrastando le risposte naturali. L'ampio letto ghiaioso quasi sempre asciutto indica la via da seguire; fare appello alla possibilità di espansione delle correnti di piena che esso offre e non trascurare completamente la sua capacità drenante che favorisce il percolare dell'acqua sino alle falde più profonde. Quindi un intervento esteso a tutto il tratto che va dalla stretta di Pinzano-Ragogna sino all'altezza di Varmo-S.Paolo dove iniziano ad evidenziarsi le caratteristiche della bassa friulana.

Con la presente proposta alternativa si potrebbe dare continuità alla fascia del Tagliamento che cinge il Friuli estendendosi dai campi di Osoppo alla zona delle risultive, a valle il fiume navigabile, a monte il fiume fra le montagne.

È innegabile la potenzialità di attrazione di un ambito paesaggistico e naturalistico di circa 70 km<sup>2</sup> che può coinvolgere le zone rivierasche con un modello di turismo diffuso, ancorato alla cultura del territorio, non invasivo, integrativo ed alternativo alle spiagge affollate ed alle piste da sci.

***Nella carta topografica allegata sono state indicate approssimativamente:***

- *la zona di espansione entro l'ampio letto del Tagliamento dalla stretta di Pinzano-Ragogna alla progressiva del ponte di Casarsa della Delizia;*
- *la posizione delle palancolate di Aonedis, Carpacco, Dignano e Casarsa;*
- *la posizione del ponte di sfioro e controllo alla progressiva di S.Odorico;*
- *la funzione di collegamento fra la strada Cimpello-Sequals e la S.S. 463 che sarebbe svolta dal ponte di sfioro e controllo portate alla progressiva di S.Odorico-S.Giorgio della Richinvelda.*

***Udine, luglio 2010***

*(rielaborazione di una idea già espressa nel 2002)*

***Gianni Sergio Pascoli***

