

	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> NR/20047	<b>UNITÀ</b> 00
	<b>LOCALITÀ</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse	Pagina 1 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

Progetto:

RIFACIMENTO METANODOTTO SANSEPOLCRO – FOLIGNO  
E OPERE CONNESSE

## STUDIO

### IDROLOGICO-IDRAULICO

ATTRAVERSAMENTO TORRENTE MUSSINO  
CON SCAVO A CIELO APERTO

NEI COMUNI DI UMBERTIDE e PERUGIA (PG)



0	Emissione	Polloni	Battisti	Luminari	30.09.2021
<b>Rev.</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Elaborato</b>	<b>Verificato</b>	<b>Approvato</b>	<b>Data</b>

	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> <b>NR/20047</b>	<b>UNITÀ</b> <b>00</b>
	<b>LOCALITÀ</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> <b>Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse</b>	Pagina 2 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>LOCALIZZAZIONE DELL'AREA .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>CARATTERISTICHE IDROLOGICHE .....</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>STUDIO IDRAULICO.....</b>	<b>8</b>
<b>4.1</b>	<b>Studio CNR-IRPI.....</b>	<b>8</b>
<b>4.2</b>	<b>Modellazione locale .....</b>	<b>10</b>
4.2.1	Metodologia adottata .....	10
4.2.2	Ricostruzione dei livelli di piena .....	12
4.2.3	Risultati della modellazione .....	13
<b>5</b>	<b>RISCHI IDRAULICI.....</b>	<b>15</b>
<b>5.1</b>	<b>Erosione di fondo alveo .....</b>	<b>15</b>
<b>5.2</b>	<b>Approfondimento di fondo alveo .....</b>	<b>16</b>
<b>5.3</b>	<b>Erosione spondale .....</b>	<b>16</b>
<b>5.4</b>	<b>Cambio di percorso e taglio di meandro .....</b>	<b>17</b>
<b>5.5</b>	<b>Stima dello spessore di erosione generalizzata in caso di evento critico .....</b>	<b>17</b>
<b>5.6</b>	<b>Approfondimenti localizzati (buche in alveo).....</b>	<b>19</b>
<b>5.7</b>	<b>Risultati delle verifiche .....</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....</b>	<b>23</b>

**ALLEGATO 1: RISULTATI DELLA MODELLAZIONE IDRAULICA**

**ALLEGATO 2: DIMENSIONAMENTO MASSI PER SCOGLIERA**

	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> <b>NR/20047</b>	<b>UNITÀ</b> <b>00</b>
	<b>LOCALITÀ</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> <b>Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse</b>	Pagina 3 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

## 1 PREMESSA

La presente relazione è relativa allo studio idrologico e idraulico in corrispondenza dell'attraversamento del T. Mussino da parte del "Metanodotto Sansepolcro-Foligno DN 400 (16") – DP 75 bar", che ricade alla progressiva PK 52+781 nel territorio dei comuni di Umbertide e di Perugia (PG).

Tale studio è di supporto alla Relazione di Compatibilità Idraulica LSC-140 (alla quale è allegato), volta a dimostrare come l'intervento in progetto, che risulta non altrimenti localizzabile, "non costituisce significativo ostacolo al libero deflusso e/o significativa riduzione dell'attuale capacità d'invaso".

Scopo dello studio è di valutare le caratteristiche idrologiche del corso d'acqua per quanto attiene le portate di massima piena al colmo con i relativi livelli idrici e di definire i parametri idraulici in corrispondenza del tratto di torrente interessato dagli interventi, permettendo pertanto la corretta progettazione delle opere.

Sono stati tenuti in conto i precedenti studi idraulici effettuati in ambito PAI e in particolare lo studio di CNR IRPI di Perugia "Redazione Mappe delle Aree Allagabili finalizzata all'individuazione del rischio idraulico nel reticolo minore del Fiume Tevere, Torrente Mussino"

Le elaborazioni idrauliche eseguite hanno avuto lo scopo di verificare localmente le caratteristiche della corrente, verificandone la congruità con i risultati ottenuti dai precedenti studi, in considerazione anche dell'attuale conformazione morfologica dell'alveo. La modellazione è stata compiuta in condizione di moto permanente con portata bicentennale tramite il programma di calcolo HEC-RAS, vers. 6.0.0.

Per effettuare la modellazione si sono condotti specifici rilievi topografici, nonché accurati sopralluoghi da parte di tecnici esperti. Sono state inoltre eseguite indagini geognostiche in loco.

Il progetto di attraversamento, comprensivo di planimetria, profilo, caratteristiche geometriche e strutturali della condotta e caratteristiche delle opere di ripristino e protezione è raffigurato nell'elaborato grafico allegato allo Studio di impatto ambientale (SIA):

- AT-20047L01-30 Attraversamento Torrente Mussino.

al quale si rimanda per approfondimenti.

	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> <b>NR/20047</b>	<b>UNITÀ</b> <b>00</b>
	<b>LOCALITÀ</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> <b>Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse</b>	Pagina 4 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

## 2 LOCALIZZAZIONE DELL'AREA

L'area in cui si colloca l'intervento in oggetto è localizzata lungo il corso d'acqua del T. Mussino nella parte terminale del suo sviluppo, compresa tra la superstrada E45 Orte-Ravenna e la sua confluenza in Tevere. Ricade nel territorio dei comuni di Umbertide e di Perugia, in corrispondenza del limite comunale, in provincia di Perugia. Nello stralcio allegato in Fig. 2/A, tratto dalla base cartografica IGM a scala 1:100.000, si riporta la localizzazione del sito.

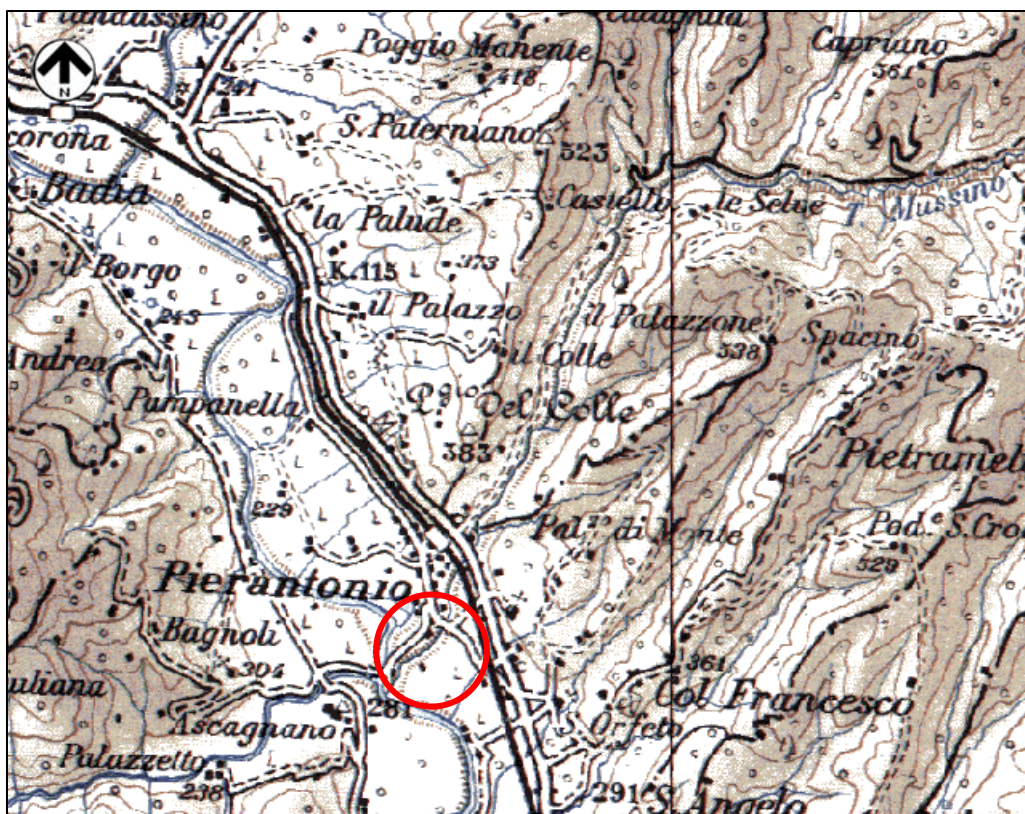


Figura 2/A – Inquadramento a scala 1:100.000 con indicata la posizione dell'attraversamento in studio

A livello della cartografia CTR della regione Umbria, l'attraversamento si ubica nel foglio 300130, di cui si riporta il particolare con la localizzazione dell'opera in progetto (v. Fig. 2/B). In tale immagine il tracciato in progetto è individuato dalla linea in colore rosso, il metanodotto in fase di dismissione dalla linea di colore verde e l'area di attraversamento del corso d'acqua con cerchio rosso. In Figura 2/C viene riportata anche la ubicazione su immagine aerea Google.

	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> <b>NR/20047</b>	<b>UNITÀ</b> <b>00</b>
	<b>LOCALITÀ</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> <b>Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse</b>	Pagina 5 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

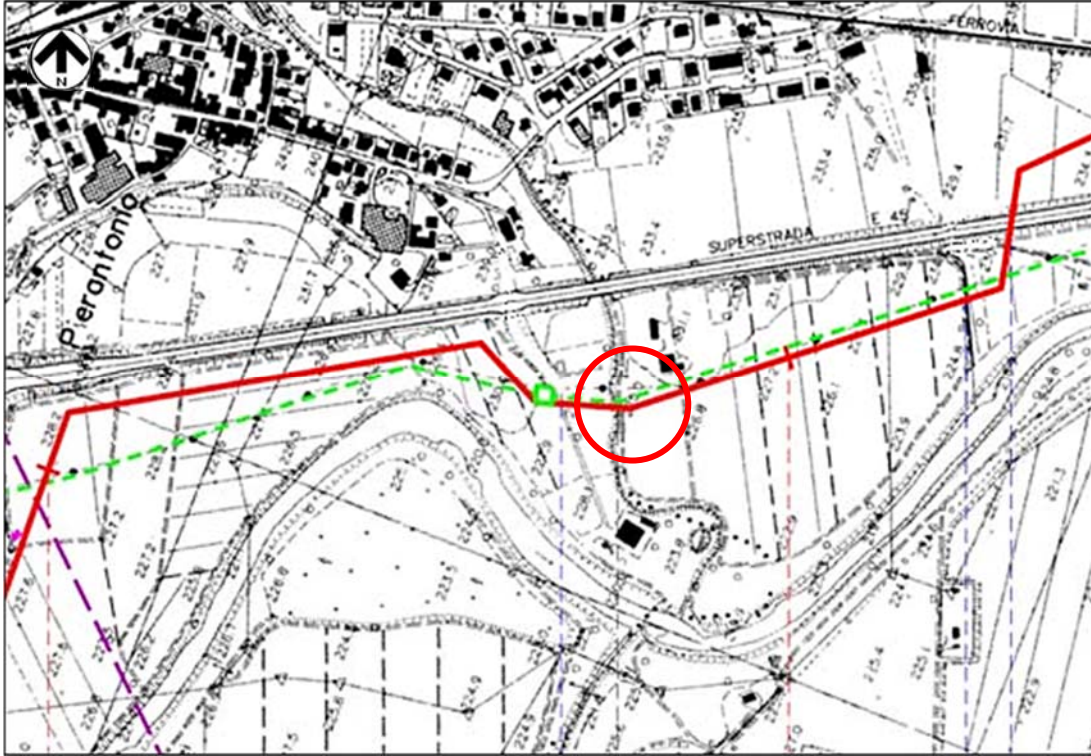


Figura 1/B – Stralcio CTR con localizzazione dell'attraversamento



Figura 2/C – Immagine aerea con localizzazione della sezione di attraversamento (su base Google Earth)

	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> <b>NR/20047</b>	<b>UNITÀ</b> <b>00</b>
	<b>LOCALITÀ</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> <b>Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse</b>	Pagina 6 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

### 3 CARATTERISTICHE IDROLOGICHE

Per la stima delle caratteristiche idrologiche del torrente, si fa riferimento allo studio effettuato nell'ambito PAI da parte del CNR IRPI di Perugia <sup>1</sup> mediante modellistica idrologica con stima della portata di massima piena al colmo in funzione del tempo di ritorno tramite un modello afflussi-deflussi semi-distribuito a scala di evento. In considerazione che la trasformazione afflussi-deflussi non comporta trasformazioni del tempo di ritorno, è stato assunto che l'idrogramma di progetto abbia lo stesso tempo di ritorno della precipitazione che lo ha generato. L'evento pluviometrico è stato schematizzato attraverso uno ietogramma sintetico del tipo a blocchi alterni con intensità stimata delle linee di possibilità pluviometrica (LSPP), ricavate con l'adattamento della distribuzione di probabilità del valore estremo a doppia componente (TCEV). Le LSPP puntuali stimate vengono estese all'intero bacino mediante un fattore di riduzione areale (v. Fig. 3/A).

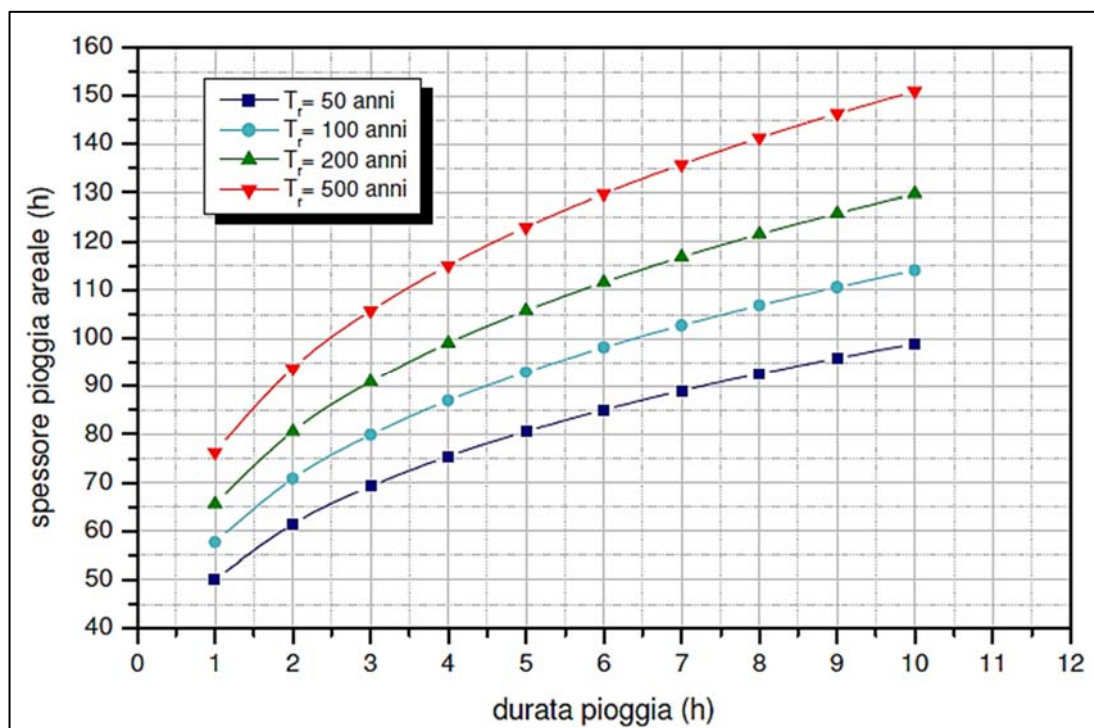
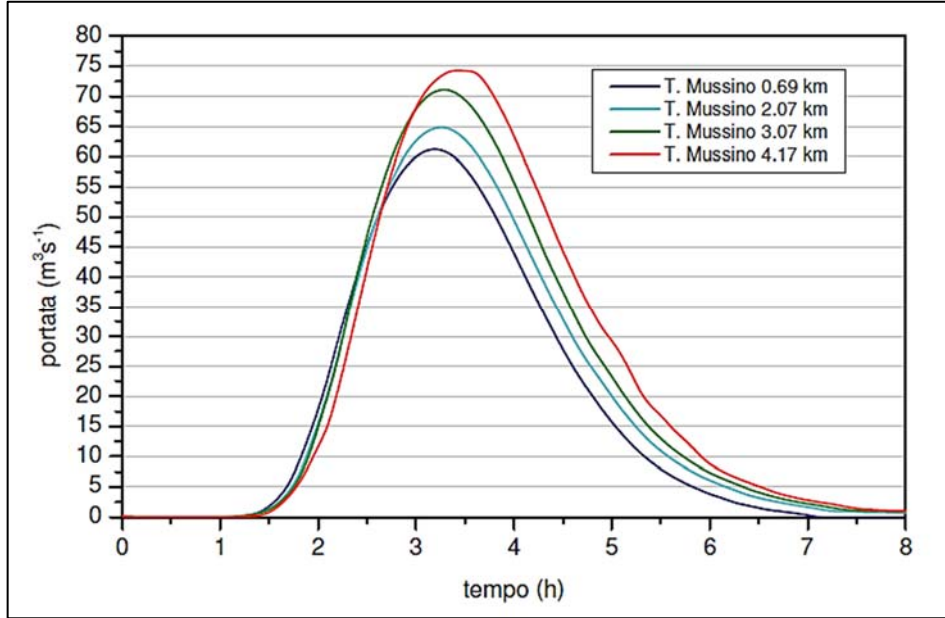


Figura 3/A – Linee segnalatrici di possibilità pluviometrica per il bacino del T. Mussino (da studio CNR-IRPI)

Lo studio idrologico ha portato alla definizione degli idrogramma di piena in funzione del tempo di ritorno per varie sezioni, come mostrato in figura 3/B. Nella tabella seguente (v. Tab. 3/A) si riporta il confronto tra i valori di portata calcolati con il metodo empirico (Ghirardelli-Giandotti) e quelli calcolati tramite modellistica semi distribuita.

<sup>1</sup> "Redazione Mappe delle Aree Allagabili finalizzata all'individuazione del rischio idraulico nel reticolo minore del Fiume Tevere, Torrente Mussino"

	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> <b>NR/20047</b>	<b>UNITÀ</b> <b>00</b>
	<b>LOCALITÀ</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> <b>Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse</b>	Pagina 7 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>



**Figura 3/B – Idrogrammi di piena in diverse sezioni**

Tempo di ritorno (anni)	$Q_p$ Ghirardelli-Giandotti ( $m^3 s^{-1}$ )	$Q_p$ Modello semi-distribuito ( $m^3 s^{-1}$ )
Sezione D (20.54 km <sup>2</sup> )		
50	37	42
100	50	56
200	65	72
500	87	95

**Tabella 3/A – Confronto dei valori di portata di massima piena alla sezione di chiusura per diversi tempi di ritorno**

	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> <b>NR/20047</b>	<b>UNITÀ</b> <b>00</b>
	<b>LOCALITÀ</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> <b>Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse</b>	Pagina 8 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

## 4 STUDIO IDRAULICO

### 4.1 Studio CNR-IRPI

La modellazione eseguita da CNR-IRPI riguarda tutto il corso d'acqua del T. Mussino da quota circa 320 m fino alla sua confluenza in Tevere a quota 220 m circa per una lunghezza di 4.07 km, comprendendo 39 sezioni idrauliche.

L'attraversamento del metanodotto si posiziona poco a monte della immissione in Tevere, a valle del ponte della superstrada E45. ed è compreso tra le sezioni dello studio CNR-IRPI n. 38 e n. 37 da cui dista egualmente 115 m (v. Fig. 4.1/A).

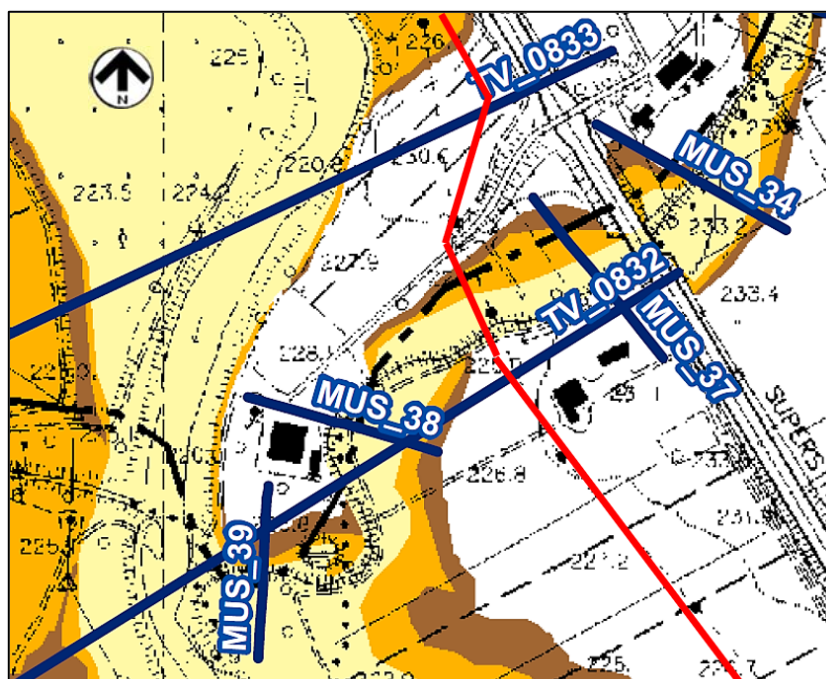


Figura 4.1/A – Localizzazione delle sezioni di studio CNR-IRPI su mappa PGRA

Per tali sezioni sono stati stimati i livelli idrici della piena duecentennale con i relativi franchi rispetto alle sommità arginale riportati nella seguente tabella (v. Tab. 4.1/A).

Torrente Mussino					
Progressiva (Km)	Argine sx (m s.l.m.)	Argine dx (m s.l.m.)	$h_p$ (m s.l.m.)	Franco sx (m)	Franco dx (m)
3.84	231.39	229.80	228.25	3.14	1.55
4.07	226.16	227.57	226.00	0.16	1.56

Tabella 4.1/A – Massimi livelli in confronto con le quote di sommità arginale

Nella figura seguente si riporta l'involuppo dei livelli idrici della piena di periodo di ritorno 200 anni e la geometria dell'alveo (v. Fig. 4.1/B).

La sezione 38 si trova alla progressiva PK 4.07 km del tratto modellato e la 37 alla PK 3.84 km. La sezione di attraversamento alla progressiva PK 3.99 km.



	<b>PROGETTISTA</b>  consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	<b>COMMESSA</b> NR/20047	<b>UNITÀ</b> 00
	<b>LOCALITÀ</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse	Pagina 9 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

Come si può osservare in Fig. 4.1/C, tratta dallo studio CNR-IRPI, il torrente Mussino determina esondazioni in occasione di piene duecentennali in una fascia intorno al corso.

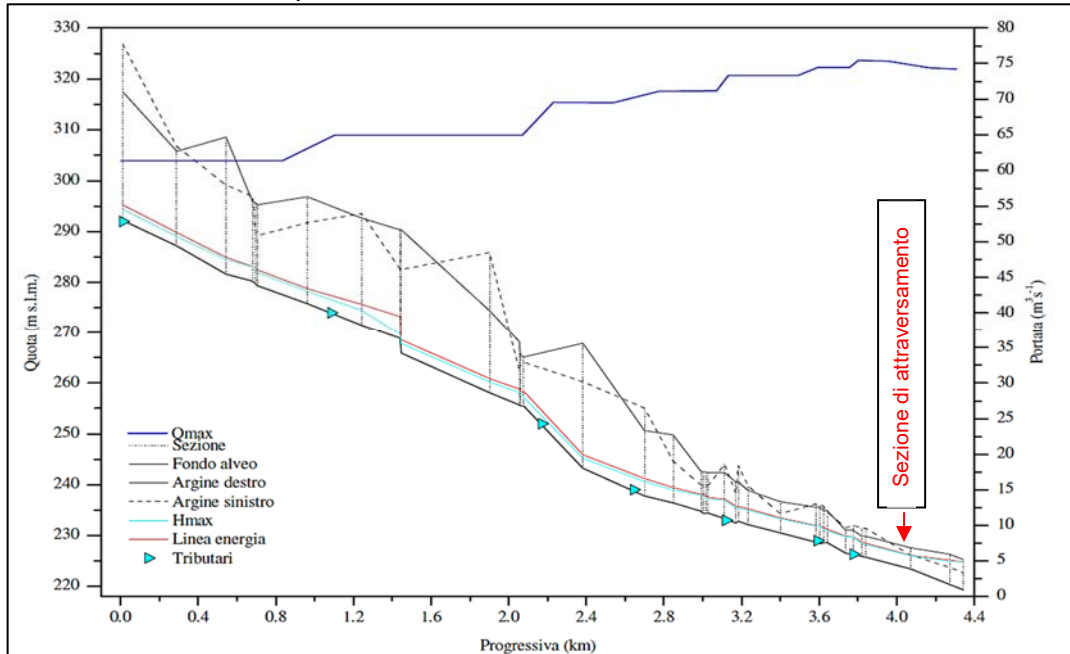


Figura 4.1/B – Involuppo dei massimi livelli calcolati per l'evento di piena con tempo di ritorno 200 anni. E' riportata anche la geometria dell'alveo.

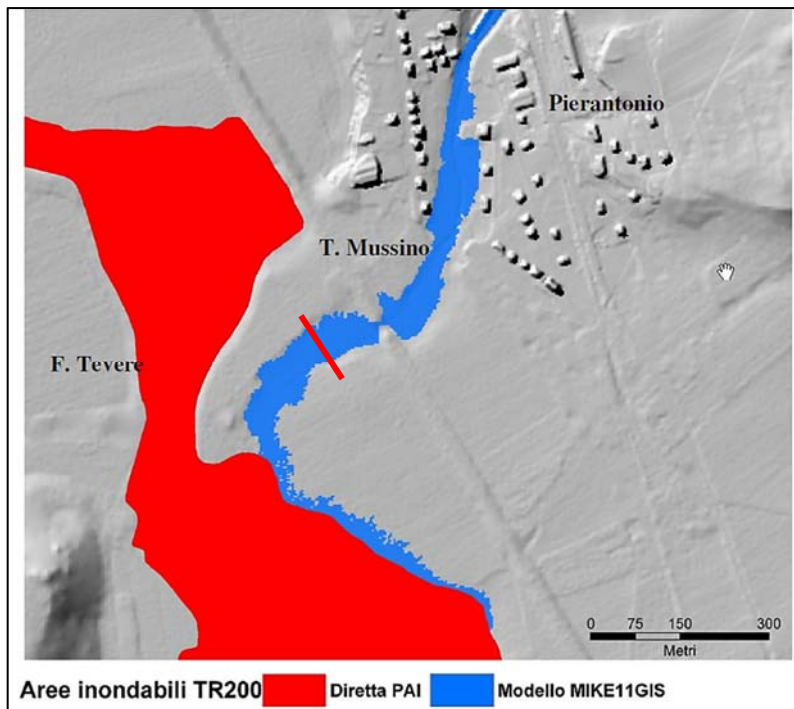


Figura 4.1/C - Mappa delle aree inondabili da parte del T. Mussino (in azzurro) per  $T_r=200$  anni (linea rossa: sezione di attraversamento)

	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> <b>NR/20047</b>	<b>UNITÀ</b> <b>00</b>
	<b>LOCALITÀ</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> <b>Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse</b>	Pagina 10 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

## 4.2 Modellazione locale

Per confronto con la modellazione del torrente Mussino eseguita nell'ambito del PAI, è stata condotta una verifica locale sempre a moto permanente per piena duecentennale (in accordo con NTC di AdB Tevere) in corrispondenza della sezione di attraversamento, sulla base dell'attuale situazione geometrica dell'alveo ricostruita tramite sezioni rilevate allo scopo.

### 4.2.1 Metodologia adottata

L'elaborazione è stata eseguita per un tratto di fiume esteso a cavallo dell'attraversamento da parte del gasdotto in progetto per una lunghezza di circa 150 m, prendendo in considerazione il valore di portata relativo al tempo di ritorno di 200 anni, come risultato dagli stuti idrologici CNR-IRPI (pari a  $Q_{200} = 72 \text{ m}^3/\text{s}$ ); sono state eseguite anche altre verifiche con differenti valori di portata via via inferiori per stimare la portata effettiva a piene rive.

I calcoli del profilo in moto permanente sono stati eseguiti per mezzo della costruzione di un modello numerico, utilizzando il codice HEC-RAS, Hydrologic Engineering Center - River Analysis System, prodotto dall'U.S. Army Corps of Engineers, di cui ampi riferimenti bibliografici sono disponibili in letteratura a riguardo sia delle basi teoriche, sia dello sviluppo numerico delle equazioni, sia di esperienze analoghe di applicazione già maturate in Italia e nel mondo. Per le simulazioni è stata utilizzata la versione 6.0.0, che simula il flusso monodimensionale in condizioni stazionarie di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali.

Il modello Hec-Ras permette di calcolare, per canali naturali od artificiali, il profilo idrico di correnti gradualmente variate ed in condizioni di moto stazionario (sia in regime di corrente lenta che di corrente veloce).

La scelta di operare con un modello che simuli le condizioni di moto permanente, scaturisce dalle seguenti considerazioni:

- la verifica idraulica considera un tratto limitato dell'asta fluviale nell'intorno della zona di interesse;
- il dimensionamento dell'intervento non dipende dallo sviluppo temporale dell'evento di piena, ma solo dal massimo valore di livello idrico raggiunto durante l'evento stesso e dai regimi delle velocità previste.

Le equazioni di conservazione del volume e della quantità di moto (equazioni di De Saint Venant) risolte nel modello sono derivate sulla base delle seguenti assunzioni:

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

Integrando le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto ed introducendo la resistenza idraulica (attrito) e le portate laterali adottate si ottiene:

	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> <b>NR/20047</b>	<b>UNITÀ</b> <b>00</b>
	<b>LOCALITÀ</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> <b>Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse</b>	Pagina 11 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

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

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

dove:

- A : area della sezione bagnata (m<sup>2</sup>);  
 C : coefficiente di attrito di Chezy (m<sup>1/2</sup>/s);  
 g : accelerazione di gravità (m/s<sup>2</sup>);  
 h : altezza del pelo libero rispetto ad un livello di riferimento orizzontale (m);  
 Q : portata (m<sup>3</sup>/s);  
 R : raggio idraulico (m);  
 α : coefficiente di distribuzione della quantità di moto;  
 q : portata laterale addotta (m<sup>3</sup>/s).

### Assetto geometrico

HEC-RAS richiede la schematizzazione del corso d'acqua con tratti successivi di lunghezza variabile individuati alle estremità da sezioni di geometria nota. La posizione delle sezioni trasversali va scelta in modo da descrivere in maniera adeguata il tratto considerato prevedendo, in linea di massima, sezioni più fitte nei tratti dove la geometria trasversale dell'alveo risulta molto variabile e più rade nei tratti in cui la geometria si mantiene piuttosto uniforme. In ogni sezione sono individuati l'alveo principale e le golene, i relativi coefficienti di Manning (scabrezza) e le eventuali arginature. Il modello è in grado di simulare gli effetti indotti sui livelli dalla presenza di sezioni singolari quali ponti, tombini, stramazzi ed ostruzioni dell'alveo.

Nel caso della modellazione in oggetto non si è fatto riferimento ad alcuna ramificazione dell'alveo simulato, implementando modelli completamente monodimensionali sulla base della geometria dell'alveo.

### Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno sono necessarie per stabilire il livello del pelo libero dell'acqua all'estremità del sistema (a monte e/o a valle). In un regime di corrente lenta, la condizione al contorno necessaria è quella di valle (se la corrente è lenta non si risente di ciò che accade a monte), mentre nel caso di corrente veloce vale l'opposto. Se invece viene effettuato un calcolo in regime di flusso misto, allora le condizioni al contorno devono essere definite a valle e a monte.

### Calcolo della velocità di deflusso

Il valore della velocità media, calcolato dal modello in riferimento alla geometria complessiva di ogni sezione trasversale, è oggetto di una reinterpretazione all'interno della sezione trasversale per la corretta valutazione del valore della velocità di deflusso da attribuire all'alveo e alla zona golenale (qualora presente) e da considerare nel calcolo del carico totale.

	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> <b>NR/20047</b>	<b>UNITÀ</b> <b>00</b>
	<b>LOCALITÀ</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> <b>Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse</b>	Pagina 12 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

Il calcolo è eseguito in riferimento alle seguenti formulazioni, che si basano sulla conservazione del valore della pendenza motrice per l'intera sezione:

$$Q = k_s \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot i^{1/2}$$

è l'equazione di Chezy, scritta con la notazione di Gauckler-Strickler per la scabrezza, con:

- $k_s$  coefficiente di scabrezza di Strickler
- $A$  area della sezione bagnata (m<sup>2</sup>)
- $R$  raggio idraulico (m)
- $i$  pendenza motrice.

Si assume che la scabrezza possa variare lungo i singoli tratti di una sezione, e che la pendenza motrice sia costante nei tratti compresi tra due sezioni del modello.

#### Risultati dei calcoli idraulici

Oltre ai valori di portata e di livello calcolati direttamente dal codice di calcolo, il modello fornisce in output anche i valori dell'area, larghezza del pelo libero, della velocità, dell'altezza d'acqua e del numero di Froude per ogni sezione di calcolo. E' fornita anche la linea del carico totale ottenuta come:

$$H = h + \alpha \frac{V^2}{2g}$$

dove:

- $h$  livello idrico (m)
- $\alpha$  coefficiente di ragguglio
- $V$  velocità media nella sezione trasversale (m/s)
- $g$  accelerazione di gravità (m/s<sup>2</sup>).

#### 4.2.2 Ricostruzione dei livelli di piena

La verifica idraulica ha lo scopo di valutare i livelli idrici raggiunti dalla piena di progetto nel tratto di interesse ed i relativi parametri idraulici, in situazione ante e post intervento, qualora diverse. Per la caratterizzazione geometrica del tratto di alveo del torrente Mussino in studio ci si è basati su di serie di 6 sezioni trasversali, di cui 3 rilevate e 2 interpolate, la cui ubicazione è riportata nello schema planimetrico di Figura e nella planimetria di **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

	<b>PROGETTISTA</b>  consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	<b>COMMESSA</b> NR/20047	<b>UNITÀ</b> 00
	<b>LOCALITÀ</b> REGIONE TOSCANA E UMBRIA	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse	Pagina 13 di 33	<b>Rev.</b> 0

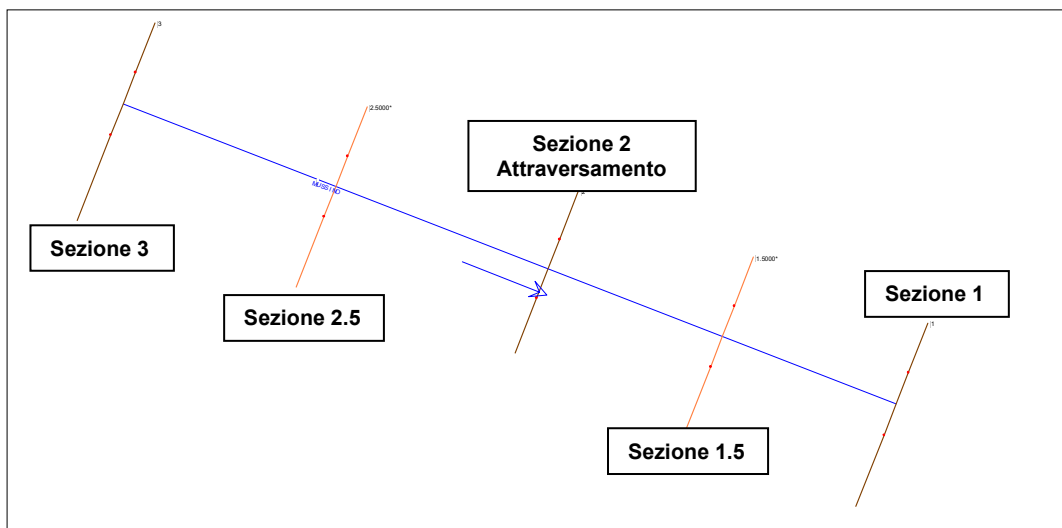


Figura 4.2.2/A – Schema delle sezioni utilizzate nella modellazione idraulica

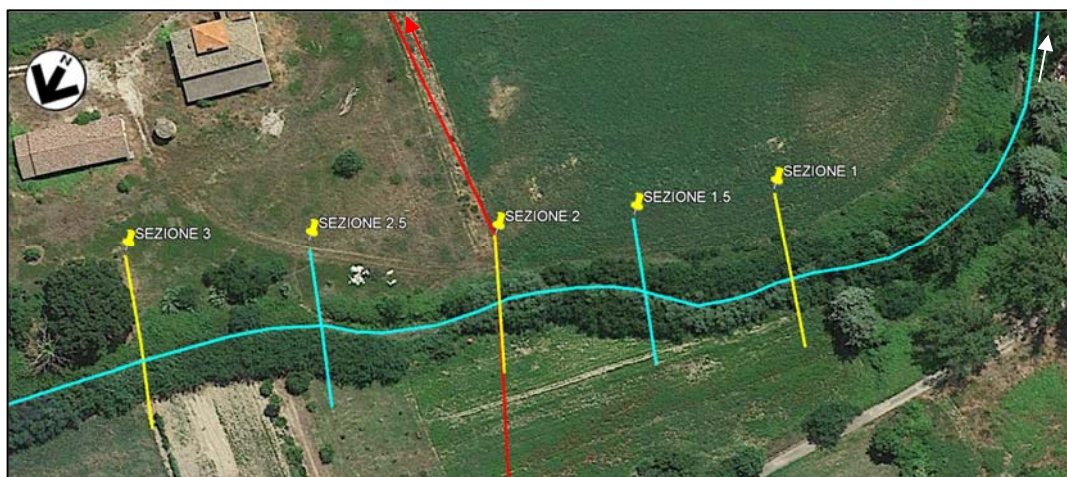


Figura 4.2.2/B – Ubicazione delle sezioni idrauliche  
(in rosso tracciato metanodotto, in giallo sezioni rilevate, in azzurro sezioni interpolate)

#### 4.2.3 Risultati della modellazione

La modellazione è stata eseguita con i valori di portata di massima piena al colmo per un evento duecentennale ( $Q=72\text{ m}^3/\text{s}$ ), come valutato dallo studio CNR-IRPI per il tratto terminale di corso.

Le verifiche hanno evidenziato che i relativi flussi idrici non sono contenuti nelle sezioni di deflusso, ma determinano esondazione sia in sinistra (in tutte le sezioni considerate) che in destra (sezione di attraversamento e a valle).

Tale risultato converge con la modellazione PAI che per il tratto a valle della E45 evidenzia aree di allagamento fino alla confluenza in Tevere.

I risultati della modellazione locale nel tratto a cavallo dell'attraversamento sono riportati in allegato 1, dove figurano il profilo idrico, le sezioni indicanti i livelli raggiunti dalle portate di piena

	<b>PROGETTISTA</b>  consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	<b>COMMESSA</b> NR/20047	<b>UNITÀ</b> 00
	<b>LOCALITA'</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse	Pagina 14 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

di progetto nonché le tabelle di dettaglio con i vari parametri idraulici per le singole sezioni esaminate.

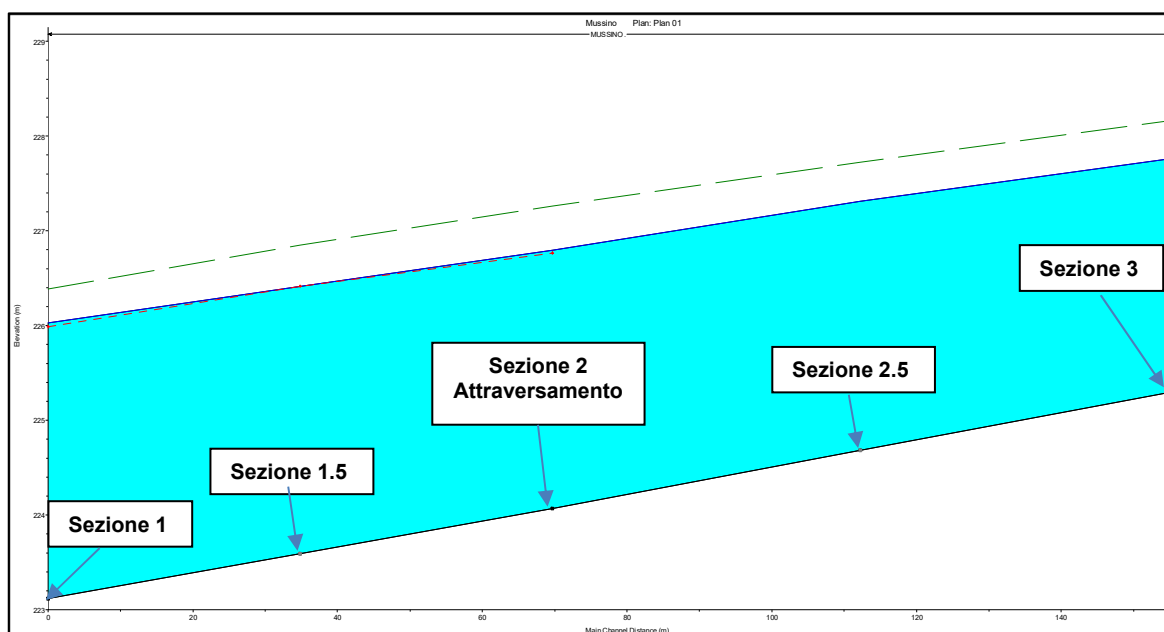
I valori dei principali parametri vengono riassunti nella tabella di seguito riportata (v. Tab. 4.3.3/A) e il profilo longitudinale viene raffigurato in Figura 4.3.3/A.

In sintesi, in relazione al tratto di interesse per i lavori in oggetto, si può osservare quanto segue:

- per tutto il tratto modellato, in caso di piena duecentennale, le sezioni non sono in grado di smaltire le portate idrologiche attese per il tempo di ritorno di 200 anni, che determinano esondazione, probabilmente già in sezioni a monte;
- la portata smaltibile a piene rive risulta di 30 m<sup>3</sup>/s sia nella sezione di attraversamento che, con leggere differenze, anche nelle altre sezioni;
- la corrente è di tipo lento con n. Froude pari a 0.78;
- il battente idrico nella sezione di attraversamento risulta essere di 2.73 m;
- la velocità della corrente nel canale è di 3.18 m/s.

Sezione	Portata	Quota fondo	Livelli idrici	Battenti idrici	Vel. golena sin	Vel. canale	Vel. golena dx	n. Froude
	(m <sup>3</sup> /s)	(m)	(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	-
1	72	225.29	227.76	2.47	1.10	3.04	1.24	0.74
1.5	72	224.68	227.31	2.63	1.34	3.05	0.95	0.74
<b>2</b>	<b>72</b>	<b>224.07</b>	<b>226.80</b>	<b>2.73</b>	<b>1.47</b>	<b>3.18</b>	<b>0.46</b>	<b>0.78</b>
2.5	72	223.59	226.41	2.82	1.62	3.13	-	0.79
3	72	223.12	226.03	2.91	1.74	2.89	-	0.73

**Tabella 4.3.3/A - Principali parametri idraulici nel tratto modellato**  
(in grassetto la sezione d'attraversamento del metanodotto)



**Figura 4.3.3/A – Profilo longitudinale con livello idrico duecentennale**

	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> <b>NR/20047</b>	<b>UNITÀ</b> <b>00</b>
	<b>LOCALITÀ</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> <b>Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse</b>	Pagina 15 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

## 5 RISCHI IDRAULICI

I rischi cui è soggetta una tubazione in corrispondenza di un attraversamento fluviale, o di un tratto di parallelismo, sono i seguenti:

1. Erosione di fondo alveo
2. Approfondimento di fondo alveo
3. Erosione spondale e relativo spostamento laterale dell'alveo
4. Cambio di percorso e taglio di meandro

### 5.1 Erosione di fondo alveo

L'erosione del fondo alveo può aver luogo a seguito della velocità della corrente rispetto ad una situazione di equilibrio, come avviene in concomitanza con le fasi di piena e in corrispondenza di zone singolari come anse, confluenze, restringimenti. Si distingue tra erosione generale lungo un tratto di corso ed erosione locale (v. Figura ).

L'erosione generale avviene a seguito di complesse interazioni tra flusso idrico, trasporto solido e morfologia del canale in genere in fase di piena. Erosione "intermittente" ha luogo durante piene in corsi d'acqua a fondo mobile quando il fondo alveo si abbassa per asportazione del materiale al fondo in corrispondenza delle massime portate (quindi massima velocità), per poi essere soggetto a sedimentazione nelle code di piena, quando la velocità diminuisce.

L'occorrenza di questo pericoloso fenomeno risulta di difficile riscontro a posteriori perché spesso non si ha una variazione del profilo di fondo pre e post piena, ma, appunto per questo, rappresenta un serio pericolo per le tubazioni installate sotto i fondi alveo a letto mobile, che possono risultare danneggiate (abrasione della protezione, bugnatura, ecc.) senza che ce ne sia evidenza, se non con esami tipo passaggio di pig.

L'erosione locale si verifica a causa di un'accelerazione della corrente a causa di una ostruzione o costrizione del flusso in corrispondenza di pile e spalle dei ponti, scogliere, massi o grossi tronchi presenti sul fondo che determinano vortici con aumento della velocità e conseguente erosione locale dei sedimenti.

I valori della profondità d'erosione possono essere stimati quantitativamente, seppur con grande cautela, sulla base delle caratteristiche idrauliche e morfologiche del corso, come indicato nel successivo paragrafo.

	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> <b>NR/20047</b>	<b>UNITÀ</b> <b>00</b>
	<b>LOCALITÀ</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> <b>Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse</b>	Pagina 16 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

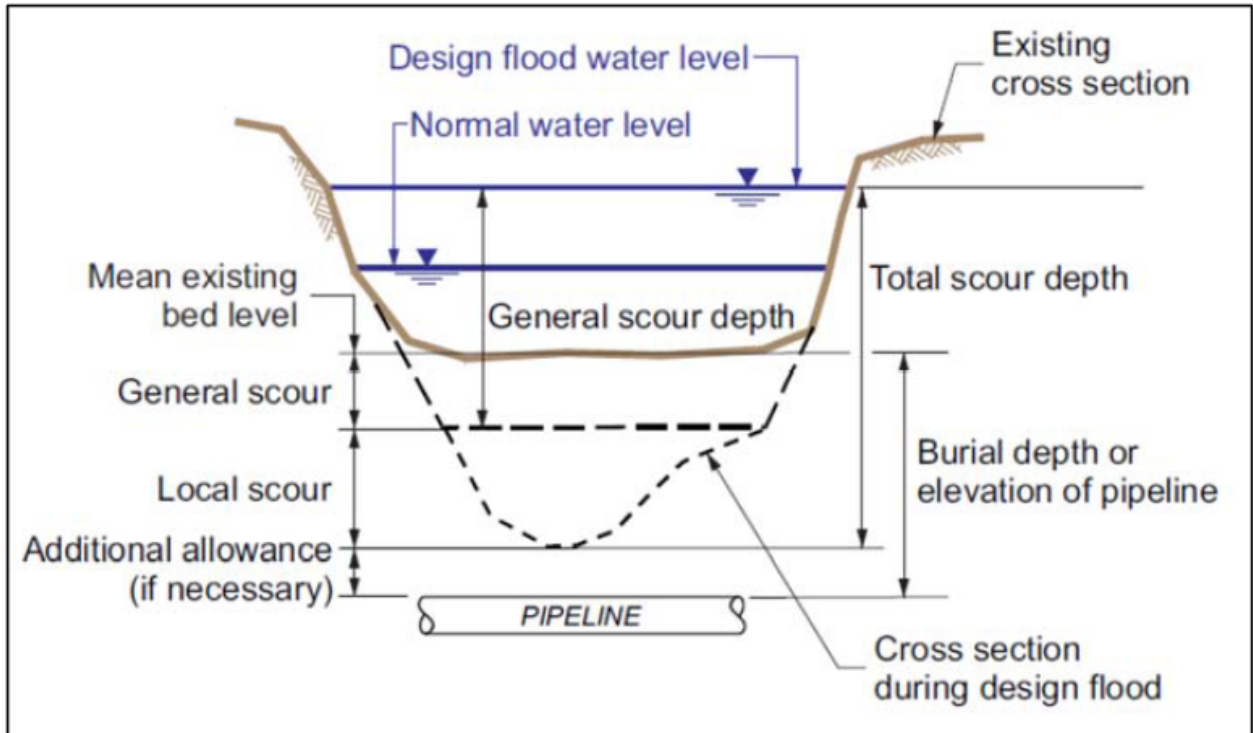


Figura 5.1/A – Schema di erosione generale e locale (da Veldeman, 2008)

## 5.2 Approfondimento di fondo alveo

Mentre per erosione di fondo si intende il fenomeno causato dal singolo evento di piena, il termine approfondimento si rivolge alla modellazione che interessa in genere lunghi tratti fondo alveo a seguito di prolungati periodi di flusso. Si potrebbe chiamare tendenza evolutiva all'approfondimento del fondo alveo.

Questo fenomeno è il risultato di un complicato processo di modellazione della morfologia del canale che tende a trovare un equilibrio con il regime di flusso.

Esso può aver luogo per aumento delle portate nel tempo, per diminuzione del materiale solido disponibile, per modifiche alla tipologia di corso (ad es. da multicursale a monocursale).

La stima della tendenza evolutiva necessita del confronto di profili fluviali rilevati in tempi diversi, nonché di osservazioni su manufatti presenti lungo il corso da tempo.

## 5.3 Erosione spondale

Le complesse modalità di trasporto e deposito del materiale alluvionale e le variazioni di velocità lungo il profilo e le sezioni fluviali, possono comportare l'erosione e lo spostamento laterale delle sponde. Tale fenomeno risulta accentuato nella parte esterna delle anse e dei meandri e nei corsi d'acqua a rami intrecciati. L'erosione può svilupparsi lentamente su lunghi periodi, ma anche nel breve volgere di una piena. La stima dell'esistenza del fenomeno si basa su osservazioni morfologiche delle sponde, delle condizioni della copertura vegetazionale e quando disponibili da misure topografiche effettuate nel tempo. Più difficile risulta stimare la potenzialità del processo quando esso non si è ancora manifestato o è quiescente da tempo.



	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> <b>NR/20047</b>	<b>UNITÀ</b> <b>00</b>
	<b>LOCALITÀ</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> <b>Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse</b>	Pagina 17 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

Il processo erosivo delle sponde comporta forti rischi per le curve di discesa/risalita delle tubazioni, che, se non localizzate a sufficiente distanza, possono venir direttamente coinvolte dal flusso idrico.

#### **5.4 Cambio di percorso e taglio di meandro**

In particolari situazioni il corso d'acqua può abbandonare il suo percorso e formare un nuovo canale. Tipiche situazioni sono in corrispondenza delle conoidi in ambiente montano, dove l'elevato trasporto solido può provocare al cambio di pendenza improvvisi depositi e ostruzioni del corso, di corsi d'acqua a rami intrecciati con passaggio da un ramo all'altro e di meandri nelle zone di bassa pianura con la formazione del cosiddetto "taglio di meandro". La differenza tra i vari processi è che nei primi due casi il fenomeno si compie in genere nel corso di un singolo evento di piena, mentre nell'ultimo progressivamente su tempi molto più lunghi.

Condotte posizionate in corrispondenza delle zone di nuovo percorso del fiume sono ovviamente a rischio di essere coinvolte dal fenomeno. In particolare potrebbe accadere che il flusso si imposti lungo la trincea di posa della tubazione, grazie alla generale minore resistenza dei terreni di riempimento rispetto al terreno in posto.

#### **5.5 Stima dello spessore di erosione generalizzata in caso di evento critico**

L'erosione generale del fondo di un corso d'acqua corrisponde all'abbassamento del letto che si può verificare durante una piena in un tratto di corso. La possibilità che una tubazione venga esposta a causa dell'erosione in un evento di piena si stima tramite la valutazione del massimo spessore di fondo alveo asportabile dalla piena di dato periodo di ritorno. Se la quota della generatrice superiore della condotta è superiore al livello di erosione previsto, allora la tubazione è da considerarsi vulnerabile nei confronti dell'evento di piena considerato.

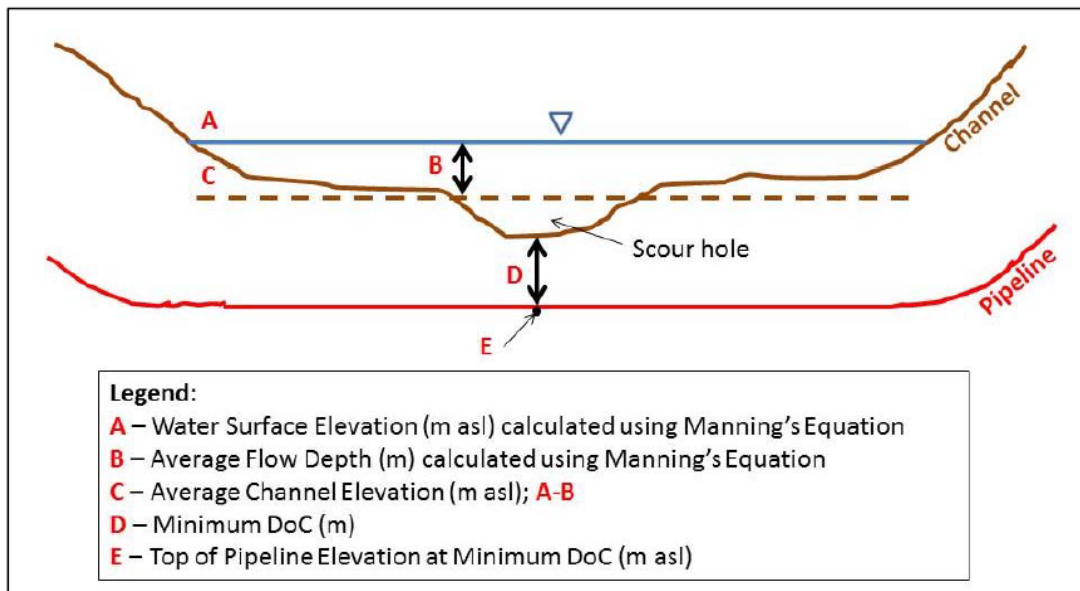
Il fenomeno è rappresentato da abbassamenti spesso transitori e reversibili dell'alveo a fondo mobile in fase di piena di difficile valutazione sia sperimentale che analitica. Essi dipendono dalle caratteristiche idrodinamiche della corrente e dal tipo di materiale costituente il fondo.

Le ricerche condotte portano ad interpretare il fenomeno nei terreni prevalentemente sabbiosi come la conseguenza di una pronunciata ondulazione del fondo che, ad opera dei cavi, incide il profilo d'alveo. Poiché il sistema di tali dune trasla verso valle, tutto l'alveo gradatamente viene interessato dalla massima depressione dei cavi.

Negli alvei torrentizi con terreni grossolani (ghiaia e ciottoli), invece, il fenomeno consiste nel rapido ed intenso modellamento del fondo con formazione di profondi solchi divaganti tra le sponde.

Il fenomeno dell'aratura di fondo è di difficile modellazione a causa delle numerosissime variabili che entrano in gioco e soprattutto delle condizioni locali, difficilmente prevedibili, che governano la dinamica del fenomeno stesso.

	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> <b>NR/20047</b>	<b>UNITÀ</b> <b>00</b>
	<b>LOCALITÀ</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> <b>Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse</b>	Pagina 18 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>



**Figura 5.5/A – Schema di calcolo dell’erosione di fondo (da Veldeman, 2008)**  
 (DoC=depth of cover, spessore di copertura)

La stima dello spessore di erosione per una data portata di progetto è assai problematica stanti i vari parametri che in effetti governano il fenomeno: geometria della sezione, caratteristiche del sedimento in posto, trasporto solido, caratteristiche del flusso idrico, ecc.; pertanto, al di là delle trattazioni analitiche, richiede grande sensibilità ed esperienza.

Tra i metodi analitici di facile approccio si segnala quello proposto da *Yamremko and Cooper (1983)* che assume la proporzionalità dello spessore di erosione in corrispondenza di un dato evento idrologico critico con l’altezza idrometrica media (=rapporto tra area del flusso e perimetro bagnato) secondo la seguente relazione:

$$d_s = z_n \cdot d_m$$

dove:  $d_s$  = spessore dell’erosione al di sotto del letto  
 $d_m$  = altezza idrometrica al di sopra del livello medio del canale inciso  
 $z_n$  = fattore di correzione, funzione della morfologia del canale (v. Tab. 5.5/A)

Channel Morphology	Correction Factor (z-factor)
Straight Reach	0.25
Moderate Bend	0.5
Severe Bend	0.75

**Tabella 5.5/A – Fattore empirico di correzione**  
 (da Joyce and Chandler, 2004)

	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> <b>NR/20047</b>	<b>UNITÀ</b> <b>00</b>
	<b>LOCALITÀ</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> <b>Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse</b>	Pagina 19 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

Simile al metodo soprariportato di *Yamremko and Cooper*, si può far ricorso al metodo cosiddetto *Regime di Neill* (1964) secondo il quale:

$$d_s = z'_n \cdot d_i \cdot (q_i/q_p)^m$$

dove:  $d_s$  = spessore dell'erosione al di sotto del letto

$d_i$  = altezza idrometrica sopra il livello medio del canale inciso in caso di piene rive

$z'_n$  = fattore di correzione, funzione della morfologia del canale (v. Tab. 5.5/B)

$q_i, q_p$  = rispettivamente la portata unitaria nel caso di piene rive e di piena di progetto

$m$  = esponente pari a  $0.67 \div 0.85$  in funzione della granulometria.

Channel Morphology	Correction Factor (z-factor)
Straight Reach	0.5
Moderate Bend	0.6
Severe Bend	0.7

**Tabella 5.5/B – Fattore empirico di correzione**  
(da Pemberton and Lara, 1984)

In Italia è anche prassi utilizzare una prudenziale generalizzazione, proposta da Zanovello<sup>2</sup>, che valuta l'erosione di fondo transitoria durante le piene pari al 50% del battente idrico, indipendentemente dalla natura del fondo e dal regime di corrente.

Nel tratto in esame si calcola che eventuali fenomeni di erosione generalizzata potrebbero avere una profondità massima di 0.70, in assenza di opere di protezione e stabilizzazione d'alveo.

## 5.6 Approfondimenti localizzati (buche in alveo)

Essi consistono in fenomeni di scavo localizzato, che si producono nel letto di un fiume in genere in fase di piena, dovuti perlopiù ai seguenti motivi:

- allontanamento della corrente dalle condizioni di moto uniforme e creazione di filetti particolarmente veloci
- presenza di ostacoli trasversali al moto
- irregolarità geometriche dell'alveo.

In qualche caso essi sono ben prevedibili, come ad es. in corrispondenza di manufatti (pile di ponti, testa di pennelli, a valle di briglie, etc.); in altri casi essi dipendono da situazioni contingenti, spesso casuali, che si vengono a produrre in fase di piena (tronchi d'albero, trovanti, etc.).

Il meccanismo che porta alla formazione delle buche può avvenire secondo i due seguenti schemi:

<sup>2</sup> Zanovello A., Sulle variazioni di fondo alveo durante le piene. L'Energia elettrica, XXXIV, n. 8; 1959.

	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> <b>NR/20047</b>	<b>UNITÀ</b> <b>00</b>
	<b>LOCALITÀ</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> <b>Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse</b>	Pagina 20 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

- vena veloce superficiale con sottostante zona di turbolenza in cui il materiale di fondo viene eroso all'indietro, indi sollevato e portato via dalla vena superficiale
- vena veloce aderente al fondo che trasporta il materiale verso valle, con sovrastante zona di turbolenza.

La buca non si approfondisce indefinitivamente, ma tende ad una condizione d'equilibrio con pendenze prossime all'angolo di riposo del materiale d'alveo. La profondità della buca (s) è di incerta stima; fra le numerose relazioni proposte dagli Autori si ricordano le seguenti:

$$s = 0,378 \cdot H^{0,5} \cdot q^{0,35} + 2,15 \cdot a \quad (\text{Schoklitsch})^3$$

$$s = 0,65 \cdot (H-h') \cdot q^{3/5} \cdot D_{90}^{-2/5} - h \quad (\text{Eggemberger})$$

$$s = h \cdot (1,82 - 1,64(1 - e^{-(\lg \tau_c / \rho v^2 + 7)})) \cdot (94 - 8 \lg \tau_c / \rho v^2)^{-1} \cdot 10^3 \quad (\text{Adami})^4.$$

Nel presente studio è stata utilizzata la relazione di Schoklitsch nella quale:

- s** = profondità massima della buca sulla quota media dell'alveo (m);  
**H** =  $h + v^2/2g$ : carico totale a monte della buca (m);  
**h** = altezza idrometrica sul livello medio del fondo<sup>5</sup>;  
**v** = velocità media nell'alveo inciso (m/s);  
**q** = Q/L: portata per unità di larghezza dell'alveo (m<sup>3</sup>/s m);  
**Q** = portata nell'alveo inciso (m<sup>3</sup>/s);  
**L** = larghezza dell'alveo inciso (m);  
**a** = dislivello delle quote d'alveo a monte e a valle della buca.

E' stato eseguito il calcolo per la sezione di attraversamento, utilizzando i valori dei parametri output del programma di calcolo Hec Ras per tale sezione, come riportato nella seguente tabella:

Altezza canale	$h_{ch}$	1,68 m
Velocità canale	$v_{ch}$	3,18 m/s
Portata canale	$Q_{ch}$	62,78 m <sup>3</sup> /s
Larghezza canale	$L_{ch}$	11,74 m
Portata unitaria	$q_{ch}$	5,35 m <sup>3</sup> /s/m
Carico totale	$H_{ch}$	1,77 m
Dislivello buca	a	0,01 m
<b>Approf. local.</b>	<b>s</b>	<b>0,93 m</b>

<sup>3</sup> Schoklitsch. A, Stauraum verlandung und kolkbewehr, Springer Ed., Vienna, 1935.

<sup>4</sup> Adami A., Fenomeni localizzati ed erosioni negli alvei, Atti "Moderne vedute sulla meccanica dei fenomeni fluviali", CNR; P.F. Conservazione del suolo, 1979.

<sup>5</sup> Hydr Depth C Hydraulic depth in channel (channel flow area/topwidth of channel flow)

	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> <b>NR/20047</b>	<b>UNITÀ</b> <b>00</b>
	<b>LOCALITÀ</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> <b>Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse</b>	Pagina 21 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

Il calcolo ha evidenziato che nella sezione di attraversamento gli approfondimenti localizzati possono avere una profondità di 0.93 m dal livello medio dell'alveo.

#### Diametro limite dei clasti

Si è proceduto alla determinazione del diametro limite dei clasti trasportabili dalla piena, utilizzando il procedimento di Shields secondo il quale sussiste la relazione sottoriportata che lega la spinta idrodinamica su particelle di granulometria uniforme e la distribuzione delle velocità lungo la verticale:

$$\tau_o / [(\gamma_s - \gamma)d] = f [(d(ghi)^{1/2} / \mu)] = f (V^* d / \mu)$$

in cui:

- $\tau_o$  = tensione tangenziale ( $\text{kg/m}^2$ );
- $\gamma_s$  = peso specifico delle particelle ( $\text{kg/m}^3$ );
- $\gamma_w$  = peso specifico dell'acqua ( $1000 \text{ kg/m}^3$ );
- $d$  = diametro medio del materiale di fondo ( $d = d_{50}$ ) (m);
- $g$  = accelerazione di gravità ( $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ );
- $h$  = profondità della corrente idrica (m);
- $i$  = pendenza del fondo alveo;
- $\mu$  = viscosità cinematica ( $\text{m}^2/\text{s}$ );
- $V^*$  = velocità d'attrito (m/s);

Si ha inoltre:

$$V^* = (\tau_o / \delta)^{1/2} \quad \text{e} \quad \tau_o = (V^2 / X^2)$$

in cui:

- $\delta$  = densità dell'acqua ( $= 102 \text{ kg} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4$ );
- $V$  = velocità media della corrente idrica (m/s);
- $X$  = coefficiente di scabrezza.

Queste ultime grandezze sono note per cui è possibile determinare il valore di " $\tau_o$ " e di " $V^*$ "; inoltre, per valori di " $V^*d / \mu$ " maggiori di 500, che nei corsi d'acqua naturali si verificano con alvei ciottolosi, il valore " $\tau_o / [(\gamma_s - \gamma_w)d]$ " è costante ed è pari a 0.06, cioè:

$$\tau_o / [(\gamma_s - \gamma_w)d] = 0.06$$

Esplicitando tale relazione in funzione dell'unica incognita si otterrà il diametro limite dei clasti trasportabili:

$$d = \tau_o / [0.06 (\gamma_s - \gamma_w)]$$

Sulla base dei risultati della modellazione idraulica è emerso che nella sezione interessata dal attraversamento del metanodotto in progetto la corrente può esercitare nel canale una tensione tangenziale massima in caso di piena duecentennale  $\tau_o = 174 \text{ N/m}^2$ , cui corrisponde una capacità di trasporto massima di un clasto di circa 20 cm. Questo in corrispondenza dell'alveo attivo, mentre in area di esondazione tale capacità di trasporto risulta sensibilmente inferiore.

	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> <b>NR/20047</b>	<b>UNITÀ</b> <b>00</b>
	<b>LOCALITÀ</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> <b>Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse</b>	Pagina 22 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

## 5.7 Risultati delle verifiche

Sulla base dei risultati delle verifiche idrauliche effettuate, delle informazioni cartografiche e di immagini aeree riprese in periodi diversi, nonché dei sopralluoghi condotti in posto, si possono effettuare le seguenti osservazioni:

- stabilità planimetrica: essendo le sponde fissate dalla vegetazione, poco a valle di un ponte che ne fissa la posizione, e dalle evidenze di assenza di fenomeni erosivi laterali, si ritiene che il corso d'acqua risulti planimetricamente stabile; anche l'esame di immagini aeree pregresse confermano la sostanziale stabilità planimetrica;
- stabilità altimetrica: non si sono osservati evidenti segni di tendenza all'approfondimento generalizzato dell'alveo;
- approfondimenti temporanei in fase di piena: gli spessori di fondo alveo mobilizzabili temporaneamente in fase di piena si sono stimati, utilizzando la metodologia sopra riportata, in circa 0.70 m, e la profondità di buche locali in alveo risulta pari a circa 0.93 m.

	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> <b>NR/20047</b>	<b>UNITÀ</b> <b>00</b>
	<b>LOCALITÀ</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> <b>Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse</b>	Pagina 23 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

## 6 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il tracciato del metanodotto in oggetto “*Metanodotto Sansepolcro-Foligno, DN 400 (16”) – DP 75 bar*” attraversa l’alveo del torrente Mussino, nel territorio dei comuni di Umbertide e di Perugia (PG).

La sezione prevista di attraversamento si localizza nell’ambito della parte terminale del corso d’acqua, poco distante dalla sua confluenza in Tevere. L’alveo, inciso nel fondovalle pianeggiante, è fissato da vegetazione spondale.

L’alveo ha una larghezza di fondo di circa 3 m e di circa 10 m tra le sommità delle sponde. Il terreno che costituisce il fondo alveo è costituito da alluvione fluviale prevalentemente di natura incoerente con ghiaie e sabbia.

Lo studio idrologico-idraulico condotto per il tratto a cavallo dell’attraversamento ha evidenziato che le portate di massima piena non sono contenute nelle sezioni ma provocano esondazione. Questo converge con quanto risulta dalla modellazione in ambito PAI che segnala fasce di esondazione sia in destra che in sinistra.

I parametri della corrente in corrispondenza dell’attraversamento sono così riassumibili:

- battente idrico: 2.73 m
- velocità della corrente: 3.18 m/s

Sulla base di tali parametri si sono stimati anche gli eventuali massimi approfondimenti che l’alveo, qualora privo di interventi di protezione, potrebbe subire in fase di piena critica (circa 0.90 m).

La tubazione verrà installata in subalveo con la tecnica dello scavo a cielo aperto, ad una profondità che garantisca una copertura minima di 2.5 m. Saranno eseguite opere di protezione tramite platea e rivestimento spondale in massi estese a tutta l’area interessata dai lavori.

	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> <b>NR/20047</b>	<b>UNITÀ</b> <b>00</b>
	<b>LOCALITÀ</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> <b>Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse</b>	Pagina 24 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

## ALLEGATO 1

### RISULTATI DELLA MODELLAZIONE IDRAULICA

**Tr= 200 anni**



	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> <b>NR/20047</b>	<b>UNITÀ</b> <b>00</b>
	<b>LOCALITA'</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> <b>Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse</b>	Pagina 25 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

## LEGENDA

Reach	Ramo fluviale
River Sta	Sezione fluviale
Q Total (m <sup>3</sup> /s)	Portata complessiva defluente nell'intera sezione trasversale
Min Ch El (m)	Minima quota dell'alveo nel canale principale
W.S. Elev (m)	Quota del pelo libero
Crit W.S. (m)	Quota critica del pelo libero
E.G. Elev (m)	Quota della linea del carico totale per il profilo liquido calcolato
E.G. Slope (m/m)	Pendenza della linea del carico totale
Vel Chnl (m/s)	Velocità media nel canale principale
Flow Area (m <sup>2</sup> )	Area totale della sezione liquida effettiva
Top Width (m)	Larghezza superficiale della sezione liquida
Froude # Chl	Numero di Froude nell'alveo principale
EG PF....	Linea del carico totale per il profilo liquido calcolato
WS PF....	Linea del pelo libero per il profilo liquido calcolato
Ground	Profilo del terreno
Bank Sta	Limite della sponda fluviale

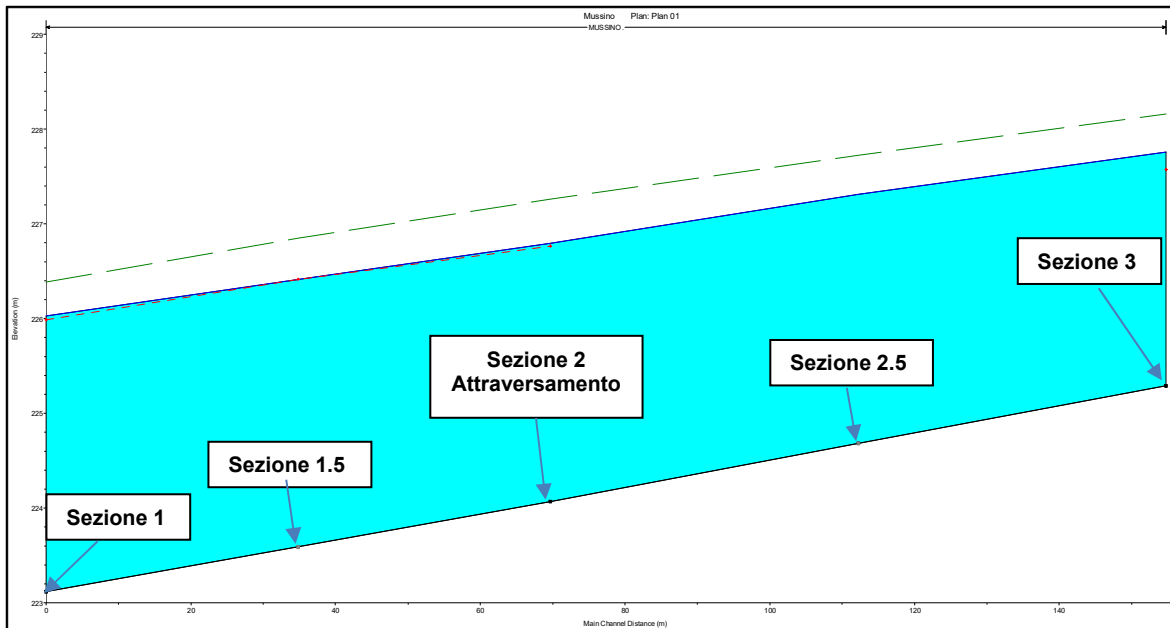
	<b>PROGETTISTA</b>  consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	<b>COMMESSA</b> NR/20047	<b>UNITÀ</b> 00
	<b>LOCALITÀ</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse	Pagina 26 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

### TABELLA RIASSUNTIVA RISULTATI MODELLAZIONE

Sezione	Portata (m <sup>3</sup> /s)	Quota fondo (m)	Livelli idrici (m)	Battenti idrici (m)	Vel. golena sin (m/s)	Vel. canale (m/s)	Vel. golena dx (m/s)	n. Froude
								-
1	72	225.29	227.76	2.47	1.10	3.04	1.24	0.74
1.5	72	224.68	227.31	2.63	1.34	3.05	0.95	0.74
<b>2</b>	<b>72</b>	<b>224.07</b>	<b>226.80</b>	<b>2.73</b>	<b>1.47</b>	<b>3.18</b>	<b>0.46</b>	<b>0.78</b>
2.5	72	223.59	226.41	2.82	1.62	3.13		0.79
3	72	223.12	226.03	2.91	1.74	2.89		0.73

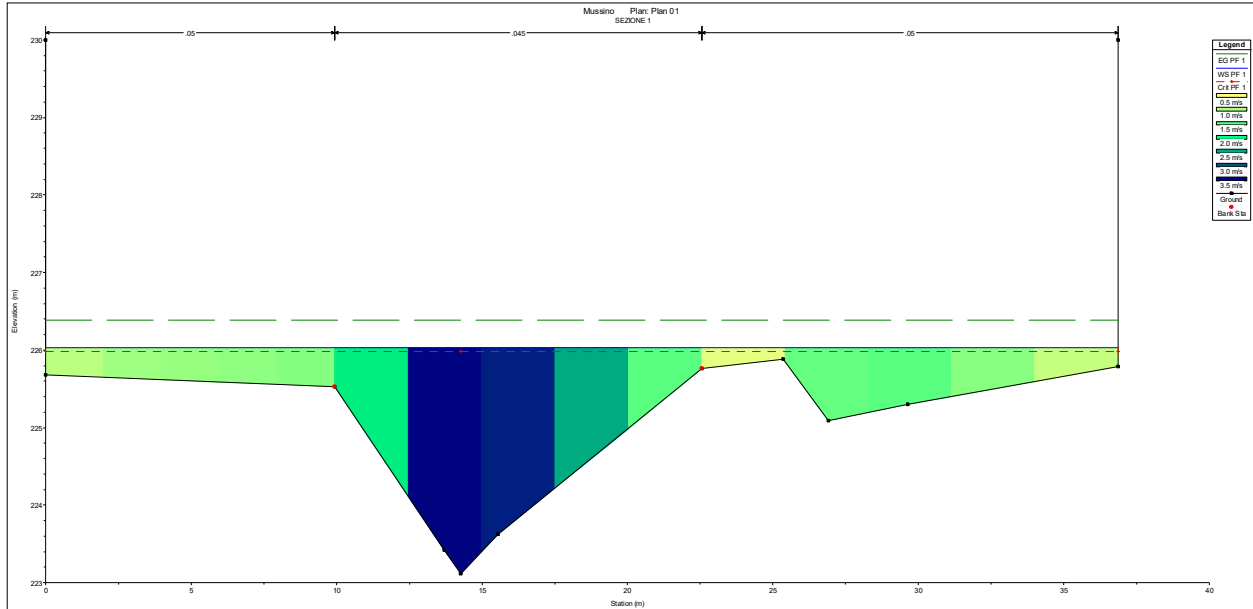
(in grassetto la sezione d'attraversamento del metanodotto)

### PROFILO LONGITUDINALE CON LIVELLO IDRICO DUECENTENNALE

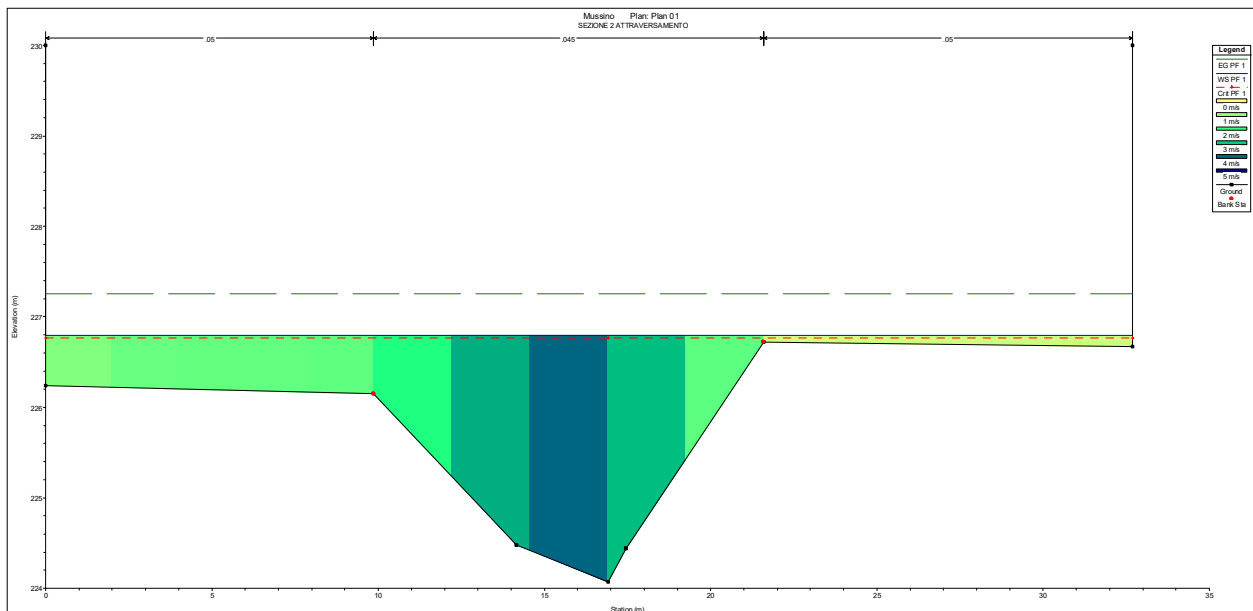


	<b>PROGETTISTA</b>  consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	<b>COMMESSA</b> NR/20047	<b>UNITÀ</b> 00
	<b>LOCALITÀ</b> REGIONE TOSCANA E UMBRIA	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse	Pagina 27 di 33	<b>Rev.</b> 0

SEZIONI (da valle a monte)

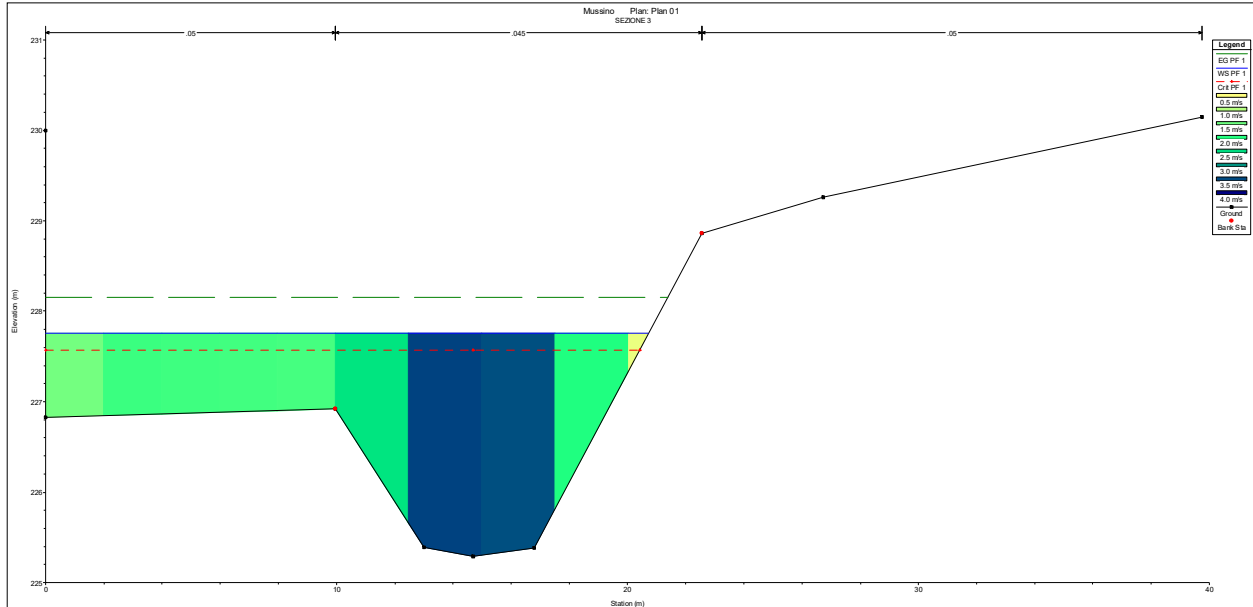


SEZIONE 1 (vista da valle)



SEZIONE 2 (vista da valle)

	<b>PROGETTISTA</b>  consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	<b>COMMESSA</b> NR/20047	<b>UNITÀ</b> 00
	<b>LOCALITA'</b> REGIONE TOSCANA E UMBRIA	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse	Pagina 28 di 33	<b>Rev.</b> 0



SEZIONE 3 (vista da valle)

RISULTATI DI DETTAGLIO (da valle a monte)

Plan:					
		Element	Left OB	Channel	Right OB
E.G. Elev (m)	226.39	Wt. n-Val.	0.050	0.045	0.050
Vel Head (m)	0.36	Reach Len. (m)			
W.S. Elev (m)	226.03	Flow Area (m <sup>2</sup> )	4.22	20.22	7.22
Crit W.S. (m)	225.99	Area (m <sup>2</sup> )	4.22	20.22	7.22
E.G. Slope (m/m)	0.010009	Flow (m <sup>3</sup> /s)	4.67	58.37	8.96
Q Total (m <sup>3</sup> /s)	72.00	Top Width (m)	9.94	12.62	14.31
Top Width (m)	36.87	Avg. Vel. (m/s)	1.10	2.89	1.24
Vel Total (m/s)	2.27	Hydr. Depth (m)	0.42	1.60	0.50
Max Chl Dpth (m)	2.91	Conv. (m <sup>3</sup> /s)	46.6	583.5	89.6
Conv. Total (m <sup>3</sup> /s)	719.7	Wetted Per. (m)	10.29	13.66	14.77
Length Wtd. (m)		Shear (N/m <sup>2</sup> )	40.27	145.27	47.97
Min Ch El (m)	223.12	Stream Power (N/m s)	44.50	419.45	59.56
Alpha	1.36	Cum Volume (1000 m <sup>3</sup> )			
Frctn Loss (m)		Cum SA (1000 m <sup>2</sup> )			
C & E Loss (m)					

SEZIONE 1

	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> <b>NR/20047</b>	<b>UNITÀ</b> <b>00</b>
	<b>LOCALITA'</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> <b>Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse</b>	Pagina 29 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

Plan:					
E.G. Elev (m)	227.26	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.46	Wt. n-Val.	0.050	0.045	0.050
W.S. Elev (m)	226.80	Reach Len. (m)	34.83	34.83	34.83
Crit W.S. (m)	226.77	Flow Area (m2)	5.91	19.73	1.11
E.G. Slope (m/m)	0.011502	Area (m2)	5.91	19.73	1.11
Q Total (m3/s)	72.00	Flow (m3/s)	8.70	62.78	0.51
Top Width (m)	32.70	Top Width (m)	9.85	11.74	11.11
Vel Total (m/s)	2.69	Avg. Vel. (m/s)	1.47	3.18	0.46
Max Chl Dpth (m)	2.73	Hydr. Depth (m)	0.60	1.68	0.10
Conv. Total (m3/s)	671.4	Conv. (m3/s)	81.1	585.4	4.8
Length Wtd. (m)	34.83	Wetted Per. (m)	10.41	12.78	11.24
Min Ch El (m)	224.07	Shear (N/m2)	64.10	174.06	11.19
Alpha	1.26	Stream Power (N/m s)	94.33	553.98	5.15
Frctn Loss (m)	0.40	Cum Volume (1000 m3)	0.35	1.38	0.28
C & E Loss (m)	0.01	Cum SA (1000 m2)	0.69	0.85	0.89

### SEZIONE 2 Attraversamento

Plan:					
E.G. Elev (m)	227.26	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.46	Wt. n-Val.	0.050	0.045	0.050
W.S. Elev (m)	226.80	Reach Len. (m)	34.83	34.83	34.83
Crit W.S. (m)	226.77	Flow Area (m2)	5.91	19.73	1.11
E.G. Slope (m/m)	0.011502	Area (m2)	5.91	19.73	1.11
Q Total (m3/s)	72.00	Flow (m3/s)	8.70	62.78	0.51
Top Width (m)	32.70	Top Width (m)	9.85	11.74	11.11
Vel Total (m/s)	2.69	Avg. Vel. (m/s)	1.47	3.18	0.46
Max Chl Dpth (m)	2.73	Hydr. Depth (m)	0.60	1.68	0.10
Conv. Total (m3/s)	671.4	Conv. (m3/s)	81.1	585.4	4.8
Length Wtd. (m)	34.83	Wetted Per. (m)	10.41	12.78	11.24
Min Ch El (m)	224.07	Shear (N/m2)	64.10	174.06	11.19
Alpha	1.26	Stream Power (N/m s)	94.33	553.98	5.15
Frctn Loss (m)	0.40	Cum Volume (1000 m3)	0.35	1.38	0.28
C & E Loss (m)	0.01	Cum SA (1000 m2)	0.69	0.85	0.89

### SEZIONE 3

	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> <b>NR/20047</b>	<b>UNITÀ</b> <b>00</b>
	<b>LOCALITA'</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> <b>Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse</b>	Pagina 30 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

## ALLEGATO 2

### DIMENSIONAMENTO MASSI PER SCOGLIERA

	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> <b>NR/20047</b>	<b>UNITÀ</b> <b>00</b>
	<b>LOCALITÀ</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> <b>Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse</b>	Pagina 31 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

L'intervento in progetto comprende opere di protezione idraulica sia di sponda che di fondo realizzati in pietrame di grosse dimensioni.

Al fine di dimensionare la dimensione degli elementi da utilizzare si è fatto riferimento al metodo proposto da USACE, NO 10 (US Army Corps of Engineers) e riportato su EM (Engineer Manual 1110-2-1601).

Secondo tale metodo il dimensionamento degli elementi viene stimato secondo la seguente relazione:

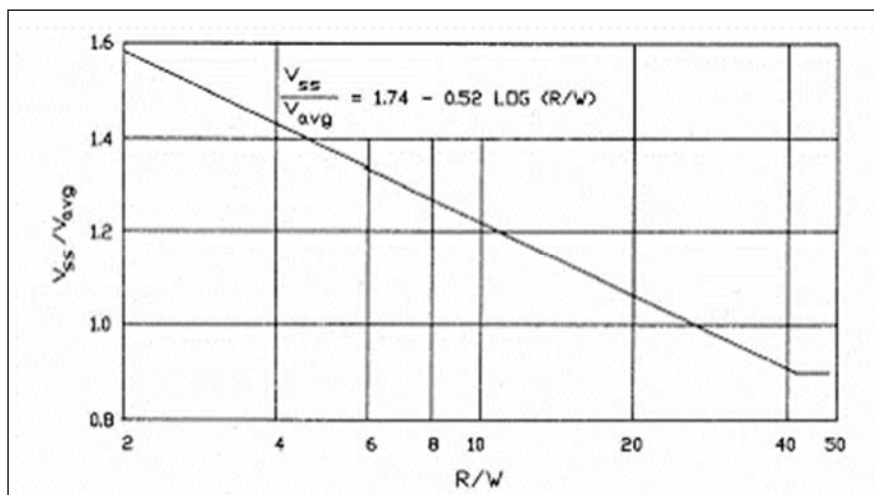
$$D_{30} = S_f \cdot C_s \cdot C_v \cdot C_t \cdot d \cdot \left( \frac{\gamma_w}{(\gamma_s - \gamma_w)} \right)^{1/2} \cdot V / (K_1 \cdot g \cdot d)^{1/2} \wedge 2.5$$

dove:

- $D_{30}$ = dimensione dei massi di cui il 30% è di peso inferiore
- $S_f$ = fattore di sicurezza = 1.1÷ 2.0
- $C_s$ = coefficiente di stabilità del blocco = 0.30÷ 0.375
- $C_v$ = coefficiente della distribuzione della velocità con la profondità  
= 1 per tratti rettilinei, =1.283-0.2 log R/W parte esterna curve
- $C_t$ = coefficiente di spessore= 1 (per spessore =D100)  
1.5 (per spessore = 1.5 D50)
- $d$ = battente idrico locale
- $\gamma_w$ = peso di volume dell'acqua= 10 kN/m<sup>3</sup>
- $\gamma_s$ = peso di volume dei massi= 24÷27kN/m<sup>3</sup>
- $V$ = velocità locale della corrente
- $K_1$ = fattore correttivo per l'inclinazione della scogliera  
=  $(1 - \sin^2\theta / \sin^2\phi)^{1/2}$
- $g$ = accelerazione di gravità
- $\theta$  = inclinazione della scogliera
- $\phi$ = angolo di attrito tra massi

Quando le opere di protezione spondale sono localizzate in tratti con curvatura, si tiene conto della differente distribuzione della velocità nell'ambito della sezione, in particolare del fatto che essa risulta maggiore sul lato esterno (v. Fig.1).

	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> <b>NR/20047</b>	<b>UNITÀ</b> <b>00</b>
	<b>LOCALITÀ</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> <b>Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse</b>	Pagina 32 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>



**Figura 1 – Rapporto velocità ansa esterna/ velocità media in funzione del rapporto raggio curvatura/larghezza canale**

Le opere di difesa spondale in progetto comprendono tratti rettilinei e tratti interni ed anche esterni di ansa.

Il tratto di protezione per il quale sono previste opere in massi risulta a cavallo della sezione 2; le velocità massime del flusso idrico nel canale in tale tratto risultano di 3.2 m/s. Nel calcolo si usa prudenzialmente la velocità di 3.5 m/s.

Nel calcolo non si tiene in conto l'aumento della velocità nella parte esterna dell'ansa in funzione della sua curvatura in quanto nel caso in studio il corso d'acqua è circa rettilineo.

Dai calcoli effettuati (v. Fig. 2) si evidenzia che una protezione in massi con paramento di pendenza 2/3 dovrà avere un D<sub>30</sub> pari a circa 50 cm.

Sulla base di tali indicazioni, il progetto prevede cautelativamente l'impiego di massi di maggiore dimensione, con un volume non inferiore a 0.2 m<sup>3</sup> ciascuno, cui corrisponde un peso di circa 500 kg, intasati con scapolame di minori dimensioni e terra vegetale. Lo spessore sia della platea di fondo che del rivestimento spondale sarà di 1.0 m.



	<b>PROGETTISTA</b>  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	<b>COMMESSA</b> <b>NR/20047</b>	<b>UNITÀ</b> <b>00</b>
	<b>LOCALITÀ</b> <b>REGIONE TOSCANA E UMBRIA</b>	<b>LSC-140/ALL. A</b>	
	<b>PROGETTO</b> <b>Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse</b>	Pagina 33 di 33	<b>Rev.</b> <b>0</b>

CALCOLO DIMENSIONE MASSI PER SCOGLIERA			
$D_{30} = S_f \cdot C_s \cdot C_v \cdot C_t \cdot d \cdot ((\gamma_w / (\gamma_s - \gamma_w))^{1/2} \cdot V / (K_1 \cdot g \cdot d)^{1/2})^{2.5}$			
			INPUT
D30	dimensione dei massi di cui il 30% è di peso inferiore	m	
Sf	fattore di sicurezza = 1.1÷ 2.0		1.3
Cs	coefficiente di stabilità del blocco = 0.30÷ 0.375		0.3
Cv	coefficiente della distribuzione della velocità con la profondità = 1 per tratti rettilinei, 1.283-0.2 log R/W parte esterna curve		1
Ct	coefficiente di spessore= 1 (per spessore =D100) 1.5 (per spessore = 1.5 D50)		1
d	battente idrico locale	m	3
$\gamma_w$	peso di volume dell'acqua= 10 kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	10
$\gamma_s$	peso di volume dei massi= 24÷27kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	25
V	velocità locale della corrente, media sulla verticale	m/s	3.5
k1	fattore correttivo per l'inclinazione della scogliera = $(1 - \sin^2\theta / \sin^2\varphi)^{1/2}$		0.531
$\theta$	inclinazione della scogliera	°	33
$\varphi$	angolo di attrito tra massi	°	40
g	accelerazione di gravità	m/s <sup>2</sup>	9.8
	<b>D<sub>30</sub> = 0.52 m</b>		
	<b>W = 1.84 kN</b>	(peso singolo elemento D <sub>30</sub> )	

Figura 2- Calcolo della dimensione del pietrame per la scogliera