

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 1 di 35	Rev. 0

PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA

Gasdotto:

VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO
DN 400 (16'') – DP 24 bar
e opere connesse

*Nei Comuni di
Chivasso, Castagneto Po, San Raffaele Cimena e Brandizzo (TO)*

STUDIO IDROLOGICO-IDRAULICO

0	Emissione	Polloni	Mochi	Luminari	06/06/2022
Rev.	Descrizione	Elaborato	Verificato	Approvato	Data

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 2 di 35	Rev. 0

INDICE

1	PREMESSA	3
2	LOCALIZZAZIONE DELL'OPERA	4
3	CARATTERISTICHE IDROLOGICHE	6
4	CARATTERISTICHE IDRAULICHE	9
4.1	Quote idriche	9
4.2	Velocità deflusso	12
4.2.1	Tratto a valle del ponte di Chivasso	12
4.2.2	Tratto a monte del ponte di Chivasso	13
4.3	Caratteristiche idrauliche nelle sezioni di attraversamento Po	15
5	RISCHI IDRAULICI PER LA CONDOTTA.....	17
5.1	Erosione di fondo alveo	17
5.2	Approfondimento generale di fondo alveo	18
5.3	Erosione spondale	19
5.4	Cambio di percorso e taglio di meandro.....	21
5.5	Stima dello spessore di erosione in caso di evento critico.....	21
5.6	Approfondimenti localizzati (buche in alveo)	25
5.7	Erosione nelle aree golenali	27
6	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	30

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 3 di 35	Rev. 0

1 PREMESSA

La presente relazione è relativa allo studio idrologico e idraulico in corrispondenza del tracciato del gasdotto “*Variante Cortemaggiore - Torino (Chivasso) DN 400 (16'') – DP 24 bar*” di lunghezza 7+485 km, che si snoda nel fondovalle del F. Po nell'intorno di Chivasso e ne comprende anche due attraversamenti in subalveo.

Tale studio è di supporto alla *Relazione di Compatibilità Idraulica REL-PAI-E-00500* (alla quale è allegato), volta a dimostrare come l'intervento in progetto, che risulta non altrimenti localizzabile, “*non costituisca significativo ostacolo al deflusso e non limiti in modo significativo le capacità d'invaso*”, come prescritto dalle NTA di AdB Po.

Scopo dello studio è di valutare le caratteristiche idrologiche-idrauliche 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 corso d'acqua interessato dagli attraversamenti e dalla percorrenza in fondovalle da parte del metanodotto, permettendo pertanto la sua corretta progettazione e di valutare l'assenza di ostacolo e/o riduzione della capacità di invaso, nella configurazione di progetto.

Allo scopo si è fatto riferimento ai precedenti studi idrologici e idraulici effettuati da AdB Po, in particolare in ambito PAI, mirati in particolare alla modellazione del tratto di corso di interesse per il progetto in oggetto, integrati da locali verifiche idrauliche a supporto della progettazione.

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 4 di 35	Rev. 0

2 LOCALIZZAZIONE DELL'OPERA

Il tracciato della variante in progetto si localizza interamente lungo il fondovalle del F. Po piemontese nel tratto a cavallo della città di Chivasso (v. Corografia in Fig. 2.1/A). Cartograficamente l'area ricade nel foglio 156040 e 156030 della Carta Tecnica Regionale alla scala 1:10 000 (v. planimetria di progetto PG-TP-0-10100), interessando il territorio dei comuni di Chivasso, Castagneto Po, San Raffaele Cimena e Brandizzo (in provincia di Torino). In figura 2.1/B viene riportata l'ubicazione su immagine aerea Google.

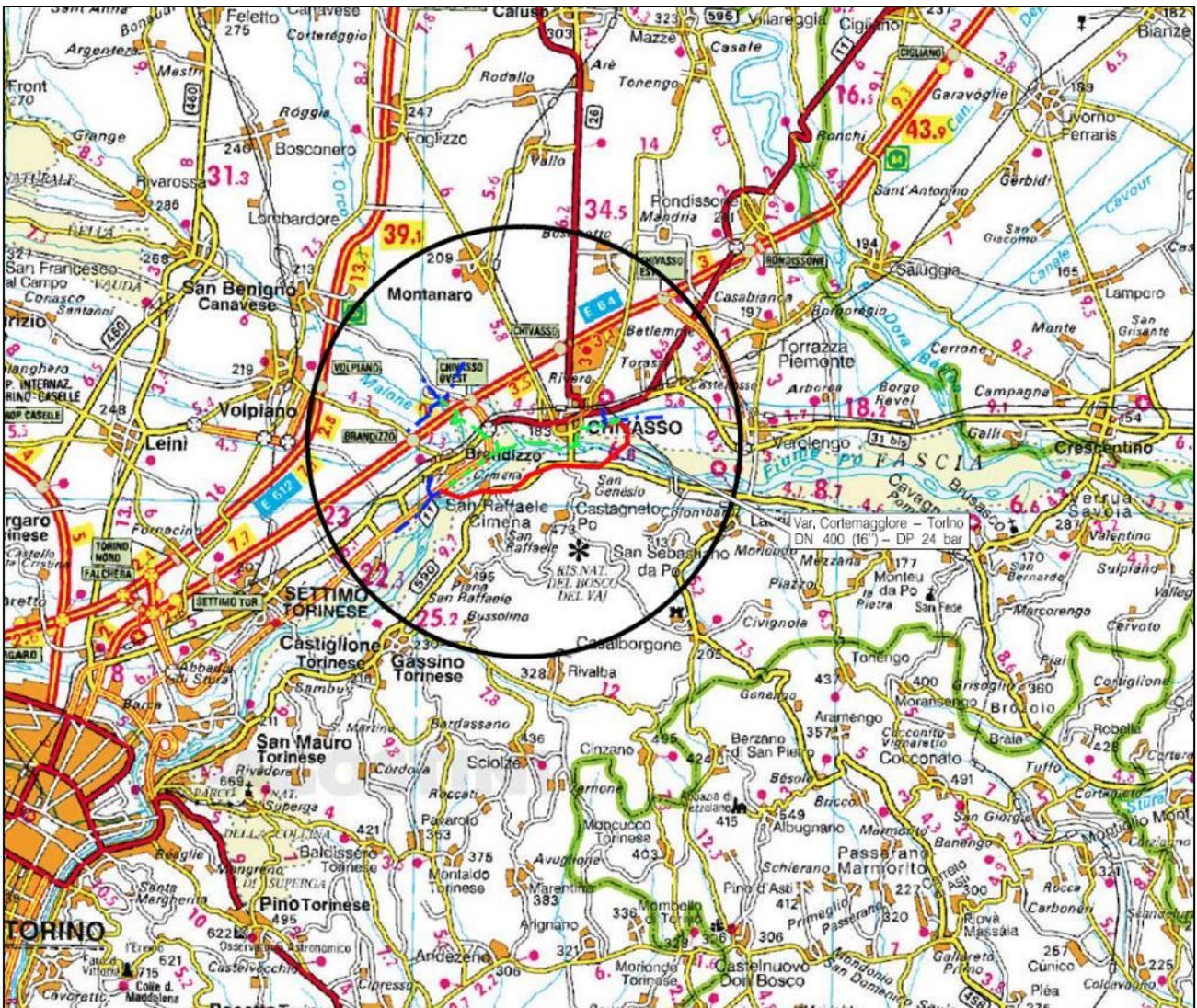
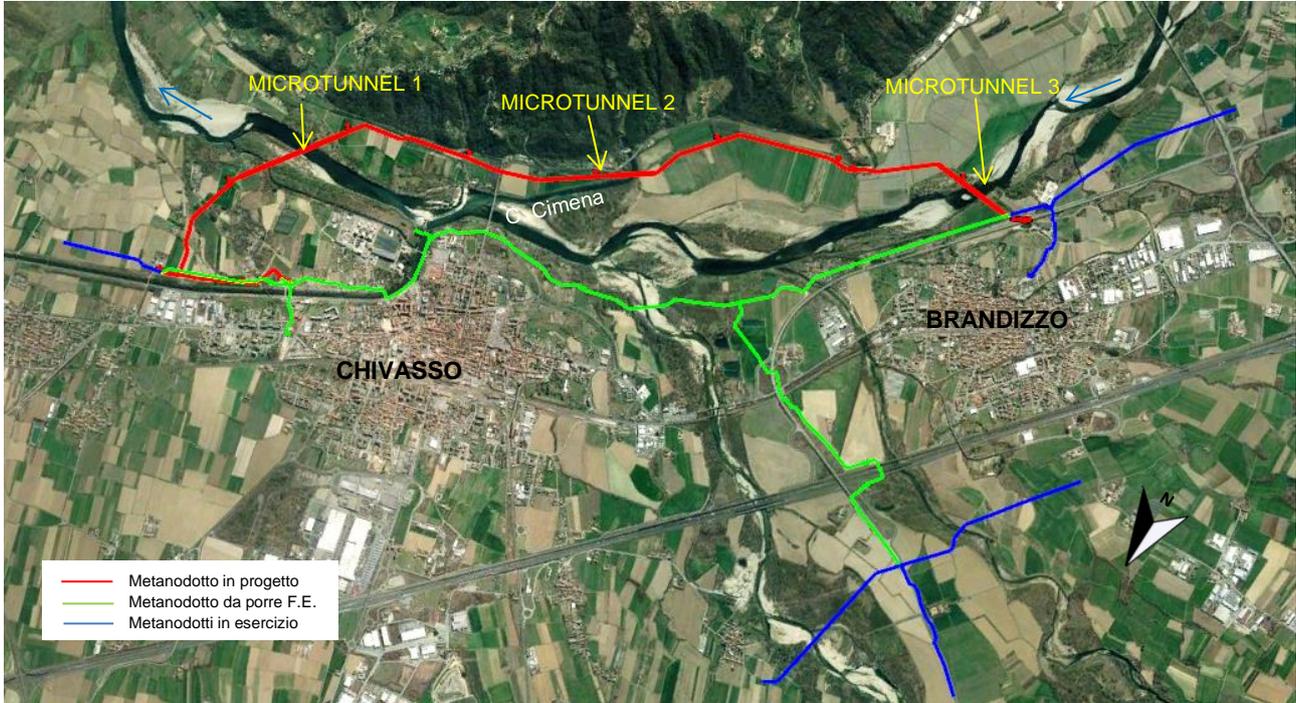


Figura 2.1/A – Corografia da Atlante TCI (tracciato metanodotto: linea rossa)

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 5 di 35	Rev. 0



**Figura 2.1/B – Immagine aerea dell'area in studio
(in rosso tracciato variante, in verde tracciato esistente in dismissione, in blu gasdotto esistente)**

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 6 di 35	Rev. 0

3 CARATTERISTICHE IDROLOGICHE

L'Autorità di Bacino del Fiume Po nell'ambito del *Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni* PGRA ha pubblicato nel documento *Profili di piena dei corsi d'acqua del reticolo principale* (Marzo 2016) le tabelle dei valori di portata al colmo nelle sezioni significative dei corsi d'acqua principali del bacino Po e, ove disponibili, le tabelle dei profili longitudinali dei valori delle massime quote idriche e delle massime velocità medie nelle sezioni fluviali per diversi tempi di ritorno.

Per il fiume Po, nel documento sopra citato vengono riportati dati idrologici di portata relativi alla sezione di Chivasso e in sezioni ricadenti in tratti limitrofi del corso d'acqua.

Corso d'acqua	Sezione			Superficie km ²	Q20	Q ott 2000	Q200	Q500	Idrometro Denominazione
	Progr.(km)	Cod.	Denomin.		m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	
Po	29.700	325	Gambasca	214	370	-	650	760	
Po	53.787	311	Villafranca Piemonte	670	900	-	1300	1460	
Po	72.000	300	Lombriasco	3500	1550	-	2320	2630	
Po	90.100	287	La Loggia	3820	1600	-	2400	2720	
Po	98.051	281	Moncalieri	4885	1750	-	2700	3100	Po a Moncalieri
Po	118.464	255	San Mauro	7408	2800	-	4300	4800	Po a San Mauro
Po	132.692	234	Chivasso	8960	3800	-	5900	6600	
Po	150.500	208	Crescentino	13640	6100	8200	-	10900	Po a Crescentino

Tabella 3/A – Valori di portata del Po per vari tempi di ritorno (da Profili di Piena PGRA) (v. ubicazione in Fig. 3/A)

La sezione 234 a Chivasso è ubicata in corrispondenza del ponte al centro dell'abitato e i relativi valori di portata si ritengono significativi anche per la sezione del primo attraversamento subalveo del metanodotto in studio (*attraversamento n. 1*), ubicata poco a valle.

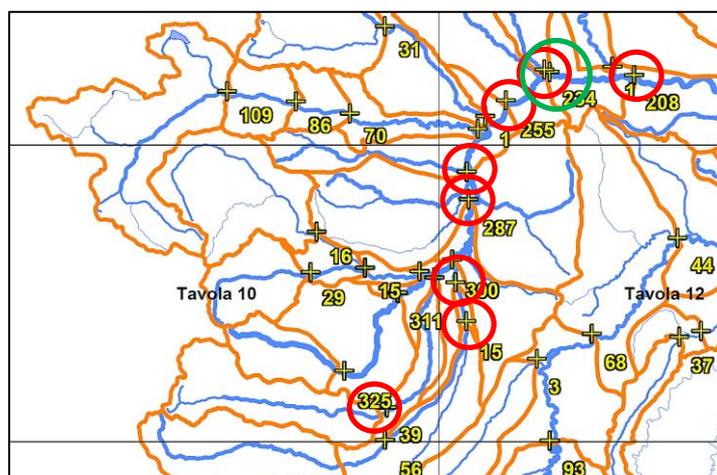


Figura 3/A – Ubicazione sezioni (in rosso) sul F. Po nel tratto di interesse (da PAI, AdB Po) (area di intervento in verde)

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 7 di 35	Rev. 0

Il secondo attraversamento in subalveo del F. Po (*attraversamento n. 3*), è ubicato invece a monte delle immissioni in Po del T. Orco e del T. Malone, le cui caratteristiche in corrispondenza della confluenza sono di seguito riportate.

Corso d'acqua	Sezione			Superficie km ²	Q20 m ³ /s	Q200 m ³ /s	Q500 m ³ /s	Idrometro Denominazione
	Progr. (km)	Cod.	Denomin.					
Malone	23.433	4	Brandizzo	371	725	1032	1170	Malone a Brandizzo
Orco	79.825	1	Confl. in Po	930	1300	2370	2870	

Tabella 3/B – Valori di portata del Po per vari tempi di ritorno (da Profili di Piena PGRA)
(v. ubicazione in Fig. 3/B)

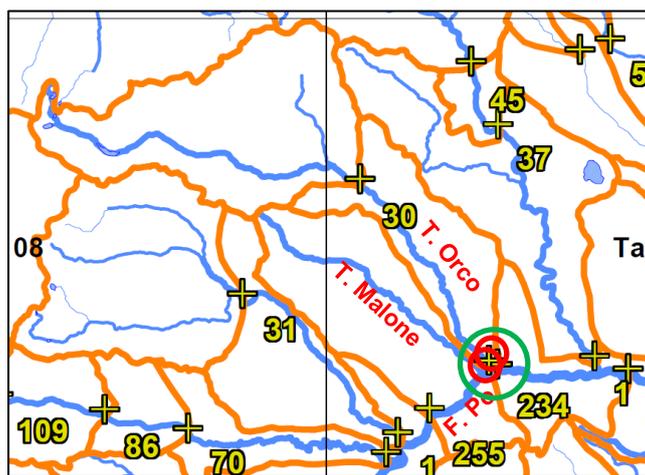


Figura 3/A – Ubicazione sezioni (in rosso) sui torrenti Malone e Orco (da PAI, AdB Po)
(area di intervento in verde)

Per tale motivo in corrispondenza della sezione del secondo attraversamento in subalveo non può essere assunta la portata alla sezione di Chivasso e, pertanto, essa è stata stimata diversamente, facendo ricorso al metodo della regionalizzazione delle portate, come di seguito illustrato.

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 8 di 35	Rev. 0

In accordo con quanto riportato nello *Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del F. Po nel tratto dalla confluenza del F. Stura di Lanzo alla confluenza del F. Dora Baltea*¹, di AdB Po, la portata in sezioni di data superficie S del bacino sotteso viene calcolata per i bacini piemontesi tra Moncalieri e Isola Sant'Antonio basandosi sui risultati di un modello di distribuzione di probabilità MG, utilizzando formule regressive per la stima dei parametri, secondo la seguente relazione:

$$Q_0(T) = \mu(Q_0) \cdot \left\{ 1 + [0.37 + 0.80 \cdot \ln(T)] \cdot CV^{1.33} \right\}$$

dove:

- coefficiente di crescita $CV = 1.81 \cdot S^{-0.13}$
- media $\mu = 3.20 \cdot S^{0.70}$
- tempo di ritorno² $T = 200$ anni
- superficie del bacino $S = 7659$ km²

Sulla base di tale relazione di regionalizzazione, alla sezione a monte delle confluenze in Po di Malone e Orco, che sottende una superficie di bacino pari a 7659 km², si stima una portata duecentennale pari a:

$$Q_{200} = 5296 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Quindi per le sezioni di attraversamento del F. Po da parte del metanodotto in valori di portata duecentennale risultano essere:

- primo attraversamento Po $Q_{200} = 5900 \text{ m}^3/\text{s}$
- secondo attraversamento Po $Q_{200} = 5296 \text{ m}^3/\text{s}$

¹ Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del Fiume Po nel tratto dalla confluenza del Fiume Stura di Lanzo alla confluenza del Fiume Dora Baltea, Attività 2.1: Definizione delle portate di piena di riferimento per l'asta del fiume Po, Relazione di sintesi (AdB Po).

² Tempo di ritorno assunto pari a 200 anni, in ottemperanza con quanto stabilito dalla Direttiva AdB Po "Valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico all'interno delle fasce A e B"

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 9 di 35	Rev. 0

4 CARATTERISTICHE IDRAULICHE

4.1 Quote idriche

La modellazione idraulica condotta nell'ambito degli studi PAI, di supporto alla perimetrazione delle fasce fluviali, i cui risultati sono da considerarsi come riferimento per la progettazione degli interventi di difesa, sono riportati nel documento AdB Po "Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni: Profili di piena dei corsi d'acqua del reticolo principale, 2016".

In tale documento vengono riportati, oltre ai valori delle portate al colmo nelle sezioni più significative dei corsi d'acqua del reticolo principale del bacino del F. Po, ove disponibili anche le tabelle dei profili longitudinali delle massime quote idriche e delle massime velocità medie nelle sezioni fluviali, relative agli scenari di evento assunti per la delimitazione delle mappe di pericolosità di alluvione, cioè per diversi tempi di ritorno (20, 200, 500 anni).

Le massime quote idriche in funzione di vari tempi di ritorno sono disponibili per il F. Po per l'intero tratto di interesse per il progetto in oggetto, mentre invece non vengono riportate le relative velocità. Nella seguente tabella 4.1/A si riporta lo stralcio della tabella del sopra citato documento AdB Po relativa alle sezioni che ricadono nel tratto di interesse con i valori delle quote idriche.

La localizzazione di tali sezioni è riportata nella planimetria in figura 4.1/A nella quale sono evidenziati anche i limiti tra alveo e zona golenale.

Sez. PAI	Progr. PAI (km)	Sez. modello SdF	Progr. modello SdF (km)	T = 20 anni	T = 200 anni	T = 500 anni	Sez. PAI	Progr. PAI (km)	Sez. modello SdF	Progr. modello SdF (km)	T = 20 anni	T = 200 anni	T = 500 anni
				Quota idrica (m s.m.)	Quota idrica (m s.m.)	Quota idrica (m s.m.)					Quota idrica (m s.m.)	Quota idrica (m s.m.)	Quota idrica (m s.m.)
		102664	128.429	184.38	185.53	185.77			98493	132.600	178.79	179.99	180.32
		102187	128.906	183.62	184.64	184.85			98468	132.625	178.70	179.80	180.10
		102117	128.976	183.65	184.73	184.95			98390	132.703	178.32	179.27	179.51
		101955	129.138	183.54	184.60	184.81			98364	132.729	178.35	179.45	179.78
		101909	129.184	183.45	184.45	184.65	233	133.250	98265	132.828	178.22	179.21	179.51
		101583	129.510	182.92	183.75	183.91	232	133.400	97897	133.196	178.21	179.32	179.67
237	130.460	101184	129.909	182.37	183.10	183.30			97886	133.207	178.20	179.30	179.65
		100861	130.232	181.96	182.68	182.93			97835	133.258	177.67	179.12	179.49
		100527	130.566	181.55	182.43	182.72			97820	133.273	177.66	179.12	179.49
		100107	130.986	181.17	182.24	182.55	231	133.800	97626	133.467	177.09	178.47	178.80
		99552	131.541	180.91	182.03	182.35			97153	133.940	176.23	177.46	177.79
		99144	131.949	179.87	181.26	181.65			96652	134.441	175.49	176.65	176.95
		98685	132.408	179.28	180.63	181.00			96420	134.673	175.25	176.50	176.82

Tabella 4.1/A – Quote idriche di piena per Tr= 20, 200, 500 anni per il fiume Po nel tratto di interesse (da Profili di piena dei corsi d'acqua del reticolo principale, AdB Po, 2016)

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 10 di 35	Rev. 0

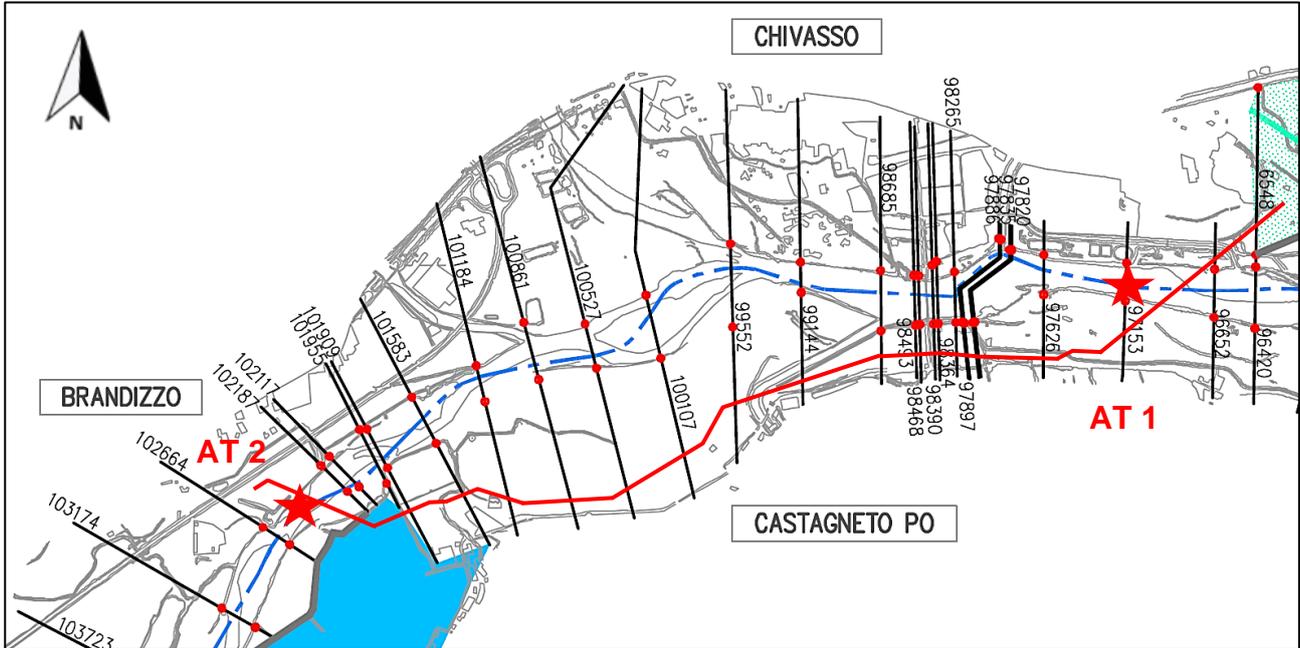


Figura 4.1/A – Localizzazione delle sezioni utilizzate per lo studio AdB Po con riportati i punti di attraversamento del tracciato (stella rossa) e i limiti tra alveo e zona golenale (punti rossi)

In figura 4.1/B si riporta il grafico del profilo di fondo e del profilo idrico duecentennale per il tratto di interesse, tratti dalla modellazione AdB Po eseguita nell'ambito dello *Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del F. Po nel tratto dalla confluenza de F. Stura di Lanzo alla confluenza del F. Dora Baltea*.

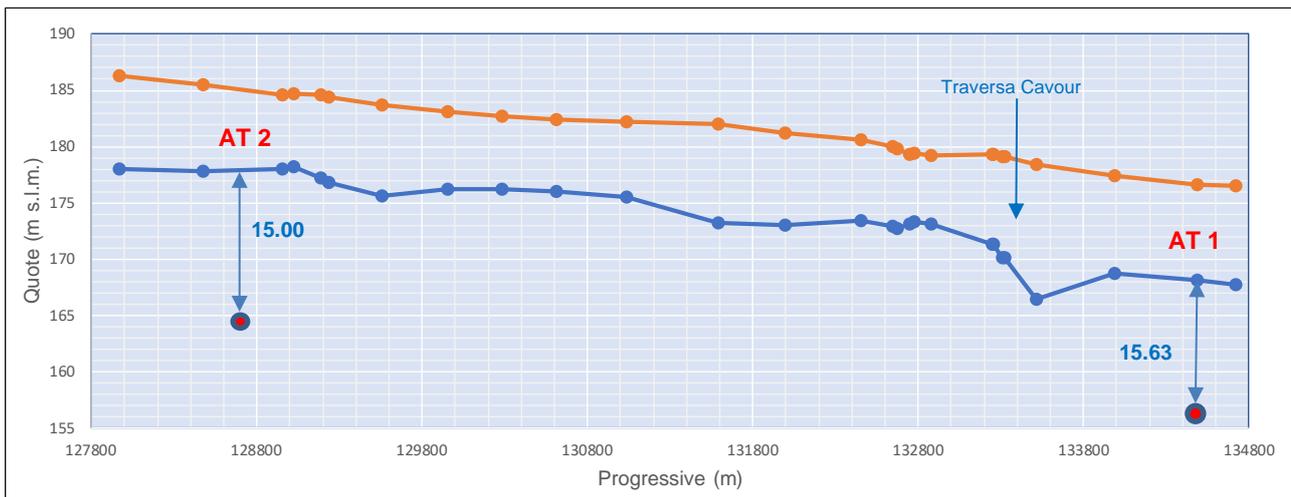


Figura 4.1/B – Profilo di fondo e livelli idrici di piena $Tr=200$ del F. Po. Con cerchio rosso sono indicate le due condotte in attraversamento subalveo, con la relativa profondità dal fondo alveo.

I valori della quota di fondo e del livello idrico, nonché dei relativi tiranti vengono riportati in tabella 4.1/B.

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 11 di 35	Rev. 0

Progressiva	Q. fondo	Q. H ₂₀₀	Tirante	Progressiva	Q. fondo	Q. H ₂₀₀	Tirante
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
127966.0	178.06	186.32	8.26	132646.4	172.93	179.99	7.06
128475.8	177.87	185.53	7.66	132672.3	172.77	179.80	7.03
128953.1	178.03	184.64	6.61	132750.3	173.16	179.27	6.11
129023.1	178.21	184.73	6.52	132776.0	173.30	179.45	6.15
129185.3	177.19	184.60	7.41	132875.3	173.16	179.21	6.05
129231.2	176.83	184.45	7.62	133243.7	171.38	179.32	7.94
129557.2	175.60	183.75	8.15	133254.6	171.38	179.30	7.92
129955.7	176.27	183.10	6.83	133305.7	170.14	179.12	8.98
130279.5	176.21	182.68	6.47	133320.3	170.14	179.12	8.98
130613.0	176.00	182.43	6.43	133514.7	166.43	178.47	12.04
131032.9	175.50	182.24	6.74	133987.0	168.74	177.46	8.72
131587.4	173.27	182.03	8.76	134488.4	168.20	176.65	8.45
131996.5	173.04	181.26	8.22	134720.6	167.79	176.50	8.71
132455.3	173.40	180.63	7.23				

Tabella 4.1/B – Quote di fondo, livelli idrici e tiranti duecentennali per le varie sezioni di modellazione

Per il tratto a valle del ponte stradale di Chivasso fino al ponte di Crescentino il suddetto studio AdB Po ha sviluppato anche una modellazione bidimensionale utilizzando il codice di calcolo agli elementi finiti RMA-2 (sviluppato dalla Resource Modelling Associated Sydney, Australia).

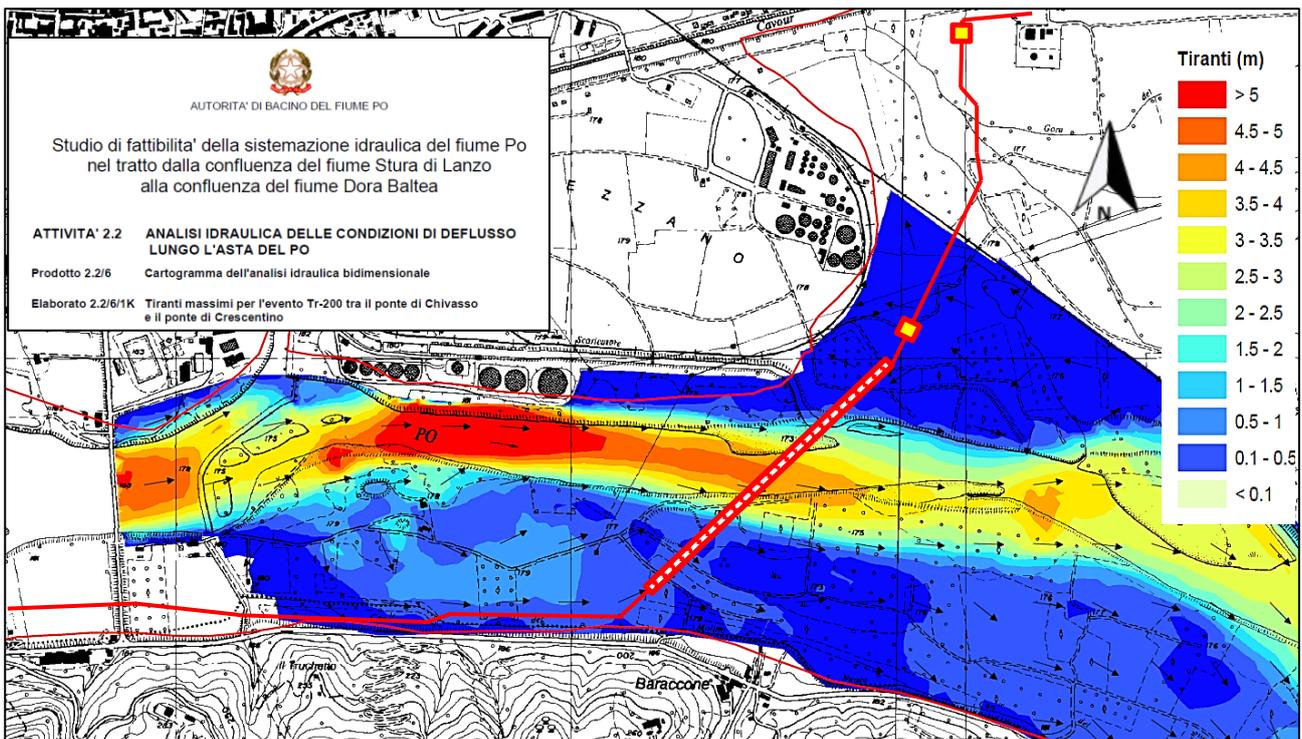


Figura 4.1/C – Stralcio della carta dei tiranti massimi per evento Tr= 200 anni (AdB Po) (tracciato gasdotto: linea rossa, Impianti di linea quadrato rosso con riempimento giallo)

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 12 di 35	Rev. 0

In merito ai tiranti massimi, dalla mappa in figura 4.1/C si evidenziano tiranti del flusso di piena che a valle della traversa Cavour possono essere anche superiori a 5 m, mentre in area golenale sinistra battenti in corrispondenza del tracciato in classe "0.1-0.5 m" e in golena destra in classe "0.1-0.5 m" e "0.5-1.0 m".

4.2 Velocità deflusso

4.2.1 Tratto a valle del ponte di Chivasso

La modellazione 2D eseguita da AdB Po, sopra citata, ha fornito anche la mappa delle velocità massime per evento di piena $T_r = 200$ anni, di seguito riportata in stralcio.

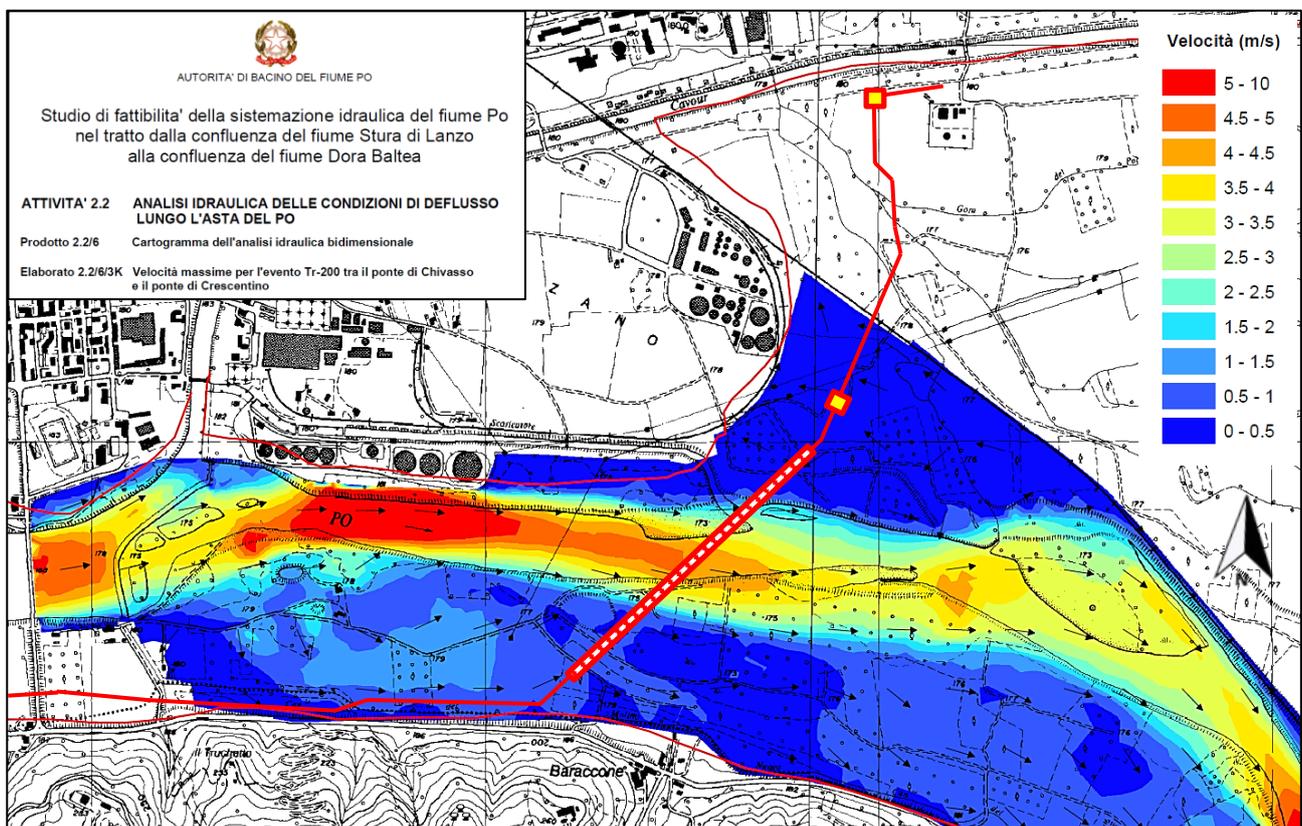


Figura 4.2.1/A – Stralcio della carta delle velocità massime per evento $T_r = 200$ anni (AdB Po) (tracciato gasdotto: linea rossa)

Da tale rappresentazione si evidenzia che le velocità raggiunte dal flusso di piena in canale, a valle del ponte di Chivasso nel tratto attraversato dal metanodotto in profondità con microtunnel, hanno valori di $4.5 \div 5$ m/s, mentre nelle aree golenali percorse dal tracciato posato a cielo aperto in trincea le velocità del flusso di esondazione sono assai più modeste, comprese nelle classi $0 \div 0.5$ m/s (in sinistra) e anche $0.5 \div 1.0$ m/s (in destra).

Anche nella carta di analisi morfologica ed idraulica della modellazione monodimensionale dello studio AdB Po si evidenzia che in golena destra fino all'altezza della traversa Cavour (provenendo da valle, cioè senso gas) le velocità del flusso di esondazione superano il valore di 0.4 m/s (v. Fig. 4.2.1/B).

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 13 di 35	Rev. 0

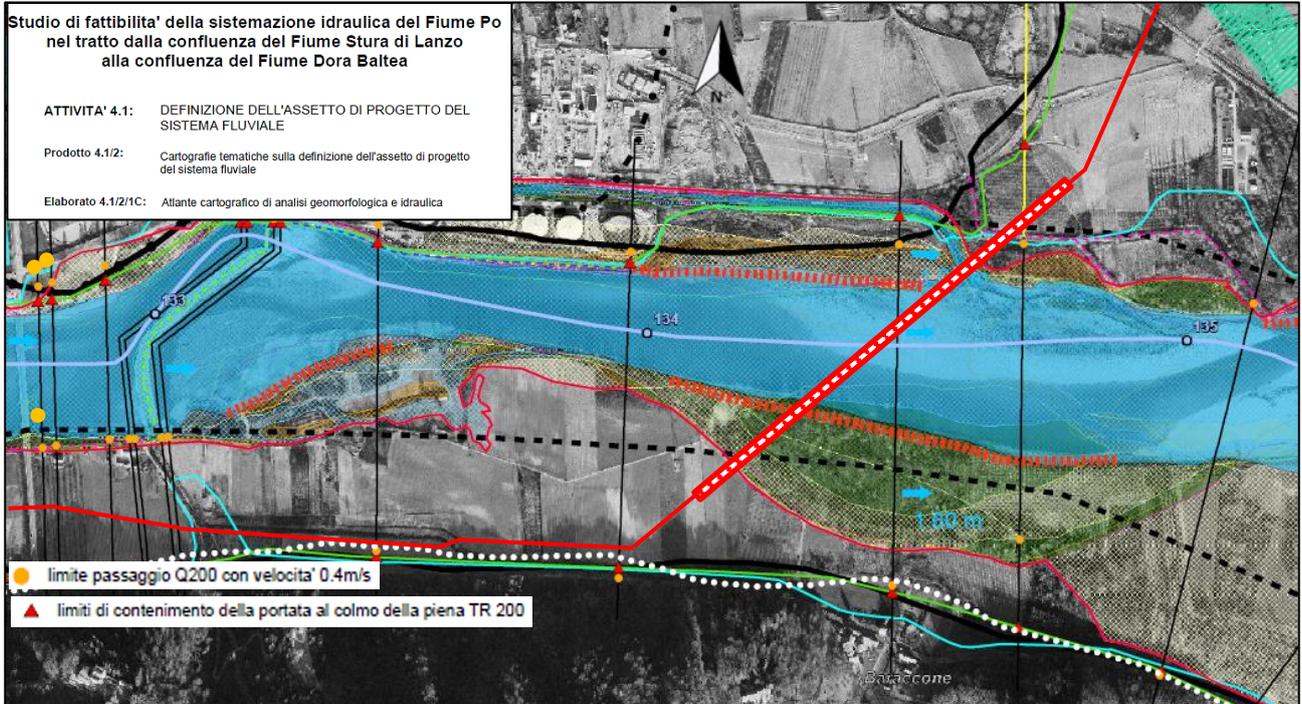


Figura 4.2.1/B – Analisi morfologica e idraulica, con indicati i limiti di passaggio della piena Q₂₀₀ con velocità $v = 0.4$ m/s (AdB Po) (tracciato metanodotto: linea rossa)

4.2.2 Tratto a monte del ponte di Chivasso

Per il tratto a monte del ponte di Chivasso non è disponibile nello studio suddetto di AdB Po la modellazione 2D. Tuttavia nello stesso studio, sulla base della modellazione monodimensionale, vengono forniti per le numerose sezioni considerate i limiti di passaggio della piena duecentennale Q₂₀₀ con velocità = 0.4 m/s (v. Fig. 4.2.2/A).

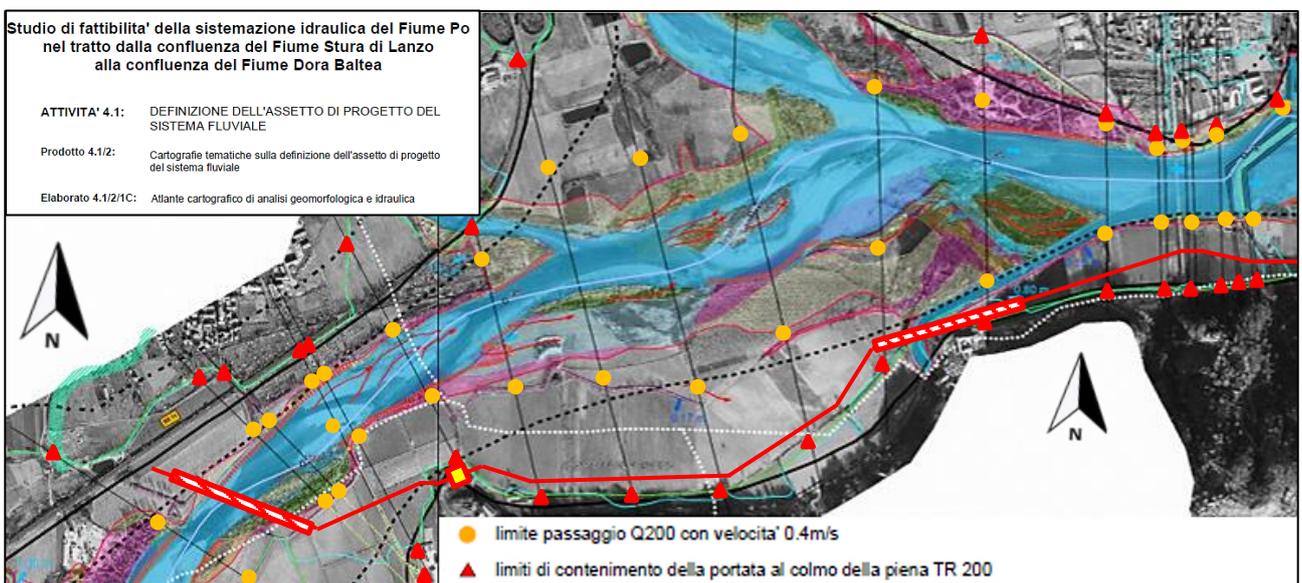


Figura 4.2.2/A – Analisi morfologica e idraulica, con indicati i limiti di passaggio della piena Q₂₀₀ con velocità $v = 0.4$ m/s (AdB Po) (tracciato gasdotto: linea rossa, Impianti di linea quadrato rosso con riempimento giallo)

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 14 di 35	Rev. 0

Come si può vedere nella immagine soprariportata il tracciato, a parte i tratti di attraversamento subalveo profondo con microtunnel, si sviluppa sempre al di fuori di tali limiti e pertanto interamente in zona golenale con velocità inferiore a 0.4 m/s.

In merito alla stima della velocità in canale in corrispondenza dell'attraversamento di monte del F. Po da parte del tracciato, si è effettuata allo scopo una modellazione a moto permanente con il programma HEC RAS in corrispondenza di un tratto di alveo a cavallo dell'attraversamento di estensione pari a 2037 m, utilizzando le sezioni desunte da AIPO (S05A, S502B, S502A, S502), modificate dove necessario sulla base del DTM Lidar 5X5 - Ripresa aerea ICE 2009-2011 della Regione Piemonte, e la sezione di attraversamento appositamente rilevata (v. Fig. 4.2.2/B).

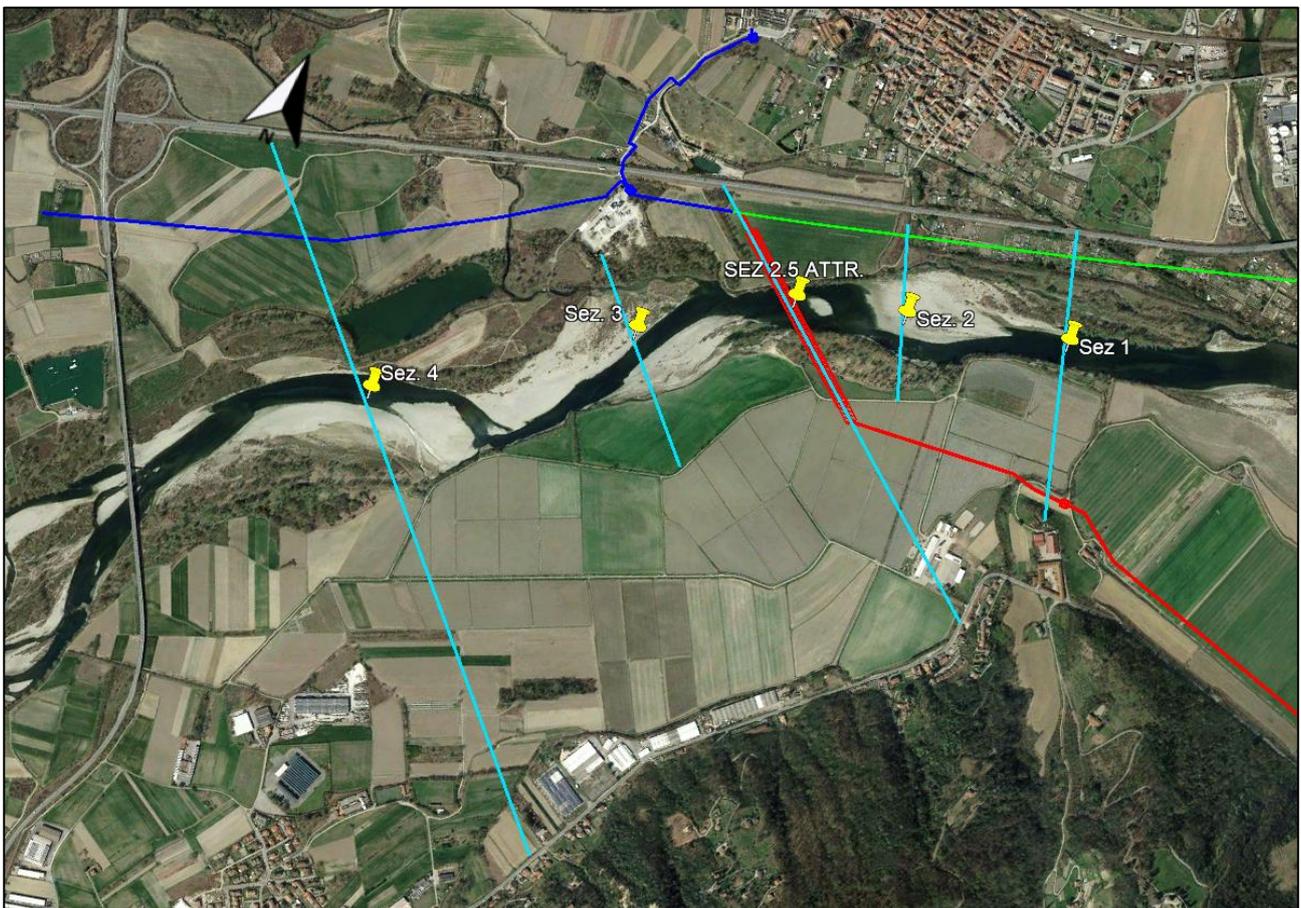


Figura 4.2.2/B – Localizzazione delle sezioni utilizzate per la modellazione locale

I risultati di tale modellazione, riportati in dettaglio a conclusione del presente studio, hanno mostrato che la velocità della corrente di piena duecentennale in canale nel tratto del secondo attraversamento è di 4.25 m/s mentre in golena destra di 0.83 m/s e sinistra 0.91 m/s (v. Fig. 4.2.2/C e Tab. 4.2.2/A)

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 15 di 35	Rev. 0

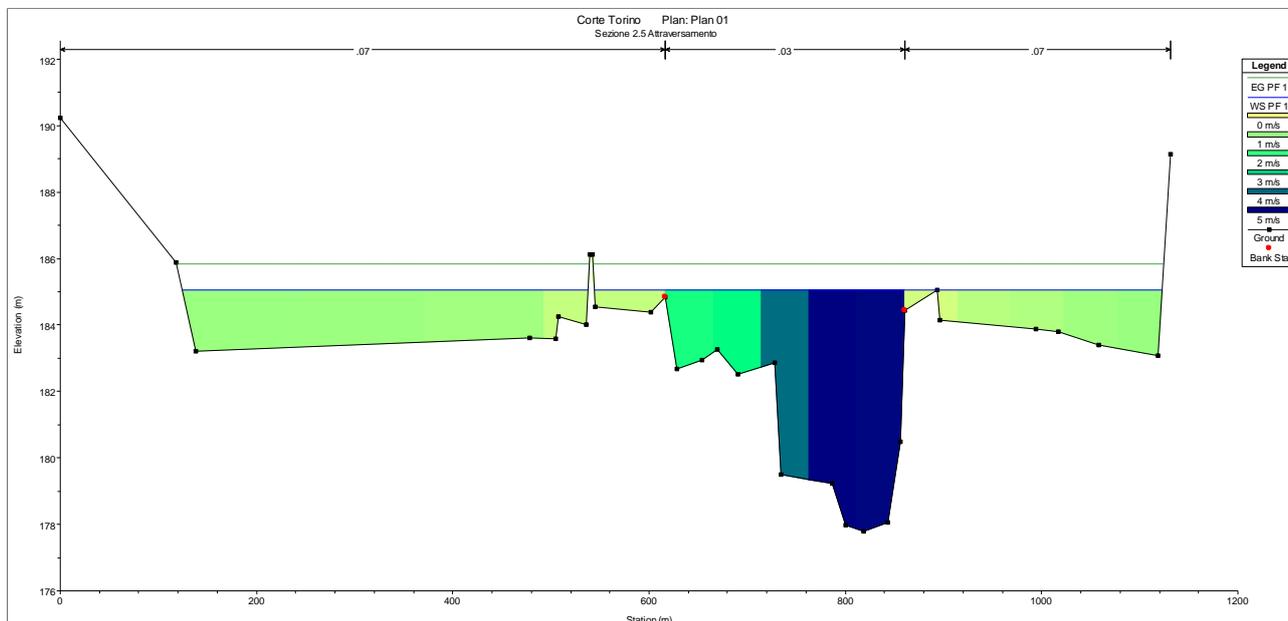


Figura 4.2.2/C - Sezione del secondo attraversamento da parte del metanodotto, con indicate le velocità del flusso idrico Q_{200}

Plan: Plan 01 PO . RS: 2.5 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	185.83	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.77	Wt. n-Val.	0.070	0.030	0.070
W.S. Elev (m)	185.06	Reach Len. (m)	175.33	106.00	216.33
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)	682.64	1039.35	315.27
E.G. Slope (m/m)	0.002384	Area (m2)	682.64	1039.35	315.27
Q Total (m3/s)	5296.00	Flow (m3/s)	619.26	4416.59	260.15
Top Width (m)	991.98	Top Width (m)	485.96	243.44	262.57
Vel Total (m/s)	2.60	Avg. Vel. (m/s)	0.91	4.25	0.83
Max Chl Dpth (m)	7.26	Hydr. Depth (m)	1.40	4.27	1.20
Conv. Total (m3/s)	108459.9	Conv. (m3/s)	12682.2	90450.0	5327.7
Length Wtd. (m)	117.97	Wetted Per. (m)	486.62	246.38	263.17
Min Ch El (m)	177.80	Shear (N/m2)	32.80	98.63	28.01
Alpha	2.25	Stream Power (N/m s)	29.75	419.13	23.11
Frctn Loss (m)	0.23	Cum Volume (1000 m3)	269.73	939.75	392.46
C & E Loss (m)	0.03	Cum SA (1000 m2)	187.20	198.23	239.20

Tabella 4.2.2/A – Valori dei parametri idraulici nella sezione del secondo attraversamento

4.3 Caratteristiche idrauliche nelle sezioni di attraversamento Po

Come precedentemente riportato, il tracciato del metanodotto attraversa il fiume Po due volte, in subalveo tramite installazione all'interno di un microtunnel:

- la prima volta (in senso del flusso gas) (*attraversamento n. 1*) alla progressiva lungo l'asta del Po km 134.464 (con riferimento alla scala chilometrica adottata da AdB Po) in corrispondenza della sezione AdB Po n. 96652;
- la seconda volta (in senso del flusso gas) (*attraversamento n. 3*) alla progressiva lungo l'asta del Po km 128.786 (con riferimento alla scala chilometrica adottata da AdB Po) tra le sezioni AdB Po n. n.102664 e la n. 102187, posizionate rispettivamente 310 m a monte e 167 m a valle.

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 16 di 35	Rev. 0

Sulla base delle valutazioni idrauliche desunte dagli studi eseguiti da AdB Po sopra citati e della modellazione locale effettuata allo scopo in corrispondenza del secondo attraversamento, opportunamente confrontata con i risultati degli studi AdB Po stessi, i valori dei parametri idraulici di principale interesse e la copertura minima sotto il letto in corrispondenza degli attraversamenti in progetto sono riportati nella seguente tabella.

		PRIMO ATTRAVERSAMENTO	SECONDO ATTRAVERSAMENTO
Quota minima fondo alveo	(m)	168.30	177.80
Livello idrico Q_{200} (*)	(m)	176.65	185.06
Tirante massimo (*)	(m)	8.35	7.26
Velocità in alveo	(m/s)	4.5÷ 5	4.25
Copertura min. MT	(m)	15.63	15.00
(*) Valori riferiti all'asse fiume			

Tabella 4.3/A – Caratteristiche idrauliche del F. Po in corrispondenza degli attraversamenti

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 17 di 35	Rev. 0

5 RISCHI IDRAULICI PER LA CONDOTTA

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: aratura di fondo e approfondimenti localizzati
2. Approfondimento di fondo alveo-tendenza evolutiva del fondo
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 fondo alvei 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 localizzata 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 nei successivi paragrafi.

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 18 di 35	Rev. 0

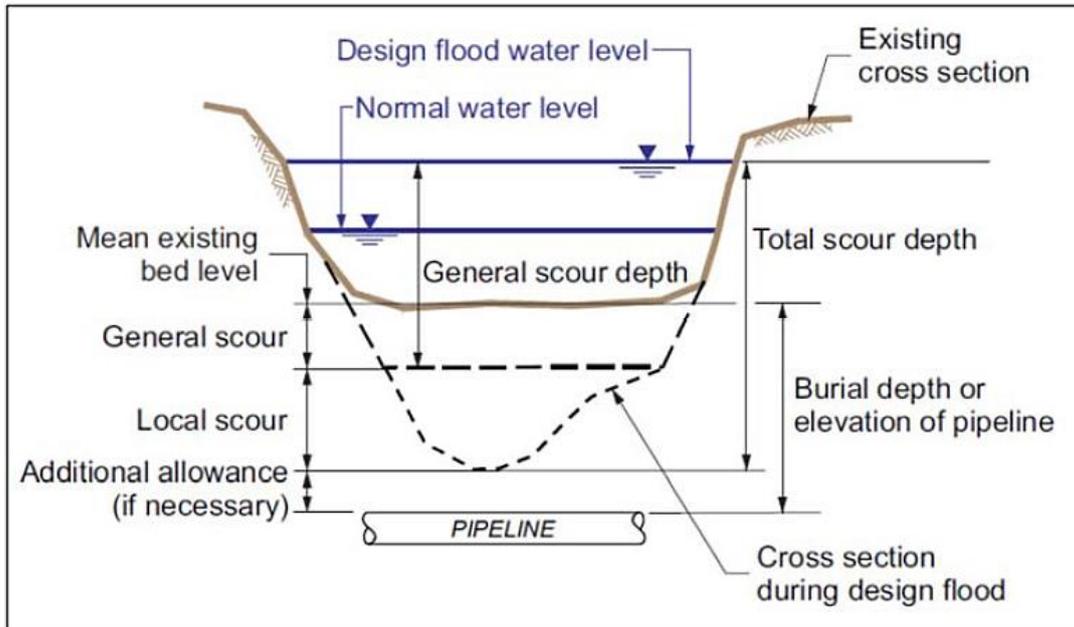


Figura 5.1/A – Schema di erosione generale e locale (da Veldeman, 2008)

5.2 Approfondimento generale 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).

Per il tratto di corso in oggetto, la presenza della traversa Cavour all'altezza dell'abitato di Chivasso (v. Fig. 5.2/A) garantisce la stabilità di fondo alveo nel tratto a monte ove è localizzato il secondo attraversamento del Po da parte del metanodotto. Anche l'elevato trasporto solido da parte dei confluenti fiumi Malone ed Orco in tale tratto fa escludere il rischio di abbassamento del letto.

A valle della traversa Cavour dai sopralluoghi lungo il fiume nel tratto del primo attraversamento non si sono riscontrati indizi di sensibili approfondimenti in atto. Solamente circa 2 km più a valle, il ponte della ferrovia Aosta-Torino presenta segni di modesto scalzamento dei pali di fondazione delle pile (v. Fig. 5.2/B).

Tuttavia l'elevata distanza dalla sezione di attraversamento e soprattutto l'elevata profondità cui è posizionato il microtunnel, fanno ritenere il suo posizionamento sicuro nei confronti di eventuali fenomeni di abbassamento dell'alveo.

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 19 di 35	Rev. 0



Figura 5.2/A – Traversa Cavour



Figura 5.2/B – Ponte ferrovia Torino-Asti: particolare delle pile del ponte

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

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 20 di 35	Rev. 0

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.

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.

Nel caso del tracciato in oggetto l'intero percorso, a parte i tratti di attraversamento dell'alveo che viene attraversato in profondità con microtunnel, si localizza all'esterno delle aree riconosciute di eventuale mobilità anche a lungo termine (v. Fig. 5.3/A). Tali fasce sono state valutate dallo studio AdB Po sulla base della osservazione delle variazioni planimetriche dell'alveo nel periodo 1882-attuale (v. Fig. 5.3/B).

Anche in merito ai due attraversamenti trenchless del fiume, si evidenzia che i relativi punti di partenza e di arrivo dei microtunnel si situano esternamente alle aree di mobilità, in zone mai interessate dalla presenza dell'alveo nel periodo suddetto.

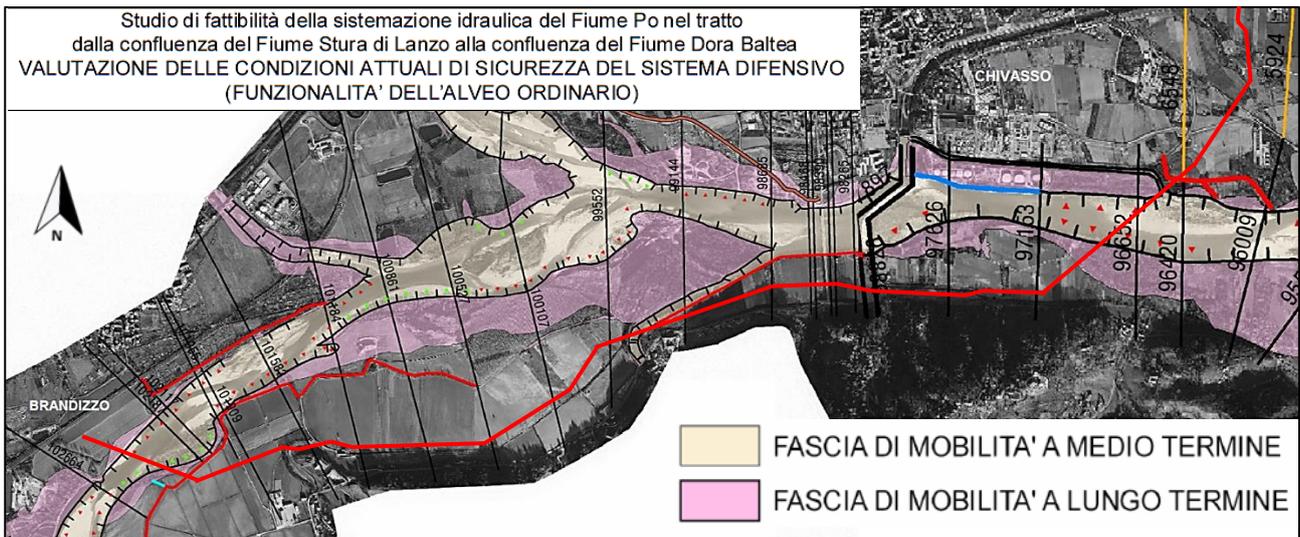


Figura 5.3/A – Carta delle condizioni attuali di sicurezza (AdB Po)

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 21 di 35	Rev. 0

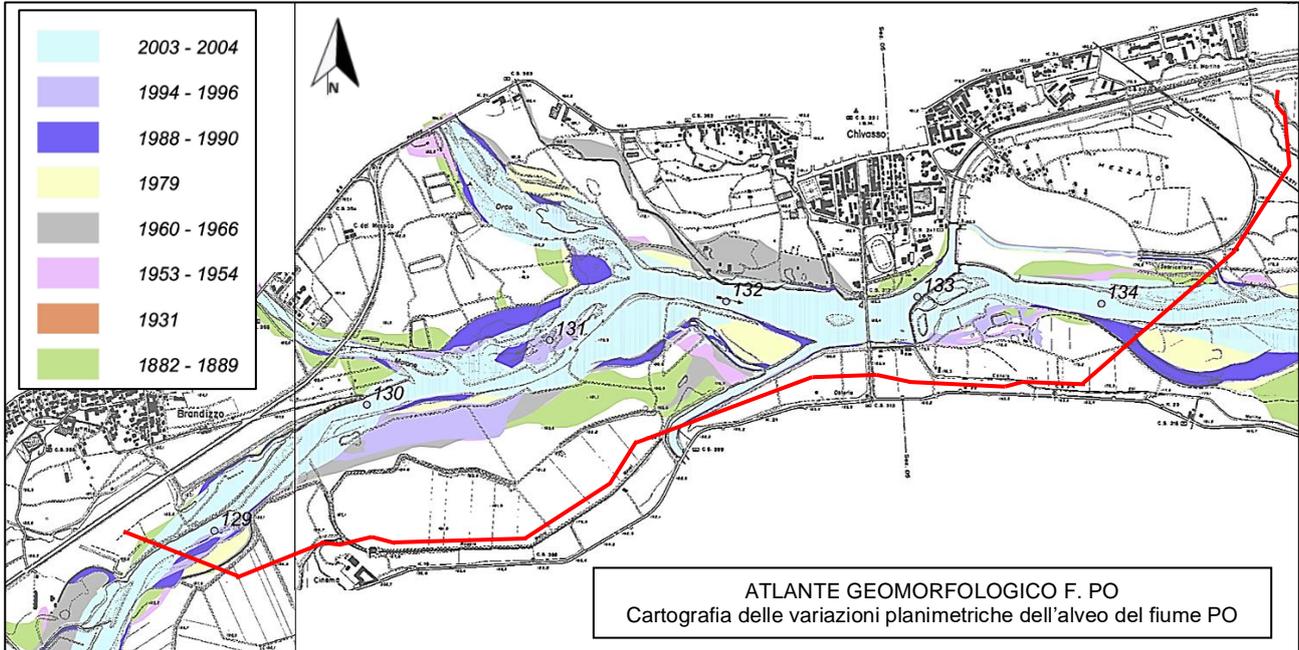


Figura 5.3/B – Carta delle variazioni planimetriche dell'alveo (A dB Po)

Si ritiene pertanto che il metanodotto risulti sicuro sotto l'aspetto della stabilità planimetrica dell'alveo e che eventuali spostamenti di corso non interesseranno, per il periodo di esercizio dello stesso, le aree in cui esso è posato.

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, oppure 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.

Nel caso in esame, come precedentemente argomentato, il fiume risulta planimetricamente stabile, così da escludere l'evenienza del fenomeno in oggetto.

5.5 Stima dello spessore di erosione in caso di evento critico

L'erosione del fondo di un corso d'acqua, in particolare quando costituito da terreno incoerente, detta anche aratura di fondo, corrisponde all'abbassamento del letto che si può verificare durante una piena in un tratto di corso, qualora la sua velocità sia sufficientemente elevata in relazione al materiale costituente il fondo alveo.

Il fenomeno di erosione del fondo alveo è rappresentato da abbassamenti spesso transitori e reversibili dell'alveo a fondo mobile che possono aver luogo durante la piena in concomitanza delle

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 22 di 35	Rev. 0

fasi dell'idrogramma a maggior velocità, cui può seguire deposizione nella fase terminale dell'idrogramma stesso, quando le velocità tendono via via a diminuire. In corrispondenza di attraversamenti fluviali, le condotte interrate non adeguatamente approfondite possono essere messe a nudo dall'erosione di fondo alveo e subire danni conseguenti a diverse cause:

- abrasione del rivestimento
- bugnatura a causa dell'urto del materiale trasportato al fondo
- flessione del tratto di condotta esposta alla spinta della corrente
- possibilità di galleggiamento per asportazione del terreno di copertura e/o asportazione dell'appesantimento, qualora esistente.

Lo spessore di erosione risulta di assai difficile valutazione, dipendendo da molteplici fattori, quali le caratteristiche idrodinamiche locali della corrente (variabili nello spazio e nel tempo della durata dell'idrogramma) e il tipo di materiale costituente il fondo (anch'esso variabile sia verticalmente che orizzontalmente). 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 pertanto 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. I principali fattori che concorrono al fenomeno dell'erosione del fondo sono la velocità della corrente in alveo e l'altezza del battente idrico, in relazione al materiale del letto. Innanzi tutto necessita verificare se la velocità della corrente è sufficiente per dar luogo al fenomeno, comparandola con la velocità limite che il materiale del letto può sopportare.

Un metodo a tale fine è quello proposto da Lischtvan-Lebediev³ che valuta la velocità media della corrente in alveo V_{lim} oltre alla quale ha inizio il fenomeno di erosione al fondo secondo l'espressione:

$$V_{lim} = 4.7 \times \beta \times D_{84}^{0.28} \times H^{(0.223/D_{84}^{0.092})}$$

dove:

$$\beta = 0.8416 + 0.03342 \times \ln T_r$$

D_{84} = dimensione delle particelle del terreno, corrispondente al passante del 84% del fuso granulometrico

H = altezza del battente idrico medio

T_r = tempo di ritorno della piena

Qualora risultasse che il fenomeno erosivo può aver luogo, la stima dello spessore di erosione per una data portata di progetto risulta come detto 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 proposta da vari autori, richiede grande sensibilità ed esperienza.

³ Schreider M., Scacchi G., Franco F., Fuentes R., Moreno C. – Aplicacion del método de Lischtvan y Lebediev al calculo de la erosión general. Ingeniería hidráulica en México, vol. XVI, num. 1, 2001

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 23 di 35	Rev. 0

Tra i metodi empirici di facile approccio si segnala quello proposto da *Yaremko and Cooper (1983)*⁴ 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)⁵

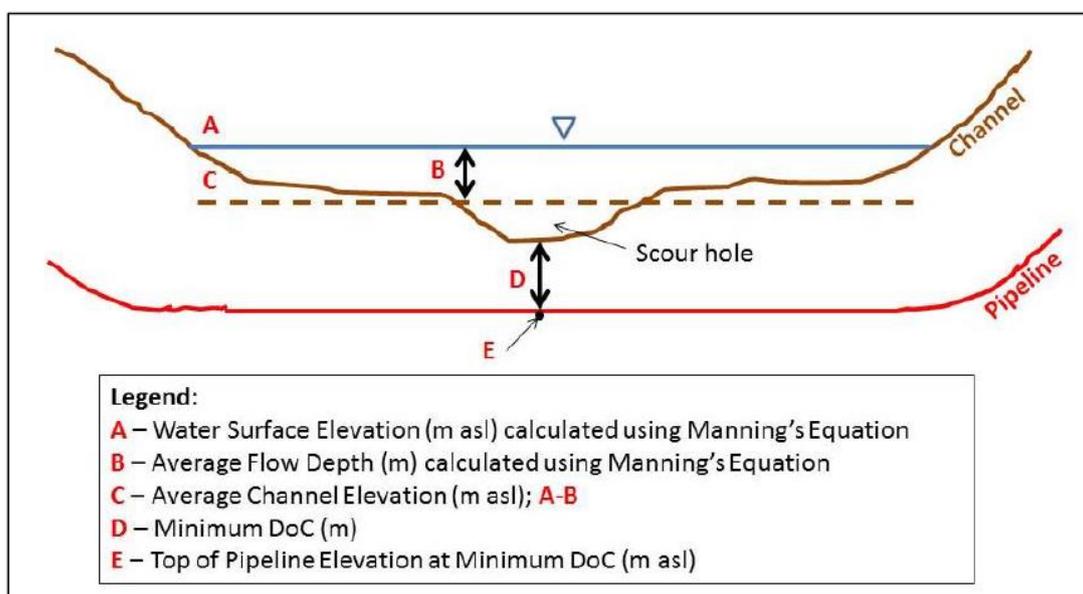


Figura 5.5/A – Schema di calcolo dell'erosione di fondo (da Veldeman, 2008)⁶

(DoC=depth of cover, spessore di copertura)

⁴ Yaremko, E.K., and Cooper, R.H. 1983. Influence of Northern Pipelines on River Crossing Design. In: Pickell, M.B. (Ed.). Proceedings of the Conference on Pipelines in Adverse Environments II, American Society of Civil Engineers. San Diego, California, November 14- 16, 1983. pp. 49-63.

⁵ Joyce, S. and Chander, A. 2004. A method for the Analysis of Scour Potential and Protective Works Design at Pipeline Crossings of Mobile-Bed Rivers. Proceedings of the Conference on Advances in Pipeline Engineering and Construction, American Society of Civil Engineers. San Diego, California, July 15-18

⁶ Veldman, W. 2008. Pipeline Geo-Environmental Design and Geohazard Management. Chapter 3, Open Cut and Elevated River Crossings. Edited by Moness Rizkalla. ASME.

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 24 di 35	Rev. 0

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

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

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

m = esponente pari a 0.67÷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)⁷

In Italia è anche prassi utilizzare una prudenziale generalizzazione alla quale spesso si fa riferimento, proposta da Zanovello⁸, che valuta l'erosione di fondo transitoria durante le piene pari al 50% del battente idrico sul livello medio del fondo, indipendentemente dalla natura del fondo e dal regime di corrente. In corrispondenza dei due attraversamenti del F. Po da parte del gasdotto, si sono calcolate le rispettive altezze idrometriche sopra il livello medio del canale e applicando il metodo sopra riportato di *Yaremko and Cooper* si sono calcolati gli spessori di erosione generalizzata che l'alveo potrebbe subire in caso di piena critica. Nella seguente tabella si riportano i risultati di tale stima (v. Tab. 5.5/C).

PRIMO ATTRAVERSAMENTO PO		
Livello medio canale inciso	h_{ch}	169.60 m
Livello idrico $Tr=200$ (stima PGRA per sez. 166-S(v))	h_{w200}	176.65 m
Altezza idrometrica media	d_m	7.05 m
Erosione fondo	s	3.53 m

SECONDO ATTRAVERSAMENTO PO		
Livello medio canale inciso	h_{ch}	178.70 m
Livello idrico $Tr=200$ (stima PGRA per sez. 166-S(v))	h_{w200}	185.06 m
Altezza idrometrica media	d_m	6.36 m
Erosione fondo	s	3.18 m

Tabella 5.5/C - Stima erosione di fondo

⁷ Pemberton E.L., J.M. Lara, Computing degradation and local scour, in "Sedimentation and River Hydraulics" Hydrology Branch, Division of Planning Technical Services, Engineering and Research Center, 1984

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

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 25 di 35	Rev. 0

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:

- 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:

$$s = 0,378 \cdot H^{0,5} \cdot q^{0,35} + 2,15 \cdot a \quad (\text{Schoklitsch})^9$$

$$s = 0,65 \cdot (H-h) \cdot q^{3/5} \cdot D_{90}^{-2/5} - h \quad (\text{Eggerberger})^{10}$$

$$s = h \cdot (1,82 - 1,64(1 - e^{-(\lg \tau_c / \rho v^2)})) \cdot (94 - 8 \lg \tau_c / \rho v^2)^{-1} \cdot 10^3 \quad (\text{Adami})^{11}.$$

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 fondo¹²;
- v = velocità media nell'alveo inciso (m/s);
- q = Q/L: portata per unità di larghezza dell'alveo (m³/s m);
- Q = portata nell'alveo inciso (m³/s);
- L = larghezza dell'alveo inciso (m);
- a = dislivello delle quote d'alveo in relazione alla lunghezza del tratto di alveo pari all'altezza idrica di piena (m).

⁹ Schoklitsch, A, Stauraum verlandung und kolkbewehr, Springer Ed., Vienna, 1935.

¹⁰ Eggerberger, W., Die Kolkbildung beim reinen Überströmen und bei der Kombination Überströmen-Unterströmen, Mitt. Versuchsanstalt für Wassrbau, Eidg. Tech. Hochsch., Zürich, Switzerland, 1944.

¹¹ Adami A., Fenomeni localizzati ed erosioni negli alvei, Atti "Moderne vedute sulla meccanica dei fenomeni fluviali", CNR; P.F. Conservazione del suolo, 1979.

¹² Hydraulic depth in channel (channel flow area/topwidth of channel flow)

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 26 di 35	Rev. 0

In considerazione dell'ampiezza della sezione fluviale delle due sezioni di attraversamento occupate dalla portata di piena, che determina anche esondazioni in aree golenali, prudenzialmente si è eseguita la valutazione degli approfondimenti localizzati in corrispondenza della zona di alveo centrale più sollecitata, calcolando la portata specifica in tale zona in funzione della velocità e del battente previsto.

I risultati vengono riportati nella seguente tabella (v. Tab. 5.5/D).

ATTRAVERSAMENTO PO 1		
Battente massimo	h_{ch}	8.35 m
Velocità canale	v_{ch}	5 m/s
Carico totale	H_{ch}	9.60 m
Portata unitaria	q_{ch}	41.75 m ³ /s
Dislivello buca	a	0,02 m
Approf. localizzati	s	4.75 m

ATTRAVERSAMENTO PO 2		
Battente massimo	h_{ch}	7.26 m
Velocità canale	v_{ch}	4.25 m/s
Carico totale	H_{ch}	8.16 m
Portata unitaria	q_{ch}	30.86 m ³ /s.m
Dislivello buca	a	0.02 m
Approf. localizzati	s	4.02 m

Tabella 5.5/D - Stima profondità buche in alveo

Il calcolo ha evidenziato che nelle sezioni di attraversamento gli approfondimenti localizzati possono avere una profondità di 4.75 - 4.02 m dal livello medio dell'alveo per il primo e secondo attraversamento rispettivamente.

Diametro limite dei clasti

Per la determinazione del diametro limite dei clasti trasportabili dalla piena si può fare riferimento al 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:

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

in cui:

- τ_o =tensione tangenziale (kg/m²);
- γ_s =peso specifico delle particelle (kg/m³);
- γ_w =peso specifico dell'acqua (1000 kg/m³);
- 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;
- μ =viscosità cinematica (m²/s);
- V^* =velocità d'attrito (m/s).

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 27 di 35	Rev. 0

Si ha inoltre:

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

in cui:

- δ = densità dell'acqua (= 102 kg·s²/m⁴);
- 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 " τ_o " e di " V^* "; inoltre, per valori di " V^*d/μ " maggiori di 500, che nei corsi d'acqua naturali si verificano in alvei con materiale grossolano, 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 la corrente può esercitare nell'alveo inciso una tensione tangenziale massima in caso di piena duecentennale $\tau_o = 139$ N/m² e $\tau_o = 99$ N/m² nella sezione del primo attraversamento e del secondo attraversamento rispettivamente cui corrisponde una capacità di trasporto massima di un clasto di circa 14 cm e 10 cm.

5.7 Erosione nelle aree golenali

Nelle aree golenali la velocità della corrente è usualmente molto più contenuta che nell'alveo del corso d'acqua, in virtù della diversa scabrezza, spesso maggiore, e della geometria con rapporto battenti/larghezza sensibilmente più contenuti.

La verifica della possibilità che si possano determinare fenomeni erosivi, è stata condotta sulla base della relazione di Lischtvan-Lebediev come sopra descritto:

$$V_{lim} = 4.7 \times \beta \times D_{84}^{0.28} \times H^{(0.223/D_{84}^{0.092})}$$

dove:

$$\beta = 0.8416 + 0.03342 \times \ln T_r = 1.0187$$

D_{84} = dimensione delle particelle del terreno, corrispondente al passante del 84% del fuso granulometrico = 3÷10 mm (valore stimato sulla base delle numerose granulometrie eseguite)

H = altezza del battente idrico medio (variabile, vedi di seguito)

T_r = tempo di ritorno della piena = 200 anni

Il tracciato, sviluppandosi interamente nel fondovalle in aree per lo più soggette ad esondazione/allagamento da parte delle acque del Po in caso di piena critica, si trova ad essere sommerso in tale evenienza da un battente idrico variabile, anche di significativo spessore.

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 28 di 35	Rev. 0

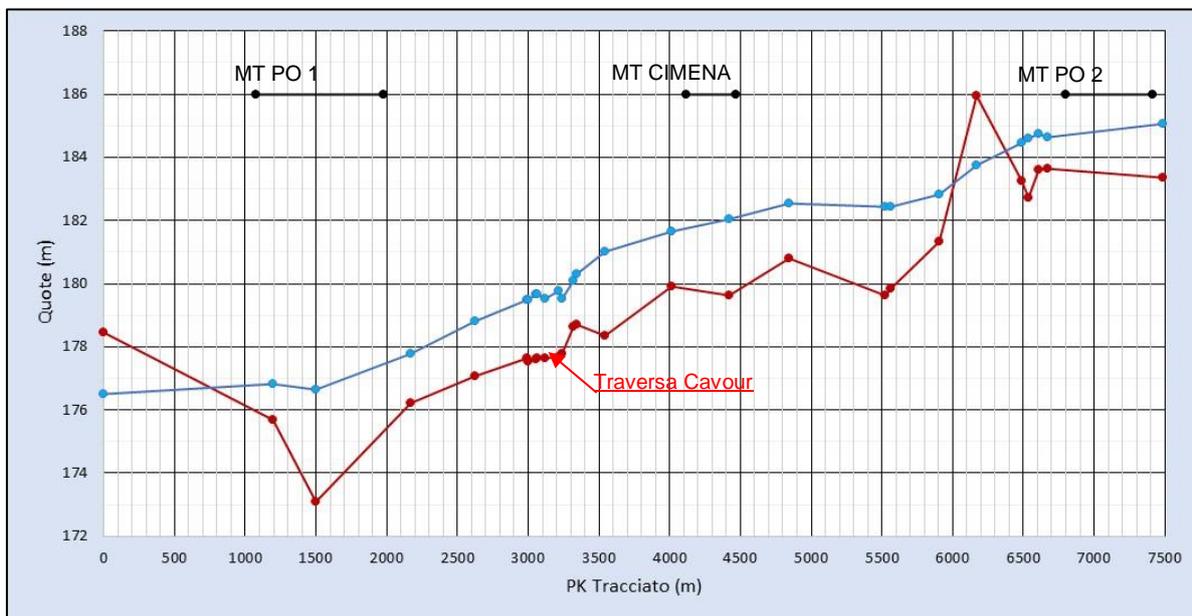


Figura 5.7/A – Profilo lungo il tracciato (linea rossa) e livello idrico Tr=200 (linea azzurra) con riportata la localizzazione dei tratti in microtunnel (MT). Dal confronto si evidenzia il battente idrico di piena

Nella figura sopra riportata vengono rappresentati il profilo del tracciato e il livello della piena duecentennale, desunto dalle varie sezioni di modellazione di AdB Po. Vengono indicati anche i tratti previsti in microtunnel per gli attraversamenti subalvei del fiume Po e del canale Cimena. Nella tabella seguente si riportano i valori delle quote del terreno, del livello idrico duecentennale e del battente conseguente per le varie sezioni considerate lungo il tracciato del metanodotto delle quali si indicano le progressive lungo il tracciato stesso.

Sez. AdB Po	PK	Quote terreno	Livello idrico Tr= 200	Battente idrico	Sez. AdB Po	PK	Quote terreno	Livello idrico Tr= 200	Battente idrico
	0	178.46	176.50	-1.96	98685	3545	178.36	181.00	2.64
96420	1198	175.67	176.82	1.15	99144	4017	179.90	181.65	1.75
96652	1503	173.10	176.65	3.55	99552	4424	179.64	182.03	2.39
97153	2166	176.20	177.79	1.59	100107	4843	180.79	182.55	1.76
97626	2625	177.06	178.80	1.74	100527	5525	179.63	182.43	2.80
97820	2991	177.64	179.49	1.85	100861	5559	179.84	182.43	2.59
97835	3004	177.54	179.49	1.95	101184	5902	181.32	182.83	1.51
97886	3054	177.61	179.65	2.04	101583	6171	185.94	183.75	-2.19
97897	3065	177.64	179.67	2.03	101909	6486	183.24	184.45	1.21
98265	3118	177.64	179.51	1.87	101955	6536	182.72	184.60	1.88
98364	3217	177.69	179.78	2.09	102117	6606	183.61	184.75	1.14
98390	3243	177.77	179.51	1.74	102187	6671	183.63	184.64	1.01
98468	3321	178.62	180.10	1.48		7485	183.36	185.06	1.70
98493	3346	178.72	180.32	1.60					

Tabella 5.7/A – Quote terreno e livelli idrici Tr=200 in corrispondenza delle varie sezioni

Per i singoli tratti in cui si può significativamente suddividere il tracciato - fatta esclusione dei tratti in microtunnel - si sono calcolati, tramite la sopra riportata relazione di Lischtvan-Lebediev, i valori della

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 29 di 35	Rev. 0

velocità limite della corrente necessari per dar luogo a erosione del suolo e confrontati con la velocità attesa della corrente di esondazione in caso di evento duecentennale (rif. 4.2). Per quanto riguarda il valore del diametro D_{84} del terreno superficiale, con riferimento alle varie granulometrie eseguite esso è compreso tra 3 e 10 mm; nei calcoli è stato assunto prudenzialmente il valore inferiore. Analizzando i risultati ottenuti (v. Tab. 5.7/B), si osserva che la velocità della corrente del flusso di esondazione è sempre inferiore al valore limite per tutti i tratti considerati, motivo per il quale si esclude il rischio di erosione da parte delle acque di esondazione.

Tratto	Progressive tratto		Battente		Vel. max. corrente (m/s)	Velocità limite	
	(m)		(m)			(m/s)	
	Inizio	Fine	Min.	Max.			
Prima del MT1 Attr. Po 1	0	1074	0.00	1.15	0.5	0.00	1.87
Da MT1 a Traversa Cavour	1976	2991	2.00	1.85	1.0	2.17	2.22
Da Traversa Cavour a MT2 Attr. Cimena	2991	4120	1.85	1.90	0.4	2.22	2.19
Da MT2 Cimena a MT3 Attr. Po 2	4470	6799	2.39	1.01	0.4	2.35	1.80
Da MT3 Po a fine tracciato	7414	7485	1.01	1.70	0.9	1.80	2.11

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 30 di 35	Rev. 0

6 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il tracciato del metanodotto in oggetto “*Variante Cortemaggiore - Torino (Chivasso) DN 400 (16'') – DP 24 bar*” si snoda interamente nel fondovalle del F. Po, all’altezza di Chivasso e comprende anche due attraversamenti in subalveo del fiume stesso, previsti entrambi tramite la tecnologia trenchless del *microtunneling*.

In corrispondenza delle sezioni di attraversamento le caratteristiche idrauliche del flusso di piena duecentennale sono le seguenti:

		PRIMO ATTRAVERSAMENTO	SECONDO ATTRAVERSAMENTO
Quota minima fondo alveo	(m)	168.30	177.80
Livello idrico Q ₂₀₀ (*)	(m)	176.65	185.06
Tirante massimo (*)	(m)	8.35	7.26
Velocità in alveo	(m/s)	4.5÷ 5	4.25
Copertura min. MT	(m)	15.63	15.00

(*) Valori riferiti all'asse fiume

Tabella 6/A – Caratteristiche idrauliche della piena Q₂₀₀ alle sezioni di attraversamento

Gli attraversamenti dell’alveo sono previsti a notevole profondità sotto il fondo alveo; la tubazione del metanodotto viene alloggiata all’interno di un microtunnel in conci di c.a. di diametro esterno circa 2500 mm e pertanto in condizione di assoluta sicurezza.

Gli spessori di copertura del microtunnel, rispetto al fondo alveo, risultano di gran lunga superiori ad eventuali approfondimenti dello stesso dovuti a fenomeni di aratura di fondo o anche di buche localizzate, ipotizzabili in caso di piena critica, confermando pertanto la più che sicura profondità dei microtunnel previsti (v. Tab. 6/B).

		PRIMO ATTRAVERSAMENTO	SECONDO ATTRAVERSAMENTO
Spessore di copertura minimo	(m)	15.63	15.00
Erosione di fondo massima	(m)	3.53	3.18
Spessore buche localizzate	(m)	4.75	4.02

Tabella 6/B – Caratteristiche idrauliche della piena Q₂₀₀ alle sezioni di attraversamento del F. Po

Dalle informazioni derivanti dalla cartografia pregressa per un periodo significativamente lungo si è constatato che il fiume, pur avendo avuto nel tempo spostamenti planimetrici, non ha mai interessato le zone percorse in golena dal tracciato, permettendo pertanto di ritenere improbabili instabilità planimetriche che interferiscano col tracciato stesso. Anche dall’attività di studio locale da parte di AdB Po emerge che le porzioni di fondovalle percorse dal metanodotto risultano all’esterno di fasce di mobilità sia a breve che a lungo termine (rif. Fig. 5.3/A).

In merito alla possibilità di erosione delle aree golenali in cui si snoda il tracciato, si è verificato che le velocità del flusso di esondazione in relazione alla tipologia di terreno presente e ai battenti previsti non determinano erosioni del terreno e conseguenti abbassamenti del piano campagna.

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 31 di 35	Rev. 0

In merito agli impianti previsti lungo il tracciato, costituiti da aree recintate con rete metallica e privi di edifici al loro interno, si evidenzia che i battenti stimati dalle modellazioni idrauliche sono:

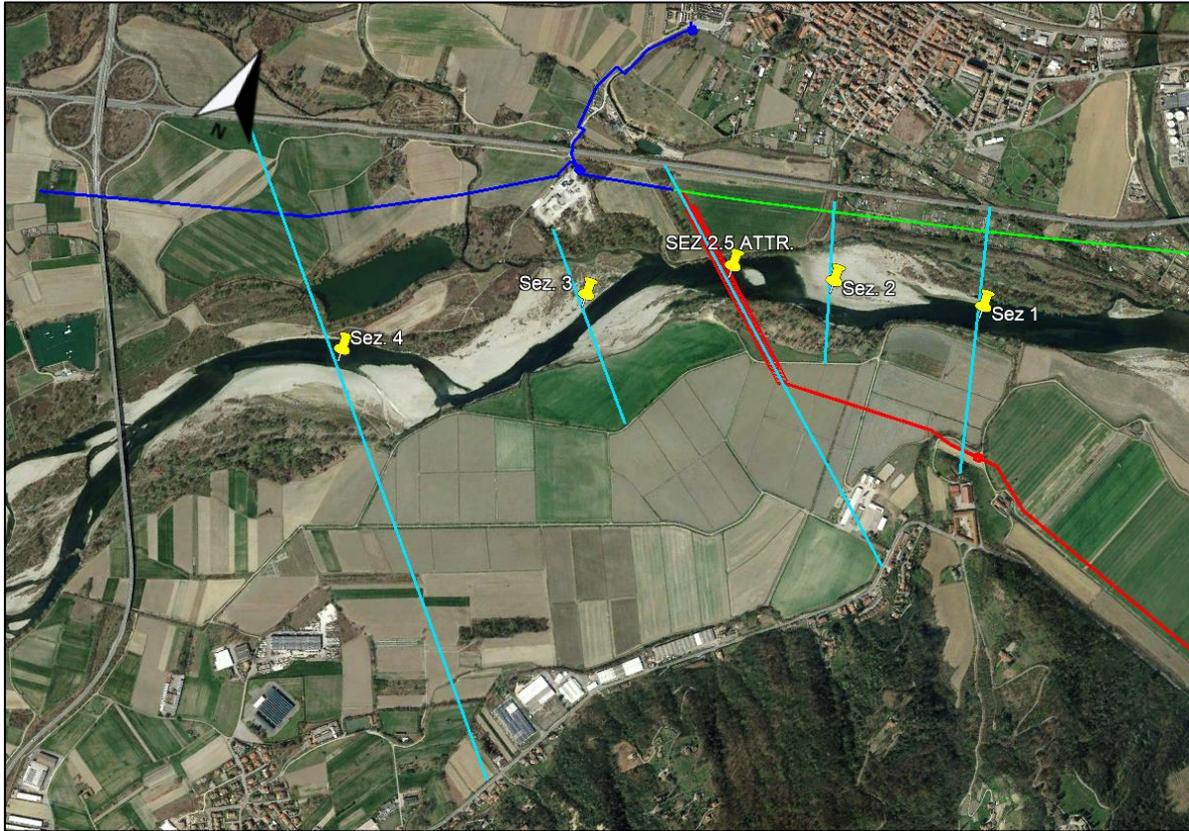
- PIDI n. 1 (PK 0+148): ricade in area priva di battenti idrici (v. Fig. 4.1/C)
- PIL n. 2 (PK 0+998): ricade in area con battenti idrici stimati in 0.1-0.5 m (v. Fig. 4.1/C)
- PIL n. 3 (PK 6+146): ricade in area prossima al limite dell'esondazione, con battenti sicuramente inferiori a 0.4 m, prossimi a 0 m (v. Fig. 4.2.2/A).

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 32 di 35	Rev. 0

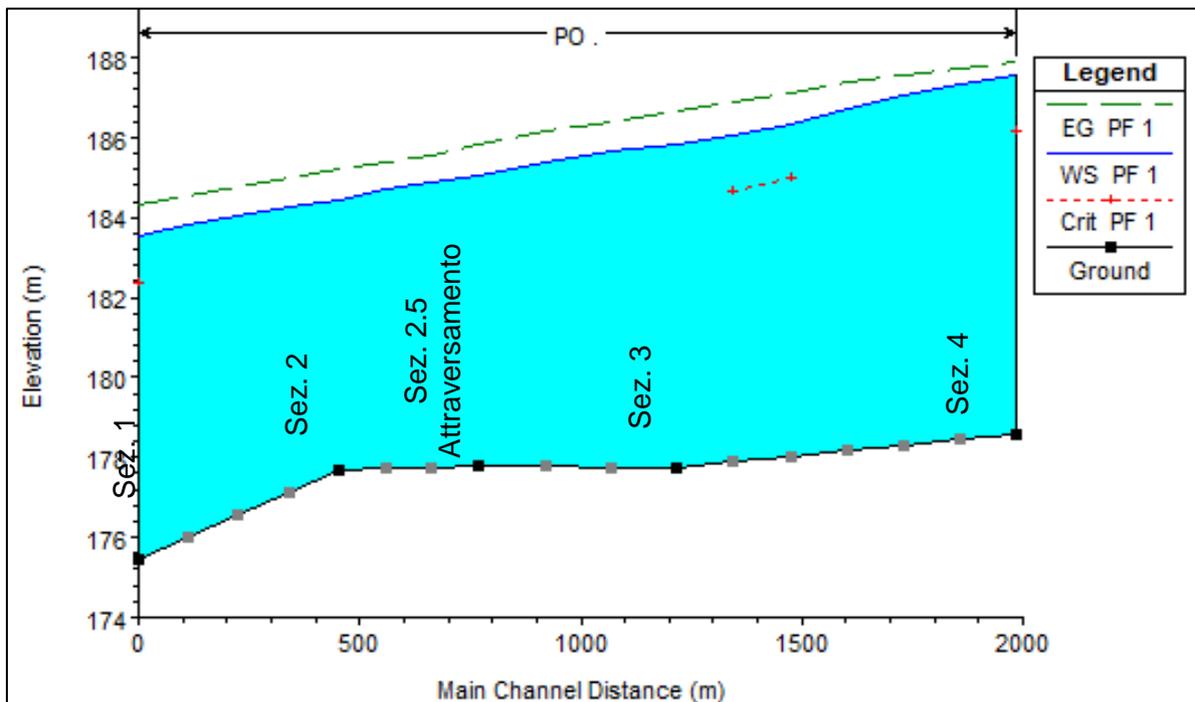
ANNESSO

RISULTATI DELLA MODELLAZIONE ALVEO PRESSO SECONDA SEZIONE DI ATTRAVERSAMENTO PO (ATTRAVERSAMENTO N. 3)

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 33 di 35	Rev. 0



Localizzazione delle sezioni utilizzate per la modellazione locale



Profilo longitudinale con livello idrico Q200

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 34 di 35	Rev. 0

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
.	4	PF 1	5296.00	178.59	187.57	186.16	187.86	0.000784	2.92	4234.97	2040.60	0.40
.	3.8333*	PF 1	5296.00	178.45	187.34		187.73	0.000963	3.20	3547.44	1765.37	0.44
.	3.6667*	PF 1	5296.00	178.31	187.05		187.56	0.001200	3.52	2868.51	1521.59	0.49
.	3.5000*	PF 1	5296.00	178.17	186.70		187.36	0.001491	3.85	2276.97	1188.87	0.54
.	3.3333*	PF 1	5296.00	178.02	186.33	185.00	187.13	0.001762	4.13	1853.77	907.32	0.58
.	3.1667*	PF 1	5296.00	177.88	186.04	184.63	186.89	0.001816	4.19	1652.06	716.08	0.59
.	3	PF 1	5296.00	177.74	185.81		186.66	0.001762	4.14	1520.76	546.51	0.58
.	2.8333*	PF 1	5296.00	177.76	185.64		186.38	0.001430	3.89	1688.89	600.21	0.53
.	2.6667*	PF 1	5296.00	177.78	185.36		186.14	0.001682	4.03	1787.18	812.17	0.57
.	2.5	PF 1	5296.00	177.80	185.06		185.83	0.002384	4.25	2037.26	991.98	0.66
.	2.3333*	PF 1	5296.00	177.76	184.88		185.57	0.001676	3.91	2024.25	810.70	0.57
.	2.1667*	PF 1	5296.00	177.72	184.72		185.38	0.001461	3.78	1902.34	622.16	0.53
.	2	PF 1	5296.00	177.68	184.42		185.19	0.001758	4.03	1597.55	427.53	0.58
.	1.7500*	PF 1	5296.00	177.13	184.25		184.97	0.001724	3.92	1712.17	510.21	0.57
.	1.5000*	PF 1	5296.00	176.57	184.05		184.77	0.001801	3.91	1748.12	586.09	0.58
.	1.2500*	PF 1	5296.00	176.02	183.80		184.56	0.001903	3.98	1714.94	621.20	0.60
.	1	PF 1	5296.00	175.46	183.55	182.37	184.33	0.002002	4.05	1662.28	645.33	0.61

Parametri idraulici per varie sezioni di modellazione

Plan: Plan 01 PO . RS: 2.5 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	185.83	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.77	Wt. n-Val.	0.070	0.030	0.070
W.S. Elev (m)	185.06	Reach Len. (m)	175.33	106.00	216.33
Crit W.S. (m)		Flow Area (m ²)	682.64	1039.35	315.27
E.G. Slope (m/m)	0.002384	Area (m ²)	682.64	1039.35	315.27
Q Total (m ³ /s)	5296.00	Flow (m ³ /s)	619.26	4416.59	260.15
Top Width (m)	991.98	Top Width (m)	485.96	243.44	262.57
Vel Total (m/s)	2.60	Avg. Vel. (m/s)	0.91	4.25	0.83
Max Chl Dpth (m)	7.26	Hydr. Depth (m)	1.40	4.27	1.20
Conv. Total (m ³ /s)	108459.9	Conv. (m ³ /s)	12682.2	90450.0	5327.7
Length Wtd. (m)	117.97	Wetted Per. (m)	486.62	246.38	263.17
Min Ch El (m)	177.80	Shear (N/m ²)	32.80	98.63	28.01
Alpha	2.25	Stream Power (N/m s)	29.75	419.13	23.11
Frctn Loss (m)	0.23	Cum Volume (1000 m ³)	269.73	939.75	392.46
C & E Loss (m)	0.03	Cum SA (1000 m ²)	187.20	198.23	239.20

Parametri idraulici per la sezioni di attraversamento

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NQ/R21072	UNITÀ 00
	LOCALITA' REGIONE PIEMONTE	REL-PAI-E-00501	
	PROGETTO VARIANTE CORTEMAGGIORE – TORINO DN 400 (16'') – DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pagina 35 di 35	Rev. 0

