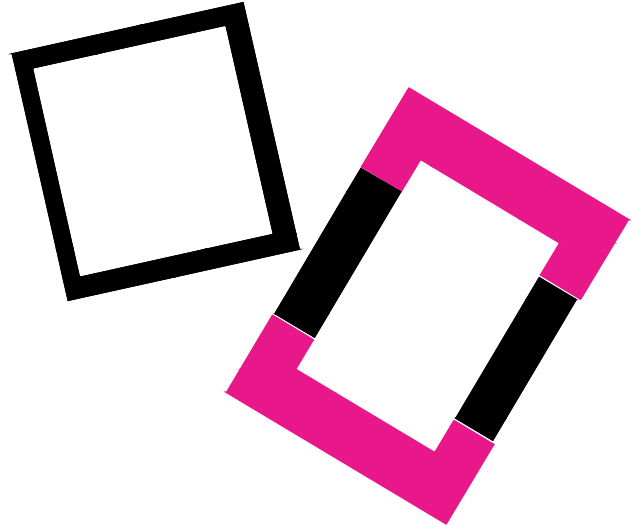




STADIO "ATLETI AZZURRI D'ITALIA"
PIANO ATTUATIVO



PROPRIETA' E COORDINAMENTO GENERALE

STADIO ATALANTA SRL

Via G. Paglia, 1/D
24122 - Bergamo
T +39 035 280 111 F +39 035 225 761

COMUNE DI BERGAMO

Palazzo Frizzoni, piazza Matteotti, 27
24122 - Bergamo
T +39 035 399 111 F +39 035 066 2696

TAVOLA

ARCH

EA1

SCALA



ELABORATO
PROGETTUALE

DATA
NOVEMBRE 2017

EMISSIONE
REV. A

PROGETTO ARCHITETTONICO E URBANISTICO

De8 ARCHITETTI

Via Portico 59/61, 24050, Orio al Serio, Bg
T +39 035 530 050 F +39 035 199 010 67
info@deottostudio.com
www.deottostudio.com



OGGETTO

STUDIO DI COMPATIBILITA' IDRAULICA
Relazione Idraulica

VALUTAZIONE AMBIENTALE STRATEGICA E IMPATTO AMBIENTALE

Iter Ingegneria del Territorio S.r.l.

Via C. Colombo 23, 20090 - Trezzano S/N, Mi
T +39 02 484 68 519 F +39 02 484 00 429



AVANZAMENTO

REVISIONE

PROGETTO MOBILITA'

Iter Ingegneria del Territorio S.r.l.

Via C. Colombo 23, 20090 - Trezzano S/N, Mi
T +39 02 484 68 519 F +39 02 484 00 429



STUDIO DI COMPATIBILITA' IDRAULICA

dott.ing. Sergio Taccolini dott.ing. Fabio Gagni
N.1234 Albo Ingegneri Bergamo N. 2713 Albo Ingegneri Bergamo

STUDIO TACCOLINI INGEGNERI ASSOCIATI

24122 BERGAMO - VIA ZAMBONATE, 81 Tel./Fax 035 244309 e-mail: taccoliniassociati@sonic.it

n°	descrizione description	data date	eseguito drawn	approvato approved
1	aggiornamento	02.2018		
2	aggiornamento	04.2018		



Copyright e tutti i diritti sono riservati. La riproduzione anche parziale è vietata. La scala di disegno è puramente indicativa. Non effettuare misure su questo disegno, fare riferimento alla quote scritte. TUTTE LE MISURE VANNO VERIFICATE IN CANTIERE

Indice generale

1	Premessa.....	1
2	Studi pregressi	2
2.1	AUTORITÀ DI BACINO FIUME PO SOTTOPROGETTO SP1.4 TORRENTE MORLA (31 OTTOBRE 2002).....	2
2.2	COMUNE DI BERGAMO: RINNOVO CONCESSIONI T. MORLA ING. GIUSEPPE PASINETTI - 2004.....	11
2.3	REGIONE LOMBARDIA -CONSORZIO DI BONIFICA: STUDIO IDROLOGICO, IDRAULICO ED AMBIENTALE A SCALA DI SOTTOBACINO IDROGRAFICO DEL TORRENTE MORLA E DELLE ROGGE AD ESSO CONNESSE 2015.....	16
2.4	CONCLUSIONI	19
3	Descrizione del bacino idrografico del Torrente Tremana	20
3.1	CARATTERIZZAZIONE DEL BACINO IDROGRAFICO	20
3.2	CALCOLO DEL TEMPO DI CORRIVAZIONE.....	22
4	La caratterizzazione pluviometrica dei bacini scolanti.....	24
4.1	LE LINEE SEGNALETRICI DI PROBABILITÀ PLUVIOMETRICA S.I.I. 1021 BERGAMO	24
4.2	LE LINEE SEGNALETRICI DI PROBABILITÀ PLUVIOMETRICA - ARPA	30
4.3	EVENTO REGISTRATO 26/06/2016 – STAZIONE BERGAMO VIA GOISIS	33
4.4	SCELTA DELLE LINEE SEGNALETRICI DI CALCOLO	35
4.5	IL RAGGUAGLIO DELLE PIOGGE ALL' AREA.....	35
4.5.1	<i>La procedura Wallingford.....</i>	<i>35</i>
4.5.2	<i>La modifica dei parametri delle L.S.P.P.....</i>	<i>36</i>
4.5.3	<i>La procedura di Moisello-Papiri.....</i>	<i>36</i>
4.5.4	<i>Il metodo di Eagleson.....</i>	<i>36</i>
4.6	LO IETOGRAMMA DI CHICAGO	38
4.7	LO IETOGRAMMA COSTANTE.....	39
5	I modelli di trasformazione afflussi-deflussi	40
5.1	IL METODO PERCENTUALE	40
5.2	IL METODO DEL CN DEL SOIL CONSERVATION SERVICE.....	41
5.3	IL METODO DELL'INVASO.....	42
5.4	IL METODO DI NASH.....	43
6	Calcolo delle portate critiche.....	45
6.1	STIME MEDIANTE FORMULE BASATE SULLA PLUVIOMETRIA	45
6.2	STIME MEDIANTE IL CALCOLO DELLA CONVOLUZIONE	46
6.3	CONFRONTO E SCELTA DELLE PORTATE CRITICHE DEL T. TREMANA	47
6.4	PORTATE CRITICHE T. MORLA	48
7	Verifiche idrauliche e stima dei livelli di piena.....	49
7.1	RICOSTRUZIONE DEI PROFILI DI MOTO PERMANENTE	49
7.2	LE CONDIZIONI AL CONTORNO	51
7.3	I RISULTATI OTTENUTI PER IL T. TREMANA TR 100 ANNI	52
7.4	I RISULTATI OTTENUTI PER IL T. TREMANA TR 200 ANNI	59
7.5	I RISULTATI OTTENUTI PER IL T. MORLA.....	65

7.6	I RISULTATI OTTENUTI NELLO SCENARIO DI SISTEMAZIONE IDRAULICA DEL T. MORLA	71
7.7	I RISULTATI OTTENUTI NELLO SCENARIO DI SISTEMAZIONE IDRAULICA DEL T. MORLA E SCOLMATORE TREMANA	79
7.8	PROPOSTE ALTERNATIVE	81
8	Analisi delle interferenze con la rete fognaria.....	84
8.1	ANALISI DELLE INTERFERENZE CON LA RETE FOGNARIA.....	84
8.2	L'INVARIANZA IDRAULICA ED I BENEFICI SUL SISTEMA FOGNARIO ESISTENTE.....	86
9	Conclusioni.....	88

Indice Figure

Figura 2.1:	Idrogrammi dei bacini chiusi alle sez. 32, 12 e 6 per T=20 anni.....	3
Figura 2.2:	Idrogrammi dei bacini chiusi alle sez. 32, 12 e 6 per T=100 anni.....	4
Figura 2.3:	Idrogrammi dei bacini chiusi alle sez. 32, 12 e 6 per T=200 anni.....	4
Figura 2.4:	Idrogrammi dei bacini chiusi alle sez. 32, 12 e 6 per T=500 anni.....	5
Figura 2.5:	Idrogrammi dei bacini residui 32-12, 12-6 e 6-1 per T=20 anni.....	5
Figura 2.6:	Idrogrammi dei bacini residui 32-12, 12-6 e 6-1 per T=100 anni.....	6
Figura 2.7:	Idrogrammi dei bacini residui 32-12, 12-6 e 6-1 per T=200 anni.....	6
Figura 2.8:	Idrogrammi dei bacini residui 32-12, 12-6 e 6-1 per T=500 anni.....	7
Figura 2.9:	Idrogramma concentrato in ingresso alla sezione di chiusura NC 5/34 per assegnato tempo di ritorno	8
Figura 2.10:	Idrogramma distribuito per assegnato tempi di ritorno, tratto 1-5 (NC 5/34).....	9
Figura 2.11:	Idrogramma concentrato in ingresso alla sezione di chiusura 12 per assegnato tempo di ritorno	9
Figura 2.12:	Idrogramma distribuito lungo il tratto NC 5/34-12 per assegnato tempi di ritorno	10
Figura 2.13:	Idrogramma concentrato in ingresso alla sezione di chiusura 50 per assegnato tempo di ritorno	10
Figura 2.14:	Idrogramma distribuito lungo il tratto 12-31 per assegnato tempi di ritorno.....	11
Figura 2.15:	Ubicazione delle Rogge sulla Carta Tecnica Regionale - CTR	14
Figura 2.16:	Idrogrammi di piena per Tr = 100 anni dei torrenti Morla (in rosso) e Tremana (in blu) alla confluenza.....	16
Figura 2.17:	Quantificazione della criticità idraulica alla confluenza dei T. Morla e Tremana per Tr=100anni – Idrogramma complessivo alla confluenza (sopra, in rosso) confrontato con la massima capacità di deflusso del T. Morla immediatamente a valle (sopra, in verde) e relativo idrogramma di portate in esubero (sotto, in blu) all'origine dei fenomeni di esondazione individuati.	17
Figura 2.18:	Particolare del profilo di rigurgito al nodo di immissione del T. Tremana per Tr=20, 100 e 200 anni, con evidenziata la minor altezza dei muri in sponda sinistra (linea tratteggiata verde) rispetto a quelli in sponda opposta (linea tratteggiata viola).....	18
Figura 3.1:	Bacino scolante del T. Tremana chiuso alla confluenza del T. Morla.	21

Figura 4.1: Mappa iso-a per Tr = 100 anni tratte dal P.T.C.P. (d>1h).....	28
Figura 4.2: Mappa iso-n per Tr = 100 anni tratte dal P.T.C.P. (d>1h).	28
Figura 4.3: Stralcio planimetrico CTR - Ubicazione Stazioni Progetto STRADA - Bacino di interesse	30
Figura 4.4: Linee segnalatrici di possibilità pluviometrica – Arpa Lombardia.....	32
Figura 4.5: Evento pluviometrico registrato dalla stazione Bergamo Goisis – 26/06/2016	34
Figura 4.6: Evento pluviometrico 26/06/2016 e LSPP – Stazione Bergamo Goisis.....	34
Figura 6.1: Idrogramma simulato per Tr = 100 [anni]	46
Figura 6.2: Idrogramma simulato per Tr = 200 [anni]	46
Figura 6.3: Idrogramma T. Tremana per l'evento del 26/06/2016.	48
Figura 7.1: Idrogramma nei nodi finali del T. Tremana con livello Htr100 nel T. Morla.....	52
Figura 7.2: Grado di riempimento tombinatura T. Tremana con scarico nel T. Morla con Htr100.....	53
Figura 7.3: Idrogramma nei nodi finali del T. Tremana con sbocco libero nel T. Morla.	54
Figura 7.4: Stralcio profilo idraulico T. Morla alla confluenza con T. Tremana per condizione limite.	55
Figura 7.5: Profilo idraulico T. Tremana per l'evento TR 100 anni con livello Htr100 nel T. Morla.....	56
Figura 7.6: Profilo idraulico T. Tremana per l'evento TR 100 anni con sbocco libero nel T. Morla.....	57
Figura 7.7: Profilo idraulico T. Tremana per l'evento TR 100 anni con battente a 260.30 [m s.l.m.] nel T. Morla.....	58
Figura 7.8: Grado di riempimento tombinatura T. Tremana con scarico nel T. Morla con Htr200.....	60
Figura 7.9: Profilo idraulico T.Tremana per l'evento TR 200 anni con livello Htr200 nel T. Morla.....	61
Figura 7.10: Profilo idraulico T.Tremana desunto dallo studio idrogeologico redatto dallo Studio Telò.....	62
Figura 7.11: Profilo idraulico T. Tremana per l'evento TR 200 anni con sbocco libero nel T. Morla.....	63
Figura 7.12: Profilo idraulico T. Tremana per l'evento TR 200 anni con pelo libero nel T. Morla di 260.30 [m s.l.m.].....	64
Figura 7.13: Tombinatura compresa tra le sezioni 05.A-M e 05.A-V.	66
Figura 7.14: Ponte compreso tra le sezioni 05-M e 05-V.....	66
Figura 7.15: Tombinatura di Piazzale Oberdan e traversa posta circa 13m a monte.	67
Figura 7.16: Profilo di moto permanente tratto T. Morla con confluenza T. Tremana (condizione moto uniforme a valle i=0.3%).	68
Figura 7.17: Profilo di moto permanente tratto T. Morla con confluenza T. Tremana (condizione stato critico a valle).	69
Figura 7.18: Estratto profilo di piena del T. Morla – Studio idraulico Telò e Murachelli [2015].....	70
Figura 7.19: Idrogramma laminato desunto dallo Studio del t. Morla (Telò e Murachelli).	72
Figura 7.20: Profilo longitudinale post opere di laminazione previste sul T. Morla per Tr 100 e 200 anni (scenario B).	73
Figura 7.21: Confronto stato di fatto e progetto (in rosso) per le opere di laminazione previste sul T. Morla per eventi con Tr 200 anni.	74
Figura 7.22: Confronto stato di fatto e progetto (in rosso) per le opere di laminazione previste sul T. Morla per eventi con Tr 100 anni.	75

Figura 7.23: Profili idraulici T. Tremana con livelli laminati nel T. Morla.....	76
Figura 7.24: Grado di riempimento tombinatura T. Tremana con scarico nel T. Morla idrogramma laminato Tr100.....	77
Figura 7.25: Grado di riempimento tombinatura T. Tremana con scarico nel T. Morla idrogramma laminato Tr200.....	78
Figura 7.26: Profili idraulici Bypass $\varnothing 120$ e tombinatura esistente T. Tremana.....	79
Figura 7.27: Grado di riempimento tombinatura T. Tremana con BYPASS - T. Morla idrogramma laminato Tr200.....	80
Figura 7.28: Ripartizione delle portate tra tombinatura esistente e lo scolmatore in progetto.....	81
Figura 7.29: Vista da monte dell'area verde posta al termine del bacino collinare del T. Tremana.....	82
Figura 7.30: Vista da valle dell'area a verde ove inizia la parte tombinata del T. Tremana.....	83
Figura 7.31: Vista da monte dell'area a verde delle scuole primarie in fregio alla Via Tremana.....	83
Figura 8.1: Estratto della rete fognaria esistente.....	84
Figura 8.2: Localizzazioni scolmatori con recapito nel reticolo idrografico studiato.....	85
Figura 8.3: Idrogramma naturale del bacino che verrà laminato secondo i criteri dell'invarianza idraulica.....	87

Indice Tabelle

Tabella 2.1: Elementi caratteristici bacini scolanti.....	2
Tabella 2.2: Parametri delle curve pluviometriche.....	3
Tabella 2.3: Portate al colmo nelle sezioni di interesse ottenute dalla modellazione.....	7
Tabella 2.4: Portate al colmo.....	7
Tabella 2.5: Stazione pluviometrica di Bergamo: Parametri a - n.....	11
Tabella 2.6: Tempi di corrivazione.....	12
Tabella 2.7: Parametri idrogramma unitario - Nash.....	12
Tabella 2.8: Portate al colmo nelle sezioni di chiusura A - B - C.....	12
Tabella 2.9: Portate al colmo complessive.....	13
Tabella 2.10: Portate al colmo complessive.....	15
Tabella 2.11: Portate al colmo nelle sezioni di chiusura A - B - C.....	19
Tabella 3.1: Caratteristiche idrografiche e tempo di corrivazione del bacino.....	23
Tabella 4.1: Parametri della distribuzione di Gumbel per durata inferiori ad un'ora.....	26
Tabella 4.2: Parametri della distribuzione di Gumbel per durata superiori ad un'ora.....	27
Tabella 4.3: Serie storica dei massimi annuali delle piogge Stazione pluviometrica del S.I.I. 1021 BERGAMO - (quota: 366 m s.l.m.).....	29
Tabella 4.4: Stazioni Progetto STRADA - Bacino di interesse.....	30
Tabella 4.5: Parametri 1-24 - Bacino in esame.....	31
Tabella 4.6: Tabella delle precipitazioni previste al variare delle durate e dei tempi di ritorno.....	32

Tabella 4.7: ARPA Bergamo – Via Goisis – Evento del 26/06/2016	33
Tabella 4.8: Parametri delle L.S.P.P. e ragguaglio all'area	37
Tabella 4.9: Evento pluviometrico di progetto	38
Tabella 5.1: Definizione dei bacini elementari e relativi coefficienti di afflusso.	40
Tabella 5.2: Valori di CN per i singoli sottobacini del T. Tremana.....	42
Tabella 6.1: Risultati riassuntivi del calcolo della portata di progetto.....	47
Tabella 7.1: Tabella coefficienti di scabrezza (PAI – Norme di attuazione – Direttiva 4)	51
Tabella 7.2: Risultati modellazione T. Morla per Tr 200 anni – stato di fatto.....	65
Tabella 7.3: Risultati modellazione T. Morla per Tr 100 anni – stato di fatto.....	67
Tabella 7.4: Risultati modellazione T. Morla per Tr 200 anni – scenario B progetto.....	71
Tabella 7.5: Risultati modellazione T. Morla per Tr 100 anni – scenario B progetto.....	72

Elenco Allegati

ALLEGATO EA1 – RELAZIONE IDRAULICA

ALLEGATO EA2 – RELAZIONE DI PRELIMINARE DIMENSIONAMENTO DELL'INVARIANZA IDRAULICA

TAVOLA E01 – COROGRAFIA GENERALE Scala 1:10.000

TAVOLA E02 – PLANIMETRIA GENERALE CON RETE FOGNARIA Scala 1:2.000

TAVOLA E03 – PLANIMETRIA DI DETTAGLIO Scala 1:1.000

TAVOLA E04 – SEZIONI TRASVERSALI T. MORLA Scala 1:100

TAVOLA E05 – PLANIMETRIA INSUFFICIENZE IDRAULICHE Scala 1:2.000

1 PREMESSA

Nell'ambito del piano attuativo relativo all'ambito di trasformazione AT_12-Stadio, a seguito di apposita conferenza dei servizi svoltasi il 29/11/2017 presso il comune di Bergamo sono stati espressi i rispettivi pareri sul progetto da parte degli enti interpellati per le loro competenze, tra cui in particolare Regione Lombardia UTR di Bergamo che in sintesi chiede la valutazione dei seguenti elementi:

- 1) Approfondimenti in fase di progettazione degli aspetti idrogeologici dell'area oggetto d'intervento.
- 2) Fase di indagine idrogeologica coordinata con la progettazione dello scolmatore Tremana – Morla e del selettore di materiale di Valverde.
- 3) Alternativa allo scolmatore proposto nella relazione idraulica del progetto che garantisca il medesimo bilanciamento idraulico e valutata considerando il selettore di materiale di Valverde.
- 4) Studio di compatibilità idraulica individuati in planimetria le aree esondabili al tempo 0 (in caso di non realizzazione dello scolmatore e del selettore di materiale flottante a Valverde) e al tempo 1 (in caso di realizzazione dei due interventi).

Il presente studio pertanto valuta gli aspetti sopra citati facendo tesoro degli studi estesi ed approfonditi già svolti e alcuni dei quali esplicitamente richiamati nel parere dell'UTR in data 04/12/2017.

Per sommi capi verranno anzitutto esaminati i tre principali studi di carattere idraulico ed ambientale curati da AdBPo anno 2002, Comune di Bergamo anno 2004 e da consorzio di Bonifica e UTR anno 2016.

A seguito di una accurata disamina degli studi sopra citati, della documentazione disponibile ed in particolare della topografia già svolta, elemento indispensabile per ogni valutazione attendibile delle criticità idrauliche della zona, è stata implementata una campagna topografica integrativa per quanto concerne il T Morla ed ad una nuova ed esclusiva campagna di indagine sul Torrente Tremana. Si segnala che non è mai stato compiutamente rilevato il tratto di tombinatura del Tremana.

Tramite opportuni modelli monodimensionale in moto permanente ed in moto vario verranno stimati i livelli di piena sui corsi d'acqua in esame Morla e Tremana nell'area di interesse coincidente con l'intorno dello stadio di Bergamo.

Verrà inoltre valutata la possibilità e l'opportunità di una soluzione tecnica alternativa oppure migliorativa a quella proposta nel progetto preliminare allegato allo studio del 2016 (Consorzio di Bonifica UTR).

Per evidenti motivi di sfasamento temporale il presente studio si concluderà anzitempo rispetto a quello citato nel verbale dell'UTR tutt'ora in fase di affidamento dell'incarico da parte del Comune di Bergamo che peraltro per le sue caratteristiche di progetto esecutivo da appaltare sarà sicuramente più esteso e dettagliato e con particolare riferimento alla vasca di laminazione di Valverde derimerà anche l'alternativa tra le due soluzioni proposte con invaso da 24500 m³ oppure da 23000 m³.

Verranno poi illustrate le modalità di valutazione adottate per tener in debito conto l'interferenza della rete fognaria mista con l'intera tratta del Torrente Tremana.

2 STUDI PREGRESSI

Come detto in premessa e secondo le finalità del presente studio, sono stati esaminati in dettaglio i tre studi idraulici di riferimento sui corsi d'acqua in questione, di seguito si sintetizzano le valutazioni generali e di dettaglio anche per un possibile raffronto sulle stime e idrologiche ed idrauliche del sistema Morla Tremana.

2.1 Autorità di bacino fiume Po sottoprogetto SP1.4 Torrente Morla (31 Ottobre 2002)

Trattasi di uno studio corposo che ha interessato tutta l'asta del Torrente Morla esaminando vari aspetti anche ambientali e qualitativi, per quanto di nostro interesse ci siamo concentrati esclusivamente sugli aspetti idrologici ed idraulici del tratto studiato compreso tra la sorgente e lo scolmatore al Fiume Serio con particolare interesse alla confluenza con il T. Tremana.

L'asta del Morla è stata interamente rilevata nel maggio 2001 con 32 sezioni trasversali di circa 90 ml e ricostruzione del profilo longitudinale dell'alveo.

Per la caratterizzazione del bacino sono state individuate lungo l'asta quattro sezioni significative sotto l'aspetto idrologico per ciascuna di esse è stata calcolata la relativa onda di piena associata ad un tempo di ritorno.

La prima sezione è ubicata a valle di Ponteranica prima della confluenza con il ramo della valle Baderen (sez. 31) la seconda a Valverde (sez. 12) la terza all'ingresso di Bergamo (sez. 6) e l'ultima alla Malpensata (sez.1). Gli elementi caratteristici dei bacini nelle quattro sezioni sopracitate sono:

SEZIONI	Area [km ²]	H min [m s.l.m.]	H med [m s.l.m.]	L [Km]	tc [h]
Sez. 1	19.12	241	421	13.0	3.4
Sez. 6	16.50	260	443	10.0	2.9
Sez. 12	12.29	272	477	8.0	2.3
Sez. 31	1.70	350	539	2.0	0.7

Tabella 2.1: Elementi caratteristici bacini scolanti

A Superficie bacino scolante

H min Altezza minima del bacino

H med Altezza media del bacino

L Lunghezza dell'asta

Tc Tempo di corrivazione

Come coefficiente di afflusso è stato adottato il valore di **0.45** per tutto il bacino nel suo complesso. Sono state adottate le curve di possibilità pluviometrica elaborate statisticamente sulla base dei dati della stazione pluviometrica di Bergamo per tempi di ritorno di 20, 100, 200 e 500 anni.

I parametri **a** ed **n** sono:

Tr = 20 anni		Tr = 100 anni		Tr = 200 anni		Tr = 500 anni	
a ₂₀	n ₂₀	a ₁₀₀	n ₁₀₀	a ₂₀₀	n ₂₀₀	a ₅₀₀	n ₅₀₀
48.70	0.24	62.40	0.23	68.27	0.22	76.02	0.22

Tabella 2.2: Parametri delle curve pluviometriche

Quindi sono stati ricostruiti gli idrogrammi di piena in corrispondenza dei quattro sottobacini citati e gli idrogrammi di piena dei sottobacini residui compresi tra un sottobacino ed il successivo. L'idrogramma del bacino residuo nel modello, è stato introdotto come una immissione distribuita lungo l'asta in quel tratto.

Nell'ultimo tratto sez1 sez-6 per la presenza di numerose immissioni è stato calcolato solo l'idrogramma del bacino residuo.

Per le sezioni di interesse sono stati ricavati gli idrogrammi del bacino chiuso a monte della sezione di interesse, l'idrogramma del bacino residuo compreso tra due sezioni e l'idrogramma chiuso alla sezione in esame come combinazione dei due idrogrammi sopra descritti e l'idrogramma chiuso alla sezione di valle considerando il bacino complessivo in quella sezione.

Gli idrogrammi dei bacini complessivi sono stati utilizzati per tarare gli idrogrammi dei bacini residui. Per la modellazione afflussi deflussi è stato utilizzato il codice di calcolo NAM (MIKE 11) con pioggia costante di durata pari al tempo di corrivazione del bacino.

Di seguito si riportano gli idrogrammi ed in forma tabellare le portate al colmo.

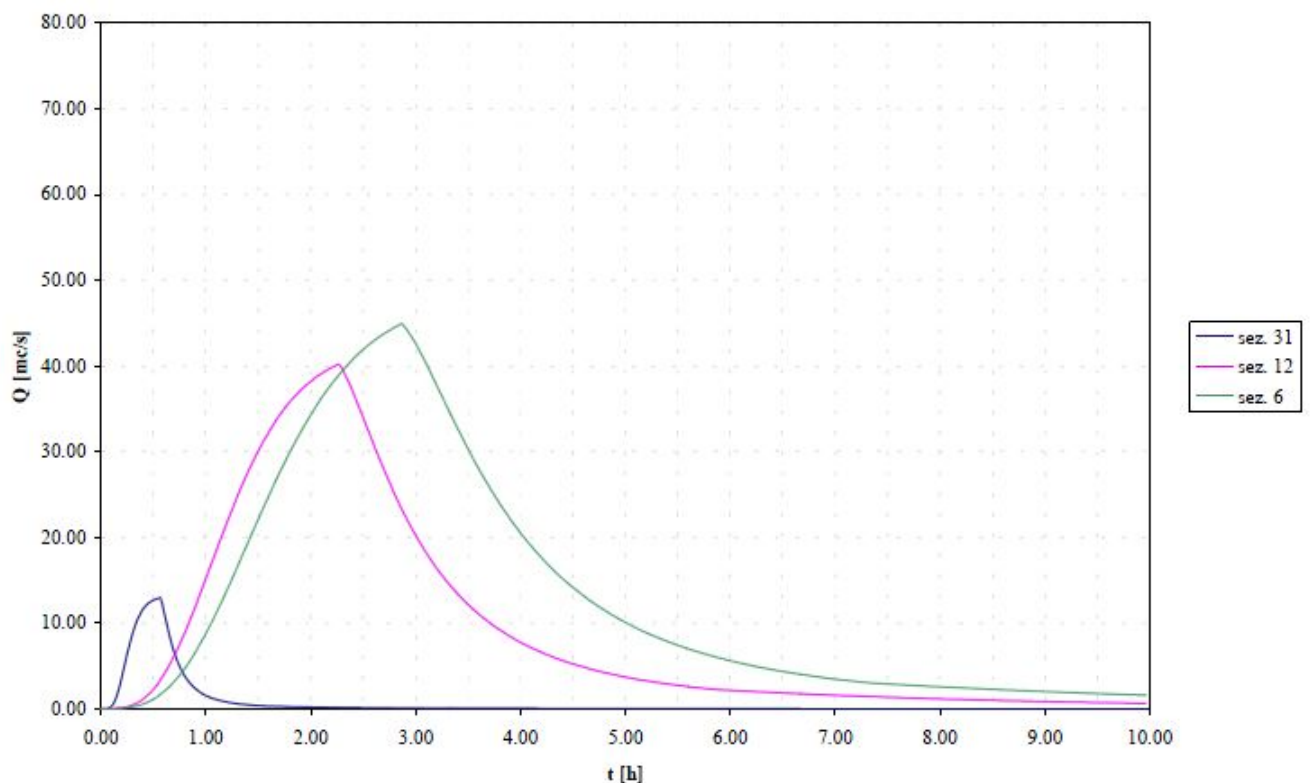


Figura 2.1: Idrogrammi dei bacini chiusi alle sez. 32, 12 e 6 per **T=20 anni**

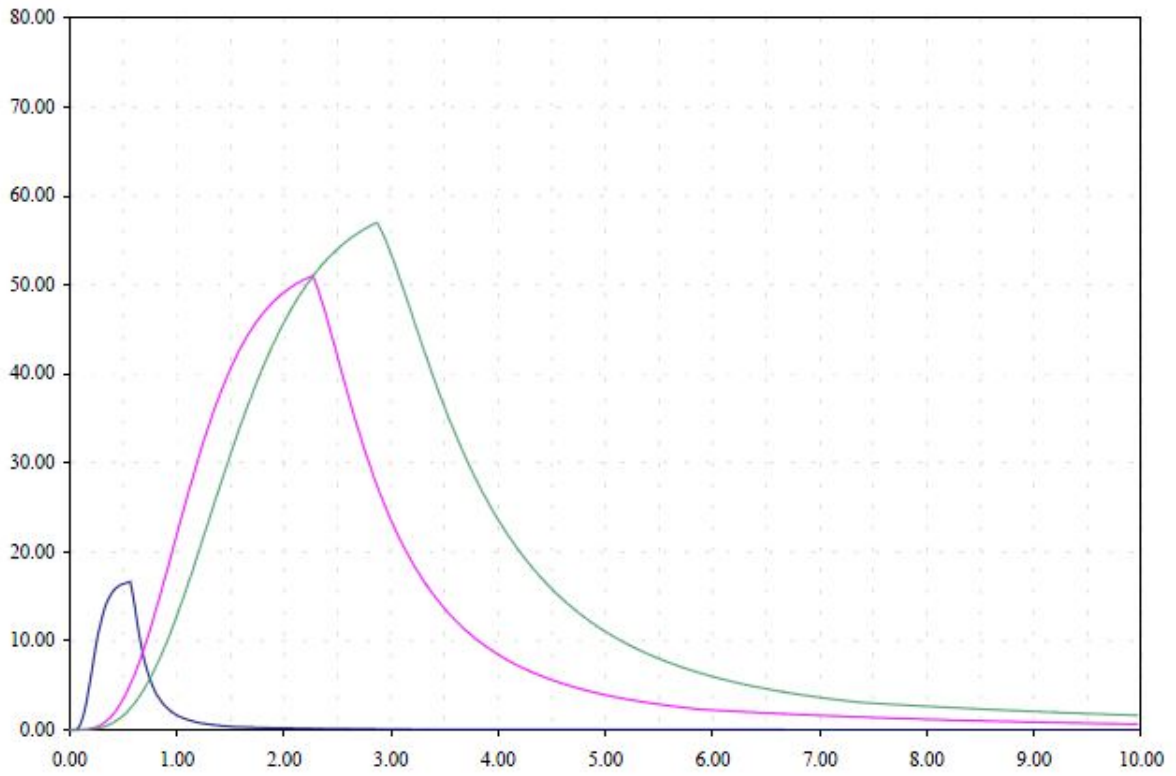


Figura 2.2: Idrogrammi dei bacini chiusi alle sez. 32, 12 e 6 per T=100 anni

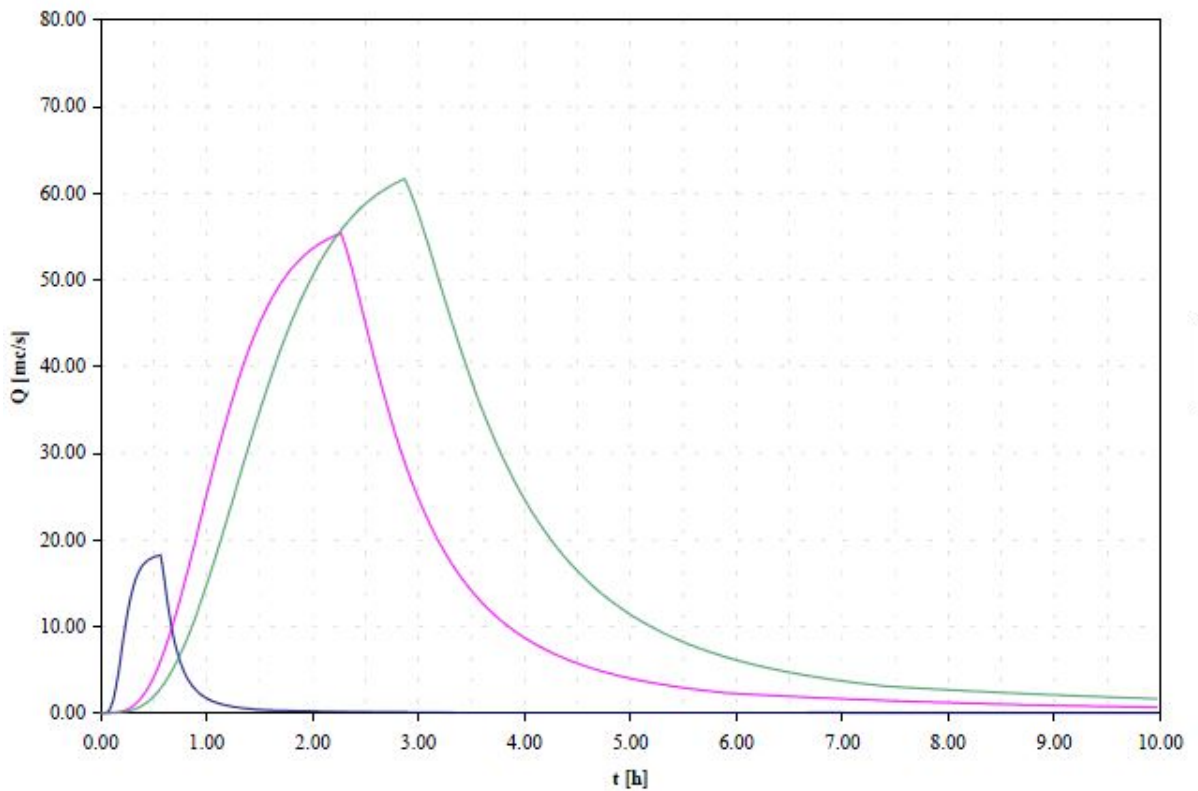


Figura 2.3: Idrogrammi dei bacini chiusi alle sez. 32, 12 e 6 per T=200 anni

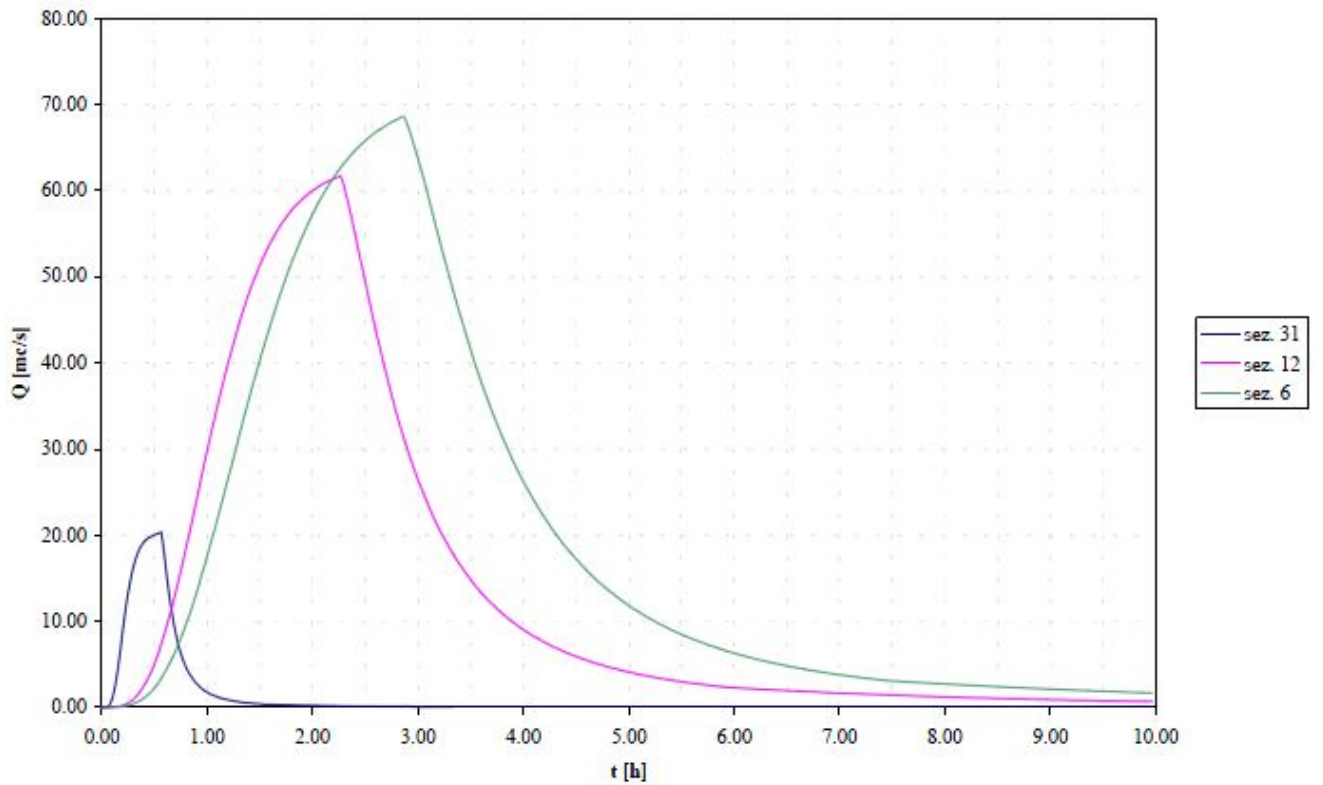


Figura 2.4: Idrogrammi dei bacini chiusi alle sez. 32, 12 e 6 per $T=500$ anni

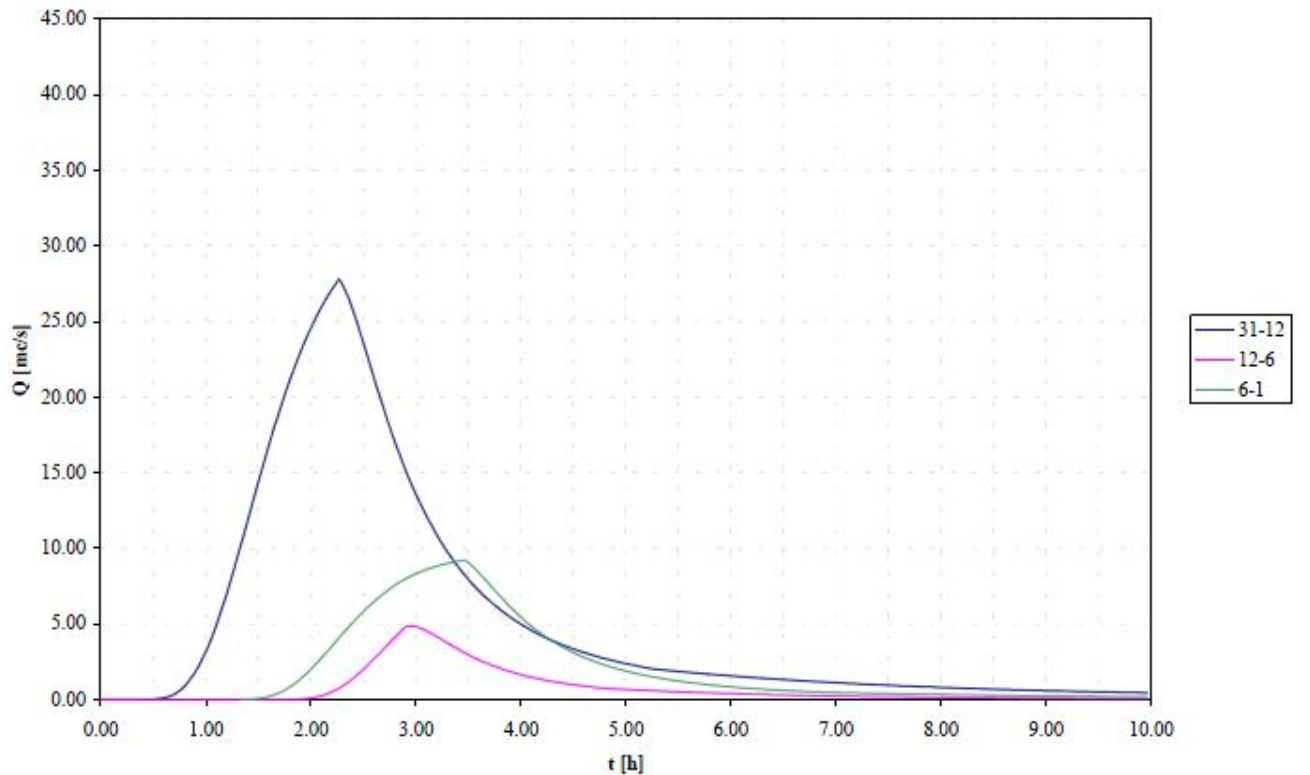


Figura 2.5: Idrogrammi dei bacini residui 32-12, 12-6 e 6-1 per $T=20$ anni

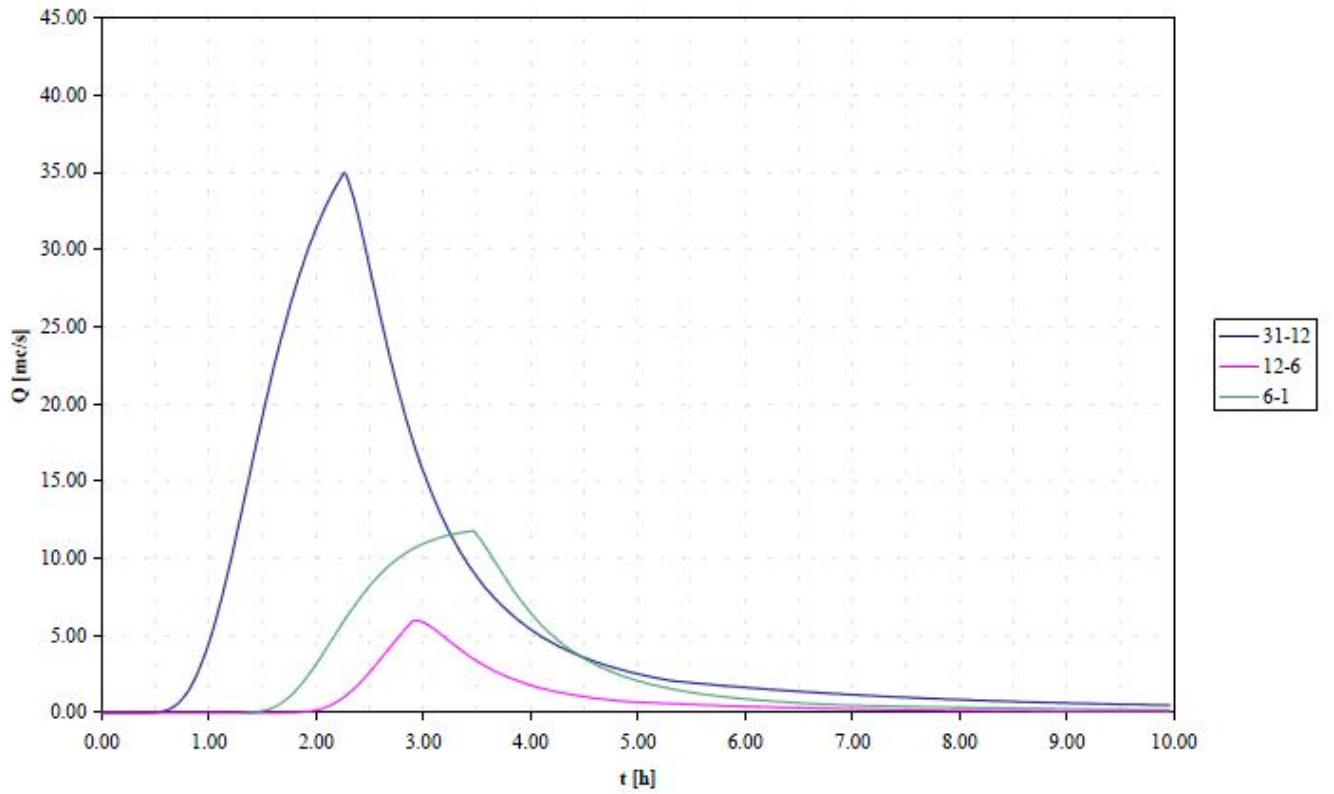


Figura 2.6: Idrogrammi dei bacini residui 32-12, 12-6 e 6-1 per **T=100 anni**

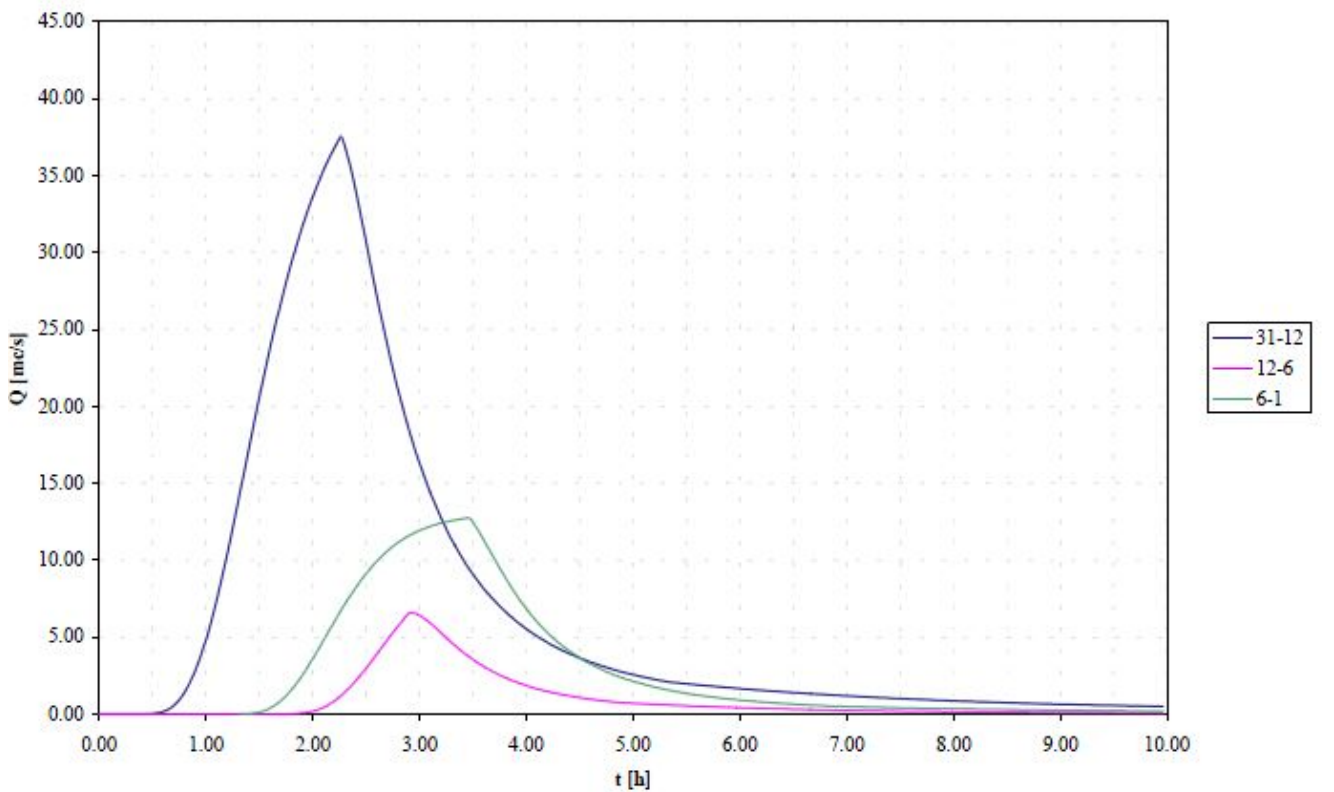


Figura 2.7: Idrogrammi dei bacini residui 32-12, 12-6 e 6-1 per **T=200 anni**

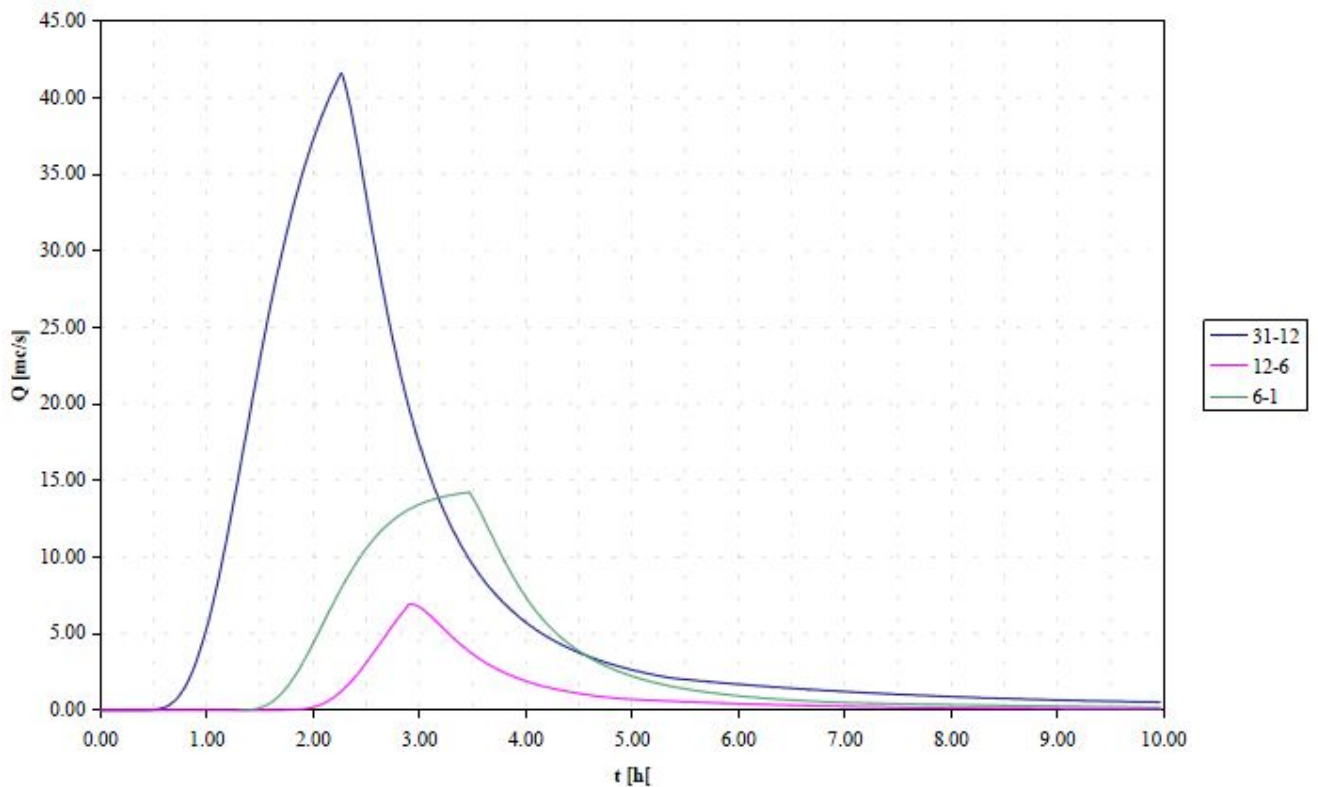


Figura 2.8: Idrogrammi dei bacini residui 32-12, 12-6 e 6-1 per T=500 anni

SEZIONI	Qt = 20 anni [m³/s]	Qt = 100 anni [m³/s]	Qt = 200 anni [m³/s]	Qt = 500 anni [m³/s]
Sez. 6	44.93	56.99	61.67	68.65
Sez. 12	40.20	51.01	55.38	61.70
Sez. 31	12.94	16.64	18.22	20.29

Tabella 2.3: Portate al colmo nelle sezioni di interesse ottenute dalla modellazione

Per completezza d'indagine è stato applicato anche il modello cinematico i cui risultati sono riportati nella tabella sottostante

SEZIONI	Qt = 20 anni [m³/s]	Qt = 100 anni [m³/s]	Qt = 200 anni [m³/s]	Qt = 500 anni [m³/s]
Sez. 1	70.08	87.37	94.60	105.00
Sez. 6	44.89	56.97	61.68	68.68
Sez. 12	40.12	51.03	55.38	61.67
Sez. 31	12.91	16.61	18.22	20.29

Tabella 2.4: Portate al colmo

Lo studio ha sviluppato infine la ricostruzione dei profili in condizioni di moto vario con modello monodimensionale e quasi bidimensionale MIKE11 per eventi con tempo di ritorno di 20, 100, 200 e 500 anni.

Per il coefficiente di scabrezza sono stati assunti i valori:

- $c = 25$ per il tratto compreso tra le progressive 0,00 e 4280 m.
- $c = 20$ per il tratto compreso tra le progressive 4280 e 8979 m.

La simulazione è stata effettuata imponendo a valle nella sezione 1 una scala delle portate nota desunta dalla geometria e pendenza locale del tratto e dalla stazione di misura presente.

Gli idrogrammi utilizzati per la simulazione sono quelli sotto riportati, i risultati conducono alle seguenti condizioni:

- Insufficienza idraulica del ponte a valle della sezione 2 con funzionamento in pressione ma senza sormonto.
- Scarsa officiosità in corrispondenza degli attraversamenti 5 e 5a anche qui però senza sormonto. (l'attraversamento 5a è quello poco a monte della confluenza del T. Tremana)
- Minimo allagamento alla sezione 11 in sponda destra (zona Valverde).
- Minimo allagamento alla sezione 13.
- Insufficienza idraulica del ponte pedonale a valle della sezione 24 senza sormonto.
- A valle della sezione 30 sul ponte di via 8 marzo deflusso in pressione con sormonto del ponte per l'evento bicentenario.

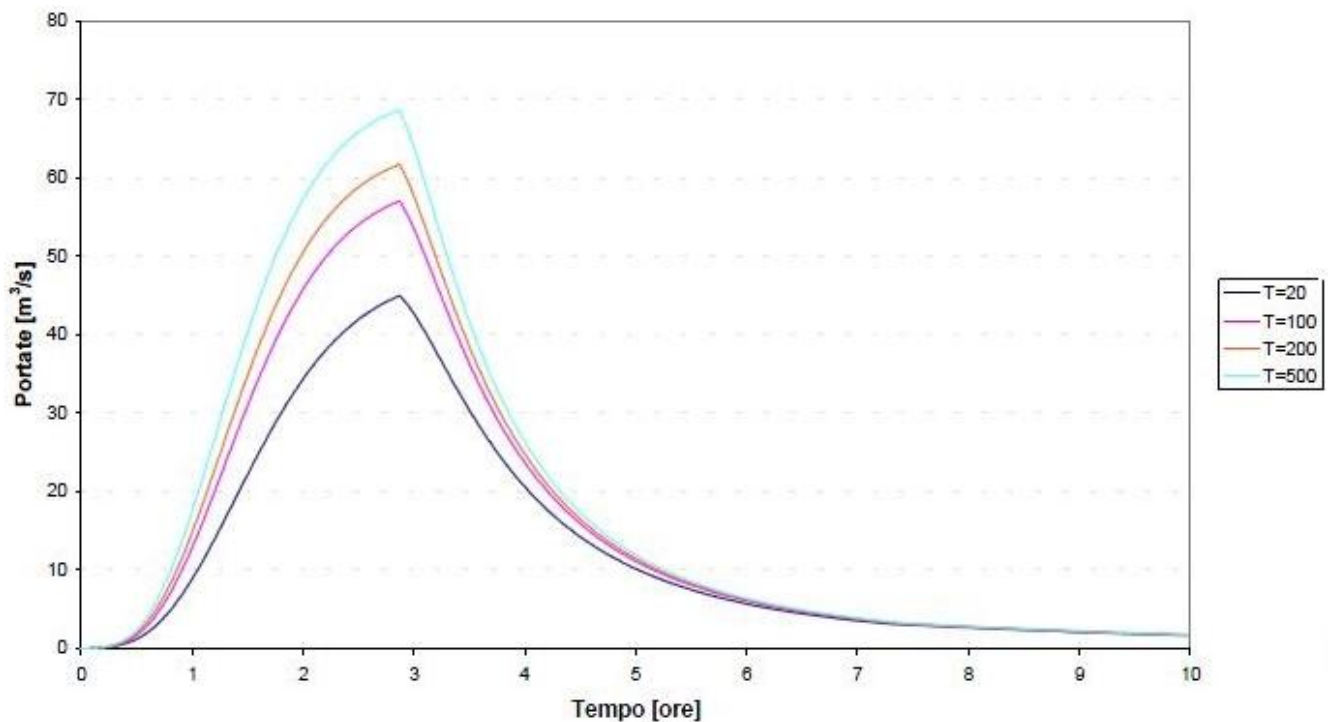


Figura 2.9: Idrogramma concentrato in ingresso alla sezione di **chiusura NC 5/34** per assegnato tempo di ritorno

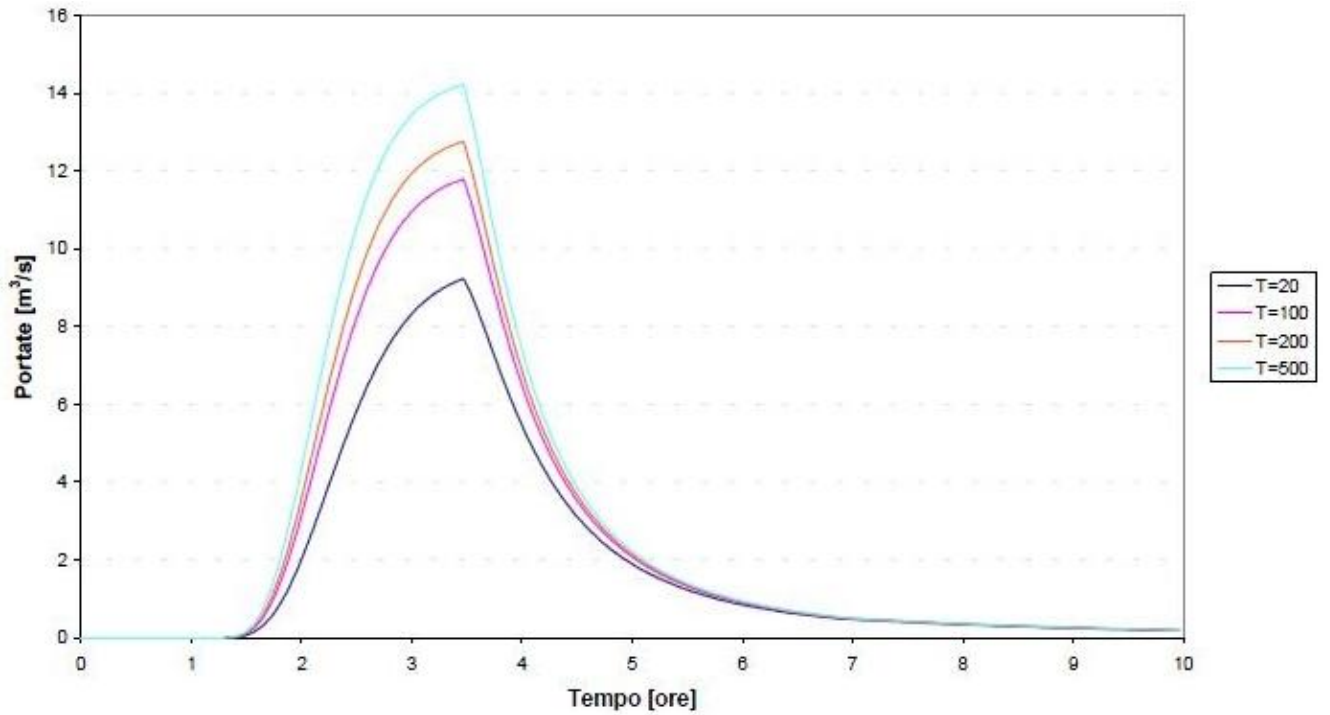


Figura 2.10: Idrogramma distribuito per assegnato tempi di ritorno, tratto 1-5 (NC 5/34)

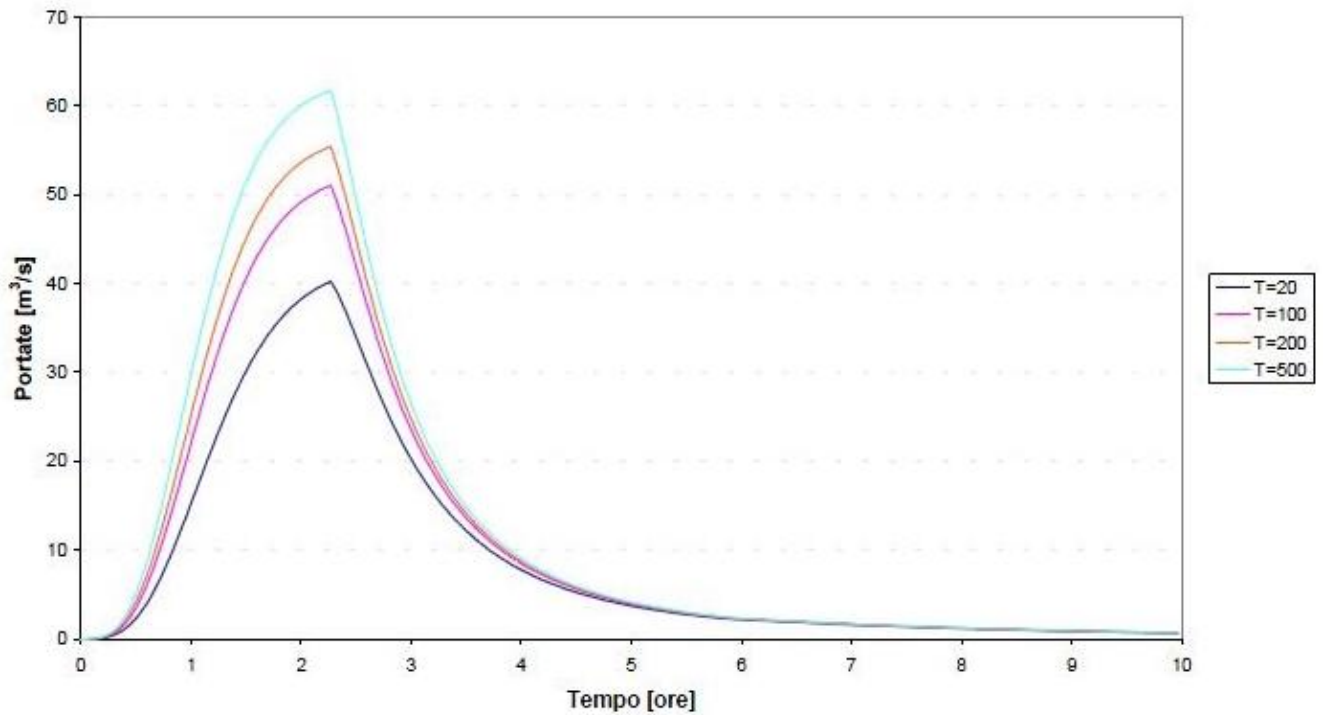


Figura 2.11: Idrogramma concentrato in ingresso alla sezione di **chiusura 12** per assegnato tempo di ritorno

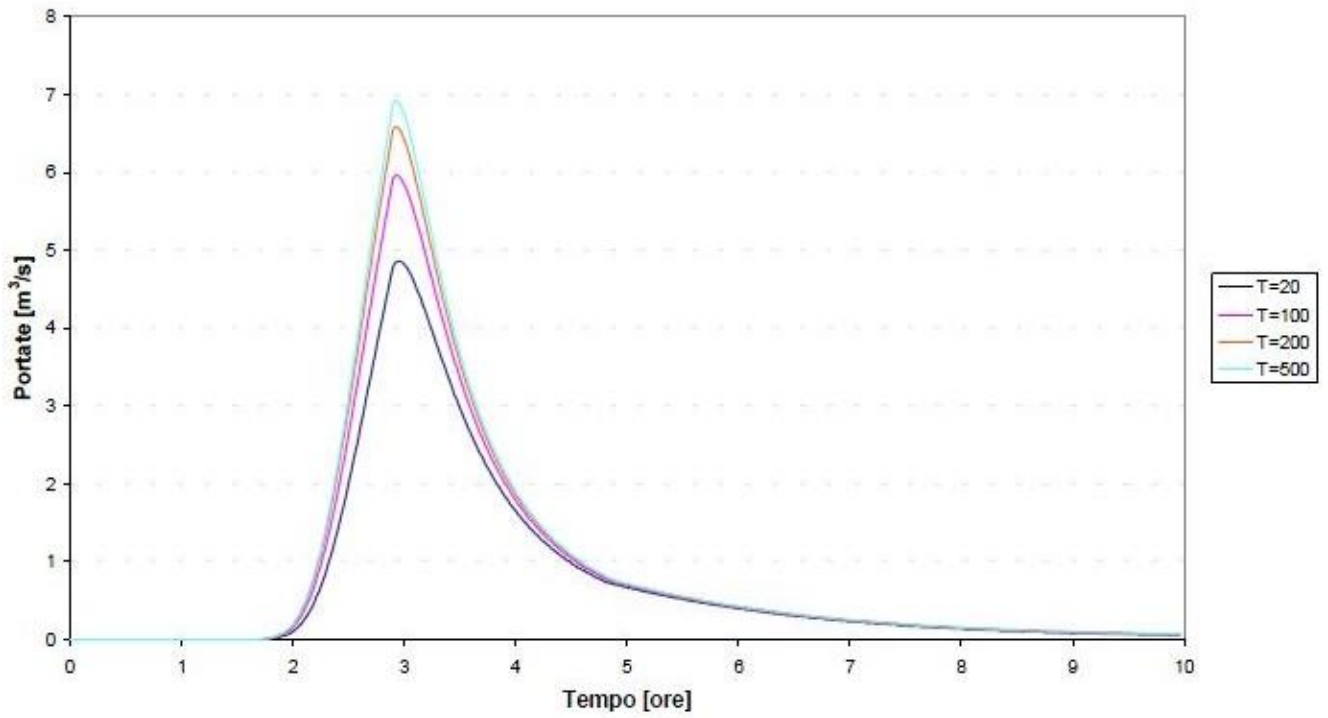


Figura 2.12: Idrogramma distribuito lungo il tratto NC 5/34-12 per assegnato tempi di ritorno

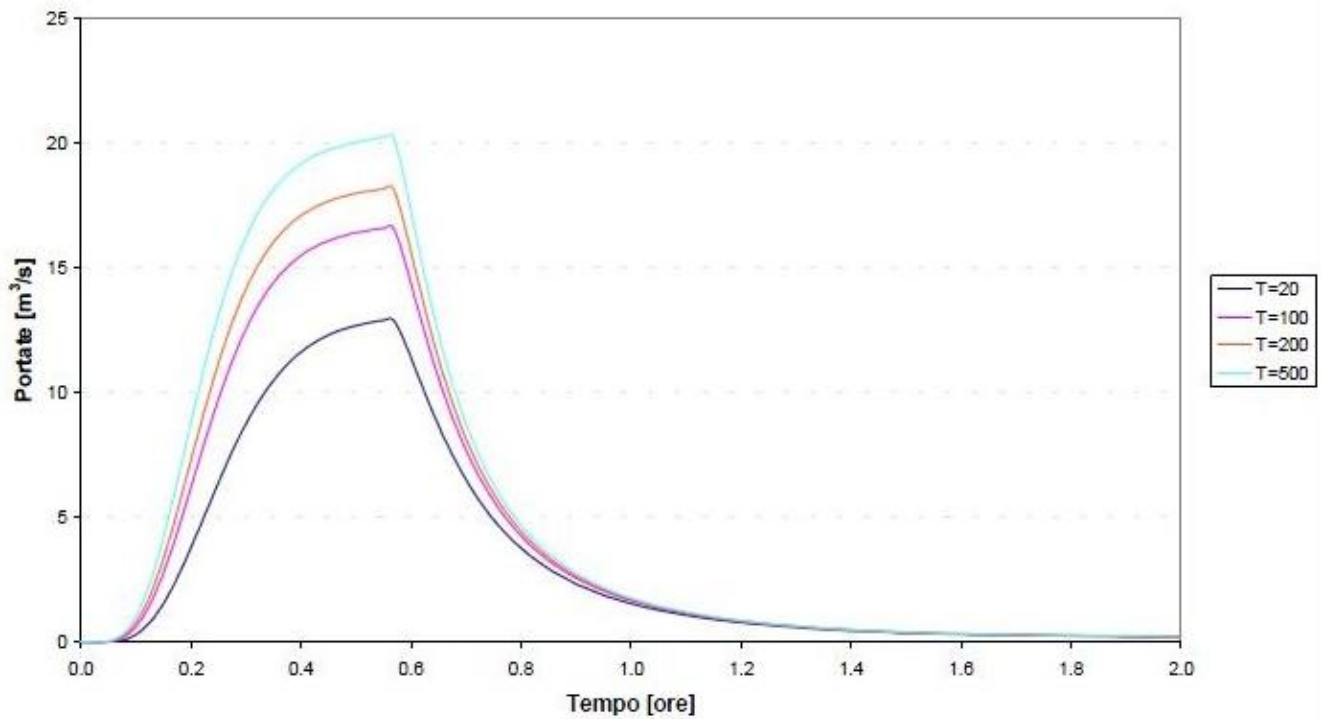


Figura 2.13: Idrogramma concentrato in ingresso alla sezione di **chiusura 50** per assegnato tempo di ritorno

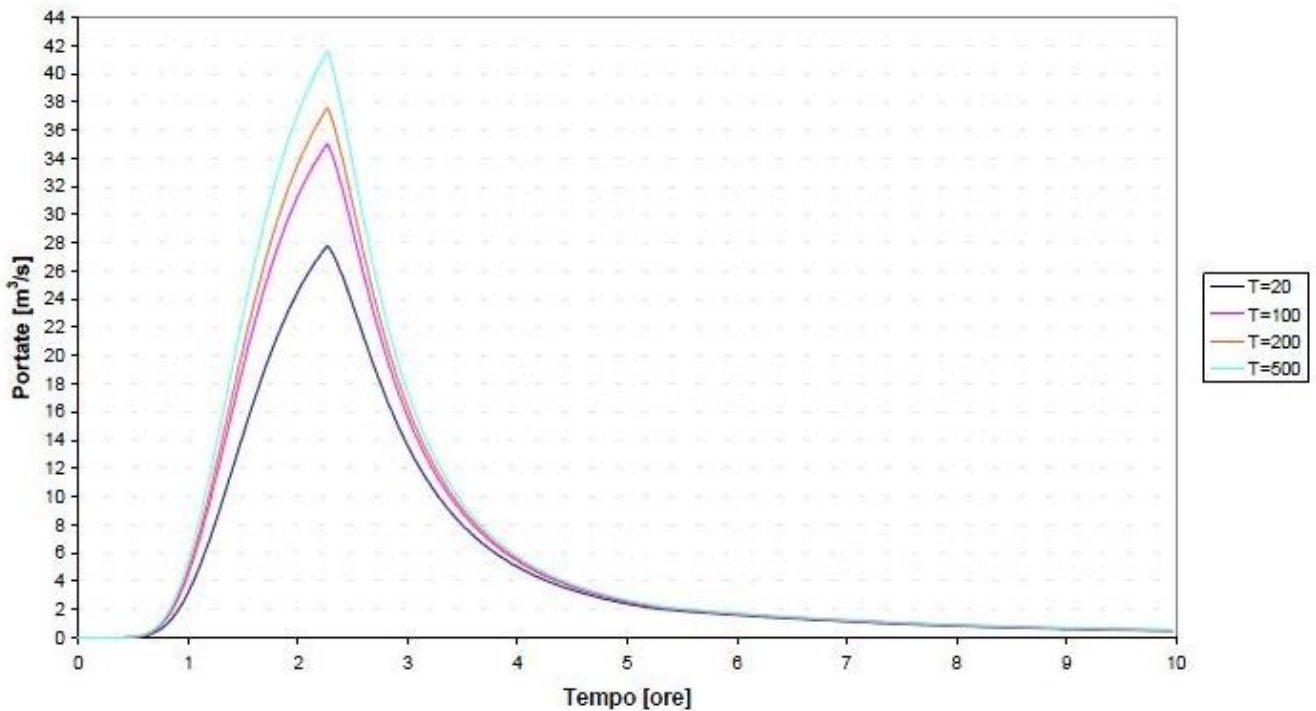


Figura 2.14: Idrogramma distribuito lungo il tratto 12-31 per assegnato tempi di ritorno

2.2 Comune di Bergamo: Rinnovo concessioni T. Morla Ing. Giuseppe Pasinetti - 2004

Nell'ambito dello studio finalizzato al rinnovo delle concessioni presenti sul T Morla del Comune di Bergamo per coperture, scarichi ecc. è stato sviluppato anche uno studio idrologico -idraulico finalizzato alla verifica delle suddette concessioni per tutto il tratto cittadino di Bergamo.

Sono state sviluppate le calcolazioni assumendo vari tempi di ritorno 20, 100, 200, 500 anni; l'analisi idrologica è stata condotta con elaborazione statistica delle piogge registrate alla stazione pluviometrica di Bergamo per durate superiori all'ora i cui parametri a e n sono risultati come indicati nella tabella seguente:

STAZIONE DI BERGAMO	Tr = 20 anni	Tr = 100 anni	Tr = 200 anni	Tr = 500 anni
a	49.050	62.571	68.342	75.956
n	0.2634	0.2580	0.2563	0.2545

Tabella 2.5: Stazione pluviometrica di Bergamo: Parametri a - n

Per la stima delle perdite idrologiche in analogia allo studio AdBpo è stato assunto un coefficiente di afflusso costante pari a **0,45**, mentre per il tempo di corrivazione è stata applicata la formula di Giandotti con i seguenti valori stimati per i tre sottobacini in cui è stato suddiviso l'intero bacino.

SEZIONE DI CHIUSURA	Tempo di corrivazione t_c [h]
C	2.3
B	2.9
A	3.4

Tabella 2.6: Tempi di corrivazione

Tramite programma di calcolo URBIS in cui è stata applicata la convoluzione tra la pioggia di progetto e l'Idrogramma istantaneo unitario (Nash) in cui i parametri **K** e **n** utilizzati sono i seguenti:

SEZIONE DI CHIUSURA	k	n
C	0.575	3
B	0.725	3
A	0.850	3

Tabella 2.7: Parametri idrogramma unitario - Nash

Le portate al colmo risultanti nelle tre sezioni A, B e C sono riportate nella tabella seguente.

SEZIONE DI CHIUSURA	Tempo ri ritorno Tr = 20 anni [m ³ /s]	Tempo ri ritorno Tr = 100 anni [m ³ /s]	Tempo ri ritorno Tr = 200 anni[m ³ /s]	Tempo ri ritorno Tr = 500 anni[m ³ /s]
C	40.12	51.03	55.38	61.67
B	44.89	56.97	61.68	68.68
A	70.08	87.37	94.60	105.00

Tabella 2.8: Portate al colmo nelle sezioni di chiusura A - B - C

Considerando inoltre che nell'ultimo tratto di valle nel T. Morla confluiscono Rogge secondarie con apporti concentrati nell'alveo del T. Morla le portate al colmo complessive in quest'ultimo tratto sono quelle evidenziate nella seguente tabella ove sono state aggiunti i contributi delle rogge ai colmi stimati nella analisi idrologica del bacino.

SEZIONE DI CHIUSURA	SEZIONE DI CALCOLO	Tempo ri ritorno Tr = 20 anni [m ³ /s]	Tempo ri ritorno Tr = 100 anni [m ³ /s]	Tempo ri ritorno Tr = 200 anni [m ³ /s]	Tempo ri ritorno Tr = 500 anni [m ³ /s]
C	12	40.12	51.03	55.38	61.67
B	6	44.89	56.97	61.68	68.68
R. Serio	4.60	52.9	66.7	72.3	80.4
R. Guidana (scar. N°1)	4	56.8	71.1	77.0	85.6
R. Morlana	3.60	57.6	71.9	77.8	86.4
R. Guidama (scar. N°2)	2	60.9	75.6	81.9	90.8
A	2	86.0	108.7	115.2	127.1
A Valle scolmatore Morla-Serio	1	7	7	7	7

Tabella 2.9: Portate al colmo complessive

La posizione delle suddette Rogge è riportata nella figura seguente:

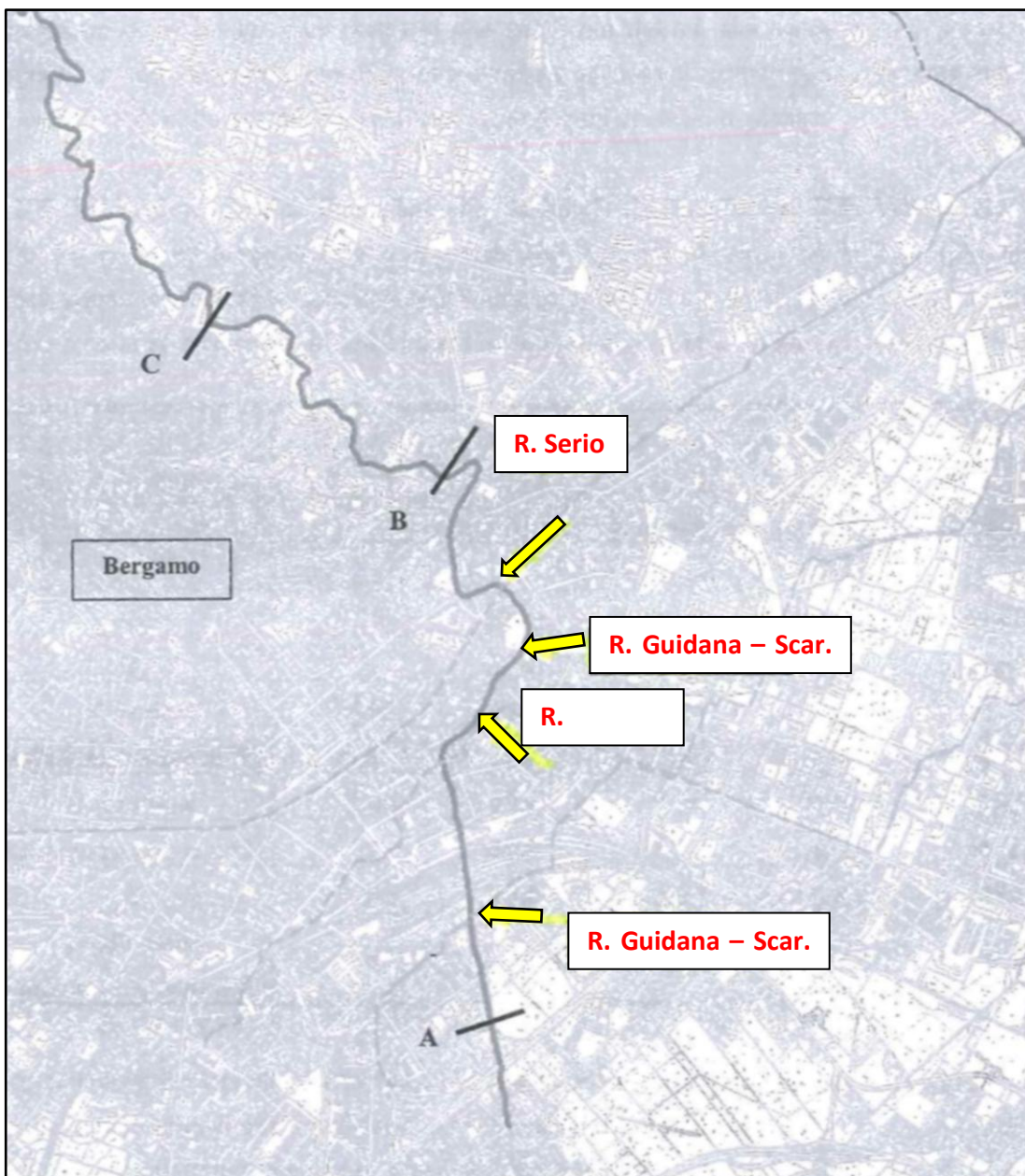


Figura 2.15: Ubicazione delle Rogge sulla Carta Tecnica Regionale - CTR

Sulla base di queste portate al colmo con l'ausilio del programma di calcolo HEC RAS è stato ricostruito il profilo idraulico avendo assunto i seguenti valori di scabrezza di Strickler:

- K=30 alveo naturale scabro
- K=40 alveo naturale debolmente scabro (fondo in ciottoli)
- K=50 alveo in calcestruzzo

I risultati delle calcolazioni sono riportati nella seguente tabella.

River Sta	Q total (m ³ /S)	Length Chnl (m)	Cum Ch Len (m)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)
31	55.38	146	11251.81	336.71	337.88	339.43	345.41	12.17
30	55.38	268	11104.8	334	337.49	337.49	337.84	3.01
29	55.38	179	10835.8	328.26	331.43	331.43	332.92	5.42
28	55.38	265	10655.8	324.58	326.12	327.12	329.63	8.41
27.2	55.38	14	10389.8	315.43	317.4	318.44	321.3	8.74
27.1	55.38	213	10374.8	313.9	314.52	315.43	320.09	10.46
26	55.38	112	10161.8	307.46	308.87	309.43	310.71	6.13
25	55.38	33	10049.8	305.61	308.92	307.33	309.12	1.98
24.2	55.38	148	10015.8	305.43	307.84	307.84	308.99	4.74
24.1	55.38	246	9866.8	303.25	305.24	305.24	306.38	4.82
22	55.38	450	9619.8	298.45	299.05	299.81	302.9	8.69
21	55.38	271	9168.8	292.65	295.04	295.04	295.77	3.79
20	55.38	231	8896.8	289.9	292.84	292.84	293.73	5.37
19.2	55.38	36	8664.8	288.87	290.12	290.71	292.15	6.51
19.1	55.38	114	8627.8	288.2	289.71	290.21	291.46	5.87
18	55.38	257	8512.8	287.31	288.93	289.22	290.23	5.06
17	55.38	207	8254.8	284.3	285.77	286.34	287.66	6.09
16	55.38	420	8047.8	282.33	283.6	283.83	284.56	4.99
13.8	55.38	588.1	7626.8	278.69	280.59	280.59	281.69	5.46
13.6	55.38	277.8	7037.7	274.68	276.01	276.38	277.2	4.97
13.4	55.38	35.3	6759.9	272.8	274.8	274.8	275.78	4.38
13.2	55.38	44.5	6724.6	272.03	273.35	273.98	275.42	6.38
13	55.38	289.4	6680.1	271.82	273.9	273.9	274.72	4.21
12	55.38	363.3	6390.7	270.06	270.89	271.31	272.35	5.36
11	55.38	446.3	6027.4	266.35	268.45	268.45	269.65	5.16
10	55.38	81.2	5565.5	263.36	264.41	264.91	266.09	5.74
9	55.38	30.2	5483.3	262.21	263.56	263.92	264.85	5.04
8	55.38	226.2	5452.1	261.97	264.12	263.54	264.53	2.83
7	55.38	284.2	5225.9	261.5	263.06	263.06	263.84	3.91
6	61.68	140.5	4939.7	258.9	260.96	260.43	261.42	3.01
5.4	61.68	29.5	4799.2	258.35	260.15	260.15	260.96	3.99
5.3	61.68	91.5	4768.7	257.7	258.95	259.45	260.68	5.83
5.2	61.68	101.1	4676.2	257.5	259.34	259.34	260.25	4.23
5.1	61.68	483.7	4574.1	255.19	256.79	257.49	259.17	6.84
4.8	61.68	71.6	4090.4	251.85	253.27	253.42	254.24	4.37
4.6	72.3	118.9	4017.8	249.45	250.32	251.07	253.16	7.47
4.4	72.3	372.1	3898.9	248.86	250.51	250.51	251.47	4.34
4	77	23.8	3525.8	247.28	249.13	249.13	249.91	3.91
3.8	77	523	3501	247.6	248.99	249.03	249.75	3.87
3.6	77.8	158.2	2978	245.17	246.63	246.76	247.57	4.3
3	77.8	199	2818.8	244.83	246.55	246.36	247.15	3.45
2.09	77.8	200	2619.8	244.28	245.67	245.67	246.38	3.72
2	115.2	547.8	2418.8	243.67	245.17	245.07	245.79	3.48
1	7	111.8	1870	242.37	242.89	242.89	243.15	2.26
0.9	7	10.9	1757.2	242.1	242.31	242.28	242.38	1.14
0.8	7	261.3	1745.3	242.05	242.26	242.23	242.33	1.14
0.7	7	667.5	1483	240.6	240.98	240.98	241.17	1.94
0.6	7	815.5	815.5	233.61	234.92	234.5	235	1.25
0.5	7			230.97	231.64	231.64	231.88	2.14

Tabella 2.10: Portate al colmo compressive

<i>River Sta</i>	N° della sezione
<i>Q total</i>	Portata di verifica
<i>Length Chnl</i>	Distanze parziali
<i>Cum Ch Len</i>	Distanze progressive
<i>W.S.Elev</i>	Quota dei livelli idrici
<i>Crit W.S.</i>	Altezza critica
<i>E.G. Elev</i>	Quota della linea dell'energia
<i>Vel Chnl</i>	Velocità della corrente

2.3 Regione Lombardia -Consorzio di Bonifica: Studio idrologico, idraulico ed ambientale a scala di sottobacino idrografico del Torrente Morla e delle rogge ad esso connesse 2015

Questo studio prende in esame il bacino del T Morla non solo nel tratto di monte compreso tra le sorgenti e lo scolmatore al Serio, ma anche il tratto di valle lungo la pianura bergamasca fino a Spirano.

Per quanto ci riguarda ci concentriamo solo ed esclusivamente sul tratto di monte.

L'analisi delle portate è stata condotta per quanto concerne la pluviometria adottando le curve segnalatrici elaborate da ARPA Lombardia relative alle stazioni di Ponteranica Bergamo e Comunnouvo per tempi di ritorno di 2, 5, 10, 20, 50, 100 e 200 anni, è stato utilizzato il codice di calcolo SWAM versione 5.0, il modello è stato tarato utilizzando i dati registrati all'idrometro situato presso il canale scolmatore

L'idrogramma di piena ricostruito per eventi con tempo di ritorno di 100 anni è riportato nella pagina a seguire ove si evince che le portate al colmo dei due corsi d'acqua ammontano a 63 m³/s per il Morla e 9 m³/s per il Tremana con tempi di picco sfalsati tal che l'onda complessiva raggiunge il colmo a 71 m³/s.

Poiché la capacità di portata del T. Morla a valle della confluenza con il Tremana è stata stimata dagli estensori ad un valore pari a 61 m³/s è necessario laminare un volume di almeno 20.000 m³.

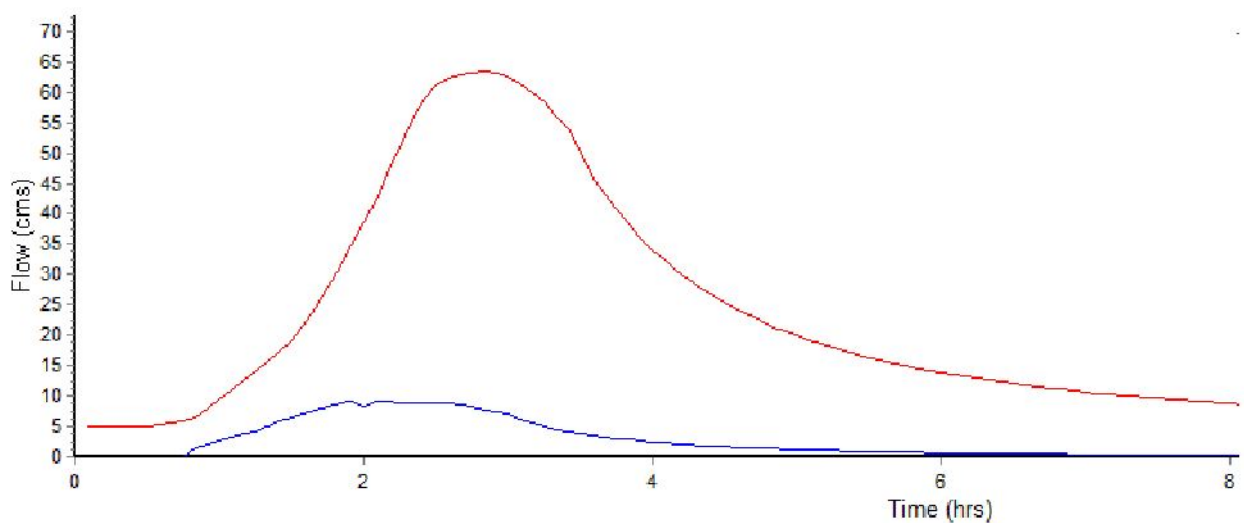


Figura 2.16: Idrogrammi di piena per Tr = 100 anni dei torrenti Morla (in rosso) e Tremana (in blu) alla confluenza

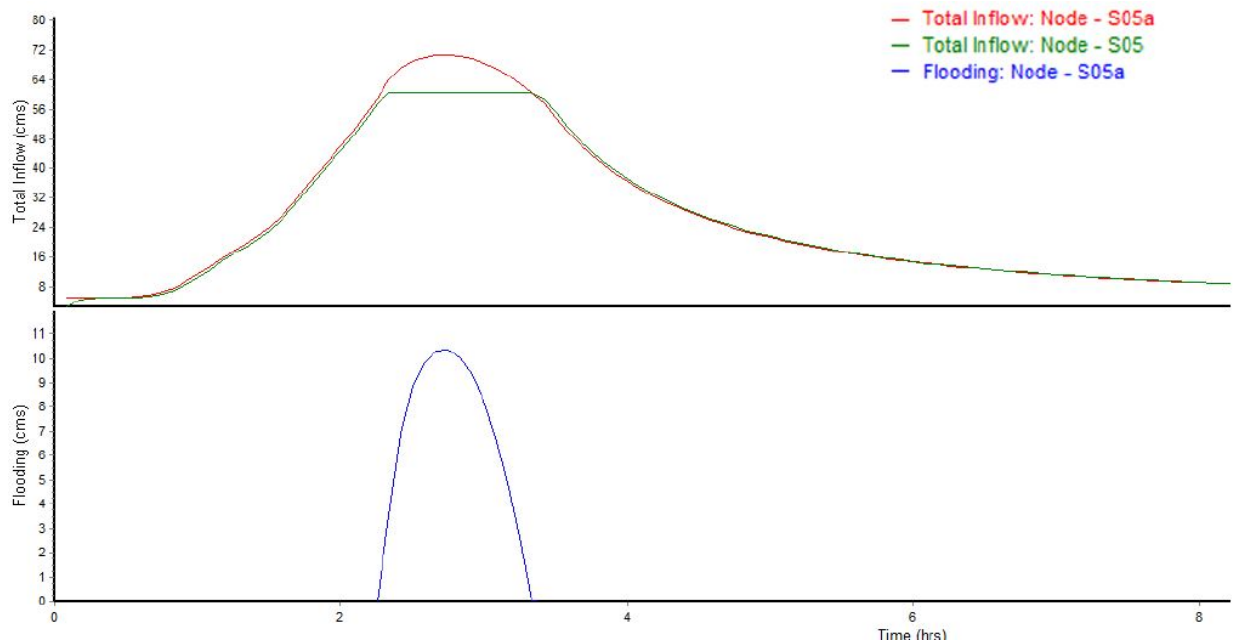


Figura 2.17: Quantificazione della criticità idraulica alla confluenza dei T. Morla e Tremana per $Tr=100$ anni – Idrogramma complessivo alla confluenza (sopra, in rosso) confrontato con la massima capacità di deflusso del T. Morla immediatamente a valle (sopra, in verde) e relativo idrogramma di portate in esubero (sotto, in blu) all’origine dei fenomeni di esondazione individuati.

Nell’analisi del Tremana secondo lo studio in questione risulterebbe che la portata al colmo per un tempo di ritorno di 100 anni pari a circa $9 \text{ m}^3/\text{s}$ non può essere smaltita dal canale esistente per una insufficienza di circa $2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tale insufficienza è meglio illustrata dall’allegato profilo.

Per eventi con Tr 200 anni la portata a monte della confluenza con il Tremana è stimata in $71 \text{ [m}^3/\text{s]}$ e pari a circa $81 \text{ [m}^3/\text{s]}$ a valle della confluenza.

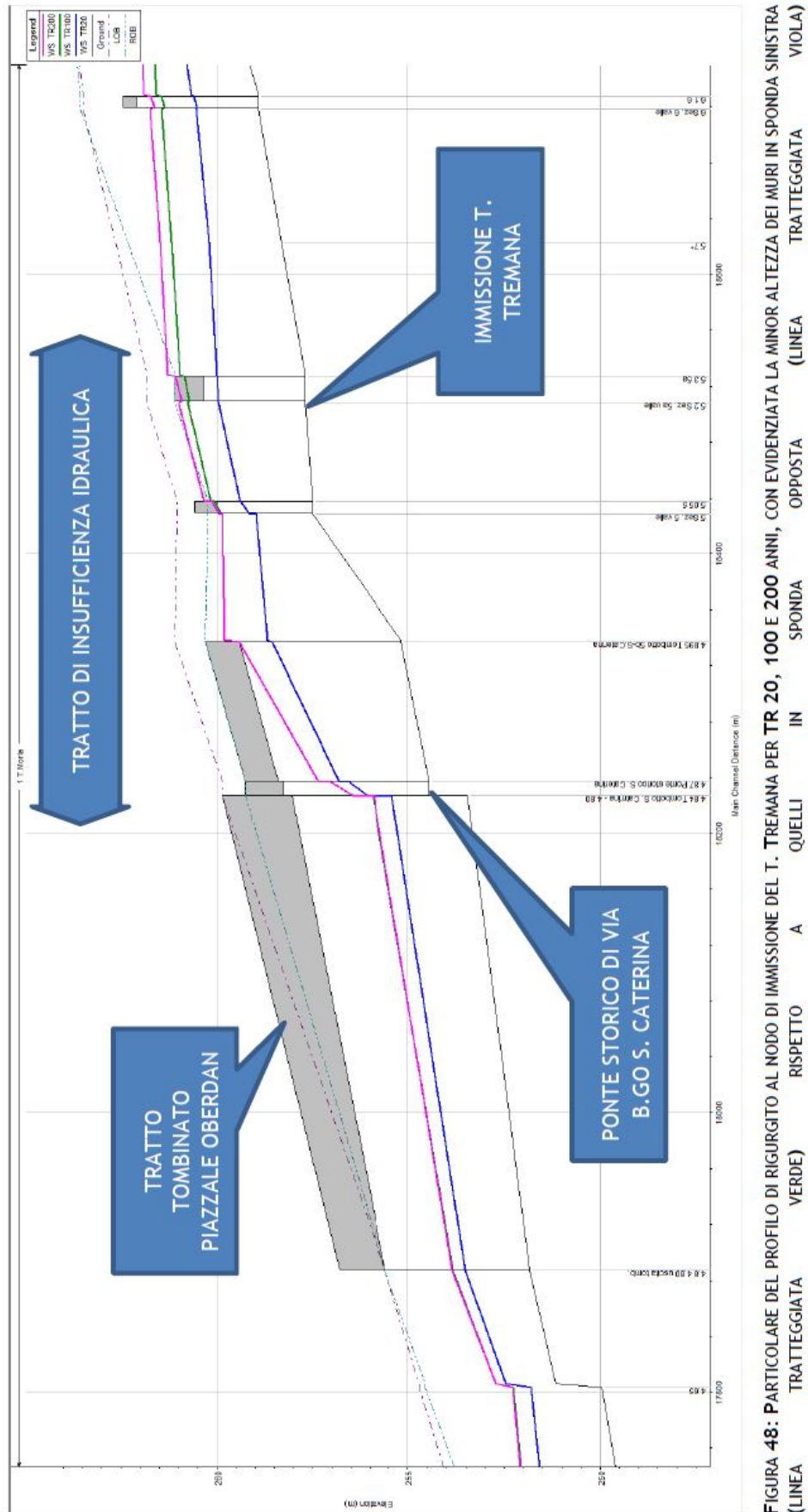


Figura 2.18: Particolare del profilo di rigurgito al nodo di immissione del T. Tremana per Tr=20, 100 e 200 anni, con evidenziata la minor altezza dei muri in sponda sinistra (linea tratteggiata verde) rispetto a quelli in sponda opposta (linea tratteggiata viola)

2.4 Conclusioni

Svolgendo una sintetica comparazione tra i vari studi esaminati possiamo concludere che nella sostanza i valori di portata stimati sono molto simili ed allineati tra loro considerando che la le sezioni di riferimento non sono simili e i tempi di ritorno in alcuni studi sono più estesi mentre per 100 e 200 anni risultano più che confrontabili.

Si segnala in particolare che la sezione di calcolo 6 degli studi AdbPo e Pasinetti è ubicata a monte della confluenza con il T. Tremana ed a monte dello scarico dello scolmatore S48 con un'estesa rete fognaria sottesa.

SEZIONE DI CHIUSURA	STUDIO ADBPO		STUDIO PASINETTI		STUDIO TELO	
	Tempo ritorno Tr = 100 anni [m ³ /s]	Tempo ritorno Tr = 200 anni [m ³ /s]	Tempo ritorno Tr = 100 anni [m ³ /s]	Tempo ritorno Tr = 200 anni [m ³ /s]	Tempo ritorno Tr = 100 anni [m ³ /s]	Tempo ritorno Tr = 200 anni [m ³ /s]
1						
6	56.99	61.67	56.97	61.68	63 (71)	71 (81)
12	51.01	55.38	51.03	55.38		
31	16.64	18.22				

Tabella 2.11: Portate al colmo nelle sezioni di chiusura A - B - C

Per quanto ci riguarda inoltre dovendo concentrarsi sull'area dello stadio ed in particolare alla confluenza del T. Tremana con il T. Morla ai fini dello studio dei livelli di piena si assumono sia per il T. Tremana che per questa zona del Morla gli idrogrammi di piena sviluppati nello studio del Consorzio di Bonifica e UTR di Bergamo redatto dall'Ing. Telo e dall'Ing. Murachelli considerando peraltro che queste portate sono leggermente superiori a quelle degli altri studi (**di circa il 10-15%**) e quindi comunque a favore di sicurezza, i valori adottati sono:

T. Morla Tr = 100 anni **Q₁ = 63 m³/s** senza il contributo del T. Tremana
 Tr = 200 anni **Q₂ = 71 m³/s** senza il contributo del T. Tremana

Per il Torrente Tremana si procederà invece all'implementazione di calcolazioni ad hoc confrontando i risultati ottenuto dallo studio commissionato da Consorzio e UTR quali:

T. Tremana Tr = 100 anni **Q₃ = 9 m³/s**
 T. Tremana Tr = 200 anni **Q₄ = 12 m³/s**

3 DESCRIZIONE DEL BACINO IDROGRAFICO DEL TORRENTE TREMANA

Prima di addentrarsi nelle calcolazioni effettuate, si ritiene necessario descrivere sinteticamente il bacino imbrifero del Torrente Tremana e analizzare il tratto di asta fluviale interessato dal rilievo topografico. Difatti al fine di definire la portata critica nella sezione di chiusura di un bacino risulta necessario andare ad individuare i principali parametri che caratterizzano la forma e le proprietà orografiche del bacino stesso. Moltissime sarebbero le indagini da effettuare per la conoscenza dettagliata dell'area oggetto di studio, si pensi ad esempio all'uso del suolo, ma in questa sede ci si è limitati ad esaminare quei parametri necessari per la determinazione del deflusso. L'omogeneità dei sottobacini individuati giustifica la sufficienza delle analisi effettuate e riportate di seguito come consueto nell'idraulica e idrologia a scala di sottobacino.

3.1 Caratterizzazione del bacino idrografico

Il bacino del Torrente Tremana chiuso in prossimità della confluenza con il Torrente Morla presenta un'estensione di circa 185.5 [km²]. Il bacino è costituito nella parte nord da un'area collinare che dalla Via Monterosso raggiunge lo spartiacque in sommità alla Maresana verso il Comune di Ponteranica.

Il bacino collinare presenta un'estensione di poco meno di 105 [ha] con una quota massima di 655 [m s.l.m.] ed una quota all'inizio della tombinatura di 285 [m s.l.m.]. L'asta idrografica presenta un andamento abbastanza rettilineo in direzione sud-nord con inciso abbastanza incassato e con pendenze considerevoli per la lunghezza di circa 1.18 km. La forma del bacino è abbastanza regolare e prosegue verso nord con una larghezza che si mantiene pressoché costante. Lateralmente in sinistra orografica il Tremana riceve circa 9-10 torrenti secondari che drenano i versanti quasi interamente boscati.

Nella parte a valle del bacino collinare il Tremana prosegue interamente tombinato per circa 2 km raggiungendo il Torrente Morla all'altezza del distributore Agip di Viale Giulio Cesare. Il contributo che quindi riceve in questa tratta derivano da caditoie e bocche di lupo direttamente connesse alla tombinatura e, soprattutto, dagli scolmatori della rete fognaria (si veda il Capitolo 8 a riguardo).

La parte di bacino urbano a nord della Circonvallazione presenta un'estensione di circa 72 [ha] ed è costituito da un tessuto urbano mediamente coperto con alcune aree a parco. A sud della Circonvallazione il bacino si riduce per terminare solo con la fascia stradale di Via Celestini. Ad oggi l'area dello Stadio non è compresa nel bacino di competenza del Tremana in quanto l'ultimo scolmatore della rete fognaria è posto a nord del comparto in esame.

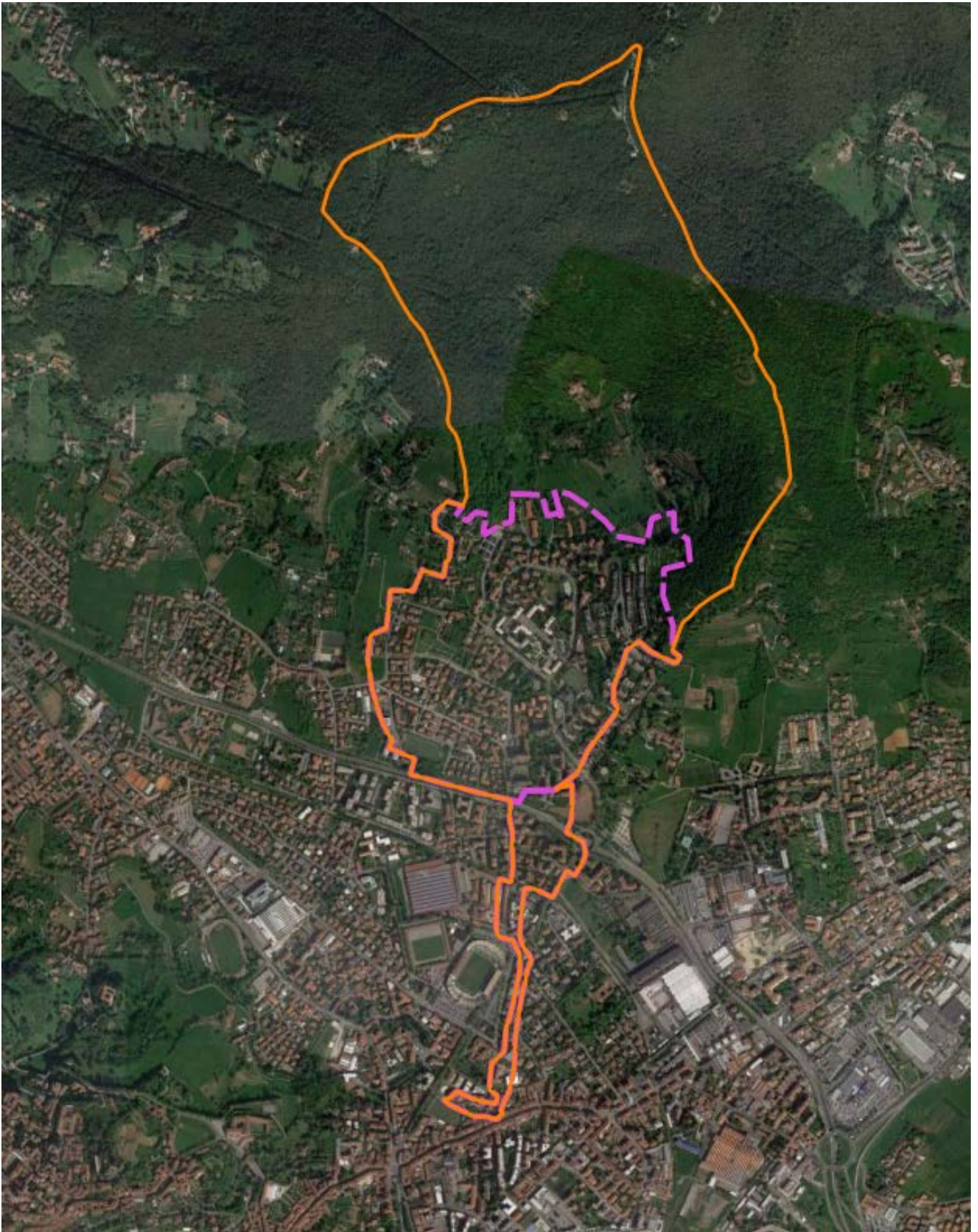


Figura 3.1: Bacino scolante del T. Tremana chiuso alla confluenza del T. Morla.

3.2 Calcolo del Tempo di Corrivazione

Un parametro fondamentale per la stima delle portate di piena è rappresentato dal tempo di corrivazione del bacino, definito come il tempo impiegato dall'acqua per giungere alla sezione di chiusura secondo il percorso idraulicamente più lungo.

La formula più diffusa in Italia per il calcolo del tempo di corrivazione è quella di Giandotti (Giandotti, 1934):

$$T_c = \frac{4 \cdot \sqrt{S} + 1.5 \cdot L}{0.8 \cdot \sqrt{z}} \quad \text{Eq. 3.1}$$

dove :

S = superficie del bacino [km²]

L = lunghezza dell'asta principale [km]

z = altitudine media del bacino rispetto alla sezione di chiusura in metri [m]

È necessario precisare che la formula di Giandotti è stata desunta dallo studio di bacini idrografici montani o comunque caratterizzati sia da un'estensione contribuyente derivante da zone pianeggianti sia da zone montane o collinari e, nel caso in istudio, fornisce un valore del tempo di corrivazione pari a 69 [minuti].

Per un'ulteriore verifica del parametro da utilizzare per i modelli matematici descritti a seguire, si applica la formula desunta da recentissimi studi sulla morfologia delle piene di numerosi bacini alpini e appenninici. Tali studi hanno fornito una sostanziale conferma della formula di Giandotti, anche se essa appare fornire una leggera sottostima dei tempi di risposta del bacino (Bacchi ed al., 1999). In particolare tali studi indicano che per la stima del tempo di corrivazione si può assumere la relazione:

$$T_c = \frac{3.3 \cdot \sqrt{S} + 3.2 \cdot L}{\sqrt{z}} \quad \text{Eq. 3.2}$$

che quindi appare simile nella struttura a quella di Giandotti, ma tiene in maggior conto, come nelle formule americane, la lunghezza dell'asta principale e fornisce nel caso in esame un valore di 104 [min.].

Nella tabella di seguito si riportano i risultati ottenuti sottolineando che il tempo di corrivazione assunto è stato posto pari a **65 [min.]**.

CARATTERIZZAZIONE DEL BACINO IDROGRAFICO:	
Area Bacino idrografico [km ²]:	1.8551
Lunghezza dell'asta fluviale principale L [km]:	3.645
Perimetro del contorno P [km]:	8.99
Quota media del bacino [m s.l.m.]:	456.5
Quota massima del bacino [m s.l.m.]:	655.0
Quota minima del bacino [m s.l.m.]:	258.0
Tempo di corrivazione secondo Giandotti T _{c1} [h]:	0.97
Tempo di trasporto in rete + tempo d'ingresso[h]:	1.01
Tempo di corrivazione secondo frm. Bacchi [h]:	1.15
Tempo di corrivazione di progetto [min]:	65
Coefficiente di deflusso[-]:	0.38
Costante d'invaso del Bacino [h]:	0.6
tempo di corrivazione di progetto:	1.08
Area convenzionale per ragguglio:	5.0

Tabella 3.1: Caratteristiche idrografiche e tempo di corrivazione del bacino.

4 LA CARATTERIZZAZIONE PLUVIOMETRICA DEI BACINI SCOLANTI

Si procede ora all'analisi della procedura che ha condotto alla stima delle portate critiche per il bacino in esame del T. Tremana. Si ricorda difatti che per il bacino del T. Morla vengono assunte le portate critiche individuate dallo studio idraulico e idrologico appositamente svolto dallo Studio Telò e dall'Ing. Murachelli.

Per il calcolo dello ietogramma depurato necessario al calcolo della portata critica si è proceduto innanzitutto ricostruendo le Curve di Possibilità Climatica per tempi di ritorno pari a 10, 50, 100 e 200 anni.

Per la determinazione delle L.S.P.P. sono stati considerati:

- Valori registrati dalla stazione pluviografica del S.I.I. 1021 – Bergamo
- Portale Idrologico Geografico di ARPA Lombardia
- Evento registrato 26/06/2016 – Stazione Bergamo via Goisis

4.1 Le linee segnalatrici di probabilità pluviometrica S.I.I. 1021 Bergamo

Si procede ora all'analisi della procedura che ha condotto alla stima delle portate critiche per il bacino in esame. Per il calcolo dello ietogramma depurato necessario al per la portata critica si è proceduto innanzitutto ricostruendo le Curve di Possibilità Climatica in particolare per tempi di ritorno pari a 100 anni e 200 anni.

Determinata l'altezza di pioggia critica in funzione del tempo di ritorno si è proceduto alla determinazione della distribuzione di tale volume nel tempo.

Per la determinazione della curva di possibilità climatica occorre indagare sugli afflussi meteorici conseguenti a piogge eccezionali. Avendo a disposizione i dati della serie storica di Bergamo le procedure di seguito descritte sono state applicate a tale serie.

Quindi sono state stimate le curve di possibilità pluviometrica di interesse o come loro media pesata tramite la distanza dal baricentro del bacino oppure tramite la costruzione di iso-linee dei parametri attraverso le quali stimare le medie spaziali relative ai bacini di interesse. Per curva caratteristica di possibilità pluviometrica si intende la relazione tra l'altezza di pioggia, h , caduta nella generica durata, d , e il tempo di ritorno, T , della stessa; tempo definito come il numero medio di anni in cui h , nella durata d viene superata 'in media' una sola volta. La sua espressione, confermata da oltre 70 anni di studi ed elaborazioni tecniche, può essere rappresentata, per campi di durate abbastanza ampi, con relazioni del tipo:

$$h(d,T)=aTdn \quad \text{Eq. 4.1}$$

ove aT [mm/hn] rappresenta la pioggia 'oraria' di tempo di ritorno T ed n [-] è un esponente di scala. Numerose osservazioni sperimentali, congiunte a estese analisi a scale spaziali anche molto ampie (cfr., fra gli altri, Moisello, 1976; Rosso e Burlando, 1996; Ranzi ed al., 1999), hanno mostrato che l'esponente n è praticamente indipendente dal tempo di ritorno e che, di conseguenza, le piogge intense manifestano una forma di 'invarianza di scala'. Si veda l'allegato B per il dettaglio del metodo.

Le piogge massime annuali che si verificano in una data località per una assegnata durata, date le loro caratteristiche di variabilità, possono essere assimilate a una variabile aleatoria. Di tale variabile è possibile, disponendo di adeguate collezioni di osservazioni, inserire la distribuzione di probabilità, $P(hd)$, con le usuali procedure della statistica. Supponendo di disporre in un dato punto di osservazioni di altezze massime annuali di pioggia relative a un certo numero di durate, d_1, d_2, \dots, d_n , e stimate le loro distribuzioni, la determinazione della 4.1 può essere eseguita regolarizzando tramite una legge di potenza i valori delle altezze di pioggia di varia durata, ma di pari valore del tempo di ritorno, T . Questo è legato alla probabilità dalla relazione

$$T(hd) = 1/[1 - P(hd)] \quad \text{Eq. 4.2}$$

ove P è la probabilità di non superamento.

Analisi di notevole dettaglio sulle piogge intense dell'area regionale lombarda hanno mostrato come, fra le varie distribuzioni degli estremi, la legge probabilistica di Gumbel rappresenti un ottimo compromesso tra semplicità operativa e capacità descrittiva della loro variabilità naturale (Ranzi ed al., 1999). Di conseguenza, ammesso che le piogge seguano tale legge, la loro probabilità di non superamento può essere espressa come:

$$P(hd) = \exp[-\exp[-(hd - ud)/ad]] \quad \text{Eq. 4.3}$$

Ove ud e ad rappresentano i parametri, legati alla media, $m(hd)$, e allo scarto quadratico medio, $s(hd)$, della hd tramite le relazioni teoriche

$$ud = m(hd) - 0.45 s(hd) \quad \text{Eq. 4.4}$$

$$ad = s(h)/1.283$$

Introducendo la relazione 4.2 nella 4.3, e ricordando che il coefficiente di variazione, CV , rappresenta il rapporto tra media e scarto quadratico medio, la precedente può essere riformulata come:

$$h(T) = m(hd) [1 - CVd[0.45 + 0.7797 \ln(\ln(T/(T-1)))]] \quad \text{Eq. 4.5}$$

ove i parametri CV ed m dipendono generalmente dalla durata. La 4.5 esprime in forma diversa la curva di possibilità climatica, parametrizzata rispetto alla durata. Nell'ipotesi di invarianza di scala, CV risulta indipendente dalle durate considerate, e quindi la parametrizzazione rispetto a d dipende solo da variare di $m(hd)$. Il confronto tra la 4.5 e la 4.1 indica il modo di variare di $m(hd)$. In particolare, disponendo su un digramma logaritmico le $m(hd)$ al variare di d , si osserva che queste tendono a disporsi, per campi abbastanza ampi di durate, intorno a una retta; ovvero le medie delle altezze massime annuali di pioggia di durata d sono generalmente esprimibili come:

$$m(hd) = m_1 d^n \quad \text{Eq. 4.6}$$

con m1 media, regolarizzata, delle piogge massime di 1 ora.

Da questa, confrontando con la 4.1, discende

$$h(d,T) = m1dn [1 - CV [0.45 + 0.7797 \ln(\ln(T/(T-1)))]]$$
 Eq. 4.7

e

$$aT = m1 [1 - CV[0.45 + 0.7797 \ln(\ln(T/(T-1)))]]$$
 Eq. 4.8

Al fine di raccogliere le informazioni relative alle piogge intense sono state consultate le pubblicazioni del Servizio Idrografico. Dalla ricerca è emerso che la stazione pluviografica più significativa per l'area di studio è quella di Bergamo. Le elaborazioni della serie riportata nelle pagine a seguire ha condotto ai risultati tabellati di seguito.

Parametri A ed N della curva di possibilità climatica e coefficiente di correlazione R alle durate di 10 min, 15 min, 20 min, 30 min, 1 ora

Tempo di ritorno	a	n	R
2	31,331	0,5214	0,9957
5	42,487	0,5605	0,9848
10	49,885	0,5779	0,9786
20	56,988	0,5909	0,9737
50	66,188	0,6040	0,9687
100	73,086	0,6119	0,9656
200	77,300	0,6201	0,9436

Tabella 4.1: Parametri della distribuzione di Gumbel per durata inferiori ad un'ora

- Tr = 2 anni h = 31.331 × d^{0.5214}
- Tr = 5 anni h = 42.487 × d^{0.5605}
- Tr = 10 anni h = 49.885 × d^{0.5779}
- Tr = 20 anni h = 56.988 × d^{0.5909}
- Tr = 50 anni h = 66.188 × d^{0.6040}
- Tr = 100 anni h = 73.086 × d^{0.6119}
- Tr = 200 anni h = 77.300 × d^{0.6201}

Stazione pluviometrica del S.I.I.
1021 BERGAMO - (quota: 366 m s.l.m.)

Parametri A ed N della curva di possibilità climatica e coefficiente di correlazione R alle durate di 1 ora, 3 ore, 6 ore, 12 ore, 24 ore.

Tempo di ritorno	a	n	R
2	28,045	0,2672	0,9956
5	38,439	0,2621	0,9939

10	45,320	0,2600	0,9930
20	51,919	0,2586	0,9922
50	60,461	0,2571	0,9845
100	66,862	0,2563	0,9856
200	73,240	0,2556	0,9639

Tabella 4.2: Parametri della distribuzione di Gumbel per durata superiori ad un'ora

- Tr = 2 anni $h = 28.045 \times d^{0.2672}$
- Tr = 5 anni $h = 38.439 \times d^{0.2621}$
- Tr = 10 anni $h = 45.320 \times d^{0.2600}$
- Tr = 20 anni $h = 51.919 \times d^{0.2586}$
- Tr = 50 anni $h = 60.461 \times d^{0.2571}$
- **Tr = 100 anni** **$h = 66.862 \times d^{0.2563}$**
- **Tr = 200 anni** **$h = 73.240 \times d^{0.2556}$**

Per una verifica dei parametri considerati si è fatto un confronto con le mappe iso a e iso n del Piano territoriale di Coordinamento Provinciale – Parte D2 Idrologia e idraulica redatto dal Prof. Paoletti nel 2002 per conto della Provincia di Bergamo pervenendo a questi risultati:

$$T = 100 \text{ anni} \qquad h = 65.5 \cdot t^{0.255} \qquad \text{Eq. 4.9}$$

Dal confronto con la curva precedente, si evince come la differenza è abbastanza limitata e per eventi di durata pari al tempo di corrivazione (di poco superiori ad 1 ora) comporterebbe una differenza percentuale del 2.3%.



Figura 4.1: Mappa iso-a per $Tr = 100$ anni tratte dal P.T.C.P. ($d > 1h$).



Figura 4.2: Mappa iso-n per $Tr = 100$ anni tratte dal P.T.C.P. ($d > 1h$).

Stazione Pluviometrica del S.I.I. 1021 BERGAMO - (quota 366 m.s.m.)
SERIE STORICA DEI MASSIMI ANNUALI DELLE PIOGGE (in mm) DELLA DURATA DI: 10 min, 15 min, 20 min, 30 min, 1 ora, 3 ore, 6 ore, 12 ore, 24 ore.

ANNO	10 min	15 min	20 min	30 min	1 ora	3 ore	6 ore	12 ore	24 ore
1936	14.6	19.4	-	-	21.6	31.6	-	46.0	74.6
1937	-	15.0	34.4	49.8	55.0	56.6	-	69.6	87.6
1938	-	-	-	46.0	51.4	54.6	54.8	-	-
1939	12.0	16.0	39.4	-	45.4	52.4	77.8	109	151
1940	19.4	23.0	-	-	39.4	48.0	73.0	97.6	-
1941	13.0	-	-	-	27.8	29.2	30.6	44.0	46.0
1942	-	-	-	21.0	28.0	37.0	42.0	47.0	75.0
1943	-	-	-	17.0	20.0	31.4	36.0	43.6	56.4
1944	-	-	-	29.0	31.0	42.4	58.6	74.2	78.0
1945	-	-	-	15.5	19.0	32.6	43.5	53.6	60.0
1946	-	-	-	17.0	23.0	26.2	40.0	46.2	48.0
1947	-	-	-	21.8	35.8	42.6	43.2	43.2	80.0
1948	-	-	-	25.0	26.0	35.0	55.0	56.0	67.0
1950	-	-	-	37.0	44.6	54.0	54.0	64.4	71.8
1951	-	-	11.8	-	28.0	30.8	48.0	63.0	116
1952	-	-	-	-	38.0	42.2	46.0	57.0	69.0
1953	-	-	-	-	43.6	50.0	57.4	59.0	66.4
1954	-	-	-	16.8	18.0	23.4	24.6	38.6	49.4
1955	9.2	12.2	-	-	39.0	40.6	46.4	54.4	55.0
1956	8.8	-	16.8	11.8	18.2	20.0	24.6	40.6	62.0
1957	-	17.8	22.4	-	36.0	42.6	45.0	45.2	67.4
1958	-	-	-	13.8	22.6	32.0	37.4	43.4	59.0
1959	-	-	-	26.8	60.0	87.8	107	109	109
1960	-	22.2	-	-	41.2	52.4	58.0	86.4	103
1961	-	-	-	34.0	35.2	39.8	39.8	47.0	58.4
1963	-	15.6	-	-	36.8	55.2	55.2	74.2	119
1964	-	-	20.2	-	32.8	36.4	45.6	47.6	70
1965	-	-	-	-	41.4	48.2	51.8	56.2	76.4
1966	13.0	14.8	-	-	35.3	45.0	67.6	73.8	93.2
1967	-	-	19.8	-	24.8	25.8	33.6	46.6	60.8
1968	17.0	-	26.0	50.8	53.0	54.2	61.6	68.2	78.0
1969	-	20.0	-	-	33.4	41.0	41.4	42.6	51.8
1970	-	-	-	29.0	36.0	47.8	68.2	73.8	85.6
1971	-	9.4	14.0	-	21.8	24.0	46.0	56.4	68.6
1972	-	-	-	31.0	35.0	56.6	64.6	66.8	79.6
1973	14.4	15.6	17.6	28.8	38.5	45.8	46.8	76.4	98.4
1974	7.5	8.6	9.8	12.2	15.2	42.0	42.0	42.0	59.2
1975	13.9	18.4	24.3	31.2	33.5	43.6	45.4	54.5	57.4
1976	15.7	21.4	23.6	28.1	28.8	32.7	50.9	65.0	70.4
1977	12.9	16.5	21.1	31.3	34.3	37.6	40.0	57.9	84.5
1978	10.9	11.2	11.6	12.8	20.7	40.7	50.2	50.2	62.6
1979	11.3	13.4	15.6	20.0	25.7	44.5	58.2	90.9	118.8
1980	6.1	6.6	7.1	8.1	11.2	16.8	22.8	32.5	65.0
1981	13.6	17.5	23.4	30.9	34.5	38.4	52.8	76.4	114.4
1982	13.5	13.9	14.3	15.6	18.9	39.8	45.9	63.0	64.8
1983	14.4	17.0	18.7	26.4	27.6	29.4	30.6	31.0	62.0
1984	11.3	13.1	14.8	18.2	29.8	35.6	48.3	54.0	54.6

Tabella 4.3: Serie storica dei massimi annuali delle piogge Stazione pluviometrica del S.I.I. 1021 BERGAMO - (quota: 366 m s.l.m.)

4.2 Le linee segnalatrici di probabilità pluviometrica - ARPA

Per la determinazione delle Linee Segnalatrici di Possibilità Pluviometrica è stato consultato il Portale Idrologico Geografico di ARPA Lombardia ed in particolare la parametrizzazione della LSPP per ogni sito stazione e per ogni punto griglia del territorio in Lombardia secondo il modello probabilistico GEV (Generalized Extreme Value) scala invariante.

Nel bacino di interesse rientrano le seguenti Stazioni Progetto STRADA:

Stazione	Numero anni	Quota [m s.l.m.]	X GB	Y GB	Lon WGS84	Lat WGS84
Bergamo - via Goisis	15	290	1553648	5062736	9.689278	45.715240
Bergamo - Torre Boldone	9	311	1553858	5062759	9.691979	45.715430

Tabella 4.4: Stazioni Progetto STRADA - Bacino di interesse

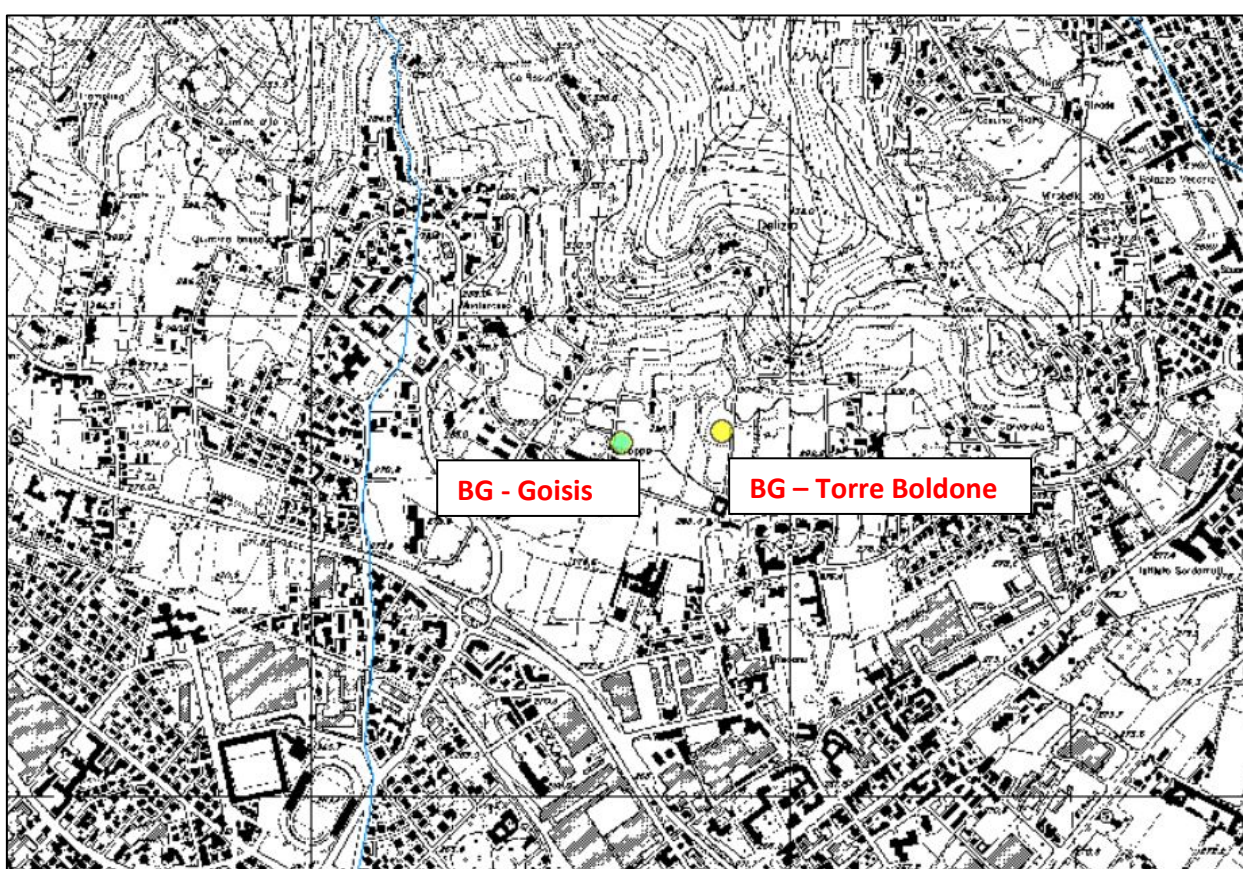


Figura 4.3: Stralcio planimetrico CTR - Ubicazione Stazioni Progetto STRADA - Bacino di interesse

Selezionando sul portale idrologico le linee segnalatrici 1-24 ore P.STRADA, con aggiornamento dei dati fino al 2011, sono stati individuati i Parametri 1-24 necessari al calcolo delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica LSPP1-24.

Tali parametri, suddivisi per griglie di dimensione 1500 x 1500m, sono i seguenti:

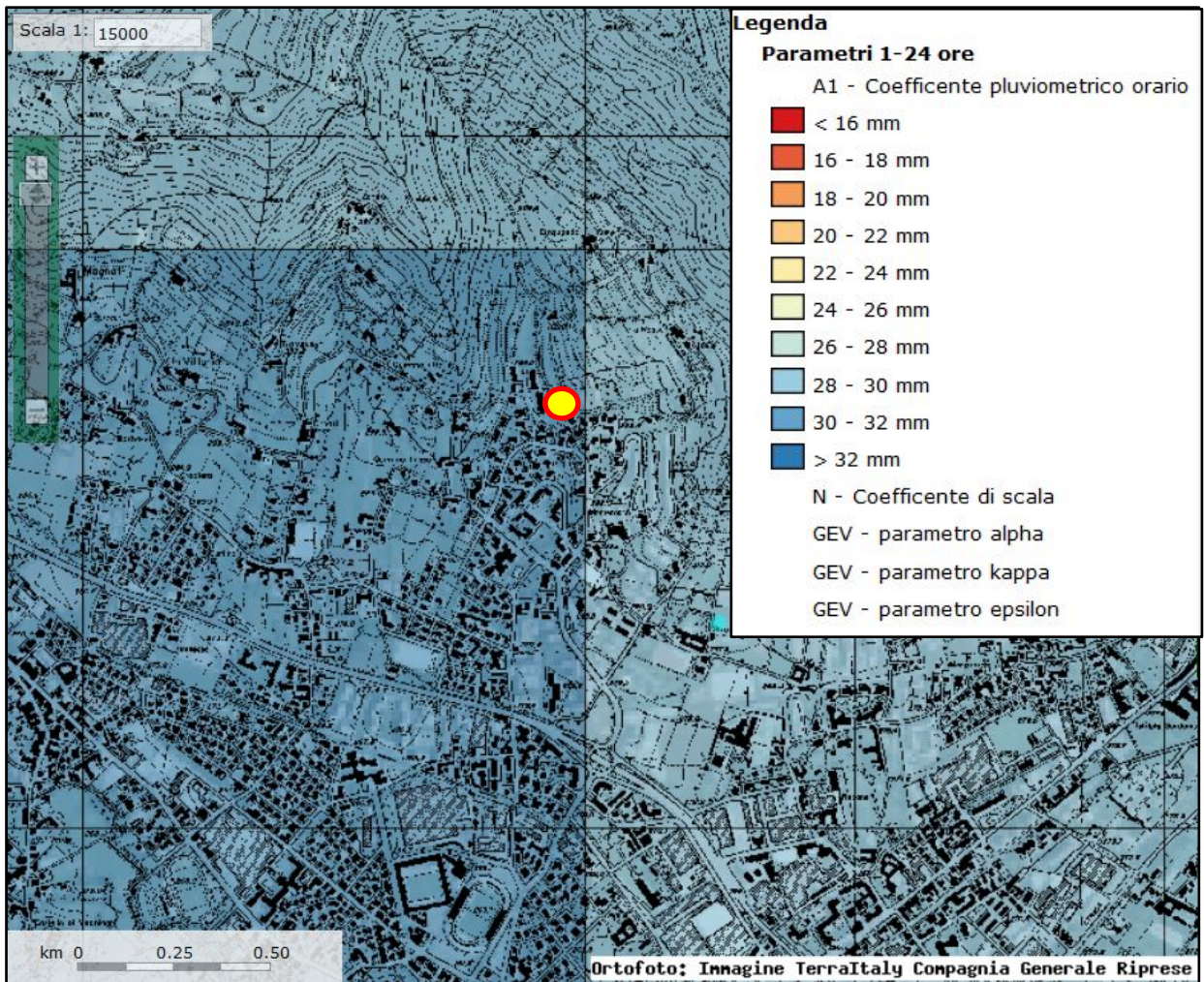
- A1 Coefficiente pluviometrico orario
- n Coefficiente di scala
- α, k, ε Parametri GEV

In particolare i valori ottenuti interrogando il portale con le coordinate Gauss-Boaga (X=1553209-Y=5063273) del bacino in esame risultano:

Parametro	Valore
A1 - Coefficiente pluviometrico orario	30.07
N - Coefficiente di scala	0.29910001
GEV - parametro alpha	0.30149999
GEV - parametro kappa	-0.0060000001
GEV - parametro epsilon	0.82380003

Tabella 4.5: Parametri 1-24 - Bacino in esame

In particolare il coefficiente A1 risulta compreso tra 30-32mm come riportato nello stralcio seguente:



A seguire sono state determinate le linee segnalatrici 1-24 attraverso la formula analitica:

Formulazione analitica

$$h_T(D) = a_1 w_T D^n$$

$$w_T = \varepsilon + \frac{\alpha}{k} \left\{ 1 - \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right]^k \right\}$$

Tr	2	5	10	20	50	100	200
wT	0,93443	1,27807	1,50689	1,72734	2,01411	2,23006	2,44613
Durata (ore)	TR 2 anni	TR 5 anni	TR 10 anni	TR 20 anni	TR 50 anni	TR 100 anni	TR 200 anni
1	28,1	38,4	45,3	51,9	60,6	67,1	73,6
2	34,6	47,3	55,8	63,9	74,5	82,5	90,5
3	39,0	53,4	62,9	72,1	84,1	93,1	102,2
4	42,5	58,2	68,6	78,6	91,7	101,5	111,3
5	45,5	62,2	73,3	84,1	98,0	108,5	119,0
6	48,0	65,7	77,4	88,8	103,5	114,6	125,7
7	50,3	68,8	81,1	93,0	108,4	120,0	131,6
8	52,3	71,6	84,4	96,7	112,8	124,9	137,0
9	54,2	74,1	87,4	100,2	116,9	129,4	141,9
10	55,9	76,5	90,2	103,4	120,6	133,5	146,5
11	57,6	78,7	92,8	106,4	124,1	137,4	150,7
12	59,1	80,8	95,3	109,2	127,4	141,0	154,7
13	60,5	82,8	97,6	111,9	130,4	144,4	158,4
14	61,9	84,6	99,8	114,4	133,4	147,7	162,0
15	63,2	86,4	101,9	116,8	136,1	150,7	165,3
16	64,4	88,1	103,8	119,0	138,8	153,7	168,6
17	65,6	89,7	105,7	121,2	141,3	156,5	171,6
18	66,7	91,2	107,6	123,3	143,8	159,2	174,6
19	67,8	92,7	109,3	125,3	146,1	161,8	177,5
20	68,8	94,2	111,0	127,2	148,4	164,3	180,2
21	69,8	95,5	112,6	129,1	150,6	166,7	182,8
22	70,8	96,9	114,2	130,9	152,7	169,0	185,4
23	71,8	98,2	115,7	132,7	154,7	171,3	187,9
24	72,7	99,4	117,2	134,4	156,7	173,5	190,3

Tabella 4.6: Tabella delle precipitazioni previste al variare delle durate e dei tempi di ritorno

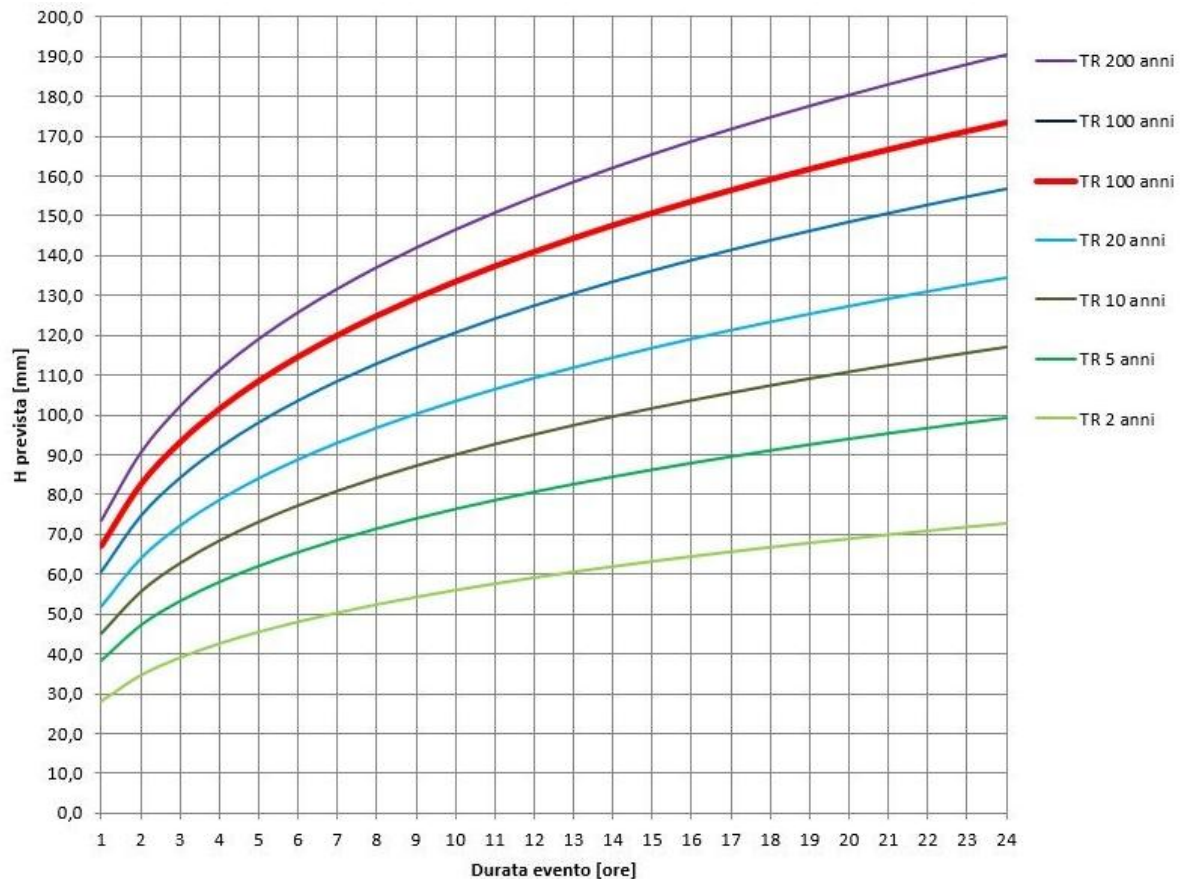


Figura 4.4: Linee segnalatrici di possibilità pluviometrica – Arpa Lombardia.

Le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica, per eventi di durata compresa tra 1-24 ore e relative ai differenti tempi di ritorno, risultano:

- Tr = 2 anni	$h = 28.0982 \times D^{0.2991}$
- Tr = 5 anni	$h = 38.4317 \times D^{0.2991}$
- Tr = 10 anni	$h = 45.3121 \times D^{0.2991}$
- Tr = 20 anni	$h = 51.9411 \times D^{0.2991}$
- Tr = 50 anni	$h = 60.5644 \times D^{0.2991}$
- Tr = 100 anni	$h = 67.0580 \times D^{0.2991}$
- Tr = 200 anni	$h = 73.5550 \times D^{0.2991}$

Come si evince dalle LSPP ricostruite dal sito di ARPA, i valori sono del tutto in linea e operativamente identici a quelli ricostruiti analizzando la serie storica di Bergamo.

4.3 Evento registrato 26/06/2016 – Stazione Bergamo via Goisis

A seguito degli eventi meteorici intensi della estate 2016 sono stati esaminati i dati disponibili registrati al pluviometri dell'area di nostro interesse: Stazione Bergamo via Goisis – Id sensore 5857. Tutte le stazioni sostanzialmente confermano questo primato. In particolare si è osservato che l'evento, tra i molteplici accaduti nella stessa estate, il più rilevante, è stato quello del 26.06.2016 ed in particolare tale evento **non ha comportato criticità** sul Tremana. Con riferimento quindi alla stazione dell'ARPA Bergamo via Goisis, le altezze di pioggia registrate con intervalli di 10 minuti sono state:

Id sensore	Data Ora	Valore Cumulata
5857	2016-06-26 18.40	0.0
5857	2016-06-26 18.50	0.0
5857	2016-06-26 19.00	0.0
5857	2016-06-26 19.10	0.0
5857	2016-06-26 19.20	0.0
5857	2016-06-26 19.30	0.0
5857	2016-06-26 19.40	0.0
5857	2016-06-26 19.50	0.0
5857	2016-06-26 20.00	0.0
5857	2016-06-26 20.10	0.0
5857	2016-06-26 20.20	0.4
5857	2016-06-26 20.30	11.0
5857	2016-06-26 20.40	10.8
5857	2016-06-26 20.50	6.6
5857	2016-06-26 21.00	8.2
5857	2016-06-26 21.10	13.0
5857	2016-06-26 21.20	13.4
5857	2016-06-26 21.30	4.2
5857	2016-06-26 21.40	4.0
5857	2016-06-26 21.50	3.0
5857	2016-06-26 22.00	1.8
5857	2016-06-26 22.10	0.8

Tabella 4.7: ARPA Bergamo – Via Goisis – Evento del 26/06/2016

In particolare, dalle ore 20.30 alle ore 21.50, sono piovuti complessivamente 74.2mm in 1.5 ore.

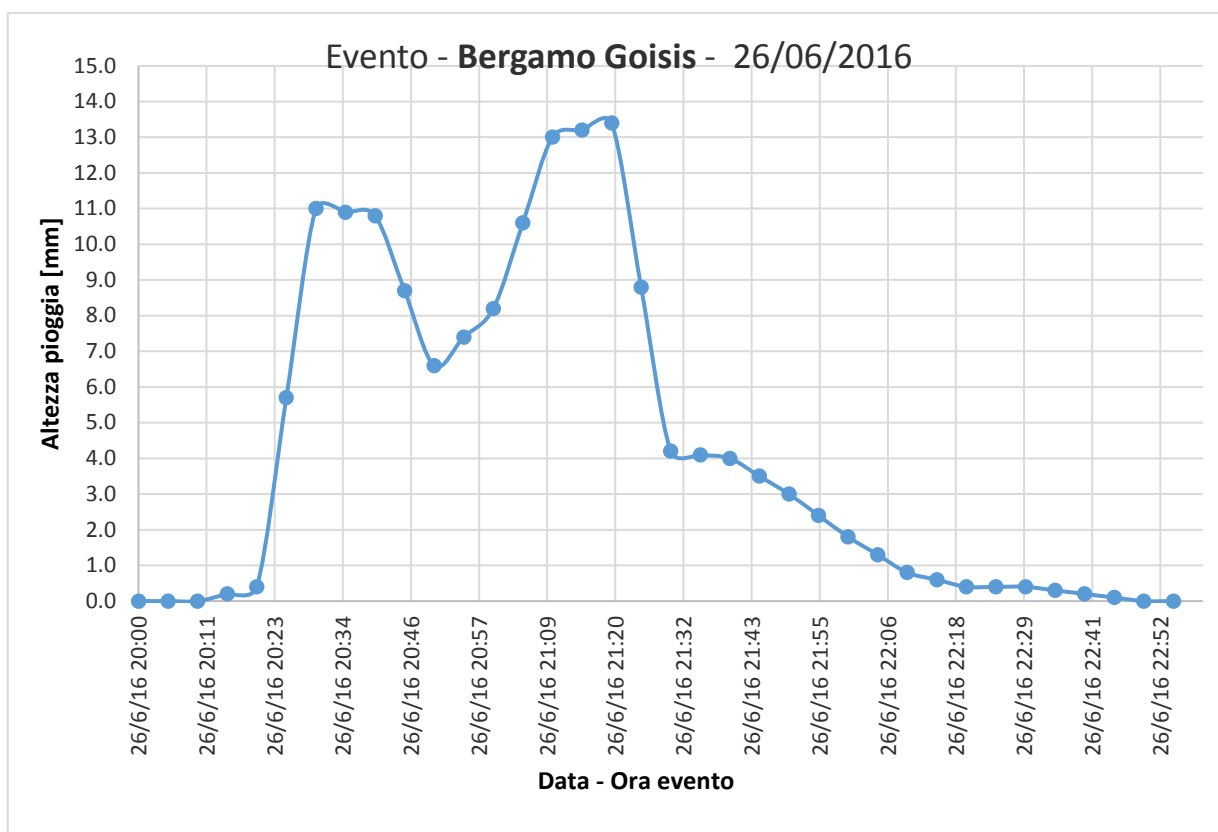


Figura 4.5: Evento pluviometrico registrato dalla stazione Bergamo Goisis – 26/06/2016



Linee segnalatrici di probabilità pluviometrica

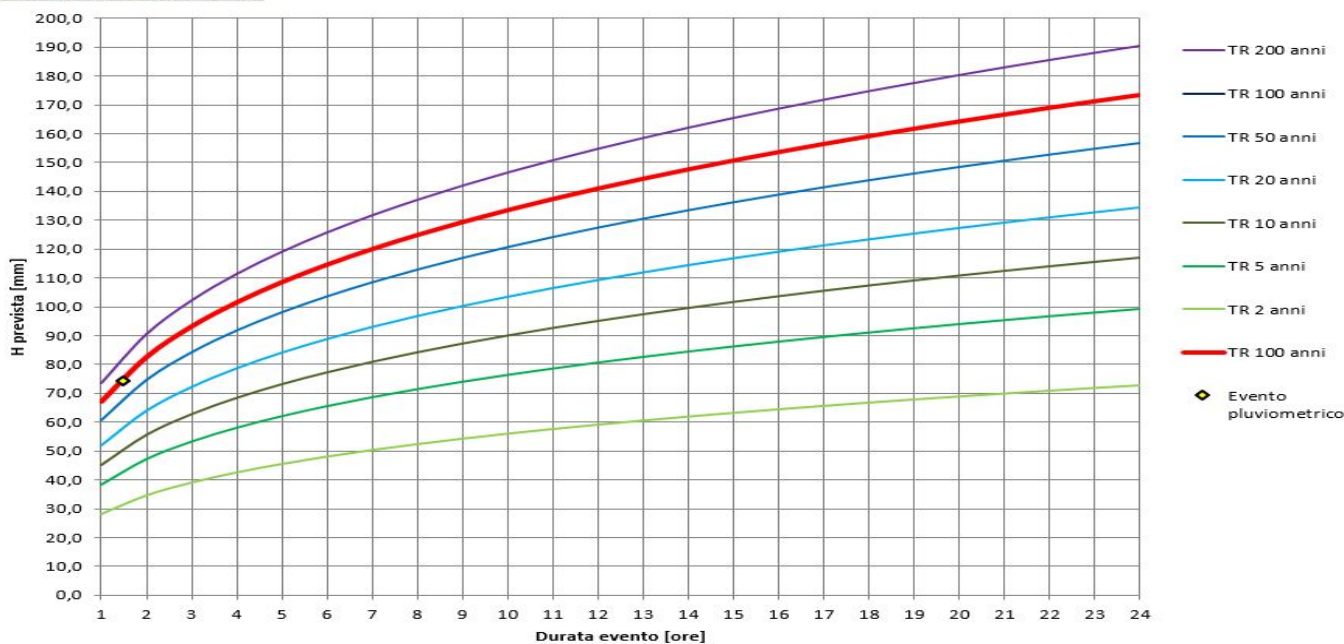


Figura 4.6: Evento pluviometrico 26/06/2016 e LSPP – Stazione Bergamo Goisis.

Se raffrontate alle linee segnalatrici per la durata superiore all'ora, i dati registrati corrispondono ad un evento con tempo di ritorno di 100 anni.

4.4 Scelta delle Linee Segnalatrici di calcolo

Considerando i valori delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica determinati in precedenza, per le calcolazioni a seguire saranno utilizzate le LSPP che, a favore di sicurezza, determinano i maggiori valori di precipitazioni e conseguentemente le maggiori portate all'interno del corso d'acqua ed in particolare quelli ricavati dal Portale Idrologico Geografico di ARPA Lombardia ed in particolare:

- Tr = 2 anni	$h = 28.0982 \times D^{0.2991}$
- Tr = 5 anni	$h = 38.4317 \times D^{0.2991}$
- Tr = 10 anni	$h = 45.3121 \times D^{0.2991}$
- Tr = 20 anni	$h = 51.9411 \times D^{0.2991}$
- Tr = 50 anni	$h = 60.5644 \times D^{0.2991}$
- Tr = 100 anni	$h = 67.0580 \times D^{0.2991}$
- Tr = 200 anni	$h = 73.5550 \times D^{0.2991}$

4.5 Il ragguglio delle piogge all'area

Dopo aver determinato le altezze di pioggia relative ad una ben determinata stazione, si deve poi tener conto del fatto che esse, ricavate per il punto in cui è collocato il pluviografo, non possono essere ritenute valide anche per aree di dimensioni non piccole attorno al pluviografo stesso. Infatti, poiché per la costruzione delle curve di possibilità climatica si parte dai valori estremi, e' probabile che per gli eventi selezionati il centro di scroscio coincida con la posizione dello strumento e che invece, per gli stessi eventi, la precipitazione media su un'area finita attorno al pluviografo sia minore. Per tener conto di ciò si applica un "coefficiente di ragguglio", che consente appunto di estendere all'area di interesse le informazioni ricavate per la stazione pluviografica considerata oppure si modificano i parametri delle L.S.P.P. in funzione dell'estensione dell'area del bacino.

4.5.1 La procedura Wallingford

Per valutare il "coefficiente di ragguglio" sono state utilizzate le formule della "procedura Wallingford" (DEWC, 1981). Esse, ricavate dall'omonimo istituto inglese, forniscono il coefficiente ARF (Areal Reduction Factor), che rappresenta il rapporto tra altezza di pioggia raggugliata ad una determinata area e l'altezza di pioggia puntuale:

$$ARF = 1 - f_1 t^{-f_2} \quad \text{Eq. 4.10}$$

$$f_1 = 0.0394 A^{0.354} \quad \text{Eq. 4.11}$$

$$f_2 = 0.40 - 0.0208 \ln(4.6 - \ln A) \text{ per } A < 20 \text{ Km}^2 \quad \text{Eq. 4.12}$$

$$f_2 = 0.40 - 0.03832 (4.6 - \ln A)^2 \text{ per } 20 < A < 100 \text{ Km}^2 \quad \text{Eq. 4.13}$$

con t espresso in ore e A espresso in Km^2 . Quindi l'altezza di pioggia raggugliata si calcola nel seguente modo:

$$h_{rag} = h_{punt} ARF \quad \text{Eq. 4.14}$$

4.5.2 La modifica dei parametri delle L.S.P.P.

Poiché anche le altezze di pioggia ragguagliate si rappresentano analiticamente in modo del tutto simile a quelle ottenute per le piogge puntuali, l'espressione della curva sarà del tipo:

$$h_r(t) = a't^{n'} \quad \text{Eq. 4.15}$$

e quindi il coefficiente di ragguaglio è espresso come:

$$h_r(t) = R(t, A) \cdot at^n \quad \text{Eq. 4.16}$$

Nella pratica il coefficiente di ragguaglio viene a dipendere solo dall'area; nei calcoli seguenti si sono adottate le seguenti formule di Columbo-Marchetti:

$$a' = a \left[1 - 0.06 \left(\frac{A}{100} \right)^{0.4} \right] \quad \text{Eq. 4.17}$$

$$n' = n + \left[0.003 \left(\frac{A}{100} \right)^{0.6} \right] \quad \text{Eq. 4.18}$$

dove l'area A è espressa in [ha].

Questa procedura è stata però desunta per i pluviometri di Milano e per studi su serie storiche non troppo lunghe e quindi difficilmente applicabile allo scopo in oggetto.

4.5.3 La procedura di Moisello-Papiri.

Tali relazioni tuttavia, per il modo in cui sono state dedotte, dovrebbero fornire, a parere di chi scrive, delle sovrastime dell'altezza di pioggia ragguagliata, almeno per le durate più brevi. Esse sono state infatti determinate dalle curve iso-ietografiche di eventi intensi, e pertanto dovrebbero rappresentare il ragguaglio centrato sul punto di massima intensità dell'evento meteorico (storm centered Areal Reduction Factor). Più ragionevole appare invece la formula di Moisello e Papiri che hanno dedotto il valore del coefficiente di ragguaglio $r(A,d)$ rispetto al centro dell'area di interesse (area centered Areal Reduction Factor). Esso rappresenta quindi il parametro adatto agli scopi dello studio. L'espressione del coefficiente è:

$$r(A,d) = 1 - \exp \left[-2.472 A^{-0.242} d^{0.6 - \exp(-0.643 A^{0.235})} \right] \quad \text{Eq. 4.19}$$

per aree $5 \leq A \leq 800 \text{ km}^2$ e per durate $15' \leq d \leq 12 \text{ h}$

4.5.4 Il metodo di Eagleson.

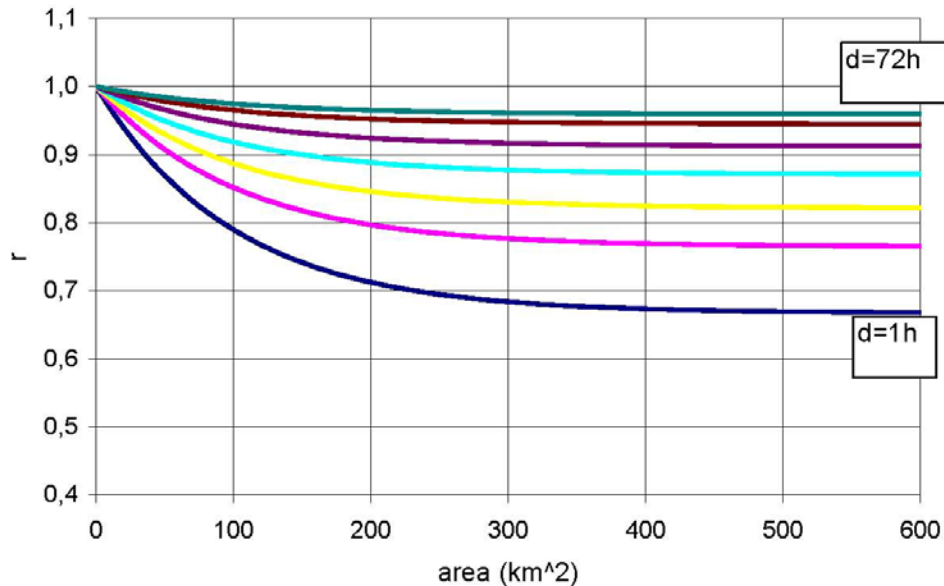
Un ulteriore metodo per la determinazione del coefficiente di ragguaglio si è utilizzata la metodologia proposta dall'United States Weather Bureau mediante l'interpolazione proposta da Eagleson in cui il coefficiente di ragguaglio dipende sia dall'area del bacino che dal suo tempo di corrivazione:

$$R(\delta, A) = 1 - e^{-1,1\delta^{0,25}} + e^{-1,1\delta^{0,25} - 0,01A}$$

dove:

δ è il tempo di corrivazione del bacino [h];

A $\frac{A}{\vartheta}$ la superficie del bacino [km²].



Di seguito si riportano i valori calcolati secondo i metodi esposti ed il valore assunto per le calcolazioni a seguire pari a **0.90**.

PARAMETRI LINEE SEGNALATRICI E RAGGUAGLIO ALL'AREA		
Tempo di ritorno [anni]:	100	200
Durata dell'evento caratteristico [h]:	> 1	> 1
parametro n_T delle L.S.P.P.:	0.299	0.299
parametro a_T delle L.S.P.P.:	67.06	73.56
parametro n_T ragguagliato delle L.S.P.P.:	0.303	0.303
parametro a_T ragguagliato delle L.S.P.P.:	61.91	67.90
parametro f_1 :	0.049	0.049
parametro f_2 :	0.317	0.317
ARF:	0.952	0.952
$r(A,d)$ di Moisello-Papiri:	0.816	0.816
r di progetto:	0.900	0.900

Tabella 4.8: Parametri delle L.S.P.P. e ragguaglio all'area

CALCOLO EVENTO PLUVIOMETRICO DI PROGETTO :		
Tempo di ritorno [anni]:	100	200
Altezza di pioggia per Tc [mm]:	68.68	75.34
Intensità di pioggia per Tc [mm/h]:	63.40	69.54
Altezza di pioggia ragguagliata ARF per Tc [mm]:	65.40	71.74
Intensità di pioggia ragguagliata ARF per Tc [mm/h]:	60.37	66.22
Altezza di pioggia ragguagliata Moisello-Papiri per Tc [mm]:	56.03	61.45
Intensità di pioggia ragguagliata Moisello-Papiri per Tc [mm/h]:	51.72	56.73
Altezza di pioggia con a', n' per Tc [mm]:	63.43	69.57
Intensità di pioggia a', n' per Tc [mm/h]:	58.55	64.22

Tabella 4.9: Evento pluviometrico di progetto

4.6 Lo ietogramma di Chicago

Per la determinazione dello ietogramma da utilizzare per l'applicazione dei modelli di trasformazione afflussi-deflussi è stato adottato il modello di Chicago.

La pioggia di progetto di Chicago è stata proposta da Keifer e Chu nel 1957 come risultato dello studio effettuato per la fognatura appunto di Chicago. La principale caratteristica di questo ietogramma di progetto consiste nel fatto che l'intensità media, per ogni intervallo di tempo, coincide con l'intensità desunta dalle curve di possibilità pluviometrica. Definito il volume di pioggia dalla relazione analitica delle L.S.P.P., fissata la durata dell'evento t_c , per ogni durata parziale θ inferiore a t_c , deve necessariamente sussistere la seguente relazione:

$$\int_0^{\theta} i(\tau) \cdot d\tau = a \cdot \theta^n \quad \text{Eq. 4.20}$$

Se il picco d'intensità si presentasse all'inizio dell'evento, l'espressione dello ietogramma sarebbe la seguente:

$$i(\theta) = n \cdot a \cdot \theta^{n-1} \quad \text{Eq. 4.21}$$

Nella realtà il picco non si presenta all'inizio dell'evento bensì ad un certo istante ($r \cdot t_c$) con $r < 1$. Il valore di r dipende da indagini relative alla zona ma è consuetudine assegnare un valore di 0.5 anche per facilitare i calcoli. In definitiva lo ietogramma avrà un ramo crescente fino all'istante del picco $r \cdot t_c$ e poi decrescente fino t_c , cioè seguirà le seguenti leggi:

$$i(\theta) = n \cdot a \cdot (rt_c - \theta)^{n-1} \quad 0 < \theta < rt_c \quad \text{Eq. 4.22}$$

$$i(\theta) = n \cdot a \cdot (\theta - rt_c)^{n-1} \quad rt_c < \theta < t_c \quad \text{Eq. 4.23}$$

I parametri di scelta per applicare questo modello di distribuzione temporale delle piogge sono quindi il valore della durata dell'evento, posta uguale al tempo di corrivazione, e del valore di r posto pari a 0.375 in base all'esperienza per zone analoghe a quella qui in istudio. La durata di pioggia è stata posta pari a 120 [min].

4.7 Lo ietogramma costante

Per la distribuzione temporale della pioggia di progetto di durata pari al tempo di corrivazione è stato previsto, in alternativa alla distribuzione derivante dal modello di Chicago, uno ietogramma costante che verrà utilizzato nel calcolo, a mezzo di formule speditive, della portata critica.

Definito quindi il volume di pioggia dalla relazione analitica delle L.S.P.P., fissata la durata dell'evento T_c pari a **60** [min], semplicemente si ricava l'intensità costante di progetto [mm/h]:

$$\int_0^{\theta} i(\tau) \cdot d\tau = a \cdot \theta^n \rightarrow i_{\text{COST}} \cdot T_c = a \cdot T_c^n \rightarrow i_{\text{COST}} = \frac{a \cdot T_c^n}{T_c} \quad \text{Eq. 4.24}$$

5 I MODELLI DI TRASFORMAZIONE AFFLUSSI-DEFLUSSI

Definito l'evento pluviometrico critico per il tempo di ritorno assegnato, il passo successivo è quello di definire la quota parte di pioggia che contribuisce alla formazione del deflusso nella sezione di chiusura. Questa operazione è eseguita dai modelli di risposta terreno, mentre il processo di formazione della piena a partire dall'afflusso netto è eseguito dai cosiddetti modelli di risposta del bacino. Nei calcoli eseguiti è stato adottato, per quanto riguarda la risposta del terreno, il metodo percentuale, per i modelli speditivi, ed il metodo del CN, per la trasformazione afflussi e deflussi, mentre per la risposta del bacino è stato utilizzato il metodo di Nash accoppiato al metodo del CN e il metodo della corrivazione accoppiato al metodo percentuale.

5.1 Il metodo percentuale

Col metodo percentuale, l'altezza di pioggia netta dall'inizio dell'evento fino all'istante t generico è valutata come percentuale dell'altezza di pioggia totale caduta nello stesso tempo (coefficiente di afflusso). Il valore di tale percentuale è usualmente assunto costante e pari ad un opportuno valore per tutta la durata della precipitazione. Questa ipotesi è peraltro priva di qualsiasi fondamento logico ed ha valore puramente operativo. L'adozione di una percentuale ad esempio variabile secondo un'opportuna funzione dell'altezza di pioggia precedentemente caduta, conferisce una maggiore generalità al metodo e può in qualche caso portare ad un miglioramento dei risultati. Non avendo dettagliate conoscenze sui parametri che caratterizzano il terreno del bacino in esame, si è cercato di stimare al meglio il coefficiente di afflusso \emptyset suddividendo il bacino in più aree in modo da rendere più semplice la distinzione delle aree omogenee ed attribuendo una percentuale di contributo al deflusso da parte delle stesse aree più permeabili ed una percentuale per il contributo dato dalle aree più impermeabili. Per la parte di bacino collinare sono stati analizzati i valori in letteratura per bacini boscati ritrovando :

- 1) boschi $\emptyset = 0.1-0.3$ da Sistemazione dei Corsi d'acqua – (Da Deppo, Datei e Saladin 1997);
- 2) aree permeabili $\emptyset = 0.15-0.3$ (Rasuolo e 1997);
- 3) prati, pascoli e boschi con pendenza media $\emptyset =$ da 0.35 a 0.45 (Chow et al., 1988)

Per la parte di bacini urbani si è fatto riferimento a valori classici suggeriti da Marchetti per le zone urbane centrali con densa fabbricazione (valori suggeriti da 0.7 a 0.9) e per le zone con densità inferiore e con zone a parco.

Nome Area	Descrizione	Est.[ha]	\emptyset
1	Bacino collinare	104.28	0.25
2A	Bacino urbano con densità media e con zone a parco	72.4	0.50
2B	Bacino urbano intenso	8.83	0.90
	Totale	185.51	0.4

Tabella 5.1: Definizione dei bacini elementari e relativi coefficienti di afflusso.

Per il bacino in esame è stato adottato un parametro medio ponderale pari a **0.4 [-]** che risulta ragionevole con i valori adottati per bacini analoghi nei quali l'incidenza della parte extraurbana è dell'ordine del 50%.

5.2 Il metodo del CN del Soil Conservation Service

Nei calcoli di convoluzione è stato inoltre adottato il metodo del Curve Number, introdotto dal Soil Conservation Service (SCS). Esso ha conosciuto un forte sviluppo soprattutto grazie alla notevole mole di dati forniti dallo stesso SCS per la taratura del modello sul territorio federale. Secondo tale modello, il volume specifico (altezza) di pioggia netta P_{net} , dall'inizio dell'evento meteorico fino all'istante generico t , risulta legato al volume specifico di pioggia lorda P , caduta nel medesimo intervallo temporale, dalla relazione:

$$P_{net} = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad \text{Eq. 5.1}$$

Nella quale S è il massimo volume specifico di acqua che il terreno può trattenere in condizioni di saturazione ed I_a è la cosiddetta perdita iniziale, vale a dire quel valore limite di altezza di pioggia che il terreno può trattenere nella fase iniziale del fenomeno senza che sia abbia produzione di deflusso. Questa relazione è valida solo se $P > I_a$, mentre se la pioggia netta risulta minore di I_a allora $P_{net} = 0$. In realtà, con l'introduzione della perdita iniziale s'intende tenere conto di quel complesso di fenomeni, quali l'intercettazione da parte della vegetazione e l'accumulo nelle depressioni superficiali del terreno, che ritardano il verificarsi del deflusso superficiale.

I due parametri S ed I_a possono essere determinati nella calibrazione del modello. In mancanza di adeguate osservazioni utili a questo scopo per la stima di I_a si può fare ricorso alla seguente relazione :

$$I_a = 0.2S \quad \text{Eq. 5.2}$$

che sulla base di alcune analisi di dati sperimentali condotte dal SCS risulta verificata con buone approssimazioni. La valutazione di S può invece essere condotta a quella dell'indice CN, cui esso risulta legato dalla relazione:

$$S = 254 \cdot \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad \text{Eq. 5.3}$$

valida per S espresso in mm.

L'indice CN è un numero adimensionale, compreso fra 0 e 100, funzione della natura del suolo, del tipo di copertura vegetale e dalle condizioni di umidità del terreno antecedenti la precipitazione. Per quanto riguarda l'influenza dello stato di imbibimento del suolo all'inizio dell'evento meteorico, il metodo individua tre classi caratterizzate da differenti condizioni iniziali a seguito del valore assunto dall'altezza di pioggia caduta nei cinque giorni precedenti l'evento (AMC I per condizioni antecedenti molto asciutte e AMC III per condizioni molto umide). Considerato il parametro CN per condizioni antecedenti di normalità si sono applicate le seguenti relazioni per il calcolo del CN I e CN II:

$$CN I = \frac{4.2 \cdot CN II}{10 - 0.058 \cdot CN II} \quad \text{Eq. 5.4}$$

$$CN III = \frac{23 \cdot CN II}{10 + 0.13 \cdot CN II} \quad \text{Eq. 5.5}$$

Per il bacino del in esame la parte urbanizzata è comunque rilevante e quindi non risulta certamente trascurabile la presenza di aree tipicamente impermeabili con percentuali di copertura anche variabili. Risulta invece più importante definire un valore del CN associato alla tipologia di uso del suolo e alla capacità dei deflusso del terreno.

Avendo assegnato classe del suolo B sulla base degli indici meglio descritti nell'Allegato A, si è attribuito un valore del parametro CN a ciascuna tipologia dei sottobacini risultando un CN medio per l'intero bacino pari a 68.5. Questo valore è in linea con le indicazioni che si possono desumere dalle tabelle di letteratura per aree come quella in esame.

Tipologia di area	CN	S [ha]
terreno boschivo forestale buona cop	55	104.28
area residenziale con imp 65%	85	72.4
area residenziale con imp >85%	92	8.83
CN medio ponderale sul bacino	68.5	185.51

Tabella 5.2: Valori di CN per i singoli sottobacini del T. Tremana.

Il valore di I_a (Initial Abstraction) rappresenta la perdita iniziale dovuta ai piccoli invasi, all'intercettazione e alla capacità di suzione del terreno all'inizio dell'evento meteorico. In mancanza di tarature, secondo quanto consigliato in letteratura, I_a è solitamente posto pari al 20% di S (per l'applicazione cfr. Moisello, 1998 oppure Chow ed al., 1988). Tale procedimento conduce però ad una sovrastima del volume infiltrato e quindi ad una riduzione dei volumi di piena. Per ovviare a tale inconveniente si può procedere, ad esempio, ponendo I_a pari a 3 mm (Wisner; 1983). Dalle simulazioni fatte ed in ragione delle pendenze dei versanti si ritiene troppo elevato il valore di 3 mm e quindi si pone **la pari complessivamente a 2 mm.**

Le condizioni di umidità relativamente alla piovosità dei cinque giorni antecedenti sono state supposte medie. Nell'Allegato A si riporta un dettaglio del metodo del CN con la disamina dei coefficienti di uso del suolo e geopedologici sia relativi alle caratteristiche di tessitura e di struttura del suolo sia relativi alla permeabilità.

5.3 Il metodo dell'invaso

Prima di descrivere il modello di Nash, utilizzato nelle calcolazioni, risulta necessario descrivere il metodo dell'invaso che ne è la base.

Secondo il modello dell'invaso il comportamento del bacino a seguito di un evento meteorico è considerato analogo al funzionamento di un serbatoio lineare descritto dalla seguente relazione:

$$q(t) = \frac{W(t)}{k} \quad \text{Eq. 5.6}$$

che lega il volume idrico immagazzinato, $W(t)$, alla portata effluente, $q(t)$, secondo una legge di proporzionalità, dove il parametro K , rappresenta la costante di immagazzinamento o invaso del serbatoio.

Considerata l'equazione di continuità del serbatoio

$$\frac{dW(t)}{dt} = p(t) - q(t) \quad \text{Eq. 5.7}$$

dove $p(t)$ indica l'ingresso al serbatoio ed indicando con $q(0)$ la portata defluente dal bacino all'inizio della piena si ricava:

$$q(t) = \int_0^t \left(\frac{e^{-\frac{(t-\tau)}{K}}}{k} \right) p(\tau) + q(0) \cdot e^{-\frac{t}{k}} \quad \text{Eq. 5.8}$$

All'espressione che compare entro le parentesi quadre si dà il nome di idrogramma unitario istantaneo del metodo dell'invaso lineare. Affinché tale metodo possa essere applicato, occorre risolvere l'integrale scritto sopra e stimare la costante temporale K che caratterizza il bacino. Per tale stima si prenda in considerazione il fatto che per un dato bacino la portata critica dovrebbe essere sempre la medesima e quindi uguagliando l'espressione ottenuta con il modello della corrivazione, assai noto in letteratura, con quella del metodo dell'invaso si deduce che:

$$T_{\text{corrivazione}} \cong k \cdot 0.65^{\frac{1}{(n'-1)}} \quad \text{Eq. 5.9}$$

Si nota quindi come la costante d'invaso risulti sempre di durata inferiore rispetto al tempo di corrivazione .

5.4 Il metodo di Nash

Un ulteriore metodo indiretto di stima delle portate al colmo è il metodo di Nash o metodo Gamma formulato in base ad uno studio su un folto gruppo di bacini britannici (Nash, 1960). Il modello idrologico è di tipo concettuale cioè analiticamente vuole rappresentare la trasformazione afflussi e deflussi anche se le leggi fisiche che governano tale processo sono profondamente differenti a quelle implementate. Il modello suppone che la formazione della piena avvenga per successivi invasi lineari a cascata cioè la portata in uscita del serbatoio i -esimo rappresenta il volume in ingresso nel serbatoio $i+1$. In questo modo i parametri che gestiscono il modello sono il numero n di invasi lineari in serie e la costante di tempo k di ogni serbatoio e uguale per tutti. In genere è favorevole utilizzare un modello a più parametri in quanto meglio si può adattare agli idrogrammi registrati o comunque si adatta meglio al processo di formazione della piena, ovviamente la stima di tali parametri è tanto più difficile e laboriosa quanto maggiore è il numero dei parametri. Nel caso particolare la presenza di due aree del bacino così ben distinte, l'area collinare e l'area di pianura, può essere in via di principio

rappresentata nella cascata di due serbatoi lineari ed, essendo pressoché simile il parametro di durata critica per le due aree, l'ipotesi di utilizzare un valore univoco di k può essere ben accettata.

Ricordando che la formulazione dell'idrogramma unitario istantaneo (in seguito IUH) per il metodo dell'invaso è la seguente:

$$h(t) = \frac{1}{k} \cdot e^{-\frac{t}{k}} \quad \text{Eq. 5.10}$$

e applicando la convoluzione in modo ricorsivo si ottiene l'IUH per due serbatoi di costante k :

$$h(t) = \int_0^t \frac{1}{k} \cdot e^{-\frac{(t-\tau)}{k}} \cdot \frac{1}{k} \cdot e^{-\frac{\tau}{k}} \cdot d\tau = \frac{t}{k^2} \cdot e^{-t/k} \quad \text{Eq. 5.11}$$

Infine per un numero n di serbatoi in serie l'IUH risulta quindi :

$$h(t) = \frac{t^{n-1}}{(n-1)!k^n} \cdot e^{-t/k} \quad \text{Eq. 5.12}$$

Per la determinazione del parametro temporale k si possono fare analoghe considerazioni a quelle fatte nel confronto fra il modello della corrivazione e il modello dell'invaso lineare e quindi si ottiene che, definito T_c il tempo di corrivazione dell'intero bacino e T_p il tempo di picco dell'idrogramma di piena, la seguente formula:

$$k = \frac{T_p}{(n-1)} \quad \text{Eq. 5.13}$$

$$T_p = 0.5 \cdot T_c \quad \text{Eq. 5.14}$$

Per le calcolazioni svolte è stato assunto un parametro di $n = 3$ e $k = 32.5$ [min.].

6 CALCOLO DELLE PORTATE CRITICHE

Il calcolo della portata critica è stato eseguito applicando sia le formule speditive basate sulla pluviometria sia applicando la convoluzione in modo da avere una stima più accurata della sollecitazione critica per il bacino in istudio.

6.1 Stime mediante formule basate sulla pluviometria

In questa categoria particolarmente importante risulta essere la formula "razionale"; essa, che nella sua prima formulazione risale al secolo scorso (Mulvany, 1850), deriva dall'impostazione di un bilancio idrologico schematico dell'evento di piena, partendo dall'ipotesi che la massima portata sia prodotta da una precipitazione di durata pari al tempo di corrivazione del bacino:

$$Q\left(\frac{m^3}{s}\right) = 0.2778 \cdot Cd \cdot \frac{hc \cdot S}{t_c} = 0.2778 \cdot Cd \cdot ir \cdot S \quad \text{Eq. 6.1}$$

dove:

hc =altezza di pioggia ragguagliata caduta durante un evento di durata pari al tempo di corrivazione [mm],

S =superficie del bacino [Kmq],

tc =tempo di corrivazione del bacino [ore],

Cd =coefficiente di deflusso,

ir =intensità di pioggia ragguagliata [mm/h].

Sostanzialmente il metodo "razionale" si fonda sull'uso della curva di possibilità climatica (della pioggia ragguagliata) e sulle seguenti assunzioni:

- che, a parità di tempo di ritorno T, la portata al colmo maggiore sia prodotta dall'evento con durata uguale al tempo di corrivazione tc del bacino;
- che la portata al colmo sia causata da una precipitazione (ragguagliata) rappresentata da un ietogramma ad intensità costante, con valore ricavato dalla curva di possibilità climatica con tempo di ritorno T;
- che la portata al colmo sia proporzionale al prodotto dell'intensità di pioggia ragguagliata ir e della superficie del bacino S, attraverso un coefficiente Cd che comprende l'effetto delle perdite.

È importante sottolineare che la formula "razionale", essendo basata sull'adozione di precipitazioni di assegnata frequenza probabile, fornisce stime associabili ad un certo tempo di ritorno. Calcolato il tempo di corrivazione come illustrato in § 3.2, calcolata l'altezza di pioggia "ragguagliata" e noto il coefficiente Cd pari al coefficiente di deflusso medio ponderale (pari a 0.4), si è potuta applicare la formula "razionale", fino a pervenire alle stime presentate nella Tabella 6.1.

6.2 Stime mediante il calcolo della convoluzione

Sono stati inoltre eseguiti i calcoli di convoluzione assumendo l'intensità di pioggia di Chicago (vedi § 4.6) per lo ietogramma di progetto, il metodo del CN-SCS (§ 5.2) per la risposta del terreno e il metodo dell'invaso (§ 5.4) come modello di risposta del bacino. Per un confronto è stato anche applicato il metodo della corrivazione basato sulla curva area-tempi con pioggia costante e metodo percentuale con coefficiente pari a 0.4. Nelle figure a seguire si riportano lo ietogramma lordo quello netto e l'idrogramma alla sezione di chiusura.

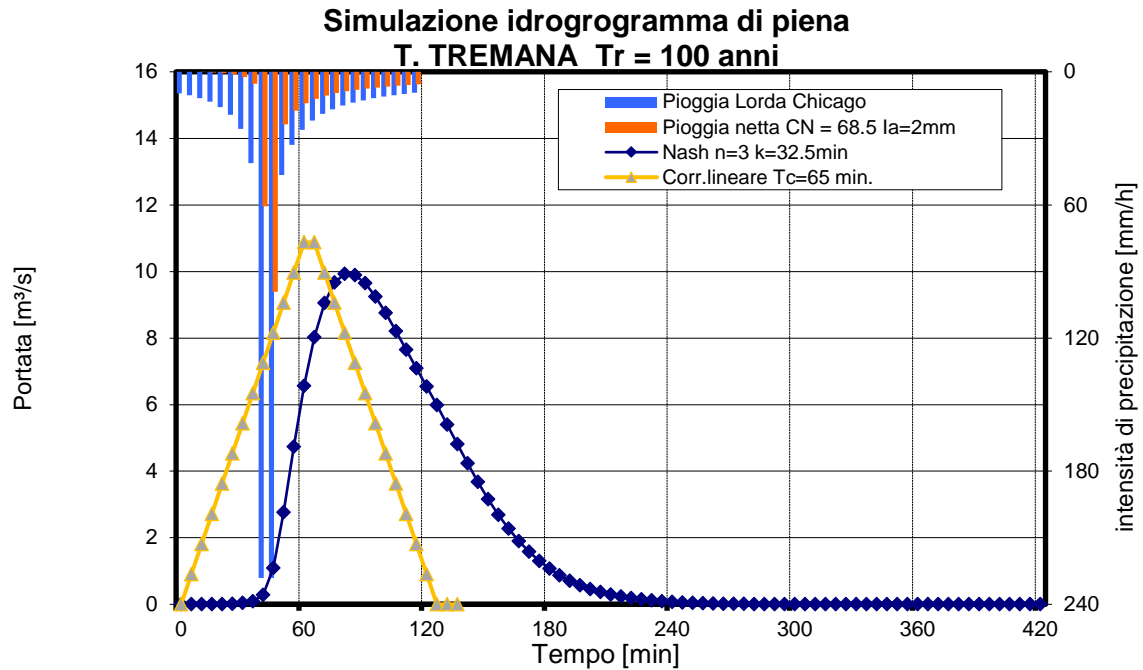


Figura 6.1: Idrogramma simulato per Tr = 100 [anni]

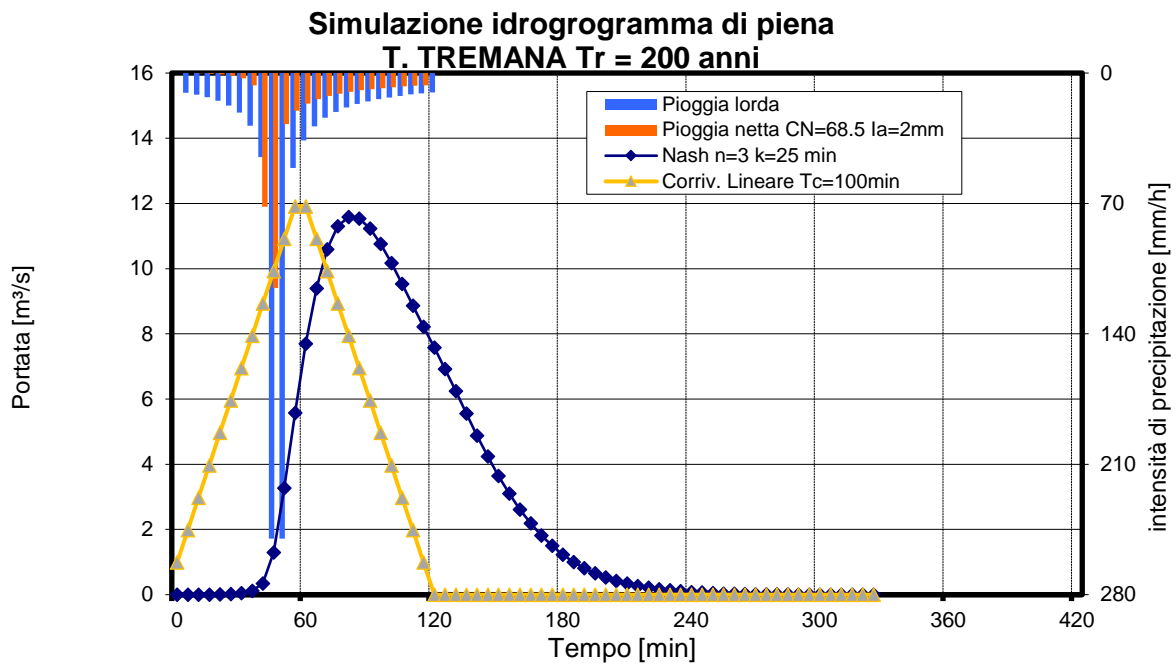


Figura 6.2: Idrogramma simulato per Tr = 200 [anni]

I risultati sono riassunti nella tabella a seguire.

CALCOLO PORTATA CRITICA:				
metodo razionale:			Tr= 100 [anni]	Tr= 200 [anni]
Formula razionale senza ragguaglio [m ³ /s]:			12.4	13.6
Formula razionale con ragguaglio ARF [m ³ /s]:			11.8	12.9
Formula razionale con ragguaglio a', n' [m ³ /s]:			11.4	12.5
Formula razionale con ragguaglio Moisello-Papiri			10.1	11.1
convoluzione ietogramma:			Tr= 100 [anni]	Tr= 200 [anni]
ietogramma di progetto	Chicago[<i>min</i>]	(120,0375)	Qc. [m ³ /s]	Qc. [m ³ /s]
Modello di risposta del Bacino	CN-SCS (la; CN)	3.0 - 68.5		
Modelli di risposta del terreno	Nash (n, k)	3 - 16.25	10.0	11.6
Modello di risposta del Bacino	pioggia cost.	Tp=60	Tr= 100 [anni]	Tr= 200 [anni]
Modelli di risposta del terreno	Corr. Area/tempi	Tc=65	10.9	11.9
formule di regionalizzazione			Tr= 100 [anni]	Tr= 200 [anni]
Stima con il metodo index-flood			13.9	15.7

Tabella 6.1: Risultati riassuntivi del calcolo della portata di progetto

6.3 **Confronto e scelta delle portate critiche del T. Tremana**

In conclusione, in base ai diversi metodi esposti, si ritiene opportuno adottare un valore della portata centennale pari a **10 [m³/s]** e per eventi con tempo di ritorno di 200 anni adottare un valore di **11.6 [m³/s]**. In conclusione il contributo specifico CENTENARIO risulta essere pari a 5.4 [m³/s·km²].

Tali valori sono pienamente in linea con le stime dello Studio Idraulico e idrologico redatto da Telò e Murachelli.

Nel grafico mostrano nella pagine a seguire si indica l'idrogramma di piena ottenuto all'evento di pioggia reale registrato in data 26.06.2016 e ben noto per la Città di Bergamo per i problemi generati nella zona di Longuelo (circa 3 km più ad ovest dell'area in esame). Dall'analisi statistica delle piogge di quell'evento, come mostrato nel Paragrafo 4.3, il tempo di ritorno della pioggia è stimabile in 100 anni. Applicando i medesimi modelli di risposta del bacino e del terreno con quella pioggia si giunge ad una portata al colmo di poco superiore a quella centenaria. **Si segnala come agli atti del Comune di Bergamo non sono stati segnalati allagamenti per quell'evento dell'estate 2016 nella zona lungo l'asta del Tremana e tantomeno nella zona dell'ansa del T. Morla in fregio a Viale Giulio Cesare.**

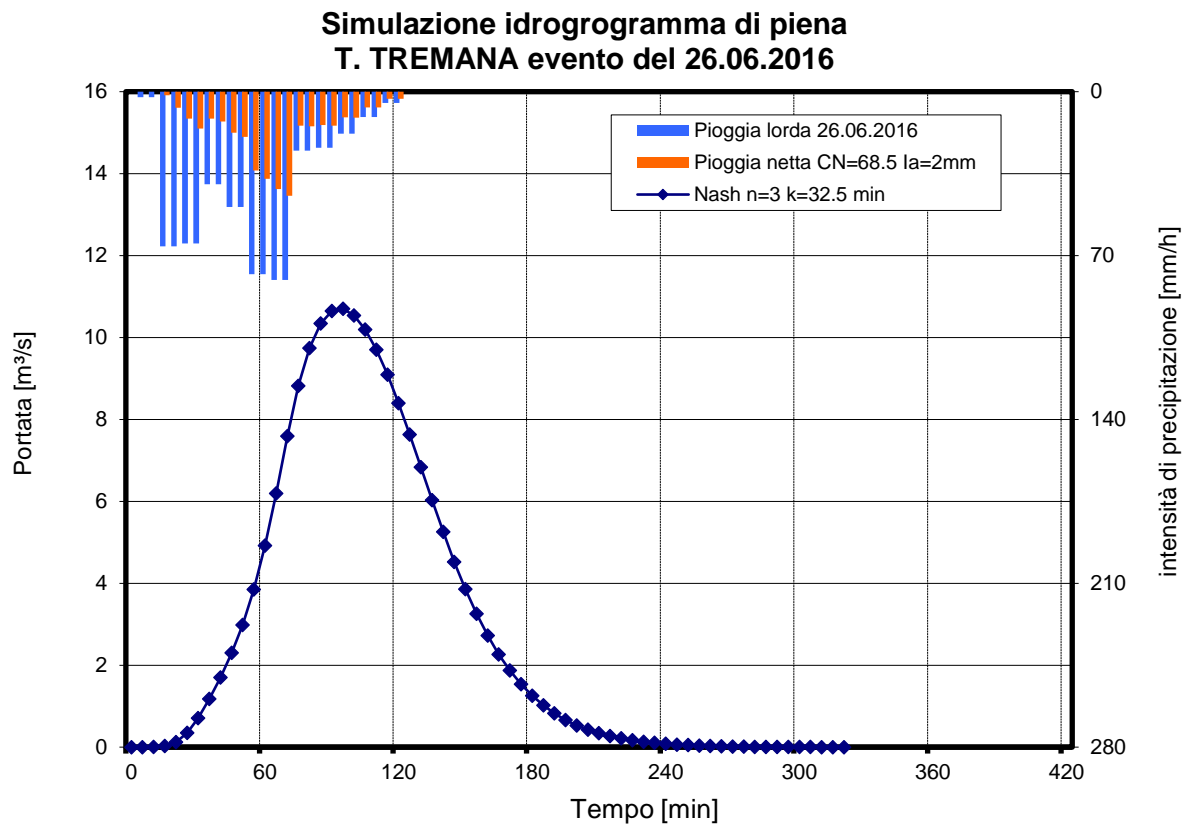


Figura 6.3: Idrogramma T. Tremana per l'evento del 26/06/2016.

6.4 Portate critiche T. Morla

Per quanto riguarda le portate del T. Morla sono state assunte quelle stimate dallo studio idraulico redatto da Telò e Murachelli e pari, nella sezione di chiusura immediatamente a monte della confluenza con il T. Tremana, a :

$$Q_{\text{MORLA } T_r 200} = 71 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

$$Q_{\text{MORLA } T_r 100} = 63 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

7 VERIFICHE IDRAULICHE E STIMA DEI LIVELLI DI PIENA

Per quanto concerne la verifica dei livelli di piena per la disamina delle condizioni idrauliche si è proceduto mediante l'implementazione di un modello in moto permanente per quanto riguarda il T. Morla e un modello idrodinamico a moto vario (dynamic wave) per quanto concerne la verifica della tombinatura del T. Tremana effettuata con il codice EPA SWMM versione 5.1.

7.1 Ricostruzione dei profili di moto permanente

Per la ricostruzione del profilo di moto permanente sul T. Morla è stato utilizzato il programma di calcolo *HecRAS 5.0.3*¹. Imponendo la condizione di moto uniforme nella sezione più a valle, si sono calcolati i profili di moto permanente per correnti lente. Il battente idrico rimane, infatti, sempre al di sopra dell'altezza critica per l'intero tratto d'alveo che è totalmente a debole pendenza ($i_r < i_{crit}$).

Il codice calcola i profili da una sezione alla successiva mediante risoluzione dell'equazione dell'energia per correnti monodimensionali gradualmente variate:

$$Y_2 + z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + \Delta H \quad \text{Eq. 7.1}$$

ove la sezione 2 è la sezione a monte, Y [m] è il battente misurato dal punto più depresso della sezione, z [m] è la quota di tale punto di fondo alveo rispetto ad un piano orizzontale di riferimento, α [-] è il coefficiente di ragguglio della potenza cinetica, V [m/s] rappresenta la velocità media nella sezione in corrispondenza della portata Q [m³/s], g [m/s²] è la accelerazione di gravità e ΔH [m] rappresenta le perdite energetiche connesse al passaggio della corrente dalla sezione 2 alla sezione 1. La localizzazione delle transizioni non gradualmente variate tra corrente supercritica e corrente subcritica viene effettuata, come solito, mediante applicazione della equazione di bilancio della spinta tra sezioni successive:

$$M_1 + \Pi_1 + W \sin \theta = \tau_o PL + M_2 + \Pi_2 \quad \text{Eq. 7.2}$$

ove $W \sin \theta$ rappresenta la proiezione del peso del volume di liquido all'interno del volume di controllo nel verso del moto e $\tau_o PL$ è la risultante nel verso del moto della azione trattiva esercitata dal contorno solido. Il termine di perdita energetica della Eq. 7.1 può vedersi quale somma delle dissipazioni distribuite, proporzionali alla lunghezza del tratto d'alveo tra le due sezioni, e delle perdite concentrate, connesse alla non cilindricità dell'alveo, e, quindi, alla presenza di singolarità, allargamenti o restringimenti

$$\Delta H = LJ + \sum c_i |V_2^2 - V_1^2| \quad \text{Eq. 7.3}$$

1 HEC-RAS, Haestad Methods Inc. - Waterbury USA.

dove i coefficienti c_i sono specifici al tipo di singolarità interposta tra le due sezioni d'alveo. In particolare il termine cinetico tra le sezioni 1 e 2, dovuto al cambio di geometria delle sezioni stesse, è a sua volta esprimibile come:

$$\sum c_i |V_2^2 - V_1^2| = \beta \left(\alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} - \alpha_2 \cdot \frac{V_2^2}{2g} \right) \quad \text{Eq. 7.4}$$

dove β è un coefficiente di contrazione o espansione dipendente dalle condizioni geometriche del tratto considerato, V_1 e V_2 [m/s] sono i valori delle velocità medie agli estremi del tronco e α_1 e α_2 sono i coefficienti correttivi dell'energia cinetica.

Il termine J viene usualmente rappresentato, in ipotesi di moto assolutamente turbolento, in funzione del parametro n di scabrezza di Manning:

$$J = \left(\frac{Qn}{AR^{2/3}} \right)^2 = \left(\frac{Q}{K} \right)^2 \quad \text{Eq. 7.5}$$

dove R[m] rappresenta il raggio idraulico della sezione e la quantità K viene tipicamente indicata in letteratura con il nome di *conveyance* e risulta:

$$K = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}} \quad \text{Eq. 7.6}$$

dove A[m²] l'area della sezione liquida, R[m] il raggio idraulico e $n[m^{-1/3} s]$ è il parametro rappresentativo della scabrezza del fondo e delle sponde secondo la formulazione di Manning. I valori tipici sono i seguenti rimandando alla pagina seguente per una più vasta disamina:

k = 33 (fondo alveo naturale con sponde non rivestite) $n = 0.030$

k = 45 (rivestimento spondale in massi stilato con terreno naturale) $n = 0.0222$

k = 60 (rivestimento di muri in massi stilati a vista) $n = 0.0166$

k = 75 (intonaco di cemento) $n = 0.0133$.

Nel tratto in esame, in funzione delle condizioni dell'alveo rinvenute nei sopralluoghi effettuati è stato assunto il valore di **35 [m^{1/3} s⁻¹]** per tutta la tratta in disamina.

Tale valore è certamente cautelativo se si considerano le singole sezioni caratterizzate dalla presenza di murature di sponda regolari per il tratto parallelo a Viale Giulio Cesare. La scelta deriva comunque dal fatto di considerare la presenza del meandro in destra e del passaggio da una sezione non regolarizzata ad una artificiale.

Per quanto concerne la confluenza con il T. Tremana, è stata adottata come metodologia di calcolo quella derivante dall'equilibrio dei momenti che meglio interpreta le confluenze con angoli di immissione importanti come quello qui in esame (pari ad un angolo retto). Come si potrà desumere dai profili di piena tale confluenza ad angolo retto comporta una perdita di carico dell'ordine di 0.5-1 altezza cinetica.

Tipologia del corso d'acqua	Strickler $K_s = 1/n \text{ (m}^{1/3} \text{ s}^{-1}\text{)}$
CORSI D'ACQUA MINORI (Raggio idraulico ≥ 2 m; larghezza in piena < 30 m)	
Corsi d'acqua di pianura	
- alvei con fondo compatto, senza irregolarità	45-40
- alvei regolari con vegetazione erbacea	30-35
- alvei con ciottoli e irregolarità modeste	25-30
- alvei fortemente irregolari	25-15
Torrenti montani	
- fondo alveo con prevalenza di ghiaia e ciottoli, pochi grossi massi	30-25
- alveo in roccia regolare	30-25
- fondo alveo con ciottoli e molti grossi massi	20-15
- alveo in roccia irregolare	20-15
CORSI D'ACQUA MAGGIORI (Raggio idraulico ≥ 4 m; larghezza in piena > 30 m)	
- sezioni con fondo limoso, scarpate regolari a debole copertura erbosa	45-40
- sezioni in depositi alluvionali, fondo sabbioso, scarpate regolari a copertura erbosa	35
- sezioni in depositi alluvionali, fondo regolare, scarpate irregolari con vegetazione arbustiva e arborea	25-30
- in depositi alluvionali, fondo irregolare, scarpate irregolari con forte presenza di vegetazione arbustiva e arborea	20-25
AREE GOLENALI (Raggio idraulico ≥ 1 m)	
- a pascolo, senza vegetazione arbustiva	40-20
- coltivate	50-20
- con vegetazione arbustiva spontanea	25-10
- con vegetazione arborea coltivata	30-20
Alveo artificiale in terra	
- materiale compatto, liscio	60
- sabbia compatta, con argilla o pietrisco	50
- sabbia e ghiaia, scarpata lastricata	50-45
- ghiaietto 10-30 mm	45
- ghiaia media 20-60 mm	40
- ghiaia grossa 50-150 mm	35
- limo in zolle	30
- grosse pietre	30-25
- sabbia, limo o ghiaia, con forte rivestimento vegetale	25-20
Alveo artificiale in roccia	
- con lavorazione accurata	30-25
- con lavorazione media	25-20
- con lavorazione grossolana	20-15
Alveo artificiale in muratura	
- muratura in pietra da taglio	80-70
- muratura accurata in pietra da cava	70
- muratura normale in pietra da cava	60
- pietre grossolanamente squadrate	50
- scarpate lastricate, fondo in sabbia e ghiaia	50-45
Alveo artificiale in calcestruzzo	
- pavimentazione in cemento	100
- calcestruzzo con casseforme metalliche	100-90
- calcestruzzo con intonaco	95-90
- calcestruzzo lisciato	90
- intonaco di cemento intatto	90-80
- calcestruzzo con casseforme in legno, senza intonaco	70-65
- calcestruzzo costipato, superficie liscia	65-60
- calcestruzzo vecchio, superficie pulita	60
- rivestimento in calcestruzzo ruvido	55
- superfici irregolari in calcestruzzo	50

Tabella 7.1: Tabella coefficienti di scabrezza (PAI – Norme di attuazione – Direttiva 4)

7.2 Le condizioni al contorno

Per le condizioni al contorno relative alla modellazione del T. Morla sono state considerate sia le condizioni critiche nella sezione di valle, cioè all'ingresso della tombinatura, sia le condizioni di moto uniforme imponendo una pendenza del fondo alveo del 0.3%. Questo valore di pendenza è sicuramente in fattore di sicurezza in quanto la pendenza del primo tratto della tombinatura del T. Morla è dell'ordine dello 0.6-0.7%. Come verrà mostrato a seguire le condizioni ipotizzate a valle del

salto di fondo posto alla sezione 05.B-M sul T.Morla non influenzano i livelli di piena nel tratto di monte. Per quanto riguarda le verifiche effettuate sul T. Tremana sono state condotte ipotizzando i corrispondenti livelli di piena per pari tempo di ritorno sul T. Morla desunti dal modello di moto permanente. Per verificare il rigurgito del T. Morla sono stati imposte ulteriori condizioni alla confluenza quali lo sbocco libero (per accertare se le insufficienze del Tremana derivano dal rigurgito di valle) e la condizione limite per la quale il livello idrico nel T. Morla non determina rigurgiti nel T. Tremana.

7.3 I risultati ottenuti per il T. Tremana TR100 anni

Per quanto riguarda la verifica idraulica della tombinatura esistente del T. Tremana si è implementato un modello idrodinamico utilizzando le risultanze di un apposito rilievo topografico di dettaglio effettuato rilevando ben 41 sezioni trasversali. Le condizioni allo scarico nel T. Morla sono state imposte come rigurgitate con livello desunto dalle calcolazioni relative al Morla stesso e quindi:

$$H_{TR100 CONFLUENZA} = 261.23 \text{ [m s.l.m.]}$$

Nella figura a seguire si mostra come per eventi con Tr 100 anni la portata che può essere scaricata nel T. Morla è limitata a circa 7 [m³/s] per via dei livelli di piena del T. Morla. L'eccedenza fuoriesce dalle numerose ispezioni sul tombotto del Tremana poste nella parte più depressa topograficamente del piano campagna (pozzetto 28 -29). Nella pagina successiva si riporta invece in grado di riempimento della tombinatura ove si evidenzia in rosso la tratta con funzionamento in pressione. Per visionare invece l'eventuale carico superiore al piano campagna si rimanda alla figura che riporta il profilo idraulico dalla quale si evince che eventuali fuoriuscite sono localizzabili solo nella parte bassa di Via Celestini nella tratta dal pozzetto 27 al 33. Nella parte a monte il funzionamento è in pressione ma con livelli contenuti al di sotto del piano campagna; comunque idraulicamente tali condizioni sono da ritenere al limite.

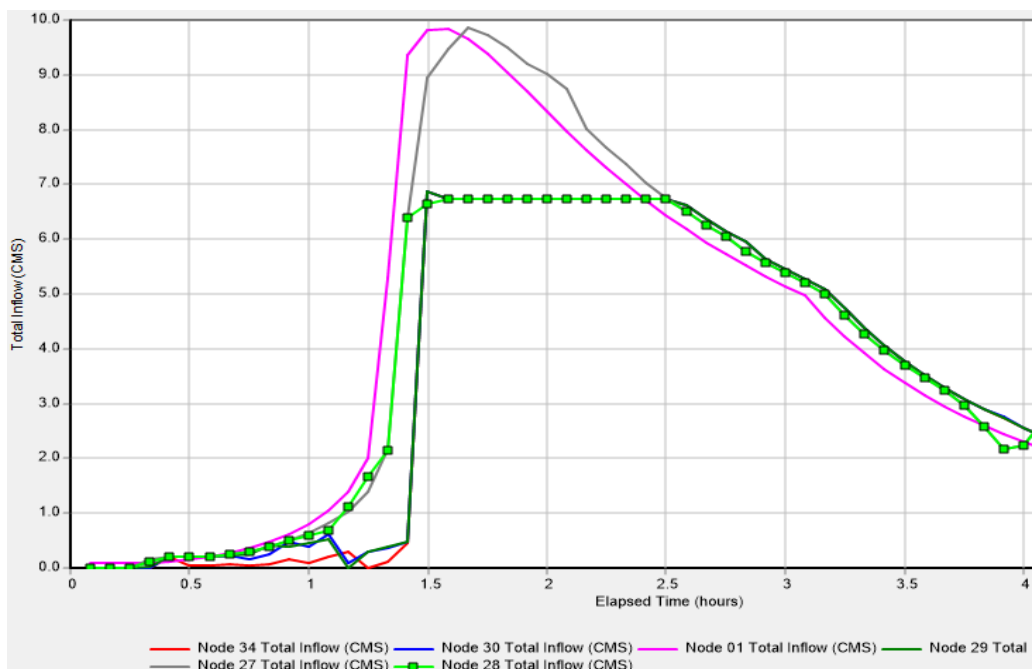


Figura 7.1: Idrogramma nei nodi finali del T. Tremana con livello Htr100 nel T. Morla.



Figura 7.2: Grado di riempimento tombinatura T. Tremana con scarico nel T. Morla con Htr100.

Nell'ipotesi di sbocco libero alla confluenza con il T. Morla, le insufficienze della parte bassa sono risolte. D'altro canto ciò lo si desume dalle ampie sezioni del Tremana alla confluenza e dal semplice fatto che la quota del piano campagna al pozzetto 27 è circa 260.60 [m s.l.m.] mentre il livello Htr100 del Morla è di 261.23 [m s.l.m.].

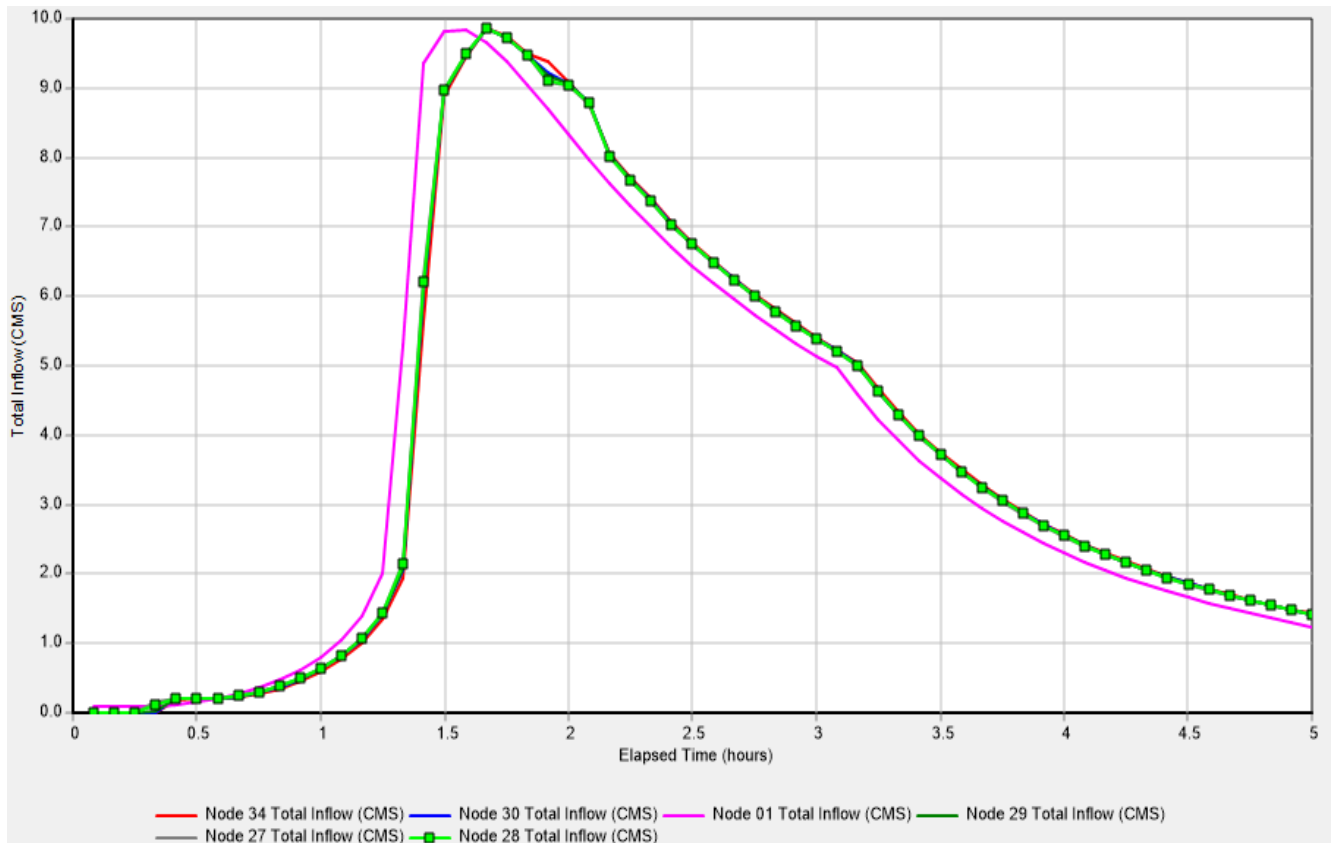


Figura 7.3: Idrogramma nei nodi finali del T. Tremana con sbocco libero nel T. Morla.

Si è quindi proceduto ricercando il valore di portata che determinerebbe un livello idrico nel T. Morla alla confluenza con il T. Tremana tale da garantire lo scarico senza fuoriuscite.

La condizione limite di incipiente esondazione la si ottiene con livello idrico nel T. Morla pari a **260.30** [m s.l.m.] corrispondenti ad una portata massima a monte della confluenza di 40 [m³/s] (**cioè un evento indicativamente compreso tra Tr 20anni e Tr 50anni**). Nella figura a seguire si riporta lo stralcio del profilo di moto permanente del T. Morla per tale valore di portata.

Nelle pagine successive invece si riporta il profilo idraulico del T. Tremana per:

- Htr100 nel T. Morla;
- sbocco linero del T. Morla;
- sbocco parzialmente rigurgitato (Hmorla=260.30 [m s.l.m.]).

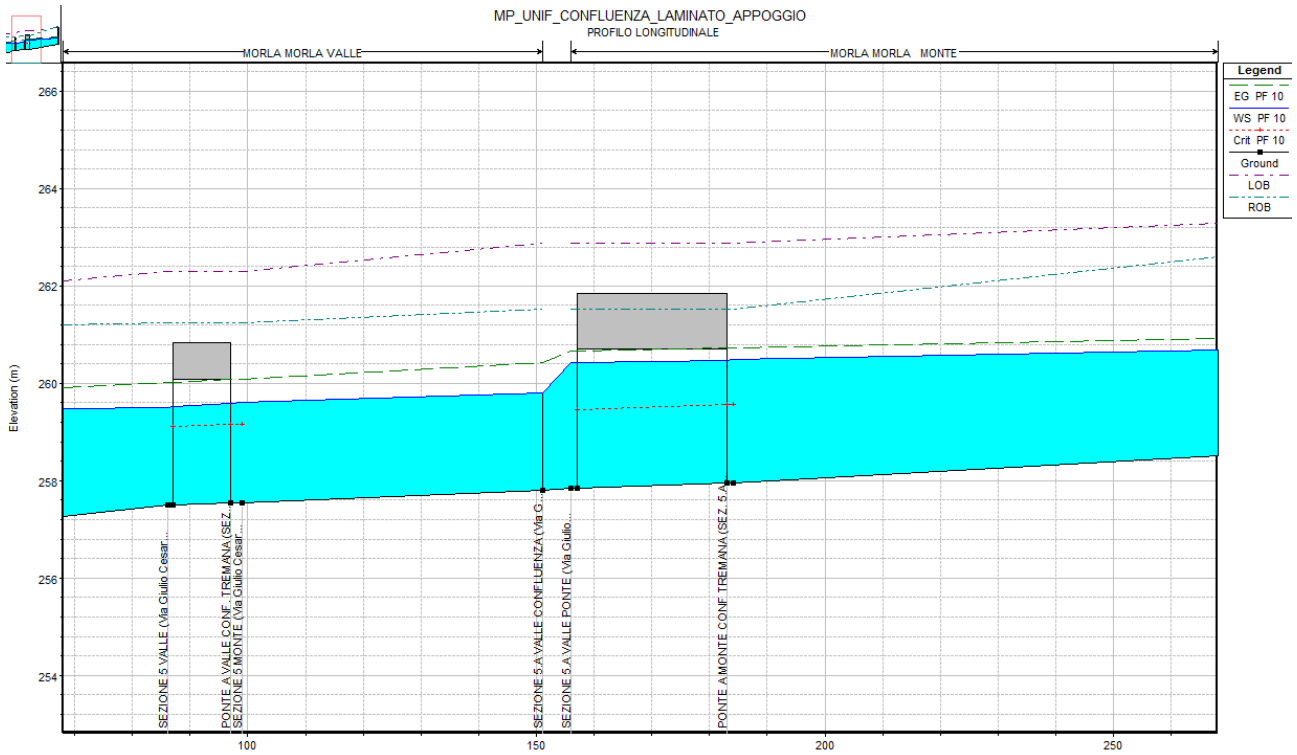


Figura 7.4: Stralcio profilo idraulico T. Morla alla confluenza con T. Tremana per condizione limite.

PROFILO T. TREMANA TR100 - SDF

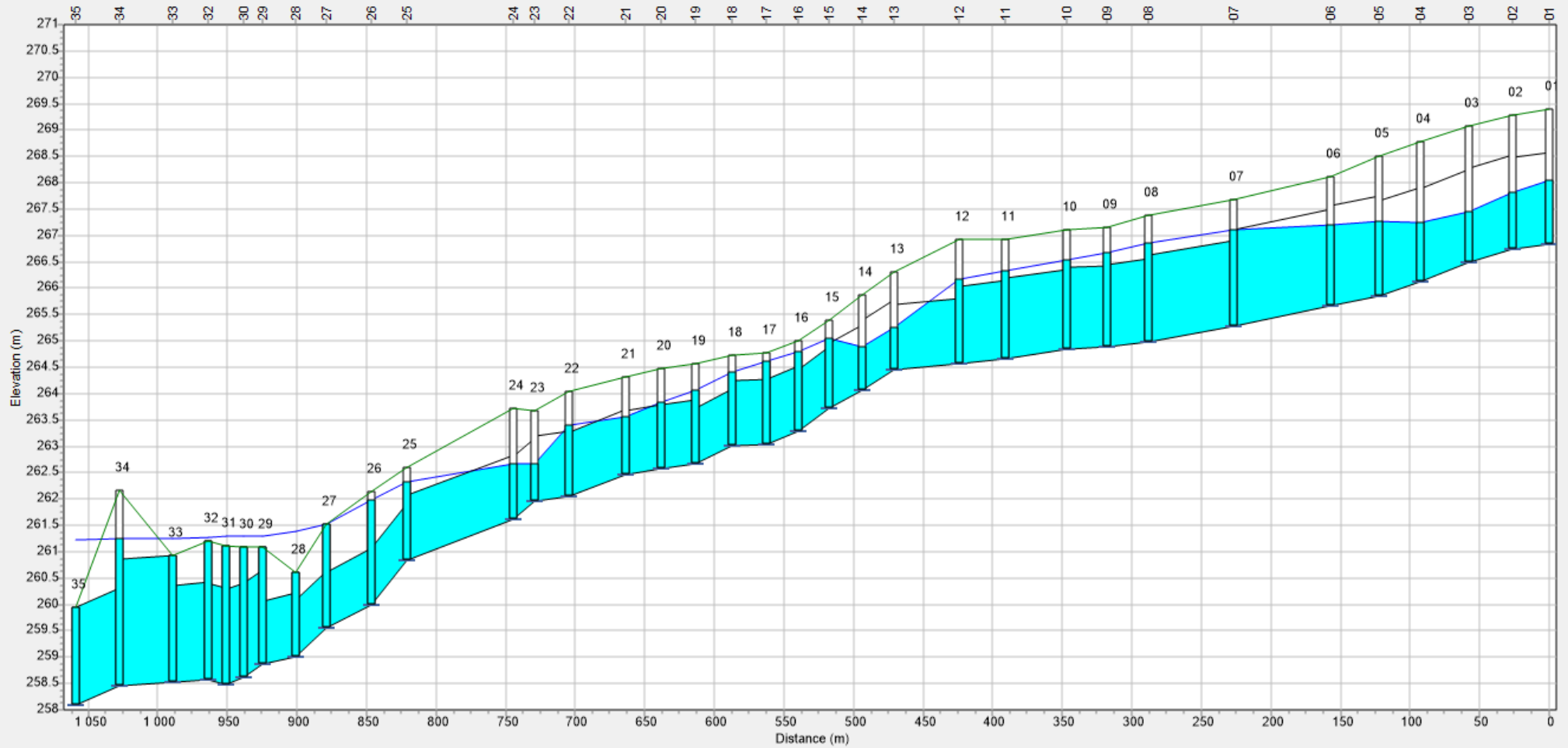


Figura 7.5: Profilo idraulico T. Tremana per l'evento TR 100 anni con livello Htr100 nel T. Morla.

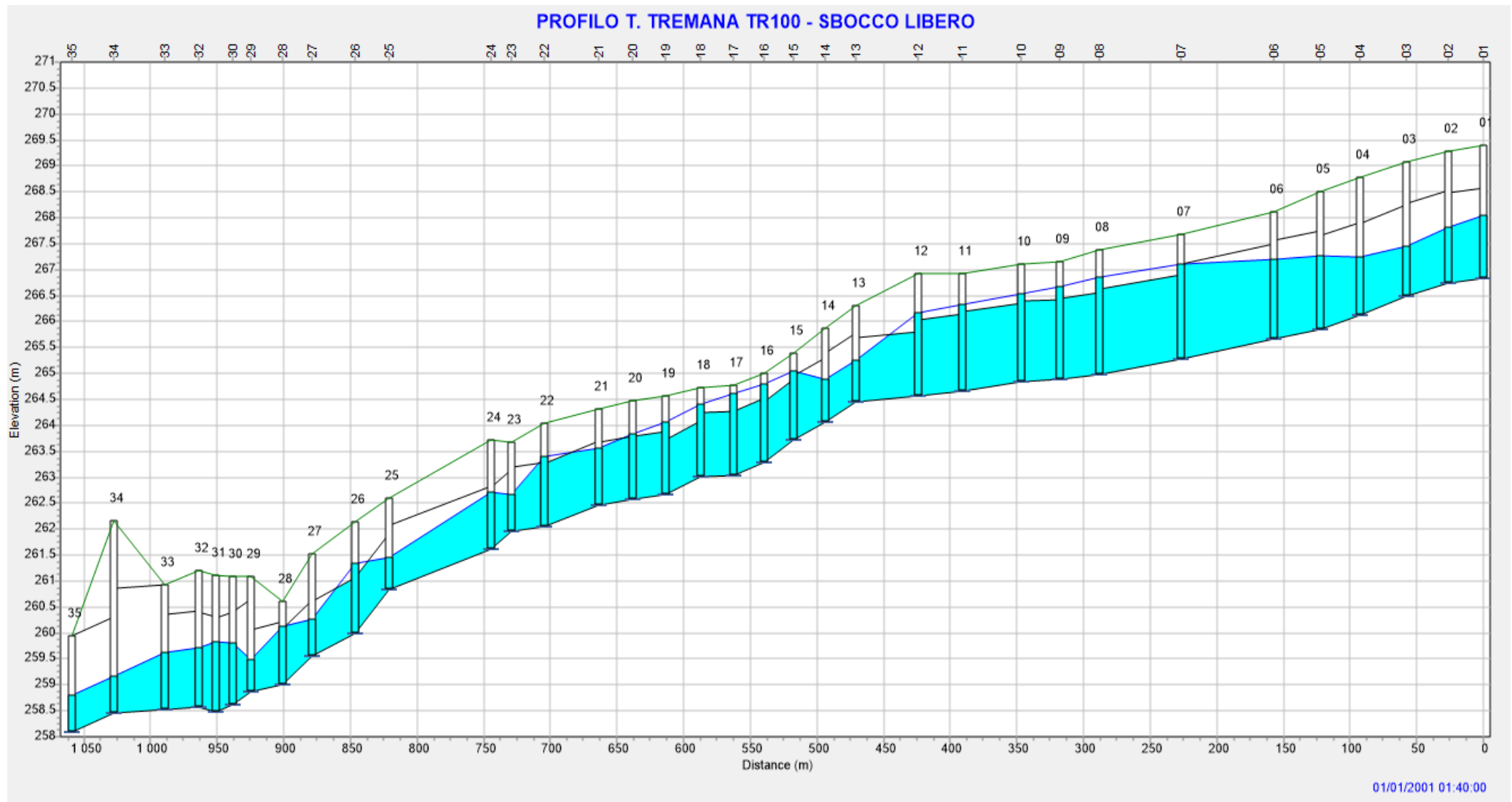


Figura 7.6: Profilo idraulico T. Tremana per l'evento TR 100 anni con sbocco libero nel T. Morla.

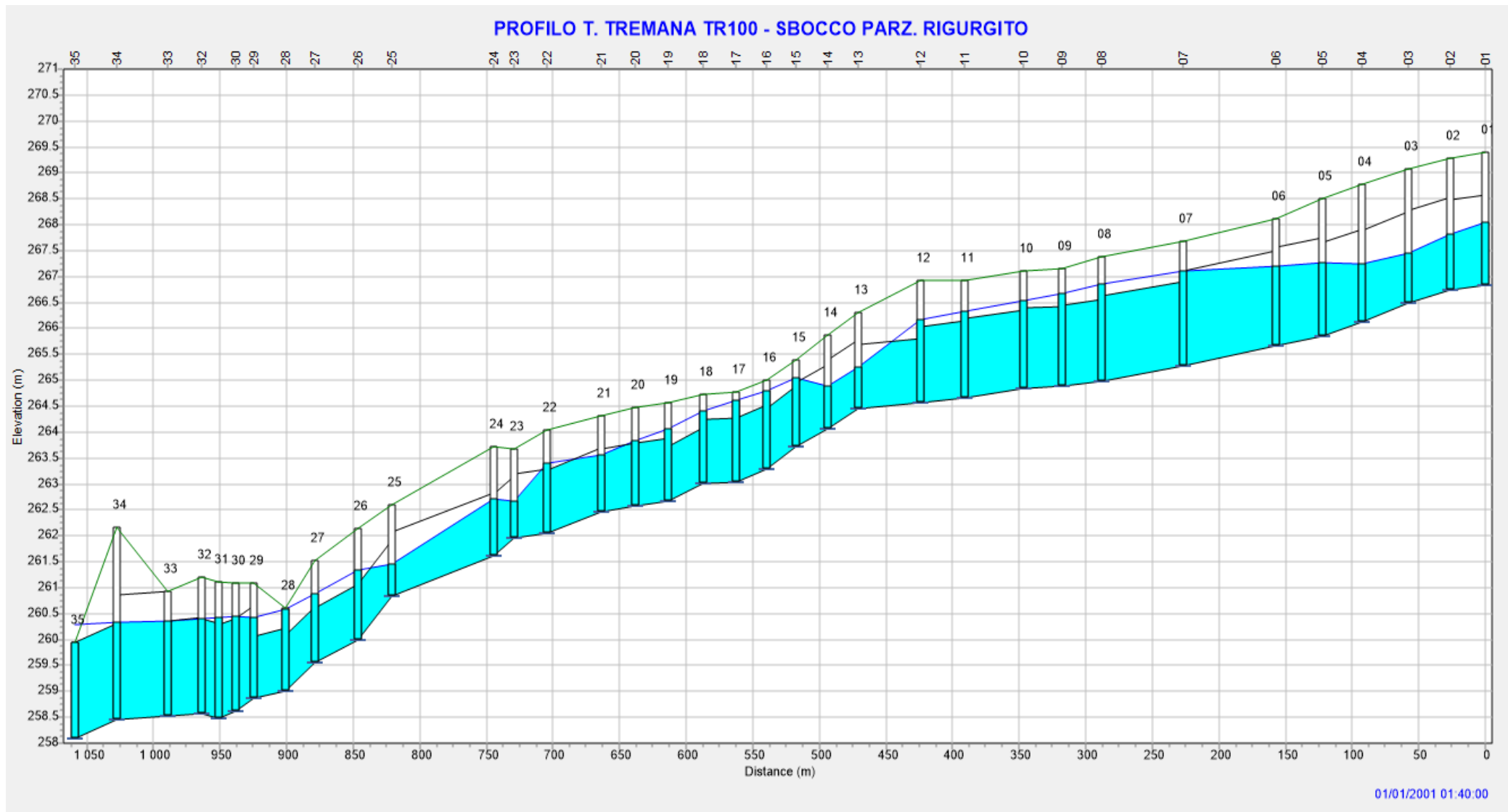


Figura 7.7: Profilo idraulico T. Tremana per l'evento TR 100 anni con battente a 260.30 [m s.l.m.] nel T. Morla.

7.4 I risultati ottenuti per il T. Tremana TR 200 anni

Per quanto riguarda i risultati ottenuti per le condizioni con Tr200 anni, sono state ipotizzate anche in questo caso le tre differenti modalità di confluenza del T. Morla.

Considerando il livello di piena Htr 200 anni nel T. Morla, come si desume dalla figura a seguire la tombinatura risulta completamente in pressione per l'intera tratta. Oltre alle insufficienze già riscontrate nella parte bassa di Via Celestini (zona oratorio Borgo Santa Caterina) si verificano insufficienze con fuoriuscite al piano stradale all'altezza della tratta 06-07-08 e tra i picchetti 15-16-17-18. In considerazione della pendenza della Via Tremana e della Via Celestini l'esondazione proseguirebbe verso valle scorrendo in superficie lungo la sede stradale seguendo il massimo gradiente topografico. I battenti di tale esondazione sarebbero limitati a 30-40 cm in quanto con questi sovralti il carico sulla sezione della tombinatura garantirebbe lo smaltimento della portata di piena bicentenaria. Evidentemente si considera l'intera sezione del Tremana senza considerare eventuali ostruzioni da corpi trasportati da monte che cambierebbero completamente la dinamica di deflusso.

Per quanto riguarda il raffronto con lo studio pregresso di Telò e Murachelli si evidenzia una sostanziale univocità delle risultanze. Nelle pagine successive si riporta il profilo di calcolo per eventi con Tr 200 analizzato in questo studio (tratta del Tremana indagata di circa 1.1 km) e il profilo dell'intero tratto del Tremana studiato nell'ambito dello studio idraulico a scala di sottobacino. Vi sono alcune differenze nella parte terminale in prossimità proprio della curva a 90° che compie il Tremana abbandonando la Via Celestini ma circoscrivibili ad un maggior dettaglio di rilievo effettuato in questa sede che ha potuto mettere alla luce la topografia del piano campagna per ogni pozzetto ritrovato.

Come già evidenziato per gli eventi centenari, applicando differenti condizioni allo sbocco nel T. Morla, si evince come l'insufficienza del Tremana nella parte di Via Tremana e parte centrale di Via Celestini sia dovuta proprio alla limitata sezione della tombinatura ed indipendente dalle condizioni allo scarico.

In ragione delle risultanze ottenute per la parte centrale della tombinatura appare evidente la condizione di rischio per la funzionalità del parcheggio interrato. Come verrà mostrato a seguire la realizzazione dello scolmatore sul Tremana prospettato nello Studio di Telò e Murachelli risolve tale insufficienza. In considerazione dello sfasamento dei tempi realizzativi occorre però sin d'ora porre in sicurezza il parcheggio interrato prevedendo un franco dai livelli di possibile esondazione (stimabili in 30 cm) del Tremana di almeno 50 cm. **Di conseguenza l'ingresso del parcheggio dovrà essere posizionato ad una quota di $0.50+0.30=0.80$ m dal piano stradale esistente di Via Celestini in corrispondenza dell'imbocco della rampa di accesso in progetto.**

Per quanto riguarda invece le insufficienze nella parte bassa (zona cameretta 28-29 etc..) queste sono ancora una volta connesse al rigurgito del livello di piena del T. Morla. Un riscontro lo si ottiene esaminando dettagliatamente i profili riportati nelle pagine a seguire.

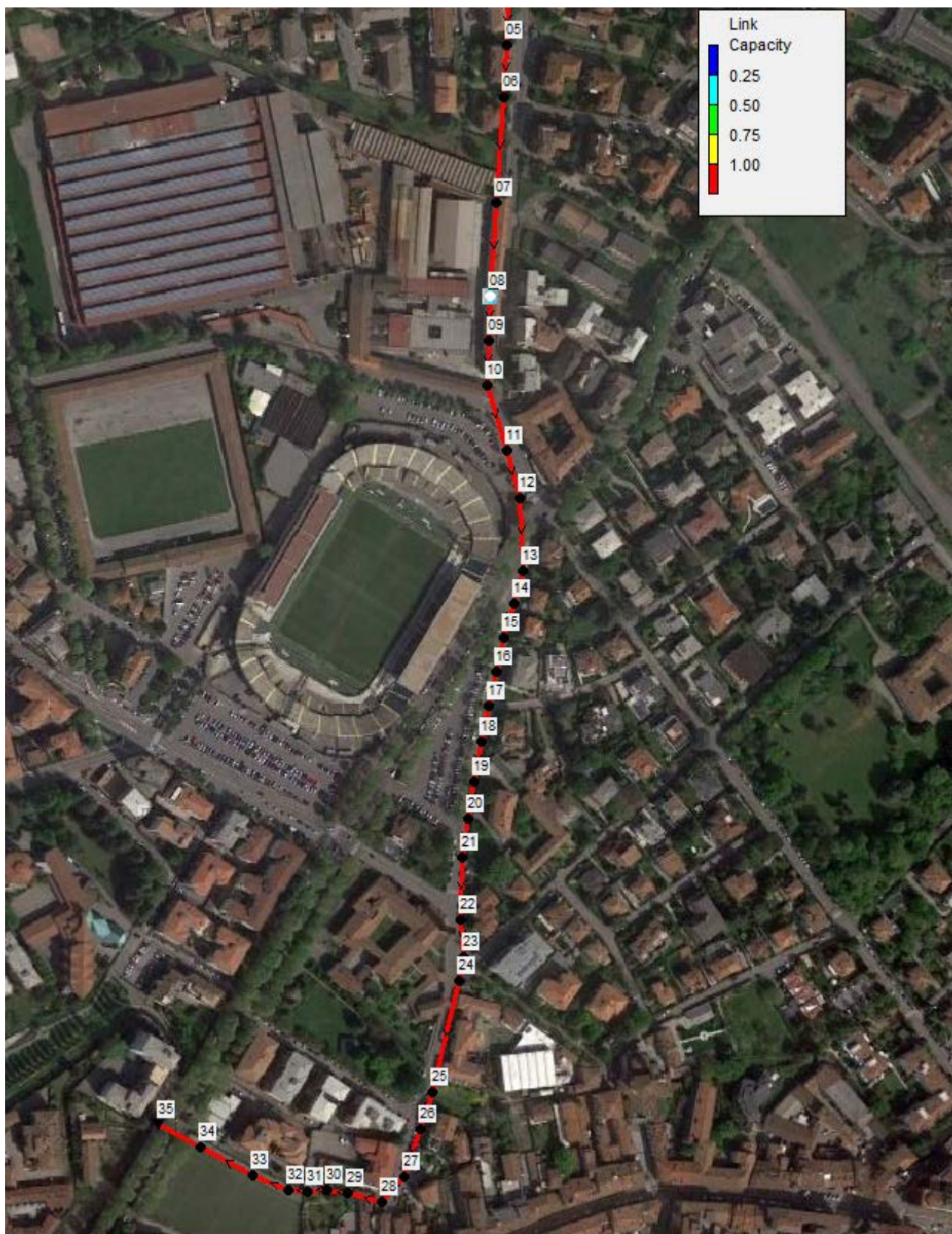


Figura 7.8: Grado di riempimento tombinatura T. Tremana con scarico nel T. Morla con Htr200.

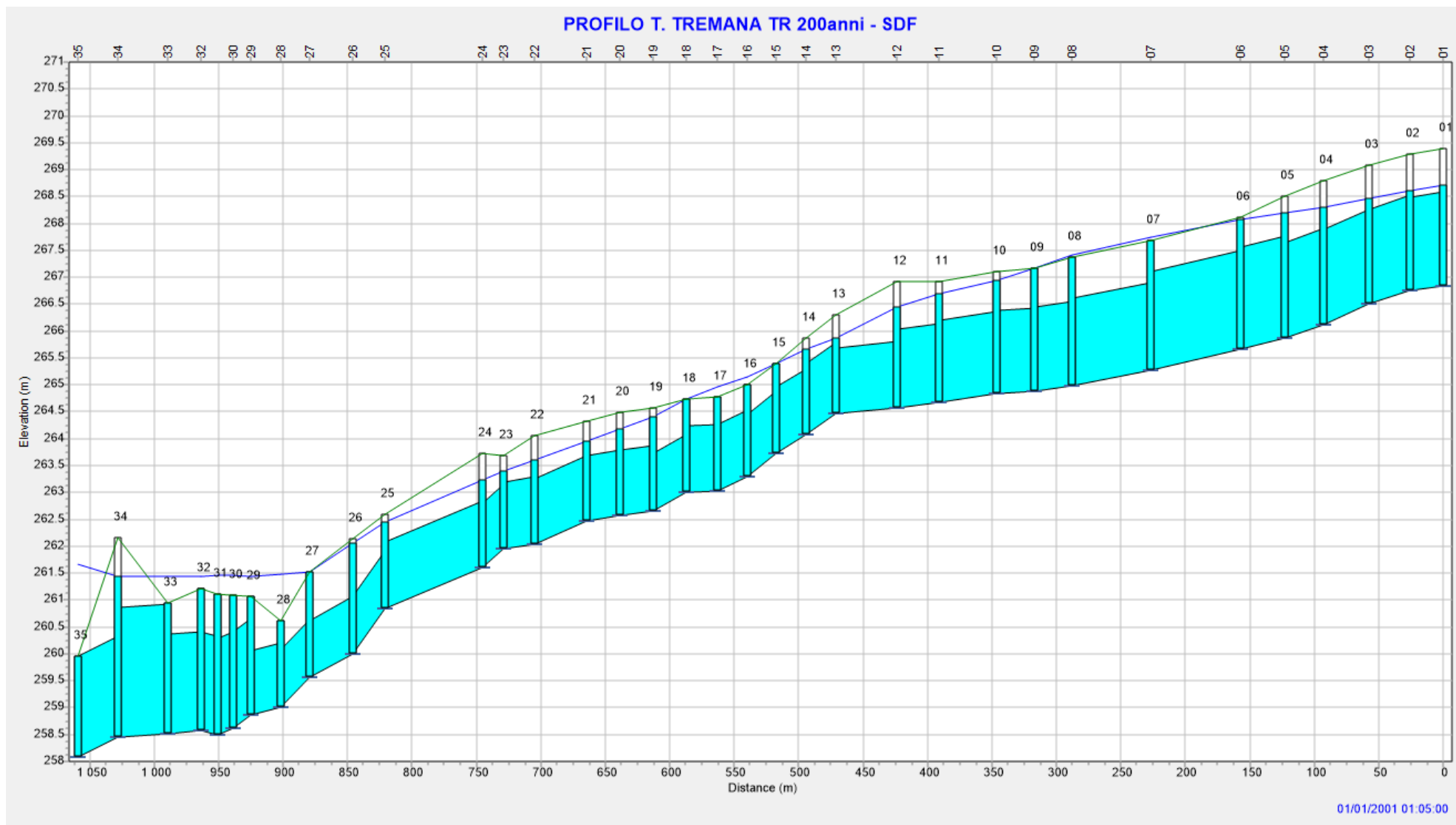


Figura 7.9: Profilo idraulico T.Tremana per l'evento TR 200 anni con livello Htr200 nel T. Morla.

Profile Plot

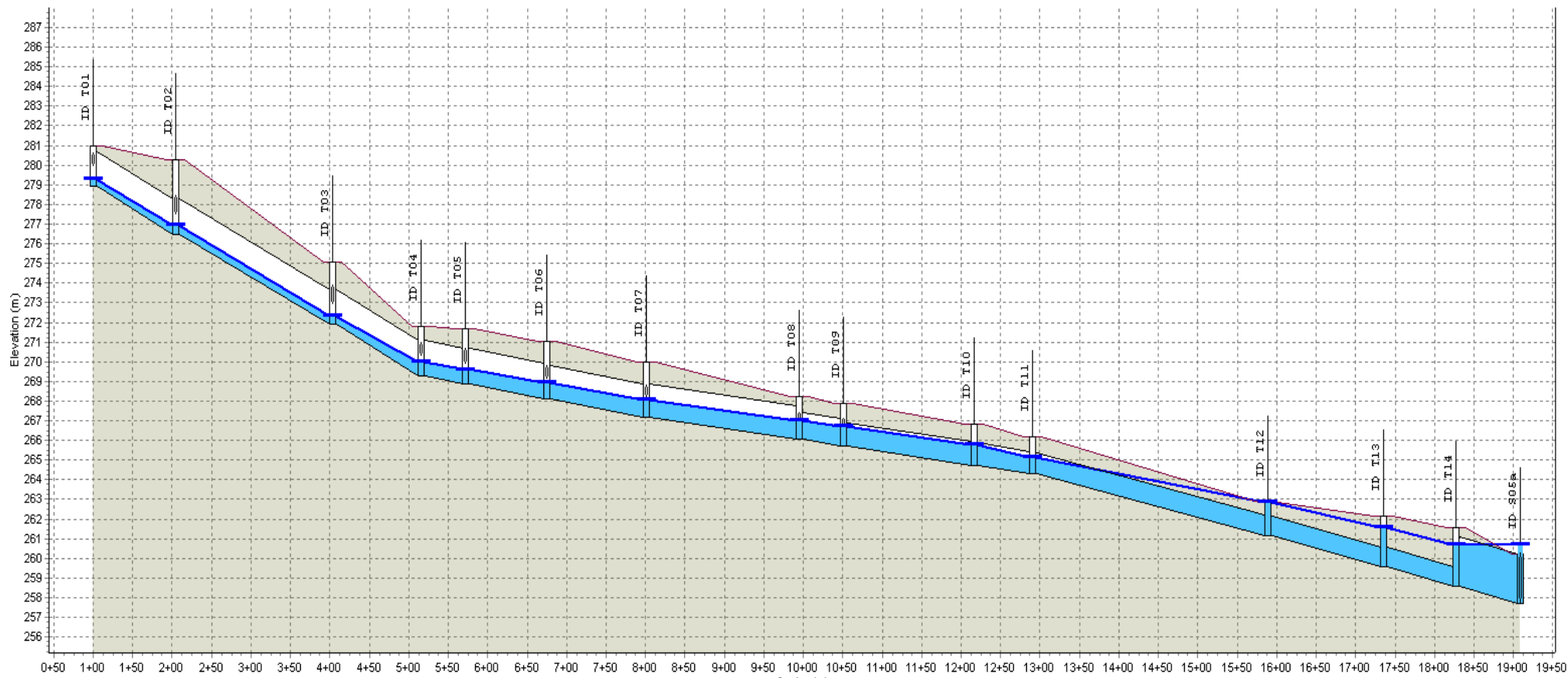


Figura 7.10: Profilo idraulico T.Tremana desunto dallo studio idrogeologico redatto dallo Studio Telò.

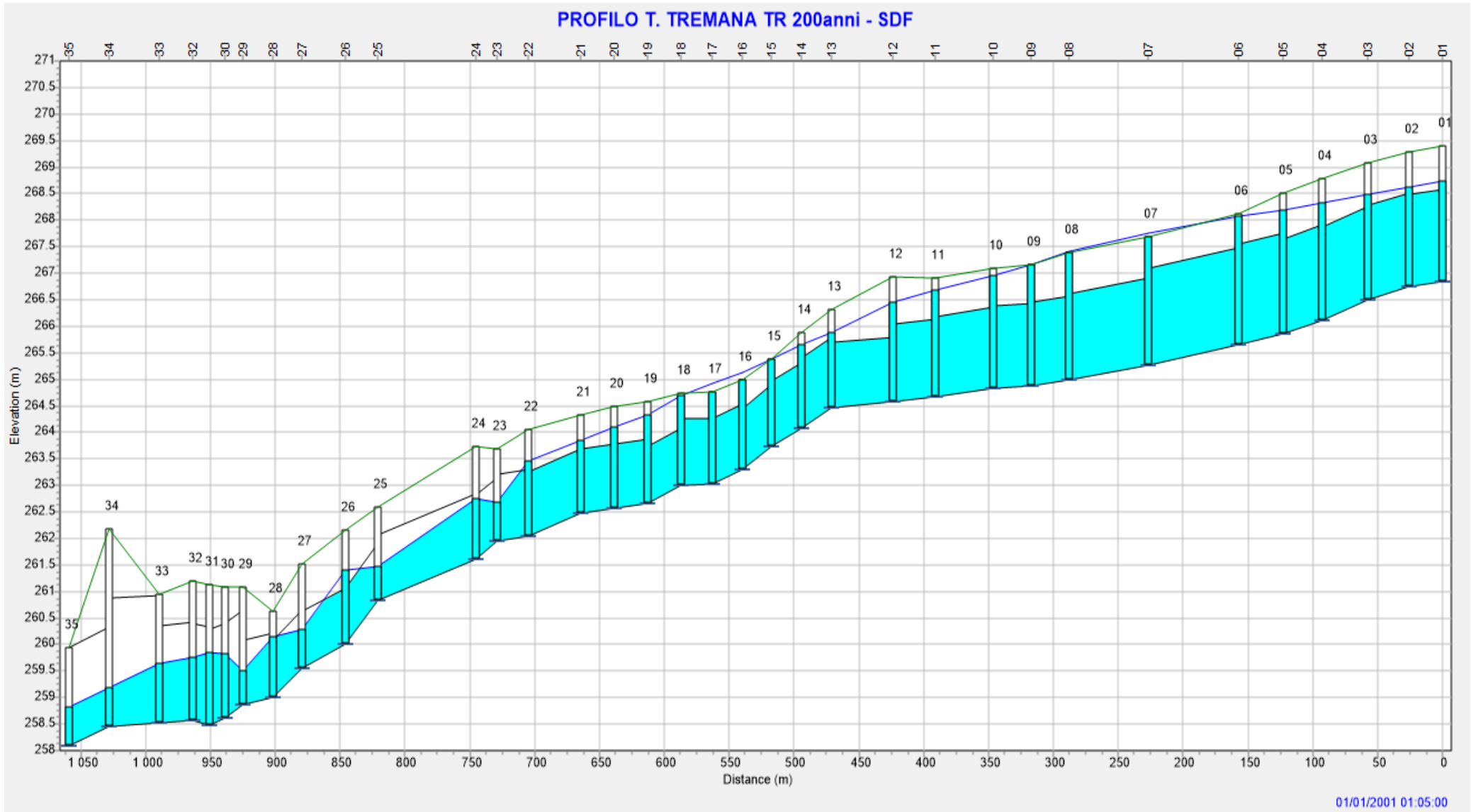


Figura 7.11: Profilo idraulico T. Tremana per l'evento TR 200 anni con sbocco libero nel T. Morla.

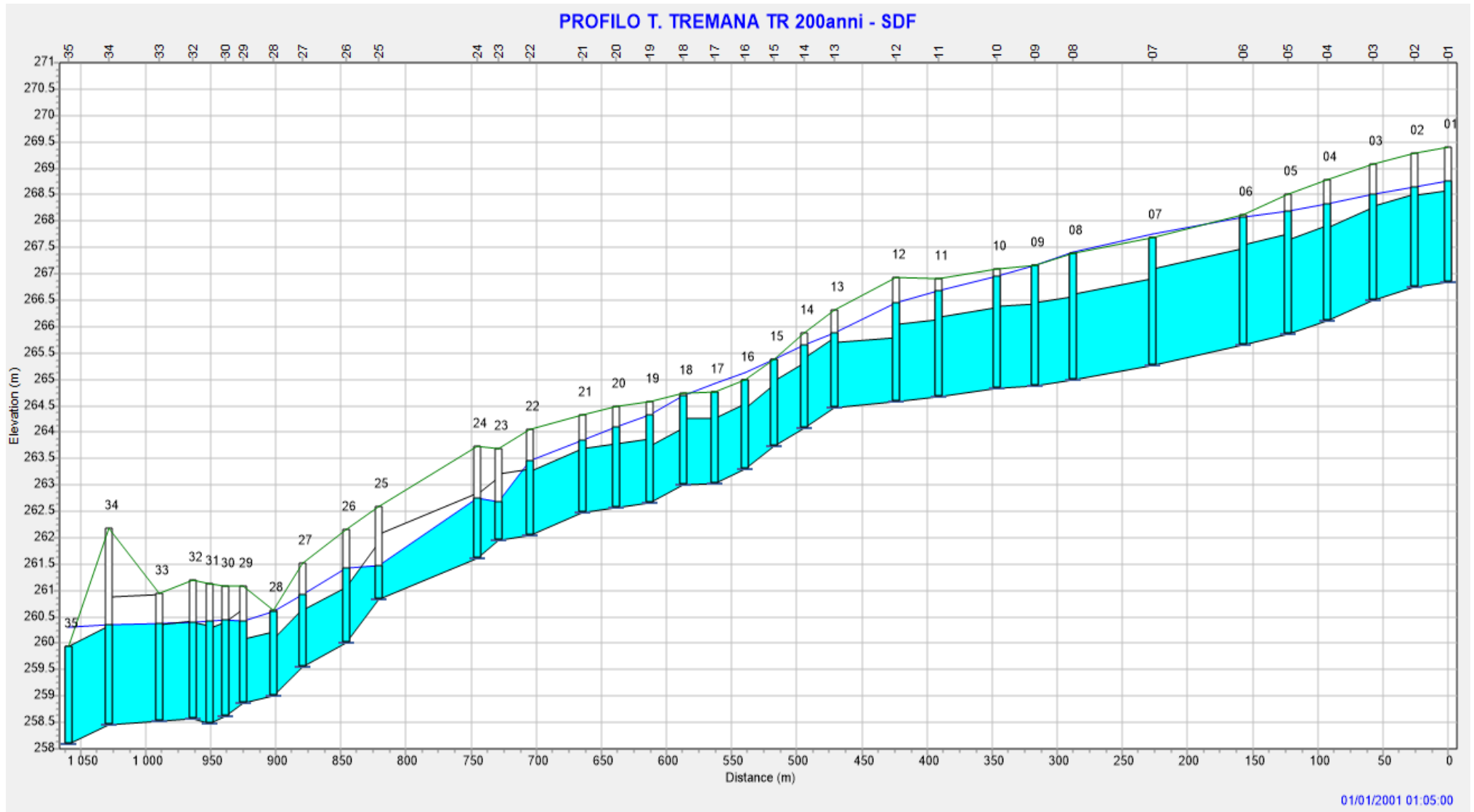


Figura 7.12: Profilo idraulico T. Tremana per l'evento TR 200 anni con pelo libero nel T. Morla di 260.30 [m s.l.m.].

7.5 I risultati ottenuti per il T. Morla

Per quanto riguarda le verifiche effettuate sul T. Morla è stato considerato il tratto di asta dal ponte di Via Baioni sino all'inizio della tombinatura di Piazzale Oberdan. Le condizioni al contorno imposte sono già state illustrate mentre per quanto concerne la modellazione avendo utilizzato un modello di moto permanente sono state imposte le portate nel tratto a monte ed a valle della confluenza con il T. Tremana aggiungendo il colmo di portata e trascurando effetti di sfasamento del colmo per differenti tempi di corrivazione.

Le simulazioni condotte per Tr 200 anni hanno mostrato limitate insufficienze nella parte immediatamente a monte del ponte di accesso del condominio di Viale Giulio Cesare posto di fronte al distributore Agip. L'insufficienza rilevata è in sponda destra cioè verso il condominio mentre in sponda sinistra si rileva la presenza di un muro che si erge dal marciapiede in modo continuo per tutta la via. La tabella a seguire mostra i livelli di pieni ed i valori del franco in sponda sinistra e destra.

Nel tratto indagato il ponte di Via Baioni non risulta particolarmente interferente mentre gli impalcati dei ponti privati perpendicolari a Viale Giulio Cesare funzionano in pressione determinando sovralti a monte che riducono il franco idraulico (in particolare in sponda destra essendo quella a minor quota). Dalla disamina dei livelli si desume una discreta incidenza delle perdite di carico concentrate alla confluenza (dell'ordine di 30 cm). Più a valle invece le condizioni migliorano e il salto di fondo determina una discontinuità idraulica non influenzata sostanzialmente dai livelli di valle. La presenza del salto di fondo di circa 1.3m posto a oltre una decina di metri dall'inizio della tombinatura di Piazzale Oberdan garantisce che la vena liquida non vada ad impattare sulla parte frontale della copertura. Tale distanza planimetrica è la causa del differente profilo di piena ottenuto rispetto a quello dello Studio Telò e Murachelli (si vedano gli estratti a seguire). Per quanto riguarda la tratta a monte del salto di fondo i livelli di piena sono invece sostanzialmente identici a quelli dello studio citato rilevando però che le insufficienze sono in sponda destra e non sinistra.

SEZ.	Q200	F. SX.	F.DX.	FONDO .A	PELO LIB.	ENERGIA	VEL. CAN.
N.	[mc/s]	[m]	[m]	[m s.l.m.]	[m s.l.m.]	[m s.l.m.]	[m/s]
06 MONTE	71	1.6	1.72	259.28	262.16	262.37	2.06
06 VALLE	71	1.71	1.83	259.22	262.05	262.27	2.11
05.A MONTE	71	1.21	-0.14	257.95	261.67	261.96	2.36
05.A VALLE P	71	1.58	0.23	257.85	261.30	261.63	2.57
05.A V TREM.	82.6	2.07	0.72	257.8	260.81	261.43	3.47
05 MONTE	82.6	1.63	0.58	257.54	260.67	261.18	3.15
05 VALLE	82.6	1.96	0.91	257.5	260.34	260.96	3.48
05BIS	82.6	1.71	0.88	257.15	260.30	260.81	3.17
05.B MONTE	82.6	1.56	0.73	256.95	260.16	260.65	3.09
05.B VALLE	82.6	2.35	9.95	255.66	259.30	259.61	2.48
05.B TOMB	82.6	2.44	2.46	255.4	259.14	259.58	2.93

Tabella 7.2: Risultati modellazione T. Morla per Tr 200 anni – stato di fatto.

Il disturbo generato dagli impalcati dei ponti privati è certamente rilevante e determinato dagli intradossi bassi dovuti agli spessori delle travi particolarmente rilevanti. Per la tombinatura in

prossimità del condominio (che presenta una lunghezza di oltre 27m) il parapetto di monte non è di pari altezza alla sponda sinistra, e quindi, funzionando in pressione, il franco idraulico viene ridotto. Dal punto di vista numero ad ogni modo tale impalcato non risulta completamente sommerso come è possibile rilevare dalle sezioni riportate nella Tavola 4. Per eventi con Tr 100 anni, l'insufficienza in sponda destra non risulta ma i ponti funzionano ancora in pressione. Mediamente il franco idraulico rispetto a Viale Giulio Cesare è adeguato per via del muro continuo segnalando ancora una volta il mancato parapetto pieno alla tombinatura del condominio.



Figura 7.13: Tombinatura compresa tra le sezioni 05.A-M e 05.A-V.



Figura 7.14: Ponte compreso tra le sezioni 05-M e 05-V.



Figura 7.15: Tombinatura di Piazzale Oberdan e traversa posta circa 13m a monte.

Nella tabella a seguire si riportano le risultanze ottenute dalla modellazione. Considerando che l'estradosso della tombinatura in prossimità del condominio è caratterizzata da una quota di 262.00 [m s.l.m.] (quota per possibile connessione a Viale Giulio Cesare) il franco minimo centenario per la Via è di circa 0.77 [m].

SEZ.	Q100	F. SX.	F.DX.	FONDO .A	PELO LIB.	ENERGIA	VEL. CAN.
N.	[mc/s]	[m]	[m]	[m s.l.m.]	[m s.l.m.]	[m s.l.m.]	[m/s]
06 MONTE	63	1.98	2.1	259.28	261.78	262.01	2.13
06 VALLE	63	2.1	2.22	259.22	261.66	261.91	2.19
05.A MONTE	63	1.65	0.3	257.95	261.23	261.52	2.41
05.A VALLE P	63	1.92	0.57	257.85	260.96	261.3	2.55
05.A V TREM.	73	2.43	1.08	257.8	260.45	261.09	3.54
05 MONTE	73	2.01	0.96	257.54	260.29	260.81	3.19
05 VALLE	73	2.21	1.16	257.5	260.09	260.68	3.39
05BIS	73	1.96	1.13	257.15	260.05	260.52	3.06
05.B MONTE	73	1.81	0.98	256.95	259.91	260.36	2.97
05.B VALLE	73	2.67	10.27	255.66	258.98	259.27	2.41
05.B TOMB	73	2.75	2.77	255.4	258.83	259.24	2.83

Tabella 7.3: Risultati modellazione T. Morla per Tr 100 anni – stato di fatto.

In sintesi si ritiene che le verifiche effettuate sul T. Morla evidenzino condizioni al limite certamente non con un buon funzionamento dei ponti ma le insufficienze sono prioritariamente in sponda destra. Con una ottimizzazione dei ponti privati (gli impalcati potrebbero essere dimezzati per spessore) si otterrebbero buoni benefici. Pensando poi ad un bypass sul T Morla della doppia curva a 90° in grado di deviare una quota delle portate di piena a valle della confluenza con il Tremana i benefici sui livelli di piena sarebbero tali da contribuire in modo significativo alla messa in sicurezza dell'area.

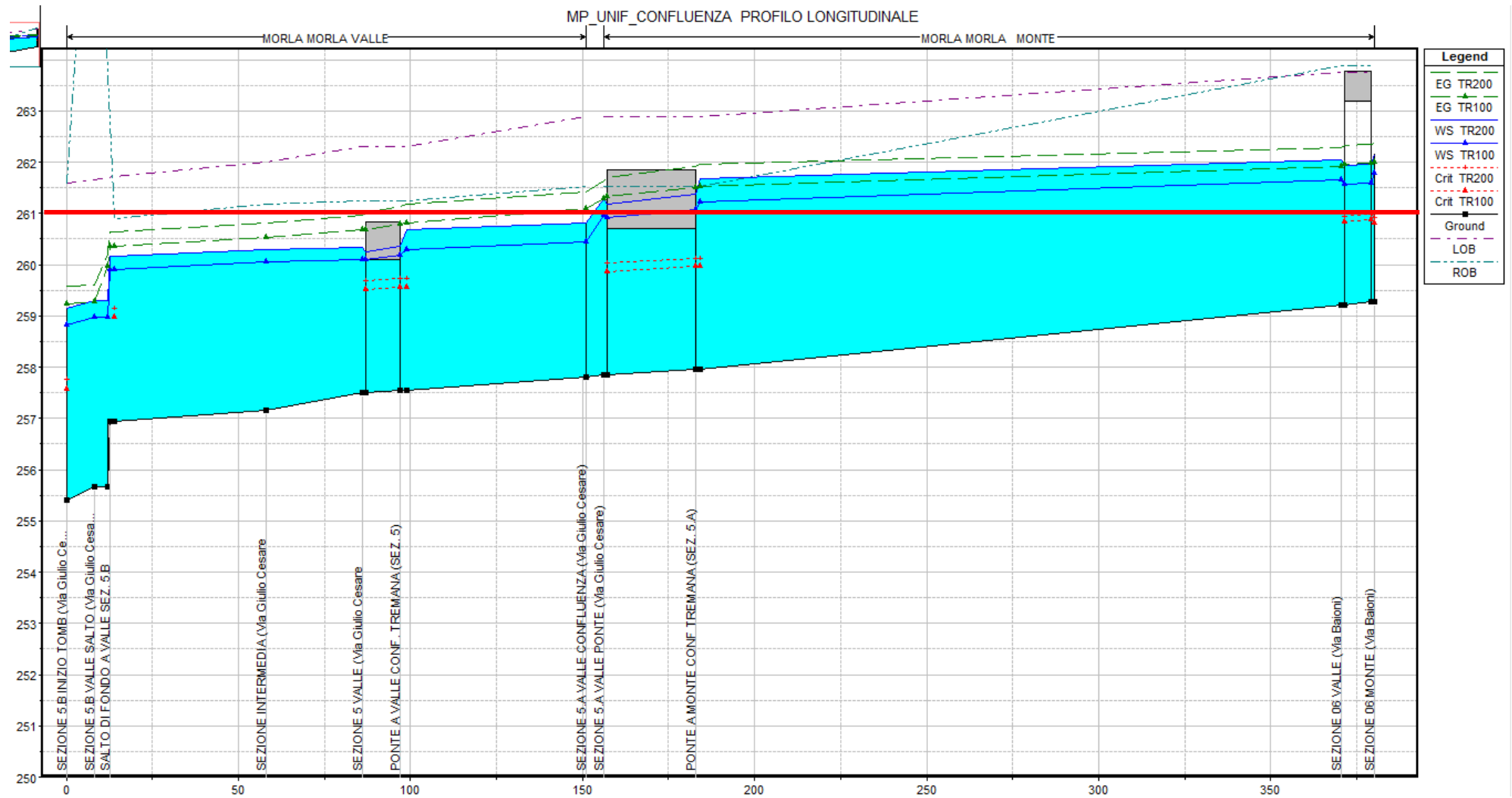


Figura 7.16: Profilo di moto permanente tratto T. Morla con confluenza T. Tremana (condizione moto uniforme a valle $i=0.3\%$).

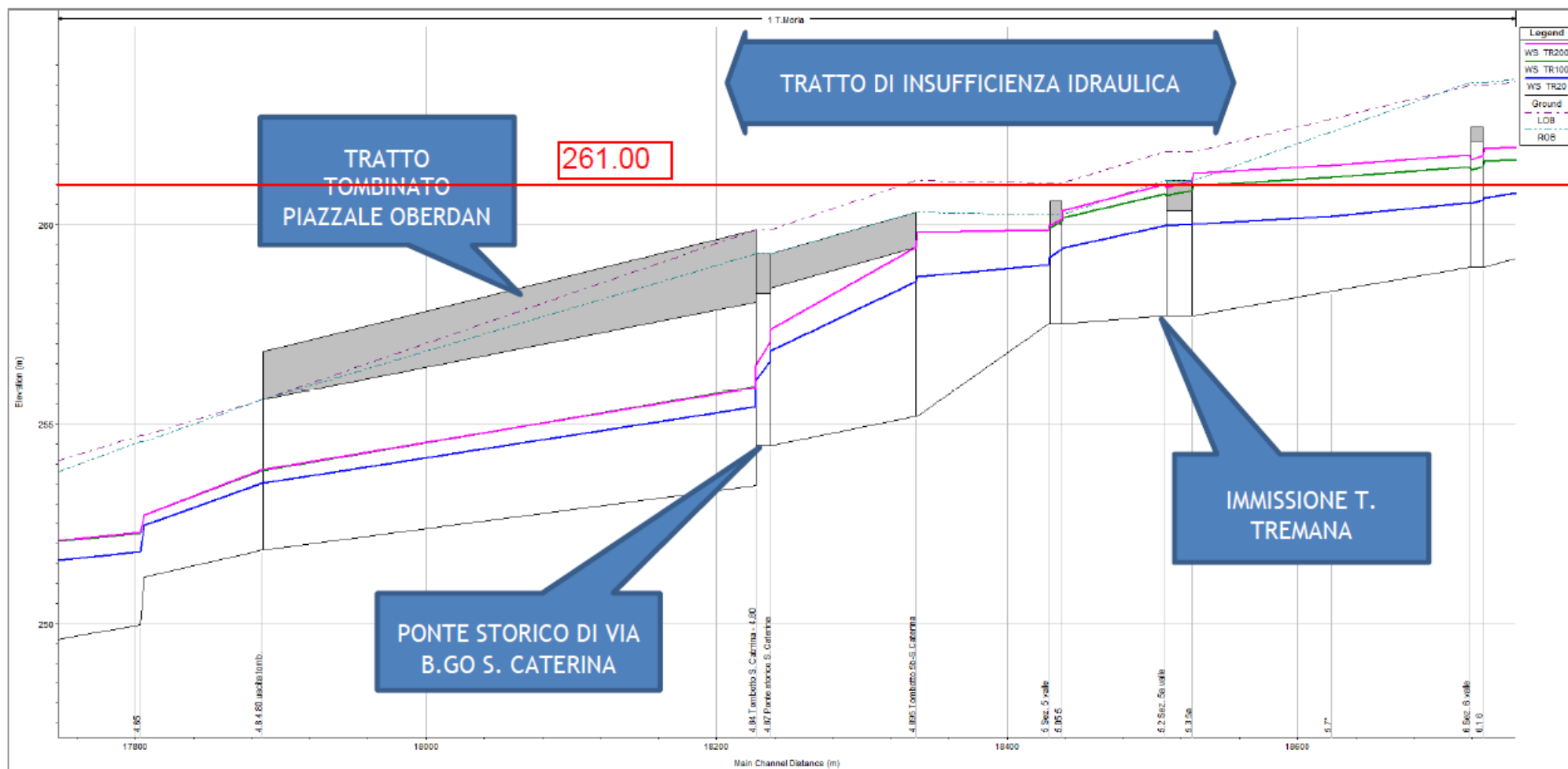


FIGURA 48: PARTICOLARE DEL PROFILO DI RIGURGITO AL NODO DI IMMISSIONE DEL T. TREMANA PER TR 20, 100 E 200 ANNI, CON EVIDENZIATA LA MINOR ALTEZZA DEI MURI IN SPONDA SINISTRA (LINEA TRATTEGGIATA VERDE) RISPETTO A QUELLI IN SPONDA OPPOSTA (LINEA TRATTEGGIATA VIOLA)

Figura 7.18: Estratto profilo di piena del T. Morla – Studio idraulico Telò e Murachelli [2015].

7.6 I risultati ottenuti nello scenario di sistemazione idraulica del T. Morla

In questo paragrafo si analizza l'effetto degli interventi di riduzione del rischio idraulico proposti nello studio redatto da Telò e Murachelli in ottemperanza alle richieste avanzate il sede di conferenza dei servizi da parte dell'UTR di Bergamo (parere protocollo AE02.2017.9999999 del 04.12.2017).

In particolare si considera la soluzione progettuale B dello studio citato che conduce alla laminazione della piena del T. Morla (nella sezione a valle della vasca di laminazione in Valverde) da 50 a 43 [m³/s] (cfr. Relazione illustrativa degli interventi di progetto pag. 13) per un volume di invaso complessivo di circa 21.000 m³. Nella pagina a seguire si riporta l'estratto degli idrogrammi di piene in ingresso ed in uscita dalla vasca.

In questa sede si considera quindi, in via semplificata, di mantenere identico l'effetto di laminazione per eventi con Tr 100 e 200 anni e quindi ridurre le portate al colmo di 7 [m³/s]. Di conseguenza le portate critica per la nuova verifica sul T. Morla sono:

$$Q_{TR200 \text{ MONTE CONFLUENZA}} = 71 - 7 = 64 \text{ [m}^3\text{/s]} \quad Q_{TR200 \text{ VALLE CONFLUENZA}} = 71 - 7 + 11.6 = 75.6 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

$$Q_{TR100 \text{ MONTE CONFLUENZA}} = 63 - 7 = 56 \text{ [m}^3\text{/s]} \quad Q_{TR100 \text{ VALLE CONFLUENZA}} = 63 - 7 + 10 = 66 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

Anche per questa condizione si trascura l'effetto di sfasamento dei colmi di piena tra Tremana e Morla.

Nelle pagine a seguire si riportano i tabulati con le risultanze delle calcolazioni dalle quali si evince che la riduzione del colmo di portata induce ad una riduzione dei livelli di piena di circa 20-30 cm (a seconda delle sezioni). Questa riduzione fa sì che numericamente l'insufficienza in sponda destra riscontrata per eventi bicentenari sia eliminata. Ad ogni modo il funzionamento dei ponti è in pressione. Nelle pagine a seguire si riporta il profilo idraulico del T Morla nella condizione di progetto e a seguire il profilo sia per eventi con Tr 100 anni che per eventi con Tr 200 anni

SEZ.	Q200	F. SX.	F. DX.	FONDO .A	PELO LIB.	ENERGIA	VEL. CAN.
N.	[mc/s]	[m]	[m]	[m s.l.m.]	[m s.l.m.]	[m s.l.m.]	[m/s]
06 MONTE	64	1.89	2.01	259.28	261.87	262.09	2.08
06 VALLE	64	2	2.12	259.22	261.76	261.99	2.14
05.A MONTE	64	1.52	0.17	257.95	261.36	261.64	2.34
05.A VALLE	64	1.8	0.45	257.85	261.08	261.4	2.49
05.A V TREM.	75.6	2.33	0.98	257.8	260.55	261.18	3.52
05.B MONTE	75.6	1.91	0.86	257.54	260.39	260.91	3.18
5.B VALLE	75.6	2.14	1.09	257.5	260.16	260.75	3.42
05BIS	75.6	1.89	1.06	257.15	260.12	260.6	3.09
05.B MONTE	75.6	1.74	0.91	256.95	259.98	260.44	3
05.B VALLE	75.6	2.59	10.19	255.66	259.06	259.36	2.43
05.B TOMB	75.6	2.66	2.68	255.4	258.92	259.33	2.86

Tabella 7.4: Risultati modellazione T. Morla per Tr 200 anni – scenario B progetto.

SEZ.	Q100	F. SX.	F.DX.	FONDO .A	PELO LIB.	ENERGIA	VEL. CAN.
N.	[mc/s]	[m]	[m]	[m s.l.m.]	[m s.l.m.]	[m s.l.m.]	[m/s]
06 MONTE	56	2.25	2.37	259.28	261.51	261.74	2.14
06 VALLE	56	2.36	2.48	259.22	261.4	261.65	2.21
05.A MONTE	56	1.94	0.59	257.95	260.94	261.23	2.37
05.A VALLE P	56	2.12	0.77	257.85	260.76	261.06	2.45
05.A V TREM.	66	2.7	1.35	257.8	260.18	260.85	3.62
05 MONTE	66	2.32	1.27	257.54	259.98	260.52	3.26
05 VALLE	66	2.4	1.35	257.5	259.9	260.46	3.32
05BIS	66	2.15	1.32	257.15	259.86	260.3	2.96
05.B MONTE	66	2	1.17	256.95	259.72	260.14	2.87
05.B VALLE	66	2.91	10.51	255.66	258.74	259.02	2.35
05.B TOMB	66	2.98	3	255.4	258.6	258.99	2.76

Tabella 7.5: Risultati modellazione T. Morla per Tr 100 anni – scenario B progetto.

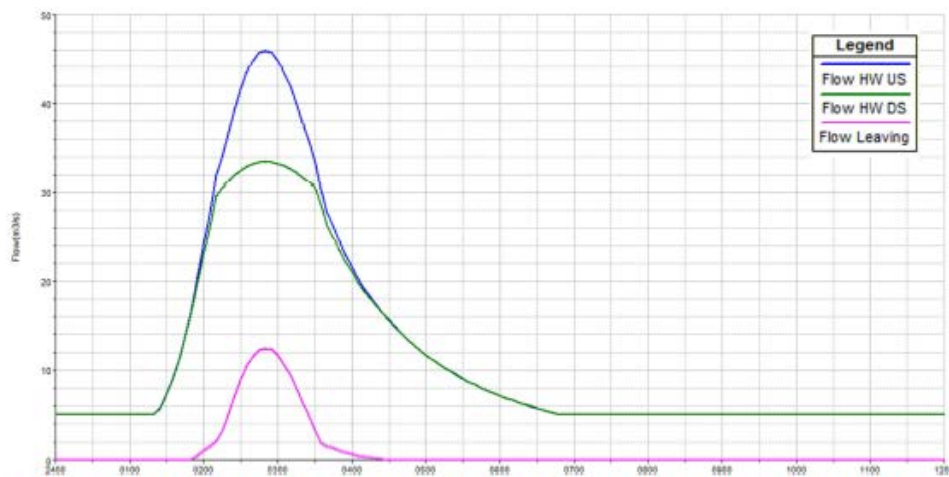


FIGURA 8 - IDROGRAMMI DI PIENA DA MONTE (IN BLU), SCOLMATI NELL'AREA GOLENALE (IN MAGENTA) E TRANSITANTI VERSO VALLE (IN VERDE) A SEGUITO DELL'EFFETTO COMBINATO DEL SELETTORE E DELLO SCOLMATORE LATERALE PER TR 100 ANNI NELLA CONFIGURAZIONE B

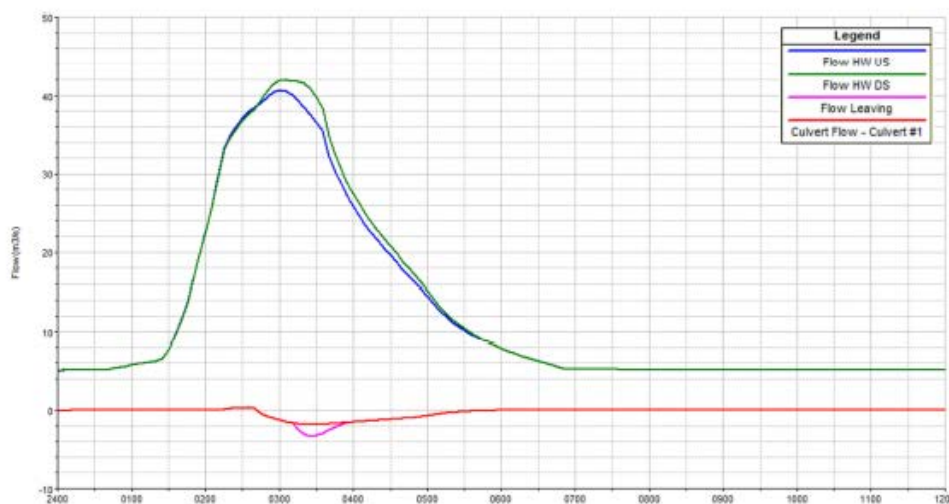


FIGURA 9 - IDROGRAMMA DI PIENA LAMINATO A VALLE DELLE AREE DI LAMINAZIONE (IN VERDE) OTTENUTO DALLA SOMMA DELL'IDROGRAMMA NELL'ALVEO INCISO (IN BLU), DELLA PORZIONE DI PORTATA RECAPITATA DAL RESTITUTORE FINALE ATTRAVERSO LO SCARICO DI FONDO (IN ROSSO) ED IL RISPETTIVO SFIORATORE (IN MAGENTA) PER TR 100 ANNI NELLA CONFIGURAZIONE B

Figura 7.19: Idrogramma laminato desunto dallo Studio del t. Morla (Telò e Murachelli).

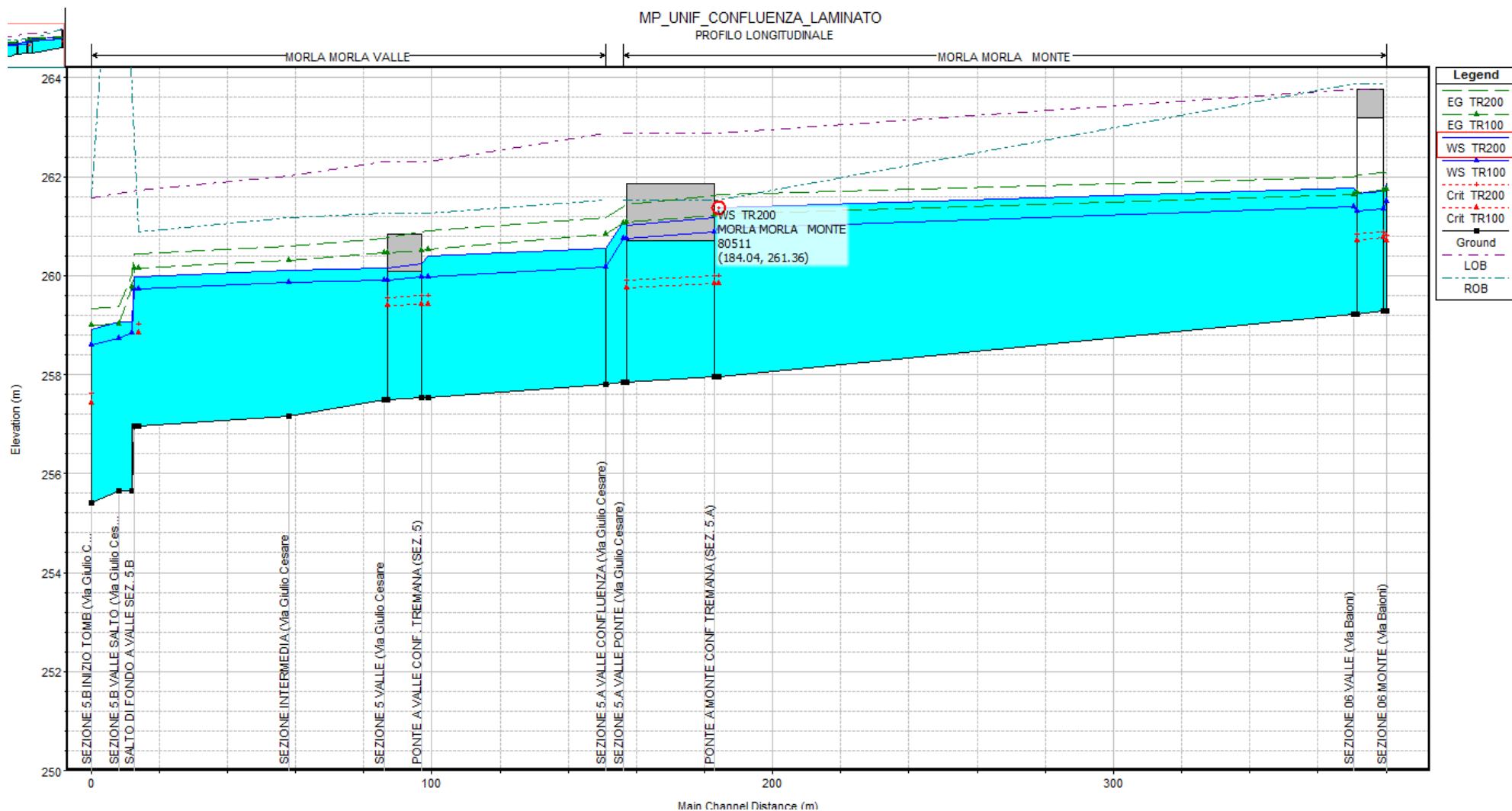


Figura 7.20: Profilo longitudinale post opere di laminazione previste sul T. Morla per Tr 100 e 200 anni (scenario B).

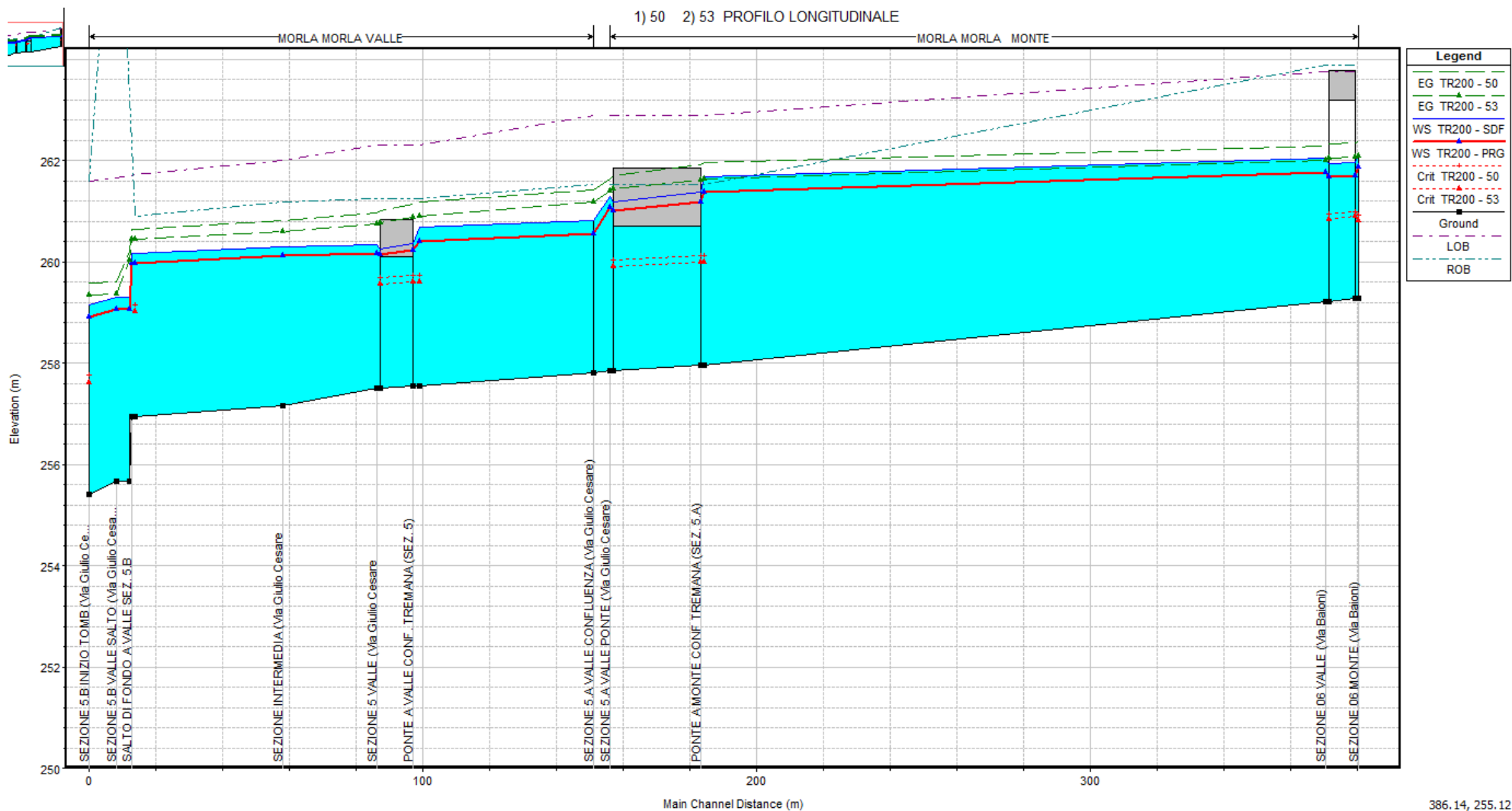


Figura 7.21: Confronto stato di fatto e progetto (in rosso) per le opere di laminazione previste sul T. Morla per eventi con Tr 200 anni.

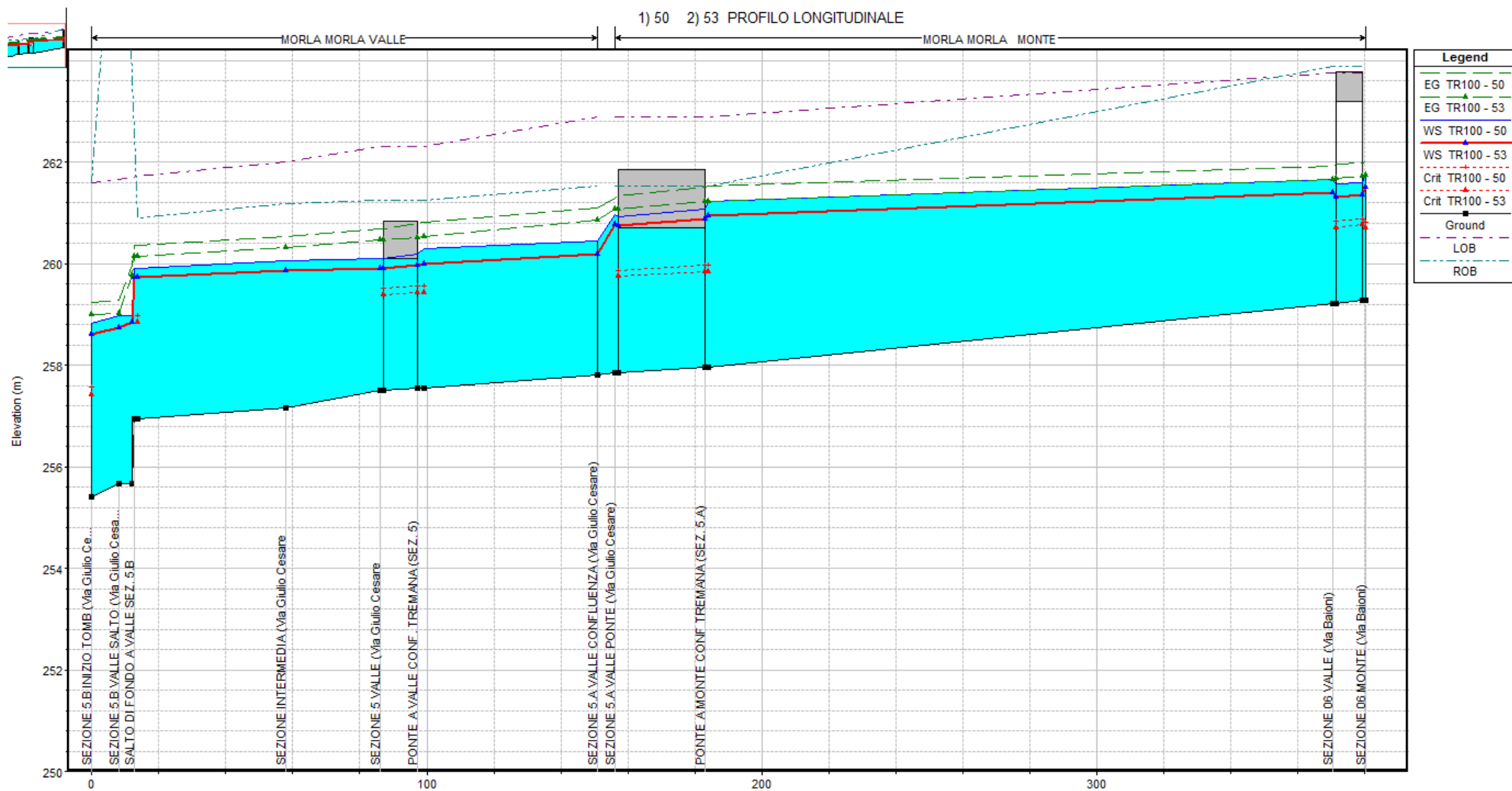


Figura 7.22: Confronto stato di fatto e progetto (in rosso) per le opere di laminazione previste sul T. Morla per eventi con Tr 100 anni.

Per quanto riguarda i benefici della riduzione al colmo dell'idrogramma del T Morla sul T. Tremana si ripercuotono solo sulla parte terminale della tombinatura in quanto il funzionamento idraulico del tratto a monte è sostanzialmente indipendente.

E' stata quindi effettuata una verifica della tombinatura imponendo questi valori di pelo libero allo scarico (mantenuto costante per tutta la durata dell'evento critico del T. Tremana):

$$H_{TR200 \text{ CONFLUENZA}} = 261.08 \text{ [m s.l.m.]} \quad H_{TR100 \text{ CONFLUENZA}} = 260.76 \text{ [m s.l.m.]}$$

Con questi nuovi valori imposti allo sbocco del T. Tremana sono stati aggiornati i calcoli di verifica della tombinatura verificando che comunque vi sono delle insufficienze per la zona più depressa del profilo. Si riportano i grafici di risultanza per la condizione di Tr 100 anni.

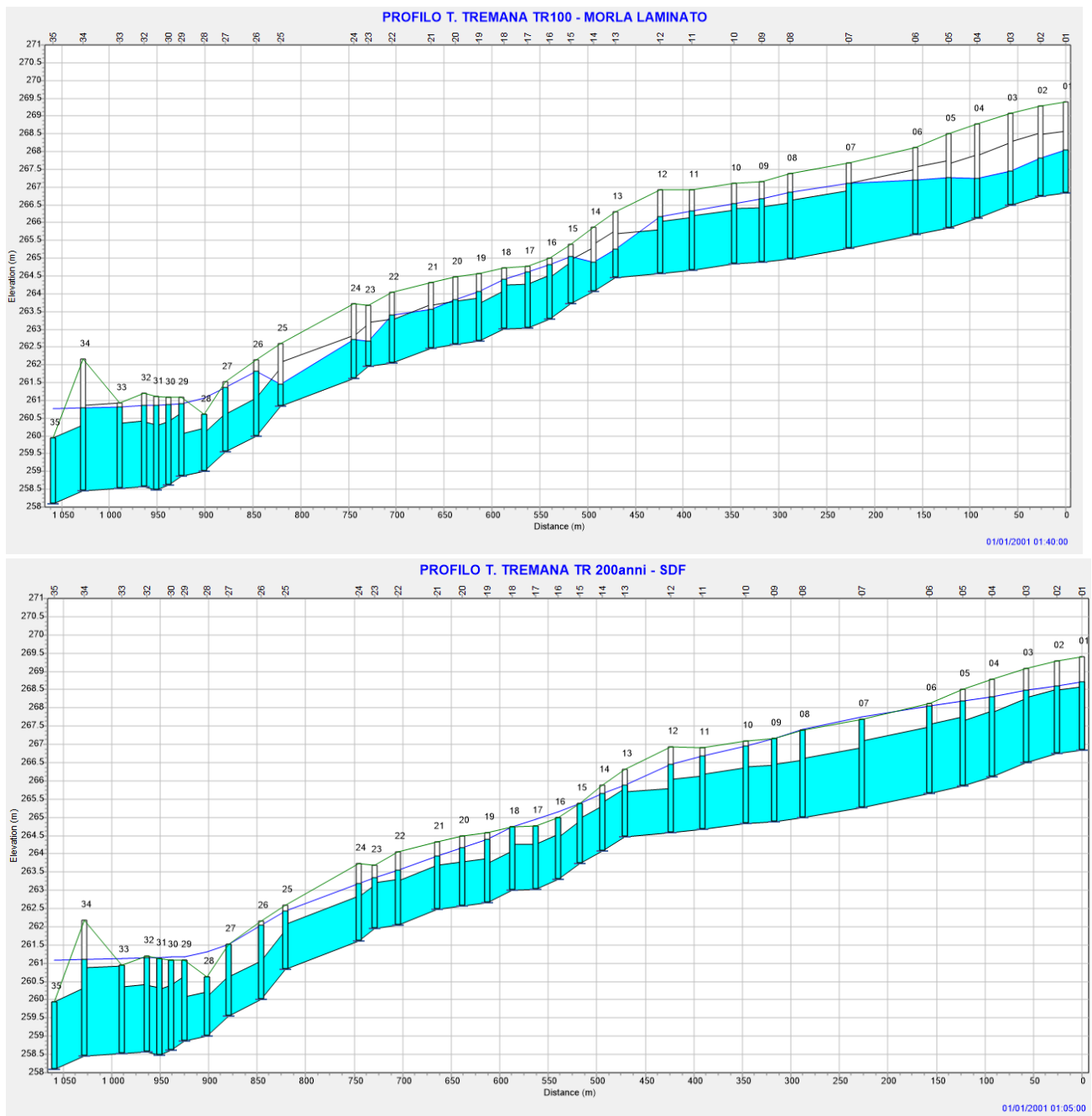


Figura 7.23: Profili idraulici T. Tremana con livelli laminati nel T. Morla.



Figura 7.24: Grado di riempimento tombinatura T. Tremana con scarico nel T. Morla idrogramma laminato Tr100.



Figura 7.25: Grado di riempimento tombinatura T. Tremana con scarico nel T. Morla idrogramma laminato Tr200.

Si rileva dall'immagine sopra evidenziata il completo funzionamento in pressione per l'intera asta del Tremana.

7.7 I risultati ottenuti nello scenario di sistemazione idraulica del T. Morla e scolmatore Tremana

Si considera ora anche la realizzazione del bypass del T. Tremana previsto nello studio idrogeologico redatto dallo Studio Telò e dall'Ing. Murachelli. Trattandosi di uno studio a scala di sottobacino vi è un'indicazione di massima dello scolmatore indicato con un diametro \varnothing 120 cm e con partenza all'incirca all'altezza del pozzetto N. 12. Si è quindi prevista la realizzazione di detto collettore ipotizzando un profilo di posa rappresentato a seguire. La partizione delle portate al pozzetto 12 è stata ipotizzata senza muri di sfioro ma sulla base della sezione libera della condotta. A valle le condizioni imposte sono le medesime di quello della tombinatura del T. Tremana (quindi livello massimo per evento con Tr 200 anni laminato).

Si rileva che l'insufficienza nella parte terminale della tombinatura del T Tremana persiste mentre per la parte in corrispondenza della tratta 17-18 non si verificano più insufficienze. Analizzando il tratto a monte in prossimità dei pozzetti 7-8 il livello idrico non determina esondazioni ma la tombinatura è comunque al limite del completo riempimento.

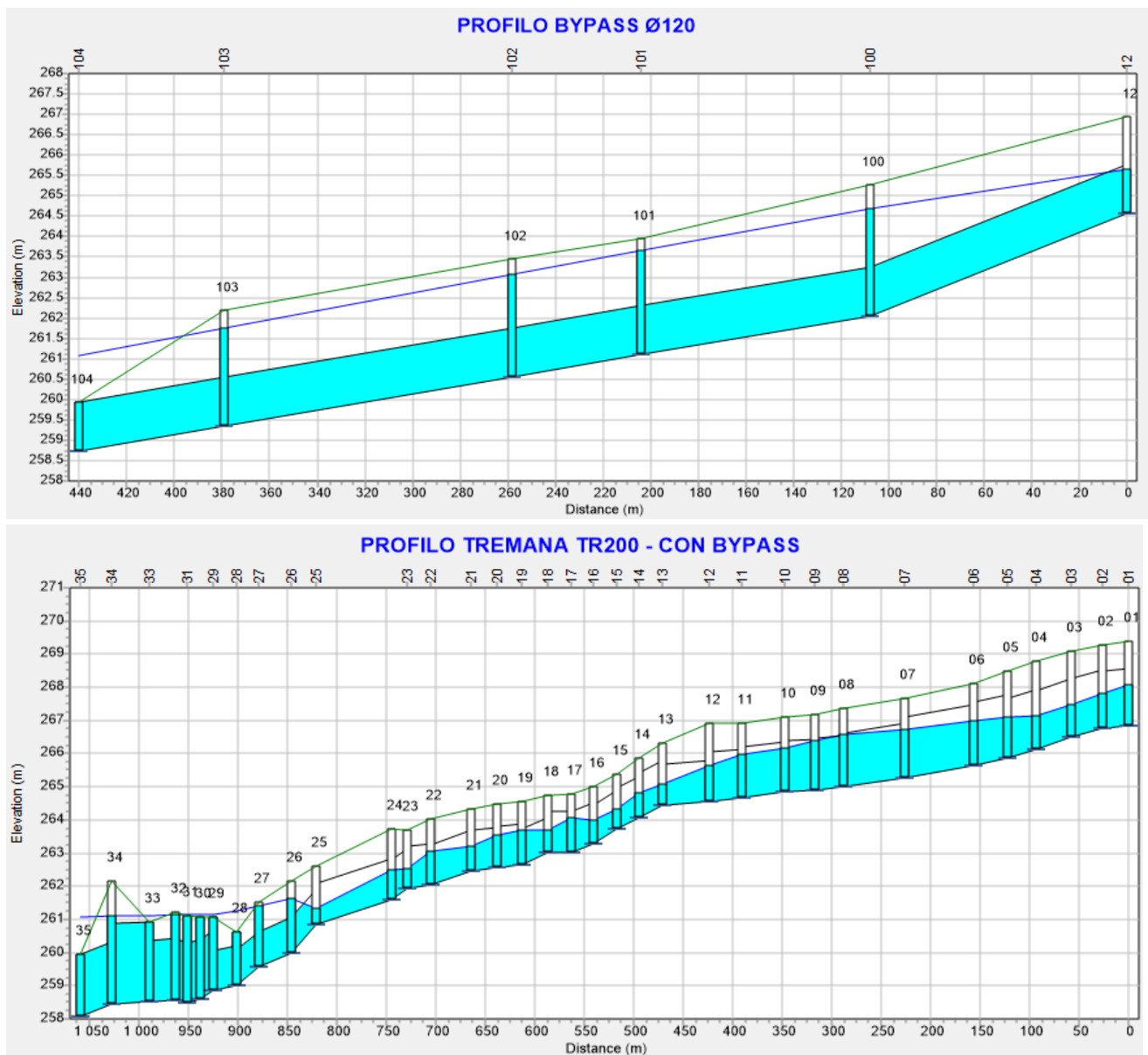


Figura 7.26: Profili idraulici Bypass \varnothing 120 e tombinatura esistente T. Tremana.



Figura 7.27: Grado di riempimento tombinatura T. Tremana con BYPASS - T. Morla idrogramma laminato Tr200.

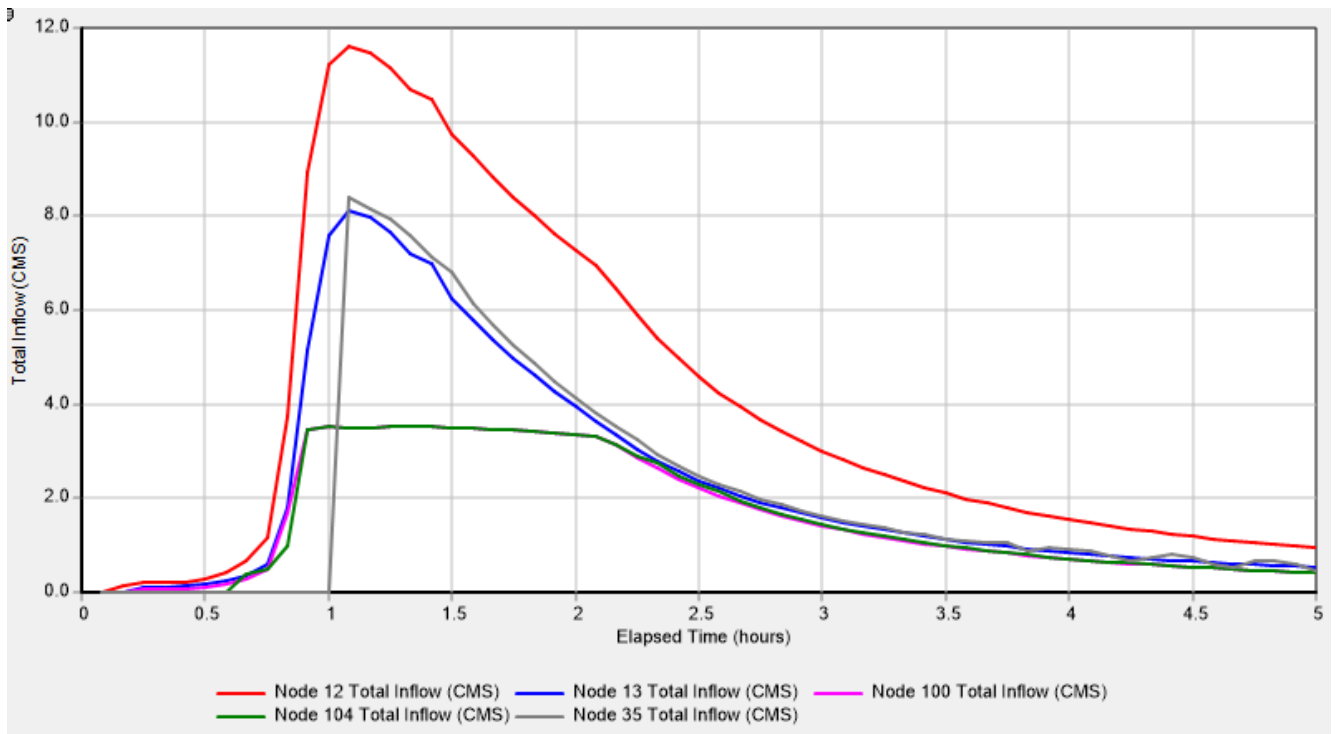


Figura 7.28: Ripartizione delle portate tra tombinatura esistente e lo scolmatore in progetto.

Il profilo longitudinale del bypass riportato nelle precedenti pagine è relativo ad un tracciato rettilineo lungo Viale Giulio Cesare senza deviazioni di sorta nell'attuale parcheggio superando in sovrappasso la fognatura \varnothing 60 cm di Via del Lazzaretto. Questo tracciato è differente, seppur solo in un tratto a monte, dal tracciato indicato nello Studio idraulico di Telò e Murachelli ed a parere degli scriventi, con i nuovi elementi a disposizione derivante dal Piano Attuativo, consente una minor interferenza con la rete fognaria esistente.

Si segnala come l'innesto di questa fognatura nel collettore che discende da Viale Giulio Cesare, dall'abaco fornito dal Gestore della rete, non risulta ispezionabile. In questa sede si è quindi ipotizzata la quota della fognatura come desumibile dalle indicazioni fornite dall'abaco per pozzetto di valle su Viale Giulio Cesare. Tali aspetti, che potrebbero anche richiedere la sistemazione del nodo fognario, dovranno essere approfonditi nel progetto dello scolmatore del T. Tremana. Così come il diametro dello scolmatore, \varnothing 120 cm, è stato mantenuto identico a quanto indicato anche se potrà essere valutata la possibilità di incrementare tale sezione viste le risultanze ottenute per avere un maggior franco. Nello sviluppo del progetto dello scolmatore potrà essere valutata la possibilità di alleggerire il collettore fognario di Viale Giulio Cesare cioè l'ovoidale 80x120 che discende la via raccogliendo lateralmente i collettore secondari.

7.8 Proposte alternative

Infine si procede ad illustrare un'ipotesi alternativa per la risoluzione delle insufficienze del T. Tremana che consiste nel prevedere una laminazione a monte della tratta critica. Percorrendo il tracciato del T. Tremana vi sono ben poche aree libere: in particolare si evidenziano alcune aree a verde in fregio alle scuole e all'asilo mentre risalendo a monte vi è un'area posta proprio all'inizio della tombinatura a confine tra la parte urbana e quella collinare.

Tale area non è topograficamente favorevole in quanto il T. Tremana è abbastanza incassato nel tratto in oggetto ma si potrebbero valutare delle soluzioni in grado di ottimizzare l'invaso in linea del corso d'acqua

opportunamente allargato in sponda destra. In questa sede ci si limita a verificare l'efficacia idraulica di un eventuale vasca di laminazione posta all'ingresso della tombinatura. Per quanto riguarda l'effetto di laminazione si considera quindi l'idrogramma di verifica della tombinatura come somma dell'idrogramma laminato del bacino collinare e l'idrogramma impulsivo per la parte urbanizzata.

Ricordando l'estensione del bacino collinare Superficie = 104 [ha] e volendo ridurre l'idrogramma complessivo critico di 2.0-2.5 [m³/s] è necessario garantire un volume di invaso della vasca di circa 8500 [m³]. Tale volume affinché si possa realizzare nell'area citata e indicata nella Tavola N. 2 richiede un'altezza di invaso di circa 3.0 m. In considerazione della topografia dell'area e della quota incassata del fondo alveo sarà necessario effettuare uno scavo consistente e una traversa di regolazione in linea sul corso d'acqua.



Figura 7.29: Vista da monte dell'area verde posta al termine del bacino collinare del T. Tremana.

Inoltre la posizione dell'area individuata sarebbe peraltro favorevole anche per controllare e trattenere il trasporto di corpi flottanti quali tronchi e rami che potrebbero rappresentare un serio pericolo all'ostruzione della tombinatura del T Tremana. Difatti, come si è mostrato ampiamente, la sezione è abbastanza limitata in particolare nella progressione verso valle e quindi il rischio di occlusione è comunque alto e comporterebbe poi dei deflussi superficiali che andrebbero a ruscellare verso il centro della città di Bergamo vista la topografia e la localizzazione del tracciato del Tremana.

Per quanto riguarda altre possibili soluzioni per la riduzione delle portate al colmo, sono state visionate altre aree a verde poste più a valle e che quindi sono inserite nel contesto urbano di Monterosso. In particolare queste aree sono quelle poste in fregio alla scuola dell'infanzia e alle scuole primarie che si sviluppano in fregio alla Via Tremana (rif. Tav. 1). Evidentemente per tali aree la soluzione sarebbe quella di prevedere delle vasche interrato in modo da ripristinare le aree a parco e giardino. Questa soluzione dal punto di vista dell'impatto sarebbe quindi minimale a lavori conclusi ma comporta certamente dei costi decisamente superiori rispetto ad una vasca a cielo aperto. Inoltre le difficoltà di manutenzione sarebbero

maggiori richiedendo un impegno economico non trascurabile per assicurare la corretta manutenzione delle vasche. Trovandosi poi tali aree a valle dello scarico dei primi sfioratori della rete fognaria, si deve tener conto anche dell'esigenza di lavaggi o comunque di fare delle valutazioni in merito ad odori.



Figura 7.30: Vista da valle dell'area a verde ove inizia la parte tombinata del T. Tremana.



Figura 7.31: Vista da monte dell'area a verde delle scuole primarie in fregio alla Via Tremana.

Altre valutazioni potranno essere sviluppate nel progetto dello scolmatore del T Tremana ad esempio prevedendo comunque un selettore di materiale all'inizio della tombinatura.

8 ANALISI DELLE INTERFERENZE CON LA RETE FOGNARIA

8.1 Analisi delle interferenze con la rete fognaria

Negli approfondimenti effettuati nel presente studio di compatibilità idraulica è stata analizzata anche la rete fognaria che in qualche modo interferisce o è idraulicamente connessa al reticolo principale del T. Morla e del T. Tremana. E' quindi stata acquisita la cartografia della rete e gli shape files forniti dal Gestore del SII quale Uniacque SPA. Nell'immagine a seguire si riporta un estratto.

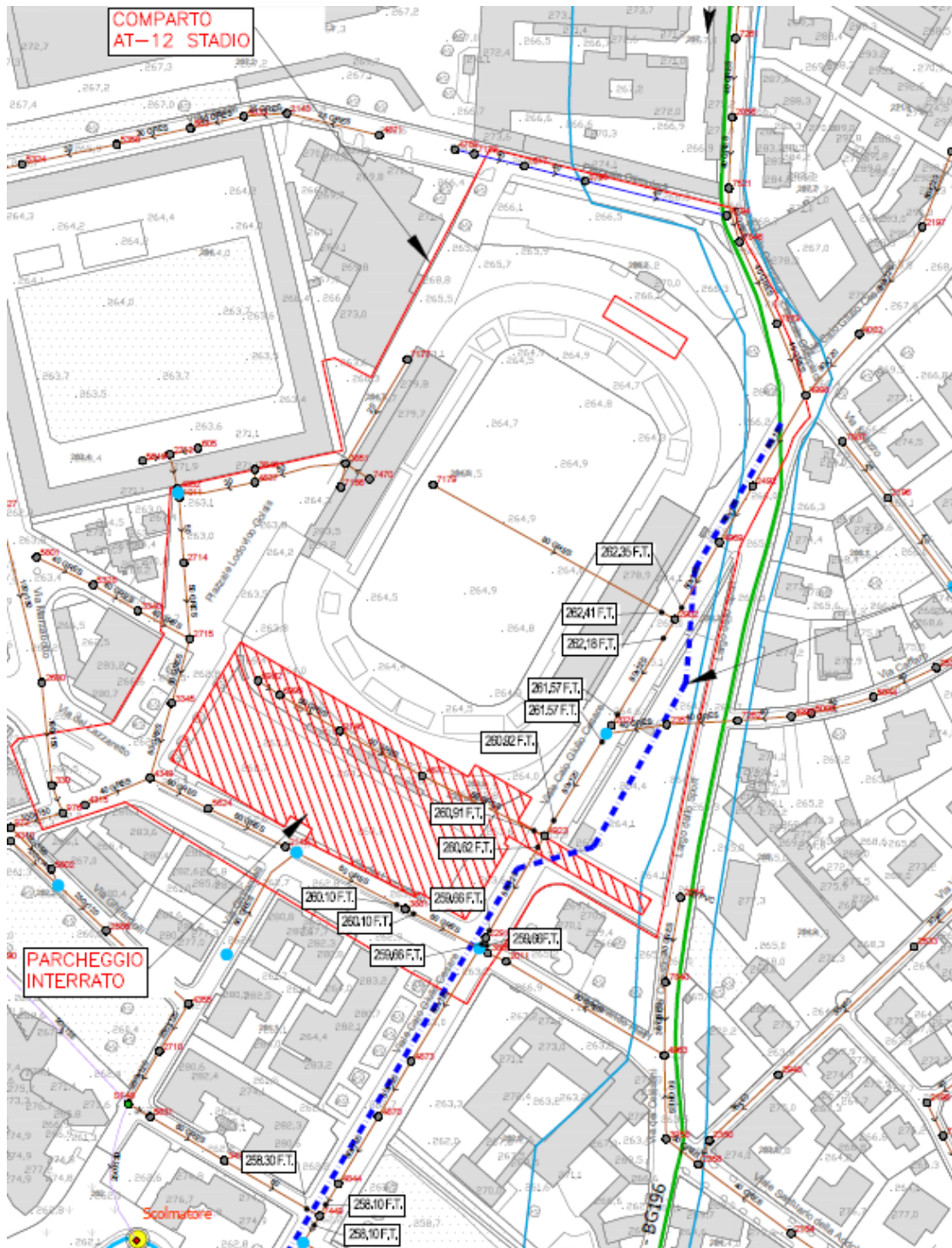


Figura 8.1: Estratto della rete fognaria esistente.

Sono stati poi considerati gli scolmatori che recapitano nel Torrente Tremana e quindi analizzata la rete di monte al fine di considerare tutto il bacino indiretto che confluisce nel corso d'acqua a mezzo del sistema di drenaggio urbano. In particolare sono stati evidenziati 8 scolmatori sul T. Tremana e uno scolmatore nel T. Morla nel tratto di interesse (da Via Baioni e Piazzale Oberdan). La figura a seguire localizza gli scolmatori in questione.



Figura 8.2: Localizzazioni scolmatori con recapito nel reticolo idrografico studiato.

Come si evince dal tracciamento dei bacini scolanti riportato nella Tavola N. 02, il bacino che la fognatura drena a nord della Circovallazione è di estensione ampia e pari a circa 74 [ha]. A sud

dell'asse stradale citato la fognatura prosegue con una condotta di diametro limitato ad un $\varnothing 30$ cm quindi l'assunzione del completo scarico del bacino urbano nel T. Tremana è giustificato.

Nella parte a sud della Circonvallazione si trovano due ulteriori scolmatori la cui rete fognaria sottesa è limitata. Anche in questo caso si è comunque considerato al 100% tale bacino nelle verifiche idrauliche effettuate. Nella parte bassa di Via Cestini invece la rete fognaria è completamente indipendente dal Tremana che riceve solo le acque stradali a mezzo di bocche di lupo e caditoie direttamente connesse alla tombinatura.

Per quanto riguarda lo scolmatore S48 che recapita nel T. Morla il bacino di competenza è considerato nel calcolo delle portate di piena assunte nelle verifiche idrauliche.

8.2 L'invarianza idraulica ed i benefici sul sistema fognario esistente

La presente relazione sviluppa e analizza la compatibilità idraulica dell'intervento previsto nel PA At-12 Stadio nei confronti del rischio idraulico derivante dalla presenza del reticolo principale che circonda l'ambito stesso. Le analisi hanno quindi interessato il T. Morla posto a sud del comparto ed il T. Tremana posto ad est. Unitamente è stata considerata anche la fognatura mista che, a mezzo degli scolmatori, recapita in particolar modo nel Torrente Tremana.

Nella relazione di cui all'Allegato 02 si prende in considerazione la tematica dell'invarianza idraulica effettuando i primi calcoli di dimensionamento preliminare che verranno poi sviluppati in modo più dettagliato nel proseguo dell'iter progettuale. In questa sede di valutazione della compatibilità idraulica dell'intervento è comunque necessario indicare sinteticamente le modalità di attuazione dei criteri di invarianza idraulica da poco divenuti obbligatori e che **contribuiscono in modo significativo ad alleggerire la fognatura di Viale Giulio Cesare**. Attualmente difatti l'intero Stadio ed il parcheggio scaricano le acque meteoriche tal quali nella fognatura di Viale Giulio Cesare. Si rimanda alla Tavola N. 2 che riporta la rete esistente nella quale si evince che un collettore $\varnothing 80$ cm scarica le acque dello stadio nella fognatura di Viale Giulio Cesare ed una condotta $\varnothing 50$ cm quelle del parcheggio lato sud.

Nel progetto del Piano Attuativo questi due collettori verranno eliminati creando delle nuove reti di sole acque bianche che riuniranno gli afflussi meteorici in vasche di laminazione. Lo scarico delle vasche di laminazione sarà effettuato con pompe di sollevamento meccanico e direttamente nel T. Tremana eliminando completamente ogni apparto alla rete fognaria esistente.

L'area complessiva che graverà sulle vasche di laminazione è circa pari a circa **24000 mq** e che attualmente scarica nella rete fognaria comunale. Nel progetto del P.A. si prevede la realizzazione di 4 vasche di laminazione per un complessivo **volume di circa 1880 [m³]** (ripartito in 4 vasche: 1 vasca pubblica lato nord- 1 vasca privata lato nord – 1 vasca pubblica per il parcheggio lato sud – 1 vasca pubblica le aree private lato sud). Lo scarico delle vasche avverrà con un impianto di sollevamento indipendente per ogni vasca e con recapito della tubazione premente verso il Torrente Tremana. Nelle future fasi progettuali verrà sviluppato il progetto di dettaglio verificando il volume di invaso stimato con il metodo semplificato indicato dal nuovo regolamento sull'invarianza idraulica pubblicato sul Bollettino Regionale in data 27.11.2017. Per i dettagli del caso si rimanda alla relazione di cui all'Allegato 02.

La portata complessivamente scaricata dai 4 impianti di sollevamento sarà pari a 23 [l/s] cioè pari allo **2 ‰** della portata di piena centenaria del T. Tremana.

Volendo stimare il beneficio dell'alleggerimento del collettore fognario di Viale Giulio Cesare per via dell'eliminazione di un bacino di oltre 2.4 [ha], per eventi cinquantennali questo **è stimabile in oltre 600 [l/s]** come illustrato nel grafico a seguire.

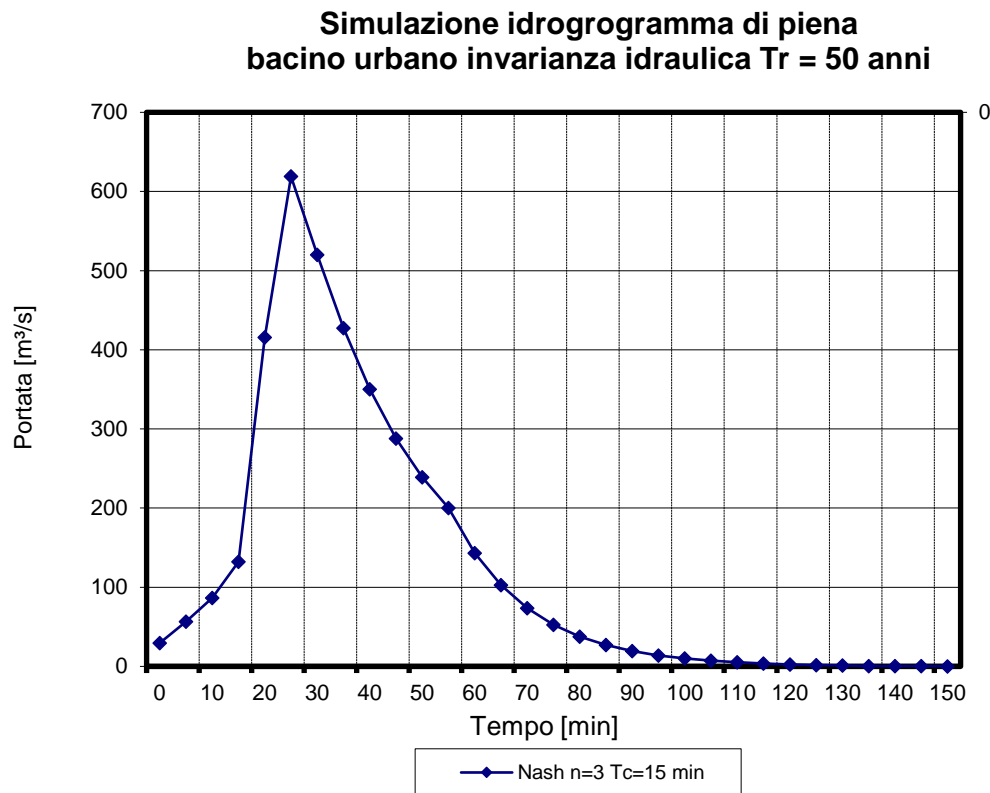


Figura 8.3: Idrogrogramma naturale del bacino che verrà laminato secondo i criteri dell'invarianza idraulica.

In sintesi quindi l'intervento del P.A. AT-12 Stadio con l'applicazione delle recenti norme per l'invarianza idraulica migliora sensibilmente il carico idraulico della fognatura esistente dando beneficio a tutta l'asta fognaria principale di Viale Giulio Cesare.

9 CONCLUSIONI

In conclusione questo studio ha analizzato le condizioni di rischio idraulico relativamente al Torrente Tremana nella parte urbana a sud della Circonvallazione SS470. L'attuale tombinatura presenta una sezione rettangolare mediamente di larghezza 3.0 m ma di altezza decrescente man mano che si giunge alla confluenza con il T. Morla. Come già evidenziato nello studio idrogeologico ed idraulico redatto dallo Studio Telò e dall'Ing. Murachelli, questa tombinatura è risultata insufficiente per il deflusso della piena con eventi con Tr 200 anni determinando sovralti in prossimità dei chiusini di ispezione che determinerebbero fuoriuscite di una parte dei deflussi di piena. In ragione della topografia e del carico idraulico sulla tombinatura, tali deflussi superficiali sono stimabili con battenti massimi dell'ordine di 30-40 cm e si svilupperebbero lungo l'asta del Tremana discendendo la Via Celestini a partire dalla tratta tra i picchetti 06-07-08 e tra i picchetti 15-16-17-18

In prossimità dell'oratorio di Borgo Santa Caterina il Tremana compie un curva in destra di 90° e qui alcuni pozzetti ricado in una zona più depressa ove per eventi con Tr 200 anni i battenti presumibili potrebbero essere anche superiori a 50cm. L'intera area dei condomini posti a nord dell'ultimo tratto del T. Tremana potrebbe essere soggetta ad esondazioni in ragione delle quote depresse dei piani ribassati. Queste ultime insufficienze sono legate alla quota altimetrica del piano campagna inferiore alla quota di piena del T. Morla e quindi esulano da insufficienze del Tremana e non si estendono sino all'area dello Stadio bensì interessano le aree depresse degli interrati e la zona a discendere dalla Via Celestini.

Tali fenomeni nella zona terminale del T Tremana si potrebbero verificare anche in caso di eventi con Tr 100 anni. Nella parte centrale del T. Tremana, quindi in zona Stadio, con eventi con Tr 100 anni non si evidenziano possibili esondazioni ma la tombinatura presenta un funzionamento in pressione con carico di poco inferiore al piano campagna.

Per quanto concerne il T. Morla si è puntata l'attenzione sulla tratta dal ponte di Via Baioni sino all'inizio della tombinatura di Borgo Santa Caterina. In questa tratta le insufficienze riscontrate sono circoscritte ad eventi con Tr 200 e solo in sponda destra a monte del ponte privato posto immediatamente a valle della curva del T. Morla. Le problematiche localizzate sono riscontrabili dalla condizione molto particolare della tratta con una doppia curva di 90° del T. Morla con raggio di curvatura abbastanza contenuto, lo scarico dello sfioratore S48 dalla Via Ghirardelli, la presenza del ponte privato a servizio del condominio e, immediatamente a valle dello stesso, la confluenza con il T. Tremana esattamente perpendicolare al T. Morla. Per quanto riguarda il funzionamento dello sfioratore S48 questo è evidentemente rigurgitato. Ad ogni modo la dinamica del T. Morla non raggiunge l'area del futuro parcheggio interrato.

Nel progetto generale del T. Morla (Studio Telò e Ing. Murachelli) sono illustrate alcune soluzioni per ridurre il colmo di portata del Morla di circa 7-9 [m³/s]. Questo intervento si traduce in una riduzione dei battenti di circa 25 cm nella zona della confluenza con il T. Tremana. L'insufficienza in sponda destra del T. Morla sarebbe risolta seppur con franchi molto limitati soprattutto considerando le tolleranze di calcolo e la soggettiva attribuzione dei coefficienti di scabrezza del corso d'acqua.

Infine il presente studio ha analizzato la compatibilità dell'intervento relativo alla formazione del parcheggio interrato e della relativa rampa di accesso con la futura realizzazione dello scolmatore del T. Tremana come indicato nello studio idraulico di Telò e Murachelli. In particolare si è verificato come **l'opera**

non precluda l'esecuzione ed il transito dello scolmatore in quanto la rampa di accesso al parcheggio sottopasserà la fognatura e quindi anche la futura condotta di bypass. In questa sede, per poter verificare la compatibilità con il canale di bypass, è stato ipotizzato un tracciato rettilineo dello scolmatore lungo Viale Giulio Cesare assumendo la sezione indicata nello studio a scala di sottobacino pari a \varnothing 120cm e accettando un funzionamento in pressione per tale condotta. Un'alternativa alla realizzazione del bypass è quella di prevedere una laminazione delle portate del Tremana a monte dovendo però interessare aree in grado di accogliere volumi di laminazione di almeno 8500-9.000 mc.

Con la realizzazione dello scolmatore sul T. Tremana o di opere di laminazione a monte, le insufficienze riscontrate lungo l'asta del Tremana per eventi bicentenari verrebbero eliminate ponendo in sicurezza l'intervento relativo al parcheggio interrato. Ad oggi, per via della convenzione tra Regione Lombardia e Comune di Bergamo, è in corso di affidamento la progettazione definitiva ed esecutiva dello scolmatore sul Tremana. L'opera dovrà poi essere finanziata in quanto ad oggi la convenzione è solo per la fase progettuale e, in ragione delle verifiche idrauliche effettuate, si sottolinea l'importanza di tale opera da ritenere come strategica per la riduzione del rischio idraulico.

Allo stato attuale e in considerazione del più rapido avanzamento del progetto del parcheggio interrato, occorre mettere comunque in sicurezza l'accesso al parcheggio prevedendo un **franco idraulico netto di 50cm** superiore ai battenti di ruscellamento stradale stimabili in 30cm. Inoltre sarà poi necessario dotare il parcheggio di un **sistema di telecontrollo** in grado di monitorare sia eventuali allagamenti sia i livelli di riempimento del Tremana in modo da sospendere la fruizione del parcheggio. Il monitoraggio dei livelli di riempimento del Tremana sarà particolarmente utile e applicando dei criteri di valutazione in merito alla **velocità di crescita dei battenti** si potrà implementare un sistema di previsione (e non solo di allarme delle'emergenza).

Poiché inoltre è prevista una seconda uscita carrabile oltre che quella pedonale su via Lazzaretto , necessaria per garantire una alternativa all'accesso principale, ai fini della sicurezza nella evacuazione del parcheggio, in fase esecutiva sarà necessario adottare quei provvedimenti atti a mettere in sicurezza l'accesso in questione da eventuali allagamenti

Dalle calcolazioni svolte i livelli di piena del T Morla per il tratto esaminato risultano inferiori al piano viario attuale di via Lazzaretto , come riportato nella Tab. 7.2 (pag 65) il pelo libero corrispondente all'evento di piena di 200 anni risulta essere , in corrispondenza della sezione 05A_MONTE pari a 261,67 , mentre il piano viario in corrispondenza dell'accesso è pari a 262,80/262,90 Per quanto riguarda invece la fuoriuscita dal tombotto del T Tremana in corrispondenza dei pozzetti 15/18 nel caso di eventi di piena di 200 anni le portate in uscita dovrebbero ruscellare lungo la via Dei Celestini verso valle in direzione Borgo Santa Caterina ,qualora i livelli superassero il valore di circa 15 cm. si potrebbe registrare anche un deflusso verso il piazzale Goisis attraverso la via Dorando Petri e raggiungere anche il secondo accesso carrabile e pedonale Questa eventualità sicuramente eccezionale con quella da non escludere a priori di insufficienza della rete fognaria consigliano di sviluppare in fase esecutiva soluzioni sulla messa in sicurezza anche di questi accessi.

Infine il presente studio ha analizzato l'interferenza della rete fognaria esistente sui corsi d'acqua indagati definendo quindi il bacino indiretto che il sistema di drenaggio urbano devia nel corpo idrico superficiale. Dal punto di vista dell'invarianza idraulica, il progetto del P.A. prevede la deviazione di una superficie di oltre 24.000 mq a opportune vasche di laminazione con scarico laminato da impianti di sollevamento meccanico. Questo nuovo schema consente di eliminare un collettore \varnothing 50 cm ed un collettore \varnothing 80 cm che

attualmente scaricano gli apporti meteorici tal quali nella fognatura di Viale Giulio Cesare. L'alleggerimento della fognatura comporta un beneficio all'intero collettore principale che discende verso Piazzale Oberdan. Nella progettazione dello bypass del T. Tremana potrà anche essere valutata la possibilità di realizzare un nuovo scolmatore sulla rete fognaria in modo da alleggerire ulteriormente il carico idraulico compatibilmente con le quote di scarico nel T. Morla.

Bergamo, febbraio 2018

Dott. Ing. Sergio TACCOLINI

Dott. Ing. Fabio GAGNI

APPENDICE A: METODO SCS CURVE NUMBER

Generalità

Questo metodo, messo a punto dal Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti [U.S. Dept. Agric., Soil Conservation Service, 1972], è generalmente noto come metodo del "numero di curva" dalla denominazione inglese di Curve Number, che deriva dal simbolo usato per la sua parametrizzazione, CN. Il metodo ipotizza che, in un evento di piena, il volume specifico del deflusso superficiale, P , sia proporzionale a quello precipitato, I , depurato dell'assorbimento iniziale, I_a , in ragione del rapporto tra volume specifico infiltrato, F , e un volume specifico, S , che caratterizza la massima ritenzione potenziale del terreno. Nell'ipotesi che

$$\frac{F}{S} = \frac{P}{I - I_a} \quad (\text{A.1})$$

il bilancio di massa

$$F = I - I_a - P \quad (\text{A.2})$$

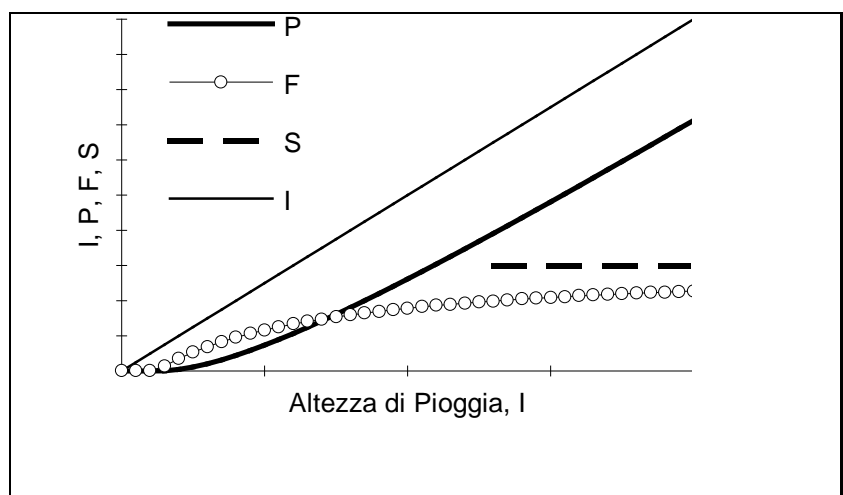
consente di ottenere la relazione

$$P = \frac{(I - I_a)^2}{I - I_a + S}, \quad (\text{A.3})$$

che fornisce la stima del volume specifico di ruscellamento in funzione di quello di pioggia e di due parametri caratteristici del bacino: la capacità di assorbimento iniziale, I_a , e la massima ritenzione idrica potenziale, S (v. Fig. A.1).

Figura A.1

Relazione tra pioggia netta, P , e pioggia lorda, I , secondo il metodo SCS-CN.



Per una certo stato iniziale di imbibimento del bacino al verificarsi di un nubifragio, la massima ritenzione potenziale, S , dipende fundamentalmente dalla combinazione di due fattori, la natura del terreno e l'uso del suolo. Il loro effetto viene rappresentato globalmente dal parametro adimensionale CN , legato a S dalla relazione

$$S = S_0 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (\text{A.4})$$

dove $0 < CN \leq 100$, e S_0 è una costante di scala dimensionale, che riflette l'unità di misura adottata e che, per valori di S , F , I e P misurati in mm , è pari a $254 mm$, ovvero $10 pollici$.

Il metodo *SCS Curve Number* prevede la stima di due parametri, I_G e S , ovvero CN . In realtà, il termine di assorbimento iniziale I_G , che rappresenta il volume specifico di pioggia sottratto a priori al bilancio in esame e descrive in modo globale un certo numero di processi differenti, quali l'intercettazione da parte della vegetazione, l'accumulo nelle depressioni superficiali, e l'imbibimento iniziale del terreno, non è facilmente valutabile. Così definito, infatti, esso risulterebbe di difficile taratura, dovendo tenere conto di fattori climatici, geopedologici, e antropici assai complessi. Poichè i dati sperimentali indicano come questo parametro risulti sempre abbastanza correlato con la massima ritenzione potenziale, S , la procedura consigliata da *U.S. Dept. Agric., Soil Conservation Service (1972)* suggerisce, anche per ovviare alle difficoltà di taratura, di esprimerne, almeno in prima approssimazione, una stima basata semplicemente su una quota parte di S , ponendo cioè $I_G = cS$, dove il coefficiente c viene generalmente assunto pari a 0.2 .

Poichè il rifiuto del terreno è un fenomeno dinamico, che dipende dallo stato del sistema, ovvero dello stato di imbibimento del bacino, si assume che il valore di CN possa variare in relazione alle condizioni iniziali di imbibimento all'atto della piena. Lo stato di imbibimento viene espresso, in modo quali-quantitativo, in base ad un indice di pioggia, ovvero la pioggia totale caduta nei cinque giorni che precedono l'evento di piena, API_5 (*Antecedent Precipitation Index*). A seconda del valore di API_5 , vengono identificate tre classi, AMC (*Antecedent Moisture Condition*) I, II e III, che rappresentano rispettivamente terreno inizialmente asciutto, mediamente imbibito e fortemente imbibito (v. Tabella A.1). Noto il valore di CN per le condizioni medie di imbibimento, ossia CN_{II} , i valori relativi alle classi AMC I e III si possono valutare rispettivamente tramite le relazioni

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2.38 - 0.0138 CN_{II}}, \quad (\text{A.5})$$

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0.43 + 0.0057 CN_{II}}. \quad (\text{A.6})$$

Parametrizzazione

Per una data condizione AMC , il valore di CN dipende, innanzi tutto, dalle caratteristiche idrologiche del suolo, in relazione alla maggiore e minore permeabilità (v. Tabella A.2a, b, c). Per identificare il *tipo idrologico di suolo* bisogna analizzare le caratteristiche geopedologiche del bacino. A tal scopo, si può

anche adottare il procedimento di valutazione proposto da Borselli et al. (1992), che prevede la stima di un indice geopedologico supplementare, Π . Il valore di Π viene calcolato come somma di due indici, che tengono separatamente conto delle caratteristiche strutturali e di tessitura del suolo, Π_1 , e della permeabilità del terreno, Π_2 . I valori caratteristici degli indici Π_1 e Π_2 sono riportati rispettivamente nelle Tabelle A.2a e b.

Dato il *tipo idrologico di suolo*, il valore di CN varia, anche notevolmente, a seconda della tipologia di *uso del suolo* stesso, ossia della sua copertura vegetale e del suo grado di antropizzazione. Nella Tabella A.3 si riportano i valori caratteristici di taratura del parametro CN , il cui valore si ottiene per incrocio delle caratteristiche idrologiche del suolo, secondo i 4 tipi idrologici A-B-C-D a permeabilità decrescente, e delle caratteristiche di uso prevalente del suolo e, più in generale, del territorio. I valori riportati si riferiscono a condizioni di imbibimento medie all'atto dell'evento di piena, ossia per AMC di tipo II, e forniscono quindi il valore di CN_{II} .

Va infine rilevato che, nei bacini idrografici, si riscontra generalmente una elevata variabilità spaziale, sia per quanto riguarda il tipo idrologico del suolo, sia per l'uso del suolo. Si consiglia, pertanto, di determinare il valore (medio) caratteristico del parametro S a scala di bacino integrando nello spazio i diversi valori di S , e non quelli di CN , a causa della relazione non-lineare che intercorre tra questi due parametri (Carrara et al., 1988).

Tabella A.1 - Definizione dello stato di imbibimento del terreno.

Classe	Pioggia totale nei 5 giorni antecedenti l'evento	
	Stagione di riposo vegetativo	Stagione di crescita
I	< 13 mm	< 36 mm
II	13 ÷ ÷ 28 mm	36 ÷ ÷ 53 mm
III	> 28 mm	> 53 mm

Tabella A.2a -Indice geopedologico, Π_1 , in funzione delle caratteristiche di tessitura e di struttura del suolo.

Tessitura	Struttura		
	Forte, Incoerente	Moderata	Debole, Lamellare Massiva
Grossolana	1	2	3
Media	4	5	6
Fine	7	8	9

Tabella A.2b- Indice geopedologico di permeabilità, Π_2 .

Permeabilità orizzonte superiore, in cm/ora	Riduzione permeabilità orizzonte inferiore	Profondità a cui inizia la riduzione di permeabilità, in cm			
		<25.4	25.4÷51	51÷102	>102
>12	piccola	-	-	-	1÷2
	moderata	5÷7	3÷4	2÷3	1÷2
	pronunciata	10	8÷10	4÷8	1÷3
6÷12	piccola	-	-	-	5÷6
	moderata	6÷8	4÷5	3÷4	5÷6
	pronunciata	10	8÷10	5÷7	7÷8
2÷6	piccola	-	-	-	5÷6
	moderata	7÷8	6÷7	5÷6	5÷6
	pronunciata	9÷10	8÷9	7÷8	7÷8
0.5÷2	piccola	-	-	-	7÷8
	moderata	8÷9	7÷8	5÷6	5÷6
	pronunciata	9÷10	8÷9	7÷8	7÷8
<0.5	piccola	-	-	-	9÷10
	moderata	9÷10	9÷10	9÷10	9÷10
	pronunciata	9÷10	9÷10	9÷10	9÷10

Tabella A.2c- Tipi idrologici di suolo e relativi valori dell'indice geopedologico, $\Pi = \Pi_1 + \Pi_2$.

←Tipo Idrologico di Suolo →			
A (0÷≤ Π ≤5)	B (6÷≤ Π ≤10)	C (11÷≤ Π ≤15)	D (16÷≤ Π ≤19)
sabbie profonde, terriccio marnoso profondo, limosi e sabbiosi	sabbie argillose, terriccio marnoso sottile	Argille sabbiose, suoli poveri di contenuti organici, suoli ricchi di componenti argillosi	suoli con tendenza al rigonfiamento in presenza di umidità, argille plastiche, suoli salini

Tabella A.3 - Valori caratteristici del parametro CN_{II} per le zone rurali, ottenuti incrociando il tipo idrologico di suolo con le caratteristiche di copertura vegetale.

Valori del parametro CN_{II}	←Tipo Idrologico Suolo →			
↓ Copertura vegetale	A	B	C	D
Zone Umide				
Pascolo in cattive/discrete/buone condizioni ¹	68/49/39	79/69/61	86/79/74	89/84/80
Prato protetto dal pascolo e soggetto a fienagione	≤30	58	71	78
Sterpaglia in cattive/discrete/buone condizioni ²	48/35/30	67/56/48	77/70/65	83/77/73
Bosco in cattive/discrete/buone condizioni ³	45/36/25	66/60/55	77/73/70	83/79/77

¹cattive condizioni: copertura inferiore al 50% e elevato sfruttamento; discrete condizioni: copertura tra il 50 e il 75% e modesto sfruttamento; buone condizioni: copertura superiore al 75% e sfruttamento saltuario.

²cattive/discrete/buone condizioni: copertura inferiore al 50%, tra il 50 e il 75%, superiore al 75%.

³cattive condizioni: sottobosco soggetto a sfruttamento e distruzione per via degli incendi; discrete condizioni: sottobosco soggetto a sfruttamento, ma al riparo dagli incendi; buone condizioni: sottobosco protetto.

APPENDICE B: LINEE SEGNALETRICI SCALA-INVARIANTI

Nell'intento di formulare una relazione statistica tra le altezze di precipitazione di durata fissata e la loro probabilità di occorrenza, si è adottata una metodologia maturata nell'ultimo decennio, ma abbastanza diffusa nella recente pratica progettuale.

Si è innanzitutto ipotizzando che il campione di altezza di precipitazione di durata assegnata appartenga ad una popolazione la cui funzione di distribuzione, come in uso nella pratica progettuale, sia quella del valore estremo del primo tipo (EV1 o di Gumbel).

Nello stimare i momenti dei campioni di altezza di precipitazione di durata prefissata, le varianze di stima soffrono della limitata numerosità dei campioni generalmente disponibili.. Tenendo conto di questo fatto, si è ritenuto opportuno confrontare la procedura, tradizionale, di regolarizzazione dei quantili con i risultati forniti da metodologie di stima che ipotizzano la cosiddetta proprietà dell'invarianza di scala, rispetto alla durata, dei momenti di primo e secondo ordine rispetto all'origine delle altezze di precipitazione (Burlando e Rosso, 1996; Ranzi et al., 1999)

In base a questa proprietà, frequentemente riconoscibile nell'analisi statistica di variabili idrologiche, si suppone che sia possibile esprimere i momenti campionari mediante relazioni del tipo

$$E[h_d] = E[h_1]d^{n_1} = m_1 d^{n_1} \quad (B.1)$$

$$E[h_d^2] = E[h_1^2]d^{2n_1} = m_2 d^{2n_1}, \quad (B.2)$$

ove $E[\cdot]$ indica la media della grandezza racchiusa tra parentesi.

Questo sta ad indicare che, come osservato, ad esempio, da Moisello (1976) nell'analisi delle precipitazioni intense di Milano, il coefficiente di variazione dei campioni di altezza di precipitazione sarebbe costante, in senso statistico, rispetto alla loro durata. Infatti, supposte valide le (2.3) e (2.4), risulta:

$$V_d = \frac{\sigma_d}{\mu_d} = \frac{\sqrt{E[h_d^2] - E^2[h_d]}}{E[h_d]} = \frac{\sqrt{m_2 d^{2n_1} - m_1^2 d^{2n_1}}}{m_1 d^{n_1}} = \frac{\sqrt{m_2 - m_1^2}}{m_1} = V = cost \quad (B.3)$$

Per l'applicazione, l'ipotesi deve naturalmente essere confermata dai valori osservati delle grandezze considerate.

Valendo questa proprietà, ne consegue che, stimati, mediante regressione logaritmica, i parametri m_1 ed n_1 e il coefficiente di variazione medio per le cinque durate di interesse, V , e assunto, per ciascuna durata, il medesimo modello probabilistico EV1 i corrispondenti quantili sono esprimibili mediante la relazione

$$h(d, T) = m_1 \left\{ 1 - \frac{V}{1.283} \left[0.5772 + \ln \left(\ln \frac{T}{T-1} \right) \right] \right\} d^{n_1} \quad (B.4)$$

Si riconosce, quindi, un'espressione analitica per le linee segnalatrici di probabilità pluviometrica, ancora del tipo

$$h(d, T) = a_T d^{n_1} \quad (\text{B.5})$$

in cui la costante a_T , funzione del tempo di ritorno, risulta per il modello EV1

$$a_T = m_1 \left\{ 1 - \frac{V}{1.283} \left[0.5772 + \ln \left(\ln \frac{T}{T-1} \right) \right] \right\} \quad (\text{B.6})$$

mentre l'esponente di scala, n_1 , a differenza del più tradizionale metodo dei quantili regolarizzati, è costante al variare del tempo di ritorno. In questo caso il numero di parametri da stimare è pari a tre, mentre il metodo della regressione dei quantili richiede la stima di due parametri per ogni durata presa in esame e di altri due parametri per la regressione dei quantili per ogni tempo di ritorno di interesse.

BIBLIOGRAFIA

- Studio Telò e A. Murachelli: Studio idrogeologico, idraulico ed ambientale a scala di sottobacino del Torrente Morla e delle Rogge ad esso connesse, 2015
- Autorità di Bacino del Fiume Po - Studio idraulico del Torrente Morla "MONOGRAFIA DEL TORRENTE MORLA – SOTTOPROGETTO SP 1.4", 2002
- Pasinetti, Comune di Bergamo "Studio idraulico del Torrente Morla finalizzato al rinnovo delle concessioni di copertura, sottopassi fognari e scarichi di sfioratori", 2004.
- AA.VV.: *Sistemi di fognatura e di drenaggio urbano*, Paoletti A. (Ed.), Seconda Edizione, Edizioni CUSL, Milano, 1997
- Bacchi, B., Armanelli, B. e E. Rossini: Valutazione delle portate di piena della provincia di Brescia, Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Brescia, *Technical Report* N.11, 1999
- Bonomi, G. e C. Cesaretti: *Valutazione del rischio idraulico in condizione di criticità delle opere di regimazione* (Coord. G. Ferretti), Provincia di Brescia & S. Lago d'Idro, 1995
- Brath, A., De Michele, C, Galeati, G. e R. Rosso: Una metodologia per l'identificazione di regioni omogenee nel regime di piena: applicazione all'Italia Nord-Occidentale, *L'Acqua*, 1, p.17-26, 1997
- Burlando, P. e R. Rosso: Scaling and multiscaling models of depth-duration-frequency curves of storm precipitation, *Journal of Hydrology*, 187, 1996
- Chow, V.T., Maidment D. R. & Mays L.W.: *Applied Hidrology*, Mc Grow Hill, New York, 1988
- Gabriele, S. e G. Iritano: *Alcuni aspetti teorici e applicativi nella regionalizzazione delle piogge con il modello TCEV*, Pub. N° 1089, CNR-GNDICI, 1994
- Giandotti, M: Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua, Ministero dei LL.PP., Servizio Idrografico Italiano, *Memorie e Studi Idrografici*, vol.8, Roma, 1934
- Keifer, C.J. e H.H. Chu: Synthetic storm pattern for drainage design, *ASCE-Journal of the Hydraulic Divion*, 83, HY4, 1957
- Marchetti M.: Fognature urbane , *Appunti delle lezioni Istituto di idraulica del Politecnico di Milano*, 1963-64
- Moisello, U.: Il regime delle piogge intense di Milano, *Ingegneria Ambientale*, N.6, 1976
- Moisello, U. e S. Papiri: Relazione tra altezza di pioggia puntuale e ragguagliata, *Atti del Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, p.615-631, Padova 8-10 Sett. 1986
- Moisello, U.: *Idrologia tecnica*, La Goliardica Pavese, 1998
- Ranzi, R., Mariani, M., Armanelli, B., Rossini, E. e B. Bacchi: Analisi e sintesi delle piogge intense del territorio bresciano, Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Brescia, *Technical Report* N.12, 1999
- Ranzi, R. e R. Rosso: FLEA® (Flood Event Analyzer), Manuale d'uso, HARPACEAS Milano, 1997
- U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service: National Engineering Handbook