



PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA
(D.Lgs 36/2023 art.41 comma 6 - Allegato I.7)



COMUNE DI INCUDINE

Provincia di Brescia

INTERVENTI INTEGRATI DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO E DI TUTELA E RECUPERO DEGLI ECOSISTEMI E DELLA BIODIVERSITA' NEL FIUME OGLIO

CUP: B88H25000930002

CODICE ODSM ID 6344025 – D.G.R. 14 LUGLIO 2025, NXII/4736

ALLEGATO C Relazione Idraulica



IL SINDACO
IL RESPONSABILE UNICO DEL PROGETTO
DIEGO CARLI

PROFESSIONISTI INCARICATI
PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA
CO&SA ENGINEERING S.R.L. TECHNOLOGY AND CONSULTING
Pavia - 27100, Via Enrica Malcovati n.° 2, Tel. 0382/22708, e-mail: coesasrl.pavia@gmail.com
Tecnici Responsabili:
Ing. LUIGI BALDINI, iscritto all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Pavia al n.°944 - Direttore Tecnico
Arch. STEFANIA PAREI, iscritta all'Ordine degli Architetti della Provincia di Pavia al n.° 1008 sez. A
Geom. ELIO FERRARI, iscritto all'Albo del Collegio dei Geometri della Provincia di Pavia al n.° 1974
Geom. TERESA GRASSO, iscritto all'Albo del Collegio dei Geometri della Provincia di Pavia al n.° 4357
Arch. VERONICA REALE, iscritta all'Ordine degli Architetti della Provincia di Pavia al n.° 1269 sez. A

RELAZIONE GEOLOGICA ED IDRAULICA:
Dott. Geol. GILBERTO ZAINA, iscritto all'Ordine Regionale dei Geologi della Lombardia al n.° 916
Darfo Boario Terme (BS) - 25047, Via Albera n.° 3, Tel. 339-3078674, e-mail: gilbertozaina@geasncservizi.com

RILIEVO TOPOGRAFICO:
STUDIO TECNICO SALVETTI
Malonno (BS) - 25040, Via IV Novembre n.° 60, Tel. 0364-657012, e-mail: info@studiotecnicosalvetti.it
Geom. OMAR SALVETTI, iscritto all'Albo del Collegio dei Geometri della Provincia di Brescia al n.° 4819

DATA ELABORAZIONE:
GENNAIO 2026

AGGIORNAMENTI

RAPPRESENTAZIONE

RIFERIMENTO
CO&SA S.R.L.
01/2026

INTERVENTI INTEGRATI DI
MITIGAZIONE DEL RISCHIO
IDROGEOLOGICO E DI TUTELA E
RECUPERO DEGLI ECOSISTEMI E
DELLA BIODIVERSITÀ
DEL FIUME OGlio

CIG: B90220FF62

Relazione idraulica

Committente:
Comune di Incudine
Via Sandro Pertini, n. 40
Incudine (BS)

DICEMBRE 2025

Dott. Geol.
Gilberto Zaina

Sommario

1	Premessa	3
2	Ubicazione	4
3	Aspetti idrografici	5
4	Pericolosità e rischio idraulico	8
4.1	Il Piano di Assetto Idrogeologico – PAI	8
4.2	Il Piano di Gestione del Rischio Alluvioni	10
4.2.1	Mappe della pericolosità per esondazione	10
4.2.2	Le mappe del rischio	12
5	Aspetti idrologici ed idraulici	14
5.1	Precipitazioni intense	14
5.2	Ricostruzione degli ietogrammi di piena	15
5.2.1	Il Modello CN	16
5.3	Taratura del modello	18
6	Stima della portata di massima piena: il modello SCS	21
7	Stato di fatto: verifiche idrauliche	22
7.1	Aspetti geometrici e morfologici	22
7.2	Modellazione del deflusso di piena	22
7.2.1	Il Modello di calcolo	22
7.2.2	Il coefficiente di Manning	23
7.3	Restituzione dati	24
8	Verifica della instabilità dei massi accatastati	36
8.1	Il modello Armanini A. & Scotton P. (1995).	36
8.2	Valutazione della stabilità dei massi presenti	37
9	Indicazioni progettuali	39
9.1	Linee d'intervento	40
9.2	Aspetti idraulici	40
10	Il rischio residuo	44
10.1	La pericolosità residua	44
10.2	Valutazione del danno	45
10.2.1	Danno associato alla presenza umana (D_p)	45
10.2.2	Danno associato alle attività economiche (D_e)	45
10.3	Determinazione del rischio	46

1 Premessa

Il tratto di fondovalle della Valcamonica all'altezza dell'abitato di Incudine (BS) è interessato da processi legati alla dinamica torrentizia del Fiume Oglio: la pericolosità del settore è ribadita nella CARTA DEL DISSESTO del PAI – Piano di Assetto Idrogeologico e nella CARTA DEL RISCHIO del PGRA - Piano di Gestione del Rischio Idraulico dell'Autorità di Bacino del Po. Lungo il tratto di corso d'acqua sono presenti opere di regimazione idraulica che, come sottolineato nello studio ESONDAZIONE E DISSESTI MORFOLOGICI DI CARATTERE FLUVIO-TORRENTIZIO LUNGO IL FIUME OGlio DA PONTE DI LEGNO AD INCUDINE redatto nel settembre 2008 per conto della Comunità Montana della Valle Camonica, risultano a tratti insufficienti per la completa difesa idraulica delle aree.

Come riportato in D.g.r. 14 luglio 2025 - n. XII/4736 Piano Lombardia (l.r. 9/2020): programma 2025/2027 di interventi urgenti e prioritari per la difesa del suolo e la mitigazione dei rischi idrogeologici del territorio e approvazione del relativo schema di disposizioni tecnico amministrative, il Comune di Incudine (BS) è risultato destinatario del finanziamento per la realizzazione degli **INTERVENTI INTEGRATI DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO E DI TUTELA E RECUPERO DEGLI ECOSISTEMI E DELLA BIODIVERSITÀ DEL FIUME OGlio**. Nella presente relazione idraulica, redatta su incarico dell'Amministrazione Comunale di Incudine (Determinazione del RSLP n. 95 del 03/11/2025 - CIG: B90220FF62) è analizzata la pericolosità idraulica del Fiume Oglio ed indicate le possibili linee d'intervento per la mitigazione del rischio delle aree a margine del tratto di alveo posto a valle del Ponte del Municipio.

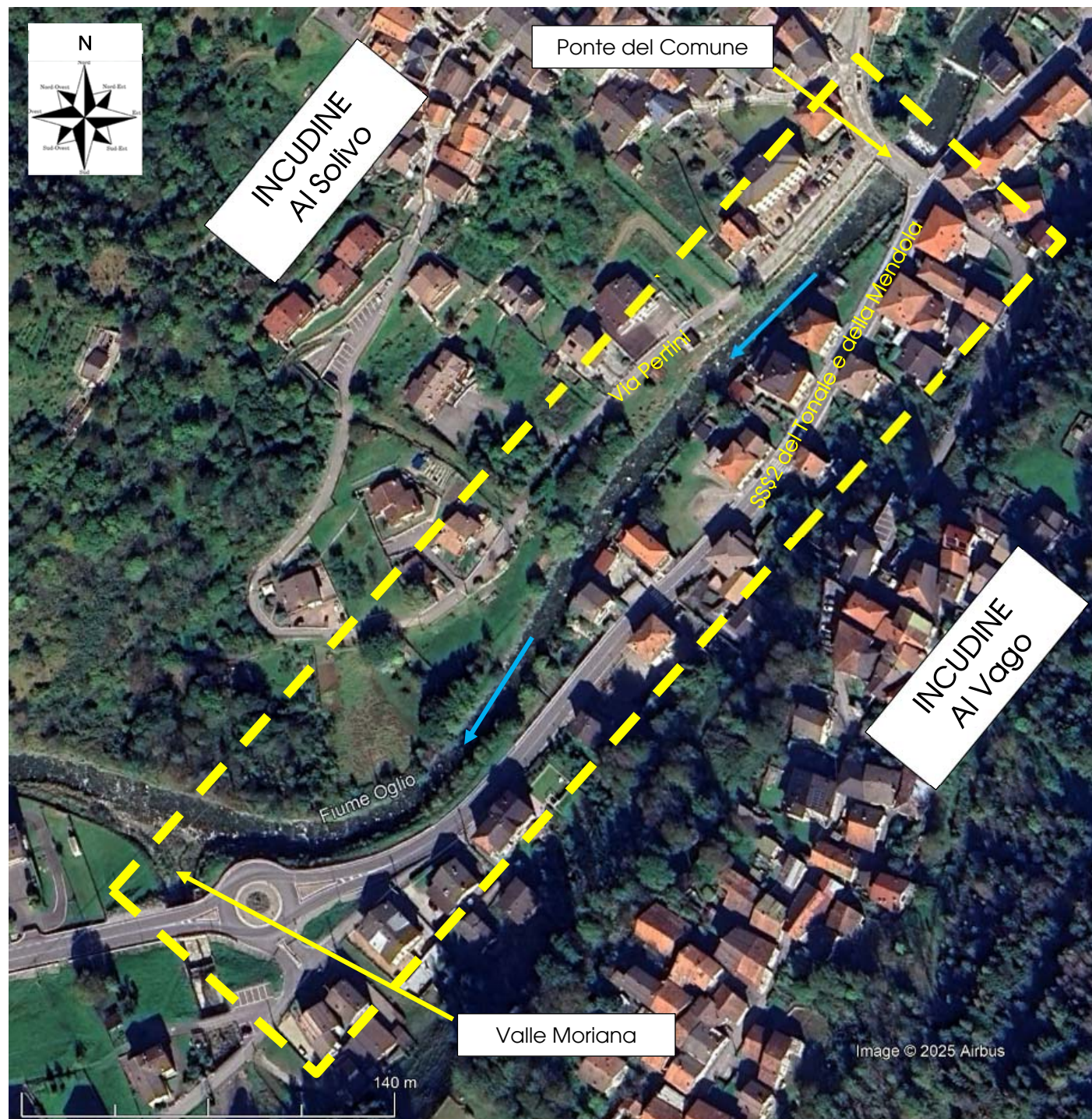
Lo studio è redatto in accordo con i contenuti di:

- Autorità di Bacino del Fiume Po. Piano per la valutazione e la gestione del rischio alluvioni (art. 7 della Direttiva 2007/60/CE e del D.lgs. n. 49 del 23.02.2010 – Profili di piena dei corsi d'acqua del reticolo principale (MARZO 2016)
- Legge Regionale 15 marzo 2016, n. 4 – Revisione della normativa regionale in materia di difesa del suolo, di prevenzione e mitigazione del rischio idrogeologico e di gestione dei corsi d'acqua.
- D.G.R. 19 giugno 2017 - n. X/6738 Disposizioni regionali concernenti l'attuazione del piano di gestione dei rischi di alluvione (PGRA) nel settore urbanistico e di pianificazione dell'emergenza, ai sensi dell'art. 58 delle norme di attuazione del piano stralcio per l'assetto idrogeologico (PAI) del bacino del Fiume Po così come integrate dalla variante adottata in data 7 dicembre 2016 con deliberazione n. 5 dal comitato istituzionale dell'autorità di bacino del Fiume Po
- ISPRA Manuali e linee guida 82/2012 - Proposta metodologica per l'aggiornamento delle mappe di pericolosità e di rischio/ della Direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi da alluvioni (Decreto Legislativo n. 49/2010).
- Piano di Gestione dei Rischi di Alluvioni – PGRA (2015).

2 Ubicazione

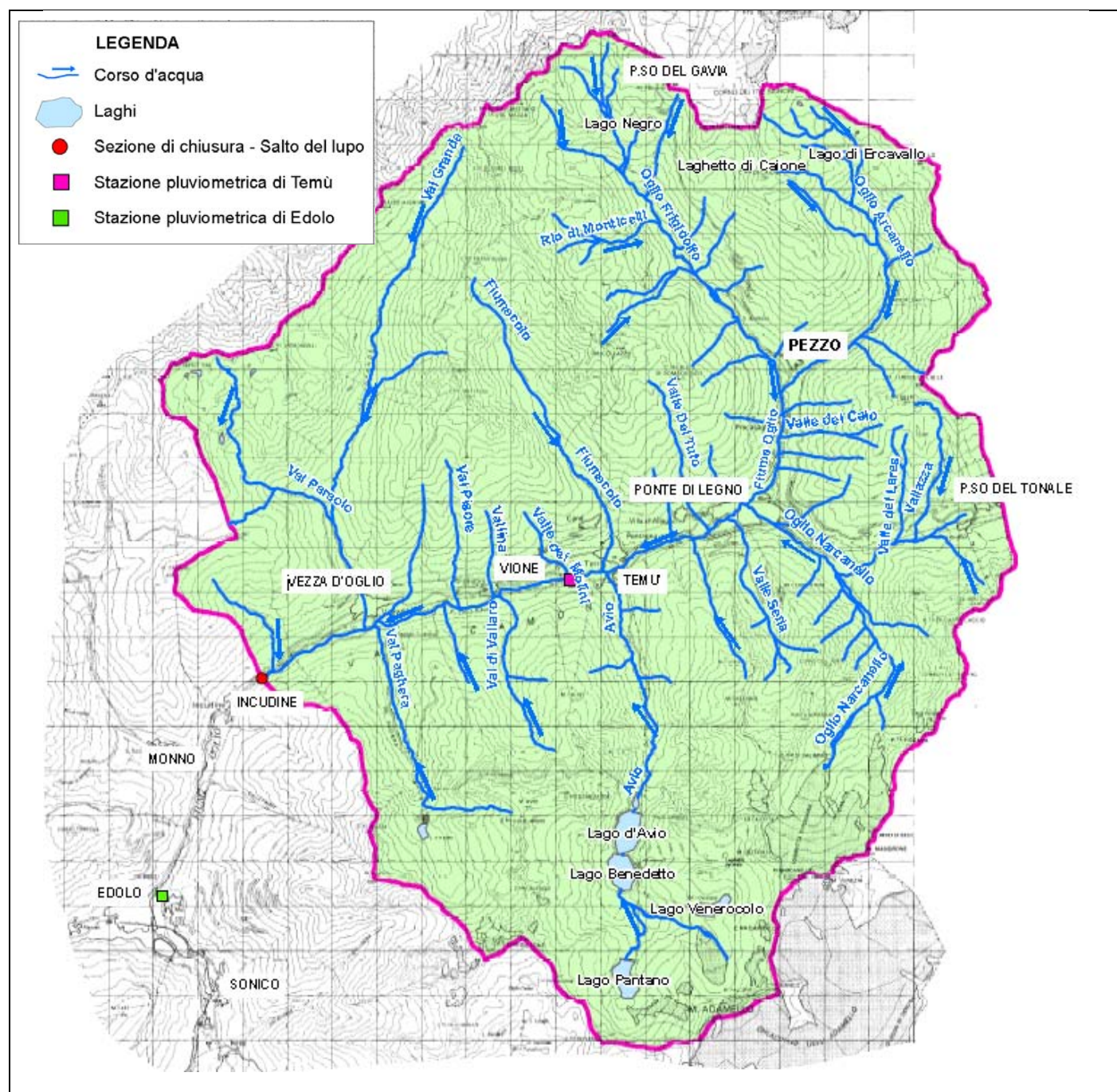
Il tratto di Fiume Oglio interessato dai lavori in oggetto si sviluppa nel tratto di fondovalle compreso tra il Ponte del Comune ed il settore sud - occidentale dell'abitato di Incudine, alla confluenza del torrente Valle Moriana in sinistra idrografica.

Di seguito si riporta l'estratto della Ortofoto (volo 2025) riportata in *Google earth*.



3 Aspetti idrografici

Il settore superiore del bacino del Fiume Oglio corrisponde alla porzione più settentrionale della Provincia di Brescia: lo spartiacque in destra idrografica, sotteso dal *Corno dei Tre Signori* a est del Passo Gavia sino alla *Cima del Monte Serottini*, definisce il confine con la Provincia di Sondrio - settore di Alta Valtellina - seguendo una direzione NordEst - SudOvest prevalente; la linea di spartiacque in sinistra idrografica, che segue la linea di cresta dal Passo del Tonale al *Monte Mandrone del Gruppo dell'Adamello*, definisce il confine con la Provincia di Trento (Regione Trentino - Alto Adige). Lungo quest'ultimo tratto la linea di spartiacque è condivisa con i bacini del Fiume Adige (in particolare del bacino del Torrente Noce che dal Passo del Tonale percorre la Val di Sole in direzione Nord-Est), e del Fiume Sarca, nel tratto superiore. Nel complesso, la testata del bacino del Fiume Oglio ha una estensione di **288.5 km²**.



In sintesi, il bacino del F. Oglio sotteso alla sezione posta all'altezza del Ponte del Comune ad Incudine è caratterizzato dai seguenti parametri morfometrici:

Bacino sotteso S	Lunghezza dell'asta L	Altezza massima H _{MAX}	Altezza minima H _{min}	Altezza media H _{med}
275.7 km²	25.0 km	3323.1 m s.l.m. Punta del Venerocolo	930 m s.l.m. Ponte del Comune	2137.5 m s.l.m.

Il Fiume Oglio ha origine a Ponte di Legno dalla confluenza del Torrente Frigidolfo, che percorre la Valle di Pezzo e il Torrente Narcanello.

Il primo ha un bacino idrografico delimitato dalle vette di Punta di Ercavallo - Corno dei Tre Signori - Passo Gavia - Cima di Savoretta - Monte Coleazzo; il Torrente Narcanello prende origine dalla Vedretta del Pissana (Ghiacciaio dell'Adamello), raccoglie le acque della Val Sozzine e del corso d'acqua che scende dal Passo del Tonale.

Nel tratto a valle della confluenza, nel settore compreso fra gli abitati di Pontedilegno e di Vezza d'Oglio, il corso d'acqua scorre con direzione ENE-WSW prevalente; all'altezza dell'abitato di Vezza d'Oglio l'asse vallivo tende a deviare verso sud, per disporsi con direzione N-S immediatamente a valle di Incudine.

Il sistema idrografico dell'Alta Valle Camonica è caratterizzato da una marcata ramificazione, con valli laterali di particolare rilevanza morfologica ed estensione; in ordine, a partire dai settori a quote superiori, le valli laterali principali sono:

in destra idrografica:

- la VALLE DI CANÈ, percorsa dal Torrente Fiumeclo sul cui conoide sorge l'abitato di Temù;
- la VAL GRANDE, percorso dal torrente omonimo sul cui conoide sorge l'abitato di Vezza d'Oglio;
- la VALLE DI DAVENINO, che solca il tratto di versante compreso fra Incudine e Vezza d'Oglio.

In sinistra idrografica:

- VALBIONE, che confluisce nel Fiume Oglio a valle di Ponte di Legno (Località Poia);
- la VAL D'AVIO, di fronte all'abitato di Temù;
- la VAL PAGHERA, all'altezza dell'abitato di Vezza d'Oglio;
- la VAL MORIANA, che insiste sull'abitato al Vago di Incudine.

Numerosi sono gli impluvi di piccole dimensioni con deflussi stagionali o temporanei.

Le aree occupate da ghiacciai perenni sono concentrate alla testata della Val Sozzine (Vedretta del Pissana) e della Valle dell'Avio (porzioni del Ghiacciaio dell'Adamello). Tali porzioni di territorio assumono un'elevata importanza nel regime idrico del corso d'acqua in esame, sia in termini di rilascio che di trattenuta. In mancanza di elementi significativi che possano quantificare l'effettiva influenza del ghiacciaio, tali aree (che occupano una porzione pari al 3.6% della superficie totale del bacino, occupando i settori altimetricamente più elevati).

Il regime idrico del Fiume Oglio, oltre che dalla presenza di aree glaciali, è influenzato dalla presenza di numerose opere di captazione legate allo sfruttamento idroelettrico del corso d'acqua e dei suoi affluenti laterali. I laghi Venerocolo, Pantano, Benedetto, Avio e Laghetto dell'Avio alla testata della Val d'Avio e il lago dell'Avio alla testata della Val Paghera, rappresentano in realtà dei bacini a scopo idroelettrico, contenuti da sbarramenti artificiali impostati in corrispondenza di conche naturali. Le acque raccolte nei bacini alimentano la centrale di Edolo (centrale idroelettrica a pompaggio, con produzione di energia elettrica nel periodo diurno sfruttando il carico idrodinamico delle dighe ed accumulo temporaneo della risorsa idrica nel bacino in Edolo; di notte le acque sono pompate nei bacini di trattenuta).

Prima di raggiungere le condotte forzate poste lungo il versante ovest del Monte Aviolo, le acque sono costrette in una galleria a partire dalle quote inferiori dei bacini d'accumulo. Parte delle acque del Narcanello, sin dalle aree prossime al ghiacciaio, sono condotte entro i bacini della Val d'Avio attraverso una galleria realizzata negli anni '50.

Il versante sinistro della Valle è percorso da un canale di gronda in galleria, che raccoglie tramite griglie poste in alveo le acque della maggior parte dei corsi d'acqua laterali a partire dalla Val Sozzine; anche le acque della Val Grande di Vezza d'Oglio. A valle dell'abitato di Temù, sul fondovalle in sinistra idrografica del Fiume Oglio, è presente un bacino d'accumulo che deriva parte delle acque del corso d'acqua di fondovalle, che vengono a loro volta immesse nel canale che segue il versante sinistro.

La mancanza di informazioni in merito alle effettive operazioni di manovra alle opere di derivazione in occasione degli eventi di piena, ossia la mancanza di dati in merito alle portate derivate o rilasciate, non consente di costruire un modello di deflusso realistico: non è possibile inoltre quantificare le possibili influenze delle stesse opere sulle modalità di deflusso delle acque di piena.

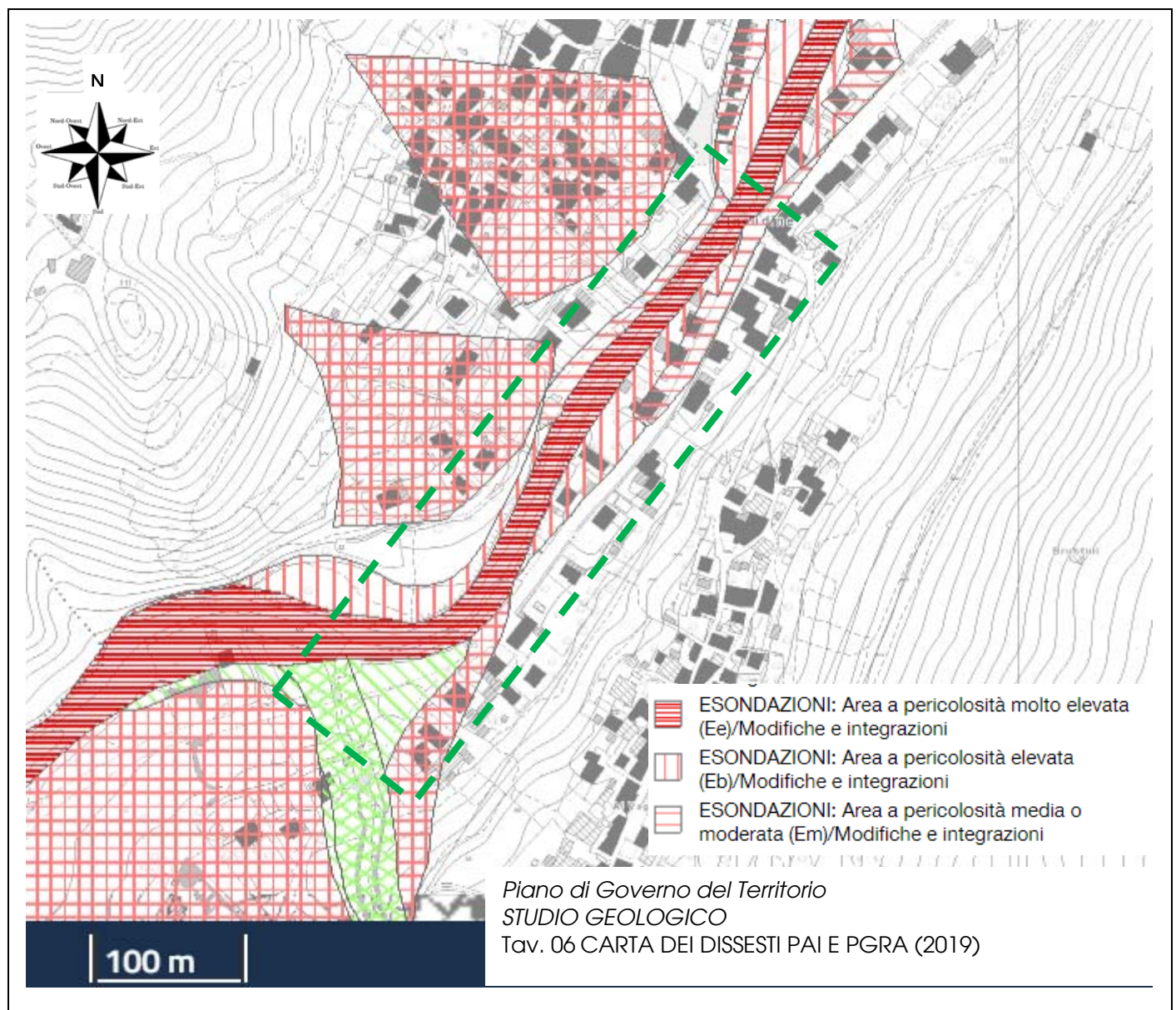
È indiscutibile l'efficacia dei bacini idroelettrici in termini di regolatori del deflusso superficiale e dell'onda di piena mentre non si esclude come errate gestioni dei bacini stessi possano dar luogo ad improvvisi rilasci d'acqua con onde di piena che si propagano lungo l'asta: non è possibile ricostruire la dinamica di propagazione dell'onda di piena massima ma è possibile presumere un effetto catastrofico per le aree di fondovalle ed i settori adiacenti.

4 Pericolosità e rischio idraulico

La pericolosità delle aree di fondovalle in Comune di Incudine è stata valutata nell'ambito dello studio ESONDAZIONE E DISSESTI MORFOLOGICI DI CARATTERE FLUVIO-TORRENTIZIO LUNGO IL FIUME OGlio DA PONTE DI LEGNO AD INCUDINE (2008); le perimetrazioni sono state recepite nella CARTA DEL DISSESTO del Piano di Assetto Idrogeologico del PAI e nel Piano Gestione del Rischio Alluvionale (PGRA) dell'Autorità di Bacino del Fiume Po. Di seguito sono sinteticamente illustrati i risultati ottenuti, i significati delle perimetrazioni ed i vincoli.

4.1 Il Piano di Assetto Idrogeologico - PAI

La pericolosità per esondazione del Fiume Oglio è illustrata nell'*Atlante dei rischi idraulici ed idrogeologici - Delimitazione delle aree in dissesto* del PAI come pubblicata nel Geoportale della Regione Lombardia di cui di seguito si riporta un estratto: all'altezza del settore in esame, le aree di fondovalle all'altezza dell'abitato di Incudine ricadono in ambiti perimetrati **Ee** e **Eb** rispettivamente a pericolosità molto elevata e elevata per fenomeni di esondazioni.



Per tali aree vigono le limitazioni introdotte dall'art. 9 delle NTA:

PAI – Piano Di Assetto Idrogeologico

NORME TECNICHE DI ATTUAZIONE

Titolo I – Norme per l'assetto della rete idrografica e dei versanti

Art. 9. Limitazioni alle attività di trasformazione e d'uso del suolo derivanti dalle condizioni di dissesto idraulico e idrogeologico

.....

5. Fatto salvo quanto previsto dall'art. 3 ter del D.L. 12 ottobre 2000, n. 279, convertito in L. 11 dicembre 2000, n. 365, nelle aree Ee sono esclusivamente consentiti:

- gli interventi di demolizione senza ricostruzione;
- gli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria, di restauro e di risanamento conservativo degli edifici, così come definiti alle lettere a), b) e c) dell'art. 31 della L. 5 agosto 1978, n. 457;
- gli interventi volti a mitigare la vulnerabilità degli edifici e degli impianti esistenti e a migliorare la tutela della pubblica incolumità, senza aumenti di superficie e volume, senza cambiamenti di destinazione d'uso che comportino aumento del carico insediativo;
- gli interventi necessari per la manutenzione ordinaria e straordinaria di opere pubbliche e di interesse pubblico e di restauro e di risanamento conservativo di beni di interesse culturale, compatibili con la normativa di tutela;
- i cambiamenti delle destinazioni colturali, purché non interessanti una fascia di ampiezza di 4 m dal ciglio della sponda ai sensi del R.D. 523/1904;
- gli interventi volti alla ricostituzione degli equilibri naturali alterati e alla eliminazione, per quanto possibile, dei fattori incompatibili di interferenza antropica;
- le opere di difesa, di sistemazione idraulica e di monitoraggio dei fenomeni;
- la ristrutturazione e la realizzazione di infrastrutture lineari e a rete riferite a servizi pubblici essenziali non altrimenti localizzabili e relativi impianti, previo studio di compatibilità dell'intervento con lo stato di dissesto esistente validato dall'Autorità competente. Gli interventi devono comunque garantire la sicurezza dell'esercizio delle funzioni per cui sono destinati, tenuto conto delle condizioni idrauliche presenti;
- l'ampliamento o la ristrutturazione degli impianti di trattamento delle acque reflue;
- l'esercizio delle operazioni di smaltimento e recupero dei rifiuti già autorizzate ai sensi del D.Lgs. 5 febbraio 1997, n. 22 (o per le quali sia stata presentata comunicazione di inizio attività, nel rispetto delle norme tecniche e dei requisiti specificati all'art. 31 dello stesso D.Lgs. 22/1997) alla data di entrata in vigore del Piano, limitatamente alla durata dell'autorizzazione stessa. Tale autorizzazione può essere rinnovata fino ad esaurimento della capacità residua derivante dalla autorizzazione originaria per le discariche e fino al termine della vita tecnica per gli impianti a tecnologia complessa, previo studio di compatibilità validato dall'Autorità competente. Alla scadenza devono essere effettuate le operazioni di messa in sicurezza e ripristino del sito, così come definite all'art. 6 del suddetto decreto legislativo.

6. Nelle aree Eb, oltre agli interventi di cui al precedente comma 5, sono consentiti:

- gli interventi di ristrutturazione edilizia, così come definiti alla lettera d) dell'art. 31 della L. 5 agosto 1978, n. 457, senza aumenti di superficie e volume;
- gli interventi di ampliamento degli edifici esistenti per adeguamento igienico funzionale;
- la realizzazione di nuovi impianti di trattamento delle acque reflue;
- il completamento degli esistenti impianti di smaltimento e recupero dei rifiuti a tecnologia complessa, quand'esso risultasse indispensabile per il raggiungimento dell'autonomia degli ambiti territoriali ottimali così come individuati dalla pianificazione regionale e provinciale; i relativi interventi di completamento sono subordinati a uno studio di compatibilità con il presente Piano validato dall'Autorità di bacino, anche sulla base di quanto previsto all'art. 19 bis.

6bis. Nelle aree Em compete alle Regioni e agli Enti locali, attraverso gli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica, regolamentare le attività consentite, i limiti e i divieti, tenuto anche conto delle indicazioni dei programmi di previsione e prevenzione ai sensi della L. 24 febbraio 1992, n. 225. Gli interventi ammissibili devono in ogni caso essere soggetti ad uno studio di compatibilità con le condizioni del dissesto validato dall'Autorità competente.

4.2 Il Piano di Gestione del Rischio Alluvioni

Nell'ambito del Piano Gestione Rischio Alluvioni - PGRA 2022 (che recepisce la Direttiva 2007/60/CE finalizzata alla redazione di mappe di **pericolosità** e del **rischio** da alluvione in accordo ai contenuti Decreto Legislativo n. 49 del 23 febbraio 2010 di "Attuazione della Direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni") sono state definite le aree potenzialmente raggiungibili dalle acque di esondazione dei corsi d'acqua in occasione di eventi alluvionali.

La definizione ha considerato i seguenti SCENARI D'EVENTO, definiti in funzione delle portate di piena associate a diversi tempi di ritorno (TR):

- alluvioni frequenti (TR = 20 - 50 anni).
- alluvioni poco frequenti (TR = 100 - 200 anni);
- alluvioni rare (TR = 500 anni);

La distribuzione delle aree allagabili illustrata nelle mappe di pericolosità è alla base della definizione delle mappe di rischio.

4.2.1 Mappe della pericolosità per esondazione

Nelle mappe di pericolosità sono riportate le perimetrazioni delle aree allagabili definite come:

- AREE P3/H aree potenzialmente interessate da alluvioni frequenti;
- AREE P2/M aree potenzialmente interessate da alluvioni poco frequenti;
- AREE P1/L aree potenzialmente interessate da alluvioni rare.

Per il territorio comunale di Incudine (BS) le aree allagabili sono riferire ad ambiti territoriali appartenenti al **Reticolo secondario collinare e montano (RSCM)** con distinzioni degli scenari secondo il seguente schema:

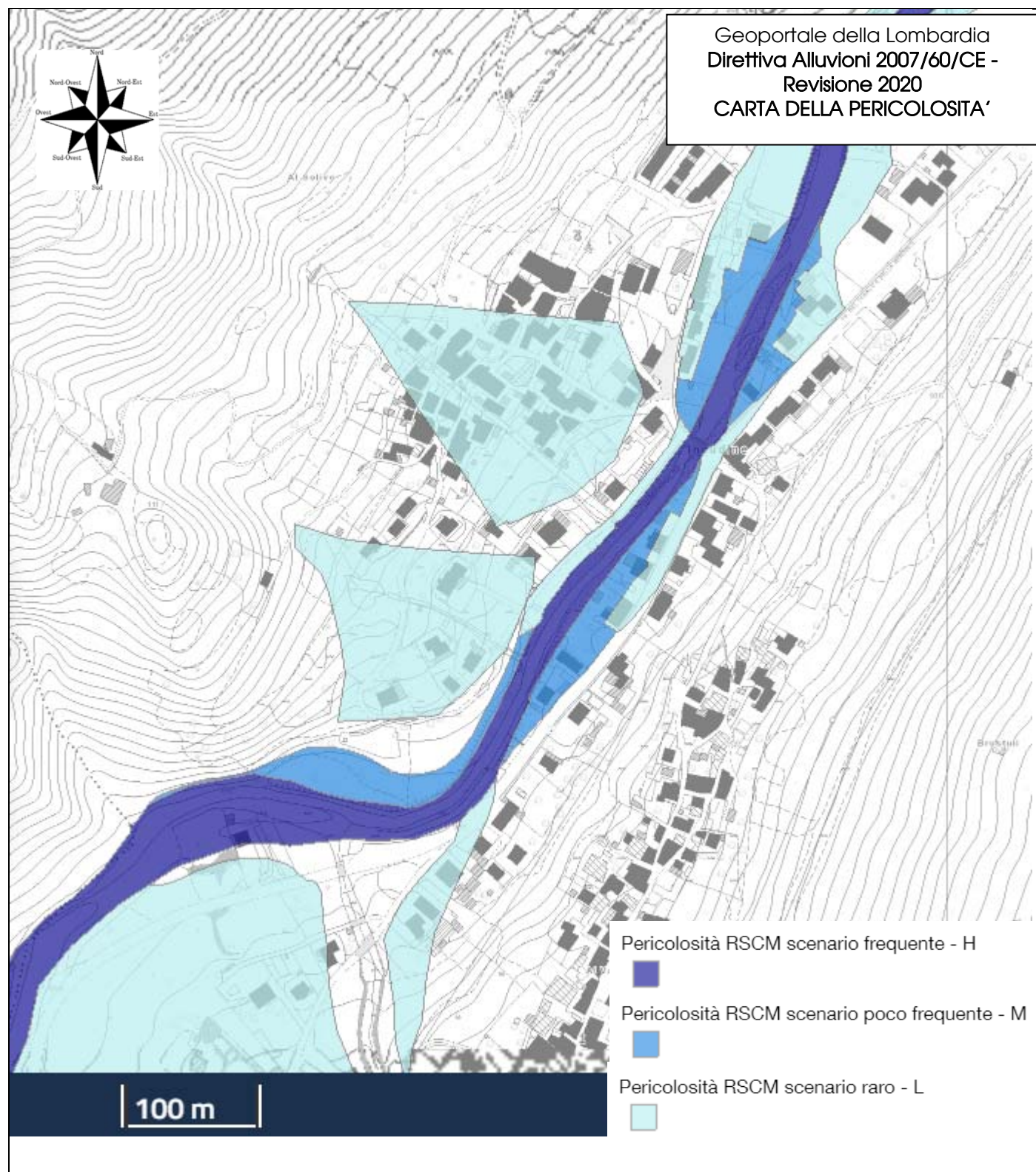
PGRA	AMBITO	SCENARI	
	RSCM Reticolo secondario collinare e montano	Aree potenzialmente interessate da alluvioni	
		H	frequenti
		M	poco frequenti
		L	rare

In accordo ai contenuti di Disposizioni regionali concernenti l'attuazione del Piano di Gestione del Rischio di Alluvione (PGRA) nel settore urbanistico e di pianificazione dell'emergenza, ai sensi dell'art. 58 delle Norme di Attuazione del Piano stralcio per l'assetto idrogeologico (PAI) del bacino del fiume Po così come integrate dalla Variante adottata in data 7 dicembre 2016 con Deliberazione n. 5 dal Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino del Fiume Po, le mappe di pericolosità e rischio contenute nel PGRA rappresentano un aggiornamento e integrazione del quadro conoscitivo rappresentato negli Elaborati del PAI.

Le perimetrazioni della pericolosità messe in evidenza nel PGRA sono coincidenti con quanto riportato nella Carta dei dissesti del PAI considerando le seguenti correlazioni fra le definizioni proposte:

PAI		PGRA	
Tipologia dei fenomeni idrogeologici		Ambiti	
Trasporto di massa sui conoidi		RSCM	Aree potenzialmente interessate da alluvioni
PERICOLOSITÀ		Reticolo secondario collinare e montano	
Ee molto elevata		SCENARI	
Eb elevata		P3/H frequenti	
Em media o moderata		P2/M poco frequenti	
		P1/L rare	

Attenendosi alla perimetrazione riportata nel PAI ed alla correlazione delle definizioni in precedenza illustrate, la perimetrazione della pericolosità riportata nel PGRA è di seguito illustrata:



4.2.2 Le mappe del rischio

Nelle mappe di rischio è indicata la distribuzione delle condizioni di RISCHIO che, in accordo con i contenuti del DPCM 1998, è definito dalla seguente relazione:

$$R = P \times E \times V$$

Dove:

P pericolosità o probabilità di accadimento di un evento alluvionale di data intensità in un intervallo temporale prefissato e su una determinata area;

E valore degli elementi a rischio (intesi come persone, beni, patrimonio culturale ed ambientale ecc.) presenti nell'area alluvionabile;

V vulnerabilità degli elementi a rischio, è il grado di perdita o danno associato a un elemento o a un gruppo di elementi a rischio risultante dal verificarsi di un fenomeno naturale di una data magnitudo.

La combinazione di E e V rappresenta il danno potenziale D.

Attenendosi alla classificazione riportata nella Tab. 8.15 del Manuale ISPRA, la classificazione del rischio si basa sulle seguenti definizioni:

CLASSE	RISCHIO	DESCRIZIONE
R1	moderato o nullo;	Per il quale i danni sociali, economici e al patrimonio ambientale sono marginali
R2	medio	Per il quale sono possibili danni minori agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale che non pregiudicano l'incolumità del personale, l'agibilità degli edifici e la funzionalità delle attività economiche
R3	elevato	Per il quale sono possibili problemi per l'incolumità delle persone, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture con conseguente inagibilità degli stessi, la interruzione di funzionalità delle attività socioeconomiche e danni rilevanti al patrimonio ambientale
R4	molto elevato	Per il quale sono possibili la perdita di vite umane e lesioni gravi alle persone, danni gravi agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale, la distruzione di attività socioeconomiche

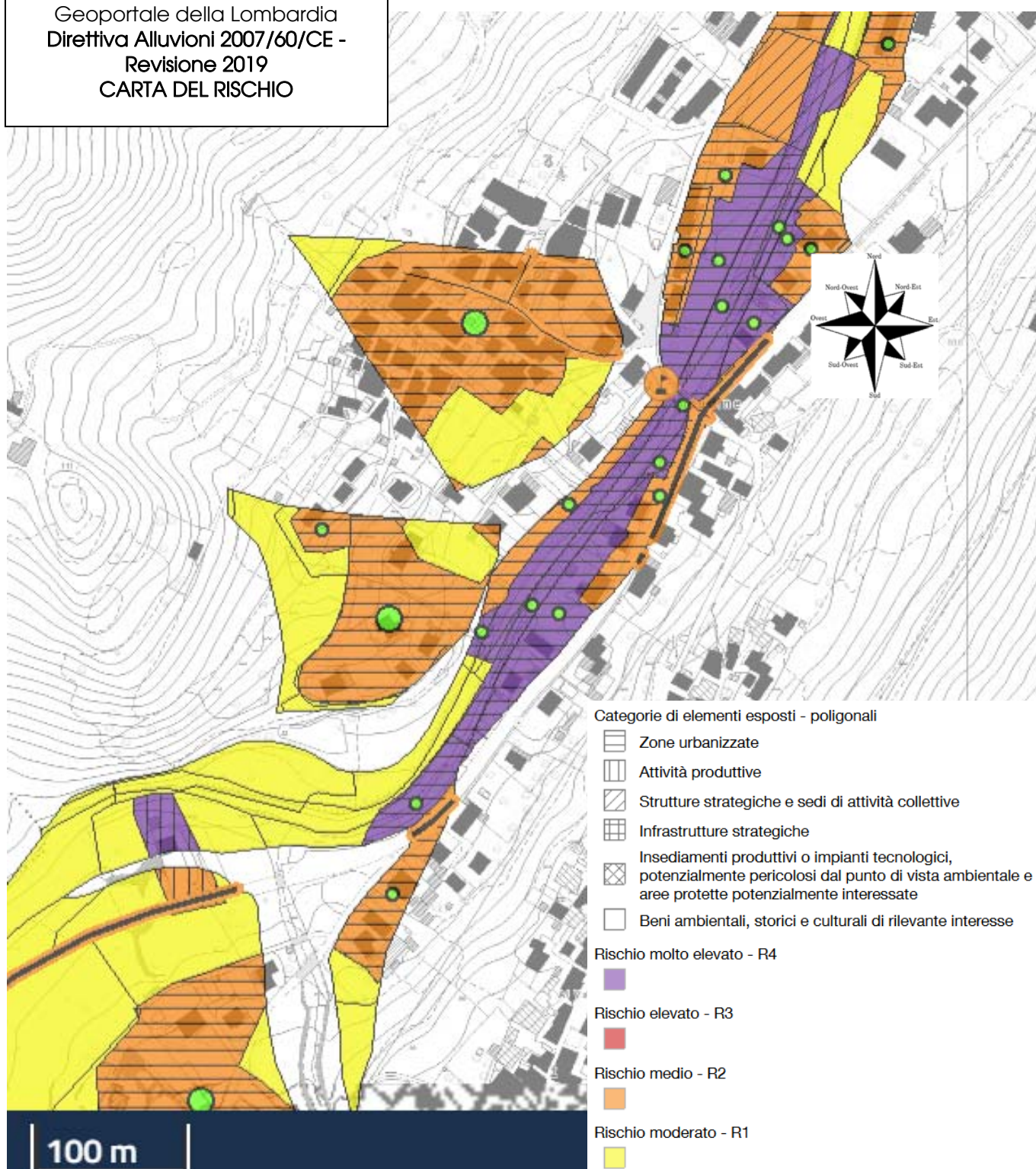
Le categorie di elementi esposti che la Direttiva 2007/60/CE, il D. Lgs. 49/2010 e gli indirizzi operativi del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del territorio e del Mare (MATM) hanno chiesto di classificare sono:

- zone urbanizzate (residenziale, produttivo, commerciale);
- strutture strategiche e sedi di attività collettive (ospedali, scuole, attività turistiche);
- infrastrutture strategiche principali (vie di comunicazione stradali e ferroviarie, dighe, porti e aeroporti);
- insediamenti produttivi o impianti tecnologici potenzialmente pericolosi dal punto di vista ambientale (impianti allegato I D.L. 59/2005, aziende a rischio di incidente rilevante, depuratori, inceneritori, discariche);
- beni culturali vincolati;
- aree per l'estrazione delle risorse idropotabili.

Per la definizione del rischio è stata utilizzata la matrice per la valutazione del rischio (R) in base alle classi di pericolosità (H) e alle classi di elementi a rischio (E) riportata nella D.g.r. n. IX/2616 del 30/11/2011.

	H1	H2	H3	H4	H5
E1	R1	R1	R1	R1	R2
E2	R1	R1	R2	R2	R3
E3	R1	R2	R2	R3	R4
E4	R1	R2	R3	R4	R4

Geoportale della Lombardia
Direttiva Alluvioni 2007/60/CE -
Revisione 2019
CARTA DEL RISCHIO



5 Aspetti idrologici ed idraulici

La stima delle portate di massima piena attese alla sezione d'interesse è preceduta dall'analisi delle valutazioni idrologiche: nei seguenti paragrafi sono illustrati i calcoli di stima delle precipitazioni massime attese e dei rispettivi ietogrammi di progetto. Quest'ultimi sono stati elaborati sulla base del Metodo CN-SCS: per la valutazione dei parametri CN sono state utilizzate le carte di uso del solo.

I risultati dei calcoli sono stati confrontati con alcune valutazioni speditive sui valori di portata di massima piena registrati sul Fiume Oglio e relativi dati di pioggia intensa ad essi correlati.

5.1 Precipitazioni intense

Il valore degli apporti meteorici conseguenti ad una precipitazione intensa è calcolato mediante le curve di possibilità climatica, definite dalla seguente espressione matematica:

$$h_d(T_r) = a(T_r)d^n$$

dove:

d = durata della precipitazione (ore)

h = altezza di pioggia (mm)

a e n = parametri che dipendono dal tempo di ritorno (T_r).

Il par. 8.3 de "Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del Fiume Oglio nel tratto da Sonico alla confluenza in Po e del suo affluente Cherio dal Lago di Endine alla confluenza" redatto dall'Autorità di Bacino del Fiume Po (febbraio 2004) illustra i risultati dell'elaborazione dei dati disponibili alle stazioni pluviometriche nel bacino del Fiume Oglio prelacuale, definisce i valori dei parametri $a(T_r)$ e $n(T_r)$ e, per ogni stazione, ne stabilisce il valore pesato nel calcolo delle portate di massima piena.

Nel tratto superiore del bacino dell'Oglio è presente la sola stazione pluviometrica di Temù; in analogia alla procedura adottata per la sezione OGS_1 - SONICO nella documentazione redatta da ADBPO (ritenuta rappresentativa del settore superiore della Valle Camonica), per il calcolo degli apporti meteorici critici al bacino sotteso alla sezione d'imposta del ponte in progetto sono state considerate le stazioni pluviometriche di TEMÙ e SANTA CATERINA VAL FURVA.

Per tali sezioni, i parametri a e n sono riportati nella seguente tabella; nelle colonne di destra sono indicati i rispettivi pesi per i singoli bacini.

Stazione	n			a			Peso
	TR (anni)	50	100	200	50	100	200
Temù		0.48	0.48	0.49	26.02	28.35	30.67
S. Caterina VF		0.57	0.58	0.58	19.23	20.66	22.09
							Fiume Oglio
							0.95
							0.05

Attenendosi ai pesi assegnati, i valori dei parametri per le curve di possibilità climatica risultano pari a:

Corso d'acqua	n			a		
	TR (anni)	50	100	200	50	100
Fiume Oglio		0.48	0.49	0.49	25.68	27.97
						30.24

La durata della pioggia critica (alla quale consegue un evento di portata critico) è stata considerata pari al tempo di corrivazione T_c calcolato mediante la formula proposta da Giandotti:

$$T_c = \frac{4\sqrt{A_b} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_m}} \text{ (ore)}$$

A_b = superficie del bacino (km^2)

L = lunghezza dell'asta (km)

H_m = altezza media del bacino definita rispetto alla sezione d'interesse (m).

Al fine di valutare i valori di *pioggia effettiva* che origina la piena nel bacino considerato, il valore della pioggia puntuale (espresso dalla curva di possibilità climatica) viene moltiplicato per un fattore correttivo *r* "coefficiente di ragguaglio":

$$h_{d-agg}(T_r) = r a(T_r) d^n$$

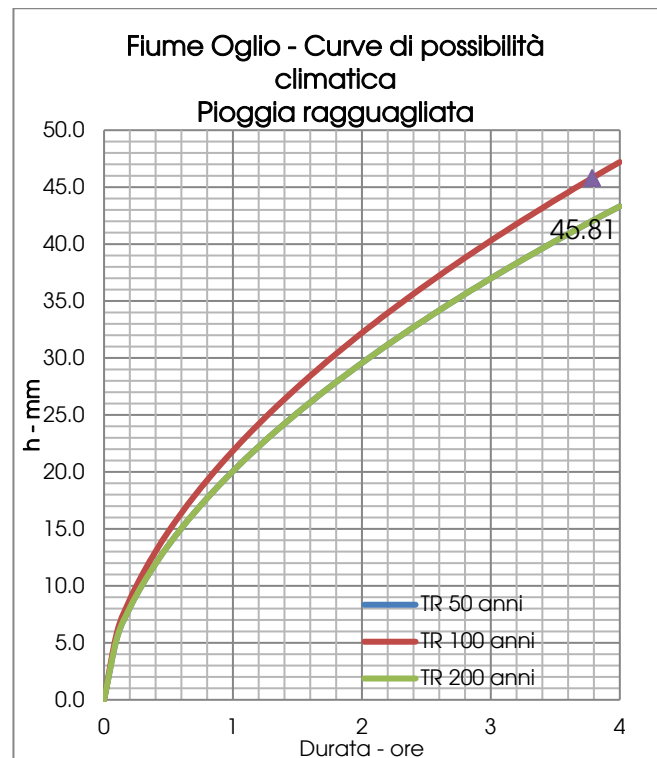
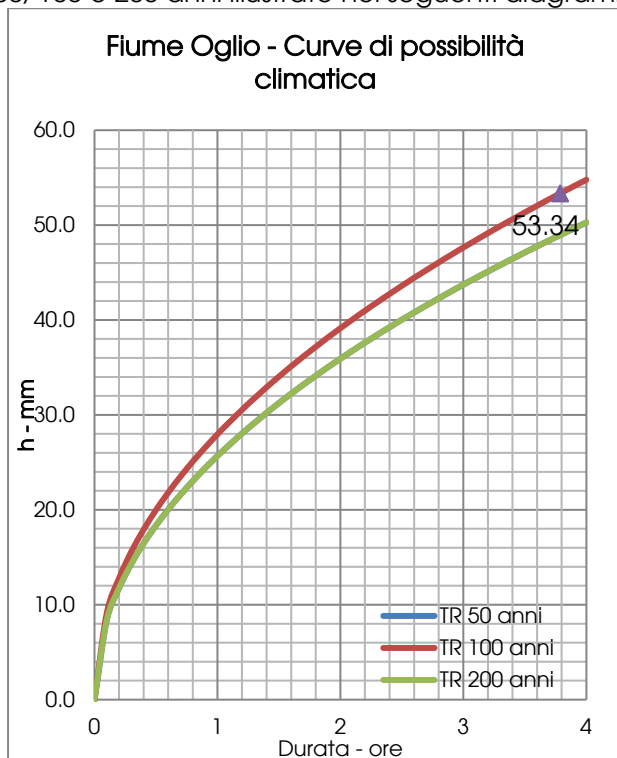
dove *r* è espresso dalla relazione (U.S. Water Bureau e Eagleson) che tiene conto degli elementi morfometrici del bacino:

$$r = 1 - e^{(-1.1d^{0.25})} + e^{(-1.1d^{0.25} - 0.00386A_b)}$$

Nella seguente tabella sono riassunti i valori dei parametri:

	T _c (ore)	h _c (mm)			r	h _{d ragg} (mm)		
	TR (anni) =	50	100	200		50	100	200
F. Oglio	3.79	48.95	53.34	58.42	0.86	42.04	45.81	50.17

Attenendosi a quanto sopra espresso è stato possibile ricostruire le curve di possibilità climatica riferite a TR = 50, 100 e 200 anni illustrate nei seguenti diagrammi:



Nei grafici sopra riportati, oltre alle curve di possibilità climatica sono evidenziati i punti indicativi della precipitazione ragguagliata attesa per i tempi di corrivazione considerati.

5.2 Ricostruzione degli ietogrammi di piena

La portata di piena di un dato bacino idrografico è definita dalla quota parte della precipitazione che effettivamente da origine al deflusso superficiale ed indicata in letteratura come "*precipitazione netta*". L'entità delle perdite idrologiche è espressa dal coefficiente di afflusso (Φ):

$$P_{net} = \Phi \times P$$

dove *P* è l'apporto meteorico.

Per la determinazione della precipitazione netta è necessaria la valutazione delle perdite idrologiche, strettamente correlate alla tipologia di suolo, alla presenza o meno di copertura vegetale, alla presenza di depressioni ed calcolabile mediante il modello CN (Curve Number).

5.2.1 Il Modello CN

Il modello CN, sviluppato da SCS - Soil Conservation Services, consente il calcolo dell'entità della precipitazione netta (P_{net}) mediante l'applicazione della seguente formula:

$$P_{net} = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a - S} \quad (\text{mm})$$

dove:

$$I_a = 0,2 \cdot S$$

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (\text{mm})$$

dove CN è un numero adimensionale (0-100) funzione della natura del suolo, del tipo di copertura vegetale e delle condizioni di umidità iniziali del bacino.







































Per la definizione del coefficiente di deflusso della porzione superiore del bacino del Fiume Oglio ci si è avvalsi del Modello CN (Curve Number) partendo dalla carta dell'uso del suolo riportata nel Geoportale della Regione Lombardia (DUSAF - 2009). Alle classi di uso del suolo riportate nella cartografia sono stati assegnati valori di CN definiti sulla base dei contenuti di DIRETTIVA SULLA PIENA DI PROGETTO DA ASSUMERE PER LE PROGETTAZIONE E LE VERIFICHE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA - NORME DI ATTUAZIONE (Piano di Assetto Idrogeologico).

Nelle seguenti tabelle sono indicati i valori di CN assegnati espressi in funzione dell'uso del suolo del territorio e del tipo di suolo in esso presente:

TIPO DI SUOLO	DESCRIZIONE
A	Elevata infiltrazione, per suoli con strati sabbiosi
B	Infiltrazione moderata, per suoli con tessitura da moderatamente fine a moderatamente grossolana
C	Infiltrazione lenta, per suoli con tessitura fine, quali argille limose, deboli strati di lumo sabbioso, suoli con debole contenuto organico
D	Infiltrazione molto lenta, per argille plastiche e compatte

Tipologia di uso del suolo		Tipi di suolo			
		A	B	C	D
Suoli coltivati		62-72	71-81	78-88	81-91
Pascoli		39-68	61-79	74-86	80-89
Prati		30	58	71	78
Boschi e foreste con copertura modesta		45	66	77	83
Boschi e foreste con buona copertura dall'erosione e sottobosco		25	55	70	77
Aree a parco e di funzione ricreative:					
- con copertura erbacea superiore al 75%		39	61	74	80
- con copertura erbacea dal 50 al 75%		49	69	79	84
Aree commerciali (impermeabili per 85%)		89	92	94	95
Aree industriali (impermeabili per 72%)		81	88	91	93
Aree residenziali con percentuale media impermeabile:					
65%		77	85	90	92
38%		61	75	83	87
30%		57	72	81	86
25%		54	70	80	85
20%		51	68	79	84
Parcheggi, aree coperte (impermeabili)		98	98	98	98
Strade					
asfaltate		98	98	98	98
inghiaiate		76	85	89	91

Valori di CN in funzione delle diverse tipologie di uso del suolo (Handbook of Hydrology, D. R. Maidment, 1992)

USO DEL SUOLO (DURSAF, 2009)	SUOLO	CN
 Accumuli detritici e affioramenti litoidi privi di vegetazione	C	70
 Alvei fluviali e corsi d'acqua artificiali	C	70
 Aree degradate non utilizzate e non vegetate	B	58
 Aree verdi incolte	B	58
 Bacini idrici artificiali		98
 Bacini idrici naturali		98
 Boschi conifere a densità media e alta	B	55
 Boschi di conifere a densità bassa	B	66
 Boschi misti a densità bassa	B	66
 Boschi misti a densità media e alta	B	55
 Campeggi e strutture turistiche e ricettive	B	69
 Cantieri	A	76
 Cespuglieti	B	66
 Cespuglieti con presenza significativa di specie arbustive alte ed arboree	B	66
 Cespuglieti in aree di agricole abbandonate	B	71
 Cimiteri	A	76
 Ghiacciai e nevi perenni		98
 Impianti di servizi pubblici e privati	B	75
 Impianti sportivi	B	85
 Impianti tecnologici	B	88
 Insediamenti industriali, artigianali, commerciali	B	88
 Insediamenti produttivi agricoli	B	71
 Orti familiari	B	71
 Parchi e giardini	B	61
 Praterie naturali d'alta quota assenza di specie arboree ed arbustive	B	58
 Praterie naturali d'alta quota con presenza di specie arboree ed arbustive sparse	B	58
 Prati permanenti con presenza di specie arboree ed arbustive sparse	B	58
 Prati permanenti in assenza di specie arboree ed arbustive	B	58
 Reti stradali e spazi accessori		98
 Seminativi semplici	B	71
 Tessuto residenziale continuo mediamente denso	B	75
 Tessuto residenziale denso	B	85
 Tessuto residenziale discontinuo	B	72
 Tessuto residenziale rado e nucleiforme	B	70
 Tessuto residenziale sparso	B	68
 Vegetazione dei greti	A	45
 Vegetazione delle aree umide interne e delle torbiere	C	71
 Vegetazione rada	B	66

L'elaborazione dei valori di CN assegnati alle differenti aree e la valutazione dei rispettivi pesi areali, consente di attribuire al bacino idrografico sotteso alla sezione del ponte in progetto un valore di CN pari a:

Corso d'acqua	CN (II)
F. Oglio	71.14

Il metodo individua tre condizioni di umidità antecedenti l'evento (AMC – antecedent moisture condition) in funzione dell'altezza di pioggia totale caduta nei 5 giorni antecedenti l'evento meteorico di riferimento. Il valore calcolato è riferito a condizioni di umidità del suolo di tipo medio (AMC II).

CLASSE AMC	Precipitazione nei 5 giorni precedenti (mm)	
	Stagione di riposo	Stagione di crescita
I	<13	<36
II	13-28	36-54
III	>28	>54

È possibile valutare i valori di CN riferiti alle differenti condizioni iniziali di umidità del suolo (quindi a differenti capacità di infiltrazione) mediante l'applicazione delle seguenti metodologie:

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)}$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)}$$

L'analisi degli eventi alluvionali consente di verificare come, per le aree della Valle Camonica, gli eventi di piena lungo il Fiume Oglio siano collegati ad apporti meteorici intensi (o di media intensità) registrati a seguito di periodi più o meno lunghi di piogge continue.

È quindi attendibile considerare come rappresentativo delle condizioni critiche il valore di CN(III): partendo dal valore ottenuto dall'elaborazione della carta dell'uso del suolo, al bacino sotteso viene pertanto assegnato un valore pari a:

Corso d'acqua	CN (III)
F. Oglio	85.0

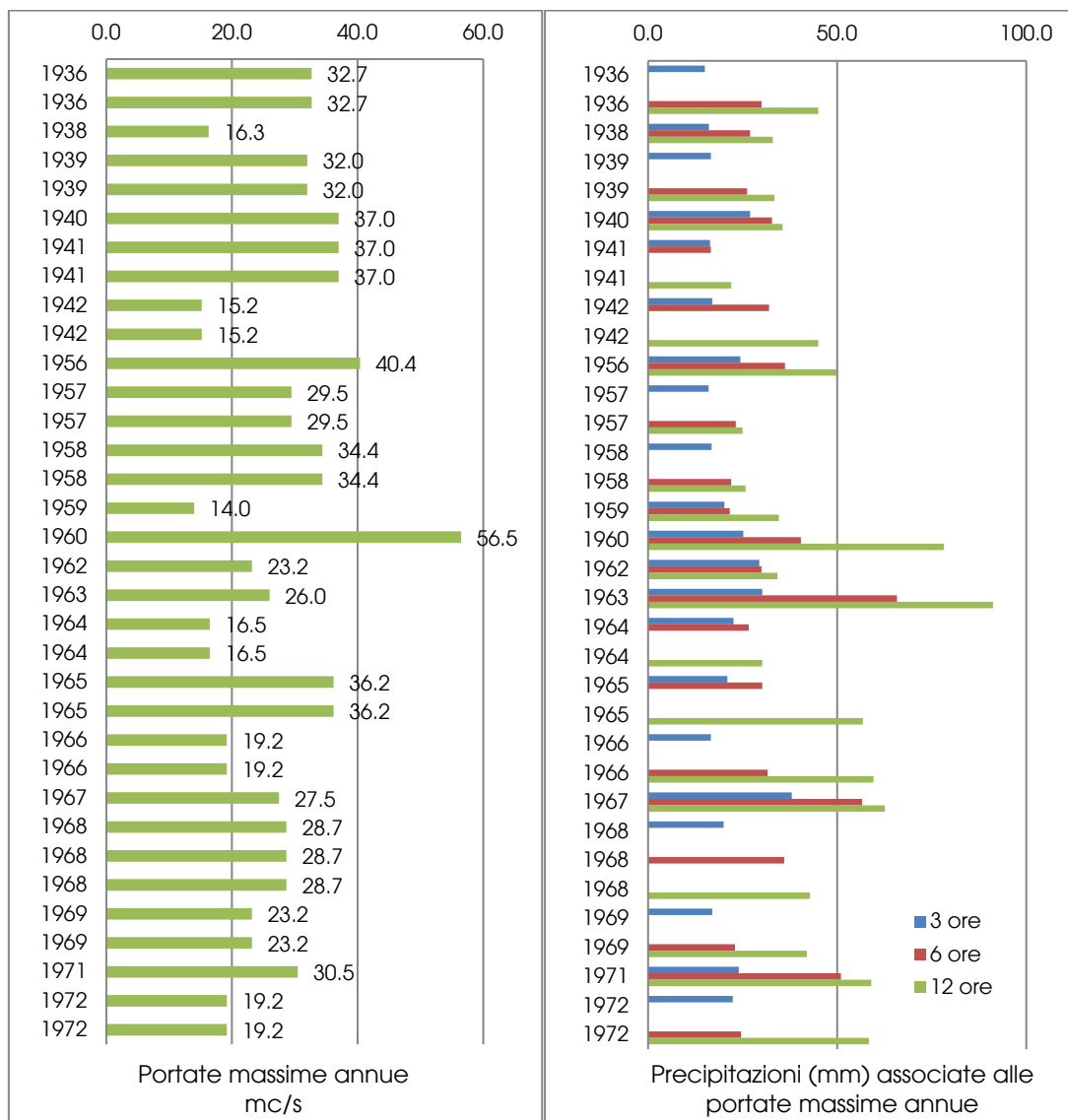
Attenendosi a tali valori, i coefficienti di deflusso del bacino (espressi secondo le metodologie in precedenza illustrate) risultano pari a:

	CN (III)	S	Ia	P _{net}	φ
F. Oglio	79.4	103.0	20.6	6.59	0.13

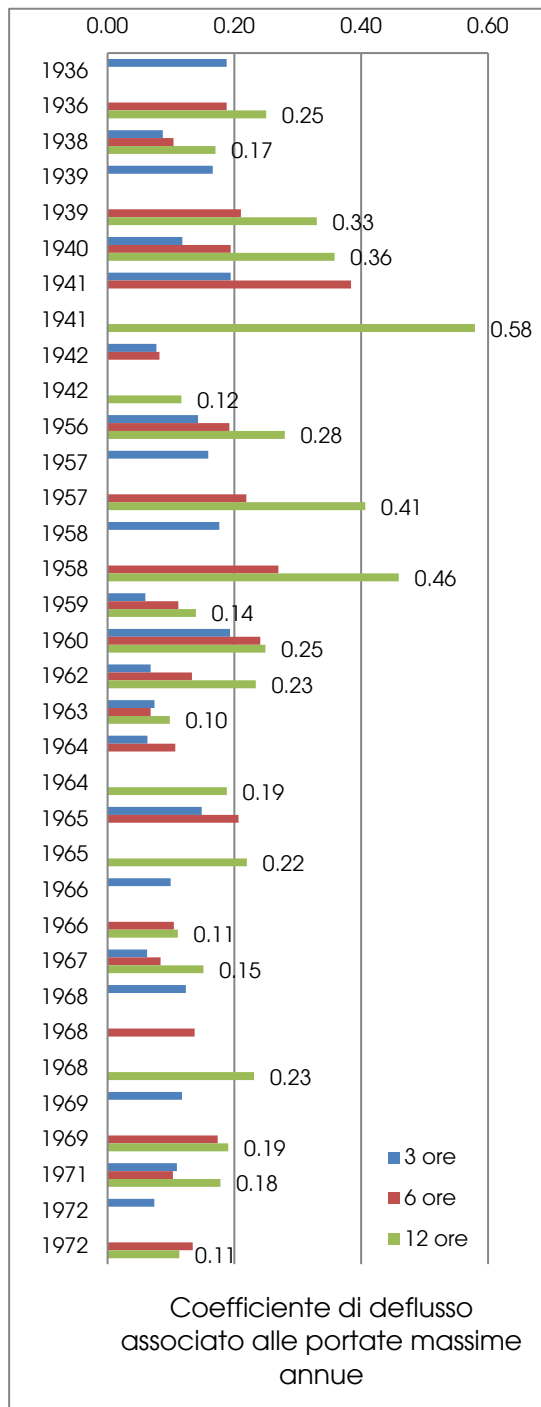
5.3 Taratura del modello

Allo scopo di valutare se il risultato ottenuto dall'applicazione del modello CN-SCS può essere ritenuto rappresentativo delle condizioni idrologiche del settore, sono stati elaborati i valori di portata massima annua registrati alla stazione di Temù e riportati da Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale. (SIMN).

I dati di portata (come riportati nella documentazione consultata) non sono direttamente associati a dati relativi ad eventi meteorici: è stato tuttavia possibile reperire i dati pluviometrici degli eventi di maggiore intensità registrati alla stazione pluviometrica di Temù, con valori di portata riferiti a 3, 6 e 12 ore consecutive.



Nell'ipotesi che l'evento di piena registrato possa essere stato associato all'evento meteorico di massima intensità registrato alla stazione di Temù, sono state valutati i valori dei coefficienti di deflusso.



Dall'analisi del grafico appare evidente i valori di portata massima registrati fino al 1958 presentino valori di coefficienti di deflusso elevati (0.25-0.58): si sottolinea come tali dati siano riferiti a condizioni precedenti la realizzazione degli invasi idroelettrici.

I dati successivi, considerati rappresentativi delle condizioni morfologiche attuali, si attestano fra valori compresi fra 0.10 e 0.25.

I valori di portata registrata sono comprensivi della componente solida presa in carico dalla piena, che determina un aumento di volume pari a 1.13-1.54 della frazione liquida.

Considerando tali condizioni, i valori dei coefficienti di deflusso degli eventi di piena considerati risultano compresi fra 0.09 e 0.22.

6 Stima della portata di massima piena: il modello SCS

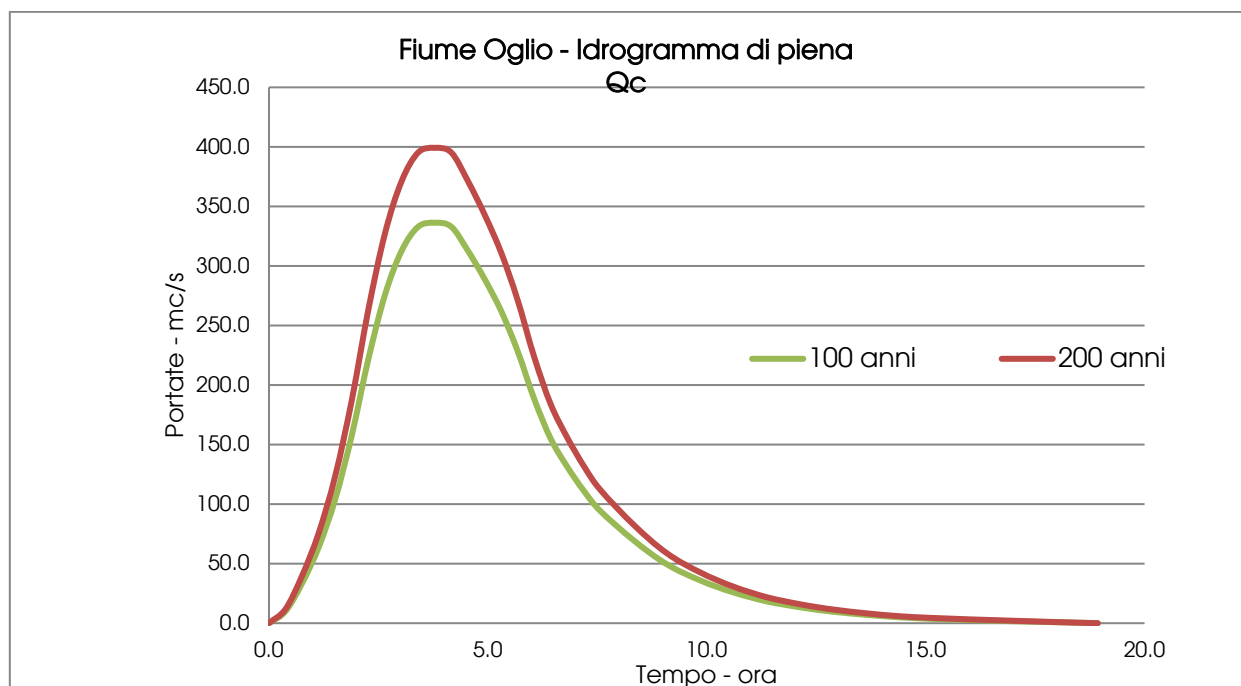
Per la stima della portata di massima piena attesa è stato adottato il modello afflussi-deflussi considerando i parametri in precedenza definiti. Il valore della portata per ogni corso d'acqua risulta pari a:

$$Q_l = P_{\text{net}} \cdot A_b / T_c$$

Pertanto, i valori di portata liquida calcolati per TR = 100 e 200 anni risultano pari:

Corso d'acqua	Q_{L-TR50} (mc/s)	$Q_{L-TR100}$ (mc/s)	$Q_{L-TR200}$ (mc/s)
F. Oglio	284.1	336.3	399.3

Considerando il tradizionale idrogramma unitario adimensionale del metodo SCS, ad una data sezione del corso d'acqua il colmo di piena è attendibile dopo un tempo t_c (pari al tempo di corrivazione del bacino) dall'inizio di un evento meteorico di determinata intensità.



Le caratteristiche torrentizie del corso d'acqua comportano che durante gli eventi di piena possano registrarsi fenomeni di trasporto solido legati alla movimentazione del materiale in alveo ed ad apporti dei tributari. Ne consegue dunque che la portata critica attesa sia superiore alla portata liquida calcolata, il cui valore può essere calcolato considerando gli aumenti di volume legati alle concentrazioni detritiche massime possibili (sono esclusi pertanto i fenomeni di colata o debris flow):

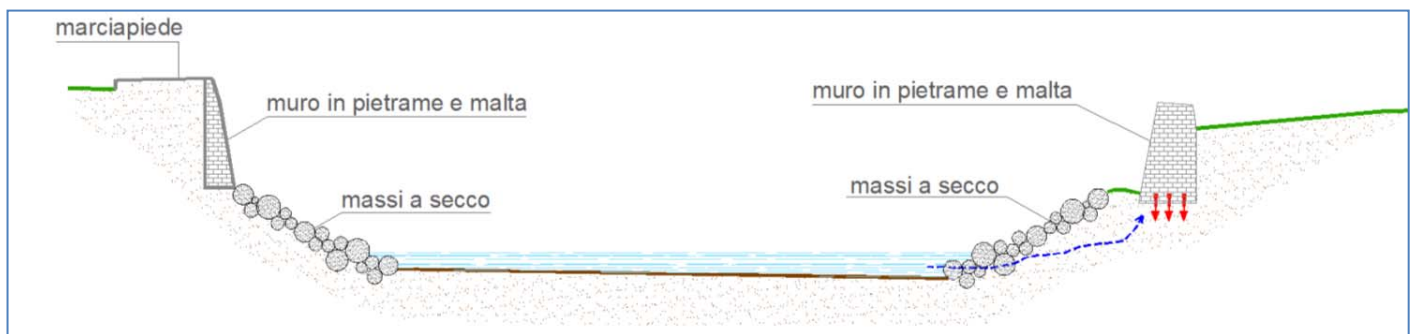
Q_{C-TR50} (mc/s)	$Q_{C-TR100}$ (mc/s)	$Q_{C-TR200}$ (mc/s)
379.3	449.0	533.0

7 Stato di fatto: verifiche idrauliche

7.1 Aspetti geometrici e morfologici

Nel settore pianeggiante in sinistra idrografica, settore che si sviluppa fra il muro d'argine e la SS 42 (che decorre in rilevato rispetto alle aree di fondovalle) è presente un'area residenziale nella quale le aree esterne degli edifici si sviluppano a quote prossime a quelle dell'alveo del Fiume Oglio. A protezione dei fabbricati in passato è stato realizzato un muro d'argine in calcestruzzo e pietrame con altezza media di 2 m impostato direttamente sul ciglio naturale della sponda del corso d'acqua: il muro non ha fondazione e in alcuni tratti mostra delle lesioni. Lungo l'argine sono inoltre presenti aperture e/o accessi privati e diretti all'alveo dell'Oglio. Alla base del muro d'argine allo scopo di contenere i fenomeni erosivi conseguenti alla ridefinizione del fondo sono state realizzate delle opere di difesa semplicemente accatastando in modo disordinato blocchi di varie dimensioni. L'accumulo alla base del muro d'argine costituisce un elemento di forte criticità per il tratto di corso d'acqua e per le opere esistenti:

- gli accumuli non sono dimensionati a resistere all'azione di trasporto delle massime portate previste;
- la loro mobilitazione in occasione di eventi di piena andando incrementa il trasporto solido;
- l'accumulo riduce la sezione idraulica utile;
- l'assenza di legare fra i massi favorisce l'infiltrazione e l'azione erosiva con conseguenti fenomeni di destabilizzazione dell'argine in muratura.



La stessa tipologia di argine descritta precedentemente (muro con blocchi accatastati al piede), è stata realizzata anche in destra idrografica nel settore compreso fra il ponte comunale e la Valle del Fossato per poi lasciar posto ad una scogliera rinverdita realizzata con massi ciclopici intasati in terra; la scogliera si allunga per circa 85-90 m raggiungendo la confluenza della Valle del Castello al margine sud-occidentale dell'abitato di Incudine. Più a valle la sponda dell'Oglio è naturale impostata nelle alluvioni di fondovalle.

7.2 Modellazione del deflusso di piena

L'analisi del deflusso della piena, finalizzata alla quantificazione delle condizioni di moto della corrente definite nei valori dei livelli idrici e delle velocità della corrente all'interno dell'alveo inciso e nelle zone golenali o inondate, è stata condotta mediante la ricostruzione dei profili liquidi di moto permanente gradualmente vario (nei termini spaziali e non temporali) utilizzando il programma **HEC-RAS River Analysis System** (Version 6.0 MARCH 2021) sviluppato da U.S. Army Corp of Engineers - Hydrologic Engineering Center e disponibile sul sito <http://www.hec.usace.army.mil/>.

7.2.1 Il Modello di calcolo

Il programma permette di effettuare calcoli idraulici monodimensionali: la procedura di calcolo adottata è nota come *Stantard Step Method* e consiste nell'integrazione dell'equazione del bilancio energetico. Il metodo si basa sulla soluzione delle equazioni monodimensionali dell'energia:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 \times V_2^2}{2 \times g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 \times V_1^2}{2 \times g} + h_e$$

dove:

Z_1, Z_2 = quota del fondo dell'alveo

Y_1, Y_2 = spessore della lama d'acqua alla sezione

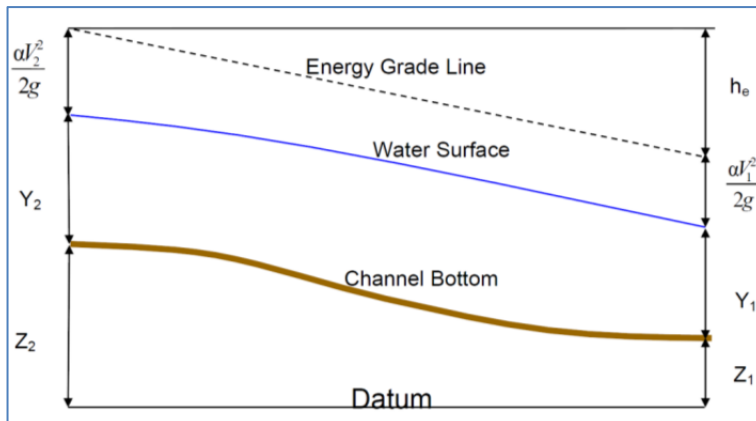
V_1, V_2 = velocità media

a_1, a_2 = coefficiente della velocità

g = accelerazione di gravità

h_e = perdite energetiche.

Le perdite di energia (h_e) considerate sono legate all'attrito (e definite dall'Equazione di Manning), alla contrazione o espansione della corrente che avviene al variare delle sezioni di deflusso (valutate tramite un coefficiente che moltiplica la variazione dell'altezza cinetica) ed all'attraversamento dei ponti.



Nel diagramma a margine è rappresentato il teorico rapporto fra i termini della perdita di energia lungo un tratto di corso d'acqua, calcolati mediante la seguente relazione:

$$WS_1 + \frac{a_1 \cdot V_1^2}{2g} = WS_2 + \frac{a_2 \cdot V_2^2}{2g} + h_{L1-2}$$

dove:

WS_1, WS_2 = quota del pelo libero della corrente fra due sezioni di calcolo;

V_1, V_2 = velocità medie

a_1, a_2 = coefficienti energetici

h_{L1-2} = perdita di carico dovute sia all'attrito che alla contrazione e all'espansione che si verifica fra le sezioni considerate.

Il valore delle perdite di carico può essere suddiviso nella somma tra le perdite per attrito h_f e perdite per espansione o contrazione h_0 . Il primo dei due termini è dato dal prodotto tra la pendenza d'attrito (sf - friction slope) e la distanza media L tra le due sezioni. Il secondo termine è il prodotto del coefficiente di contrazione (C_c) o di espansione (C_e) e la differenza dell'energia raggiunta nelle due sezioni:

$$h_0 = C_{c,e} \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right|$$

In caso di corrente lenta, i valori dei coefficienti di contrazione ed espansione vengono spesso assunti pari a 0.1 e 0.3 rispettivamente. In caso di corrente veloce invece risultano sensibilmente inferiori. Sostituendo l'espressione delle perdite di carico in quella delle perdite energetiche si ottiene:

$$WS_2 = WS_1 + \left(\frac{a_1 V_1^2}{2g} - \frac{a_2 V_2^2}{2g} \right) + Ls_f + C_{c,e} \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right|$$

Tale espressione costituisce la forma dell'equazione dell'energia usata da HEC-RAS.

L'equazione della quantità di moto è utilizzata nei punti dove il profilo del pelo libero subisce brusche variazioni: questo si verifica, in condizioni di regime misto, nei punti di passaggio da corrente veloce a corrente lenta (risalti idraulici), oppure in corrispondenza di ponti. In ragione delle condizioni dell'alveo, il calcolo è stato condotto considerando le seguenti condizioni relative alle modalità di deflusso:

regime di flusso rapido.

coefficienti di contrazione ed espansione del flusso rispettivamente pari 0.1 e 0.3.

7.2.2 Il coefficiente di Manning

Le perdite legate all'attrito sono definite dal coefficiente di Manning (n) che, come indicato in DIRETTIVA CONTENENTE CRITERI PER LA VALUTAZIONE DELLA COMPATIBILITÀ IDRAULICA DELLE INFRASTRUTTURE PUBBLICHE E DI INTERESSE PUBBLICO ALL'INTERNO DELLE FASCE A E B - Autorità di Bacino del Fiume Po

(aggiornata con deliberazione n. 10 del Comitato Istituzionale del 5 aprile 2006), può essere espresso dalla seguente formula:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \times m_5$$

dove i valori dei singoli parametri tengono conto di:

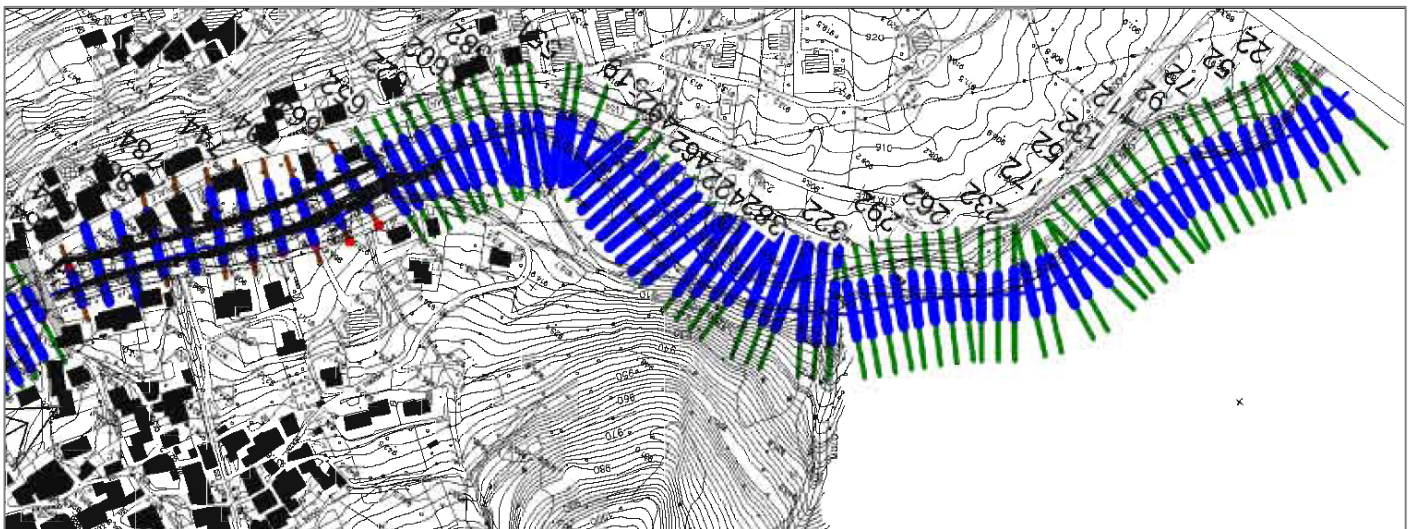
- a) materiale costituente l'alveo;
- b) irregolarità della superficie;
- c) variazione della forma e delle dimensioni della sezione trasversale
- d) effetto relativo di ostruzioni
- e) effetto della vegetazione
- f) grado di sinuosità dell'alveo.

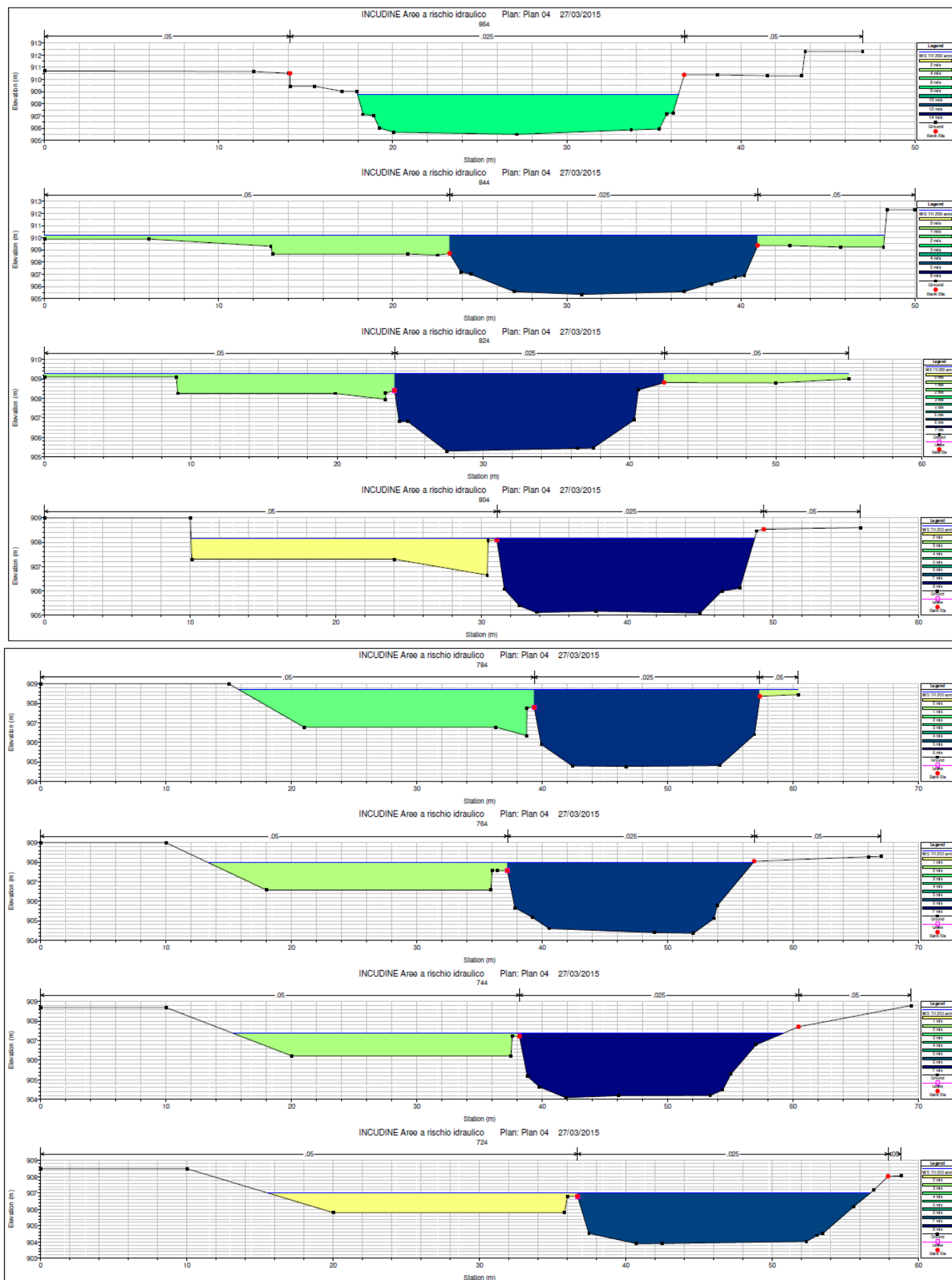
Attenendosi alle condizioni morfologiche e vegetazionali dell'alveo e del suo intorno, attenendosi ai valori di riferimento riportati della Tabella 1 della normativa sopra citata, per la modellazione idraulica del tratto di alveo sono stati considerati i seguenti valori dell'indice di Manning:

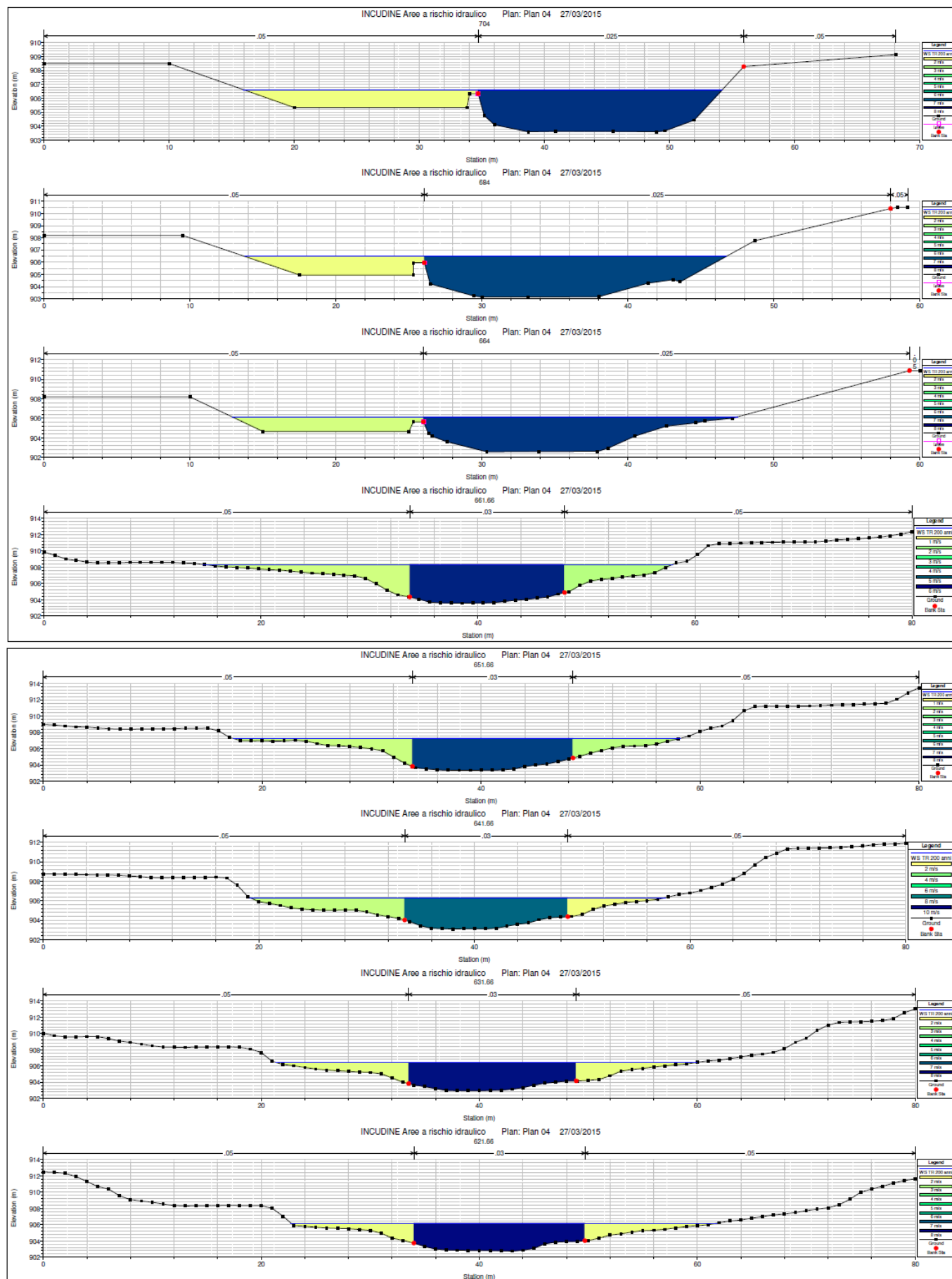
	Indice di Manning	
Alveo	0.04	s/m ³
Aree esterne	0.03	s/m ³

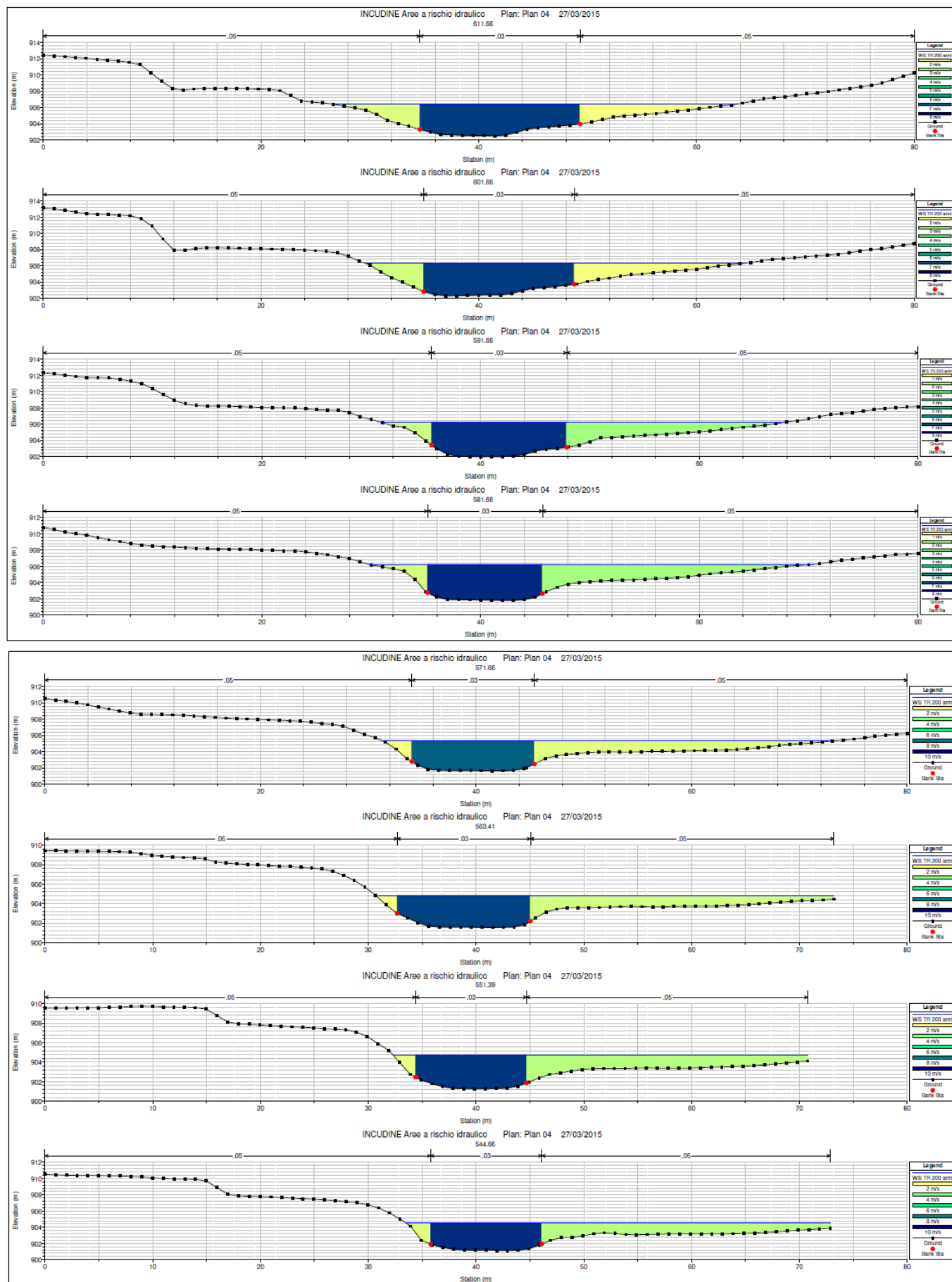
7.3 Restituzione dati

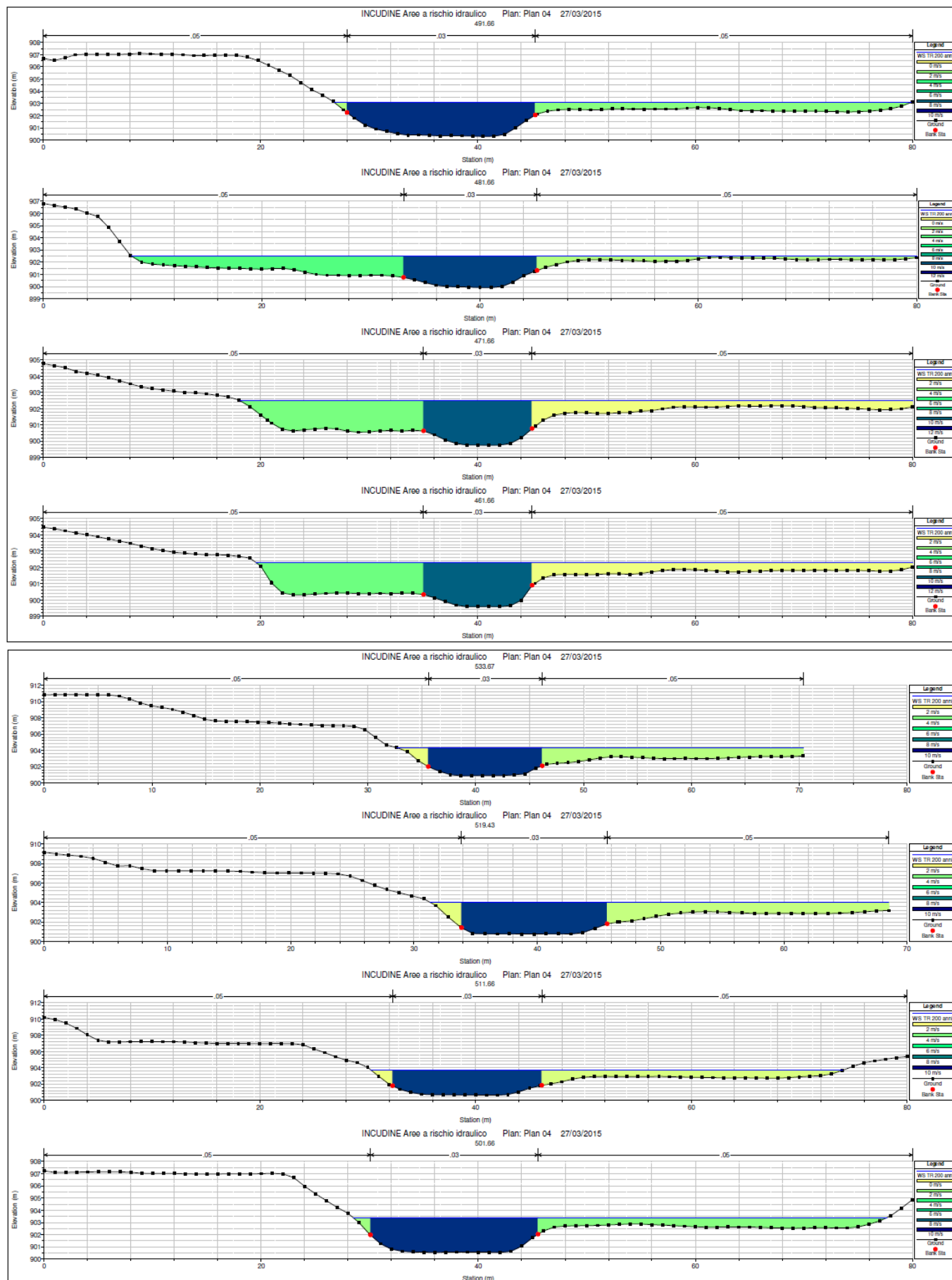
I risultati della modellazione condotta sono illustrati nelle seguenti sezioni idrauliche riassunti nella successiva tabella.

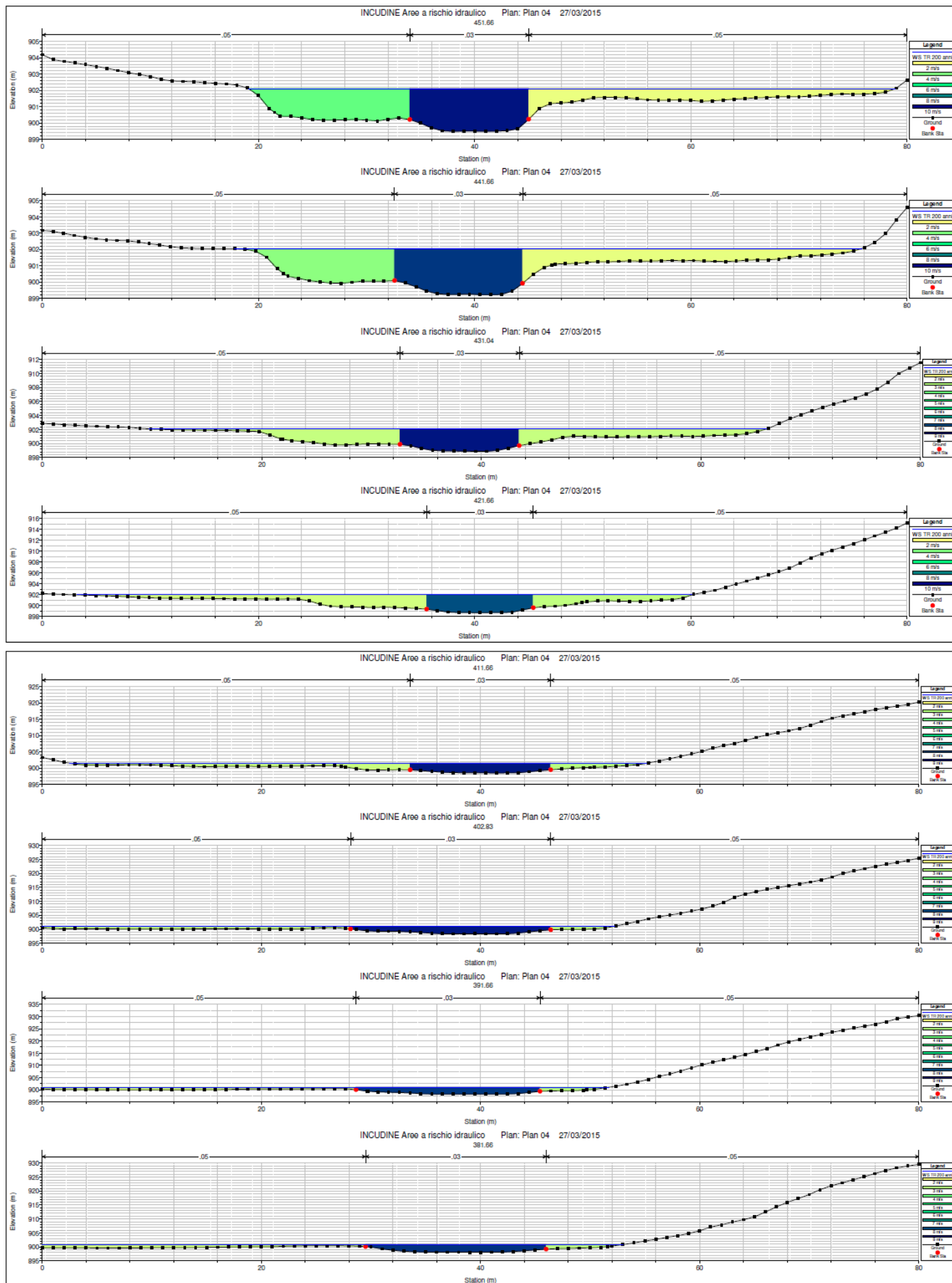


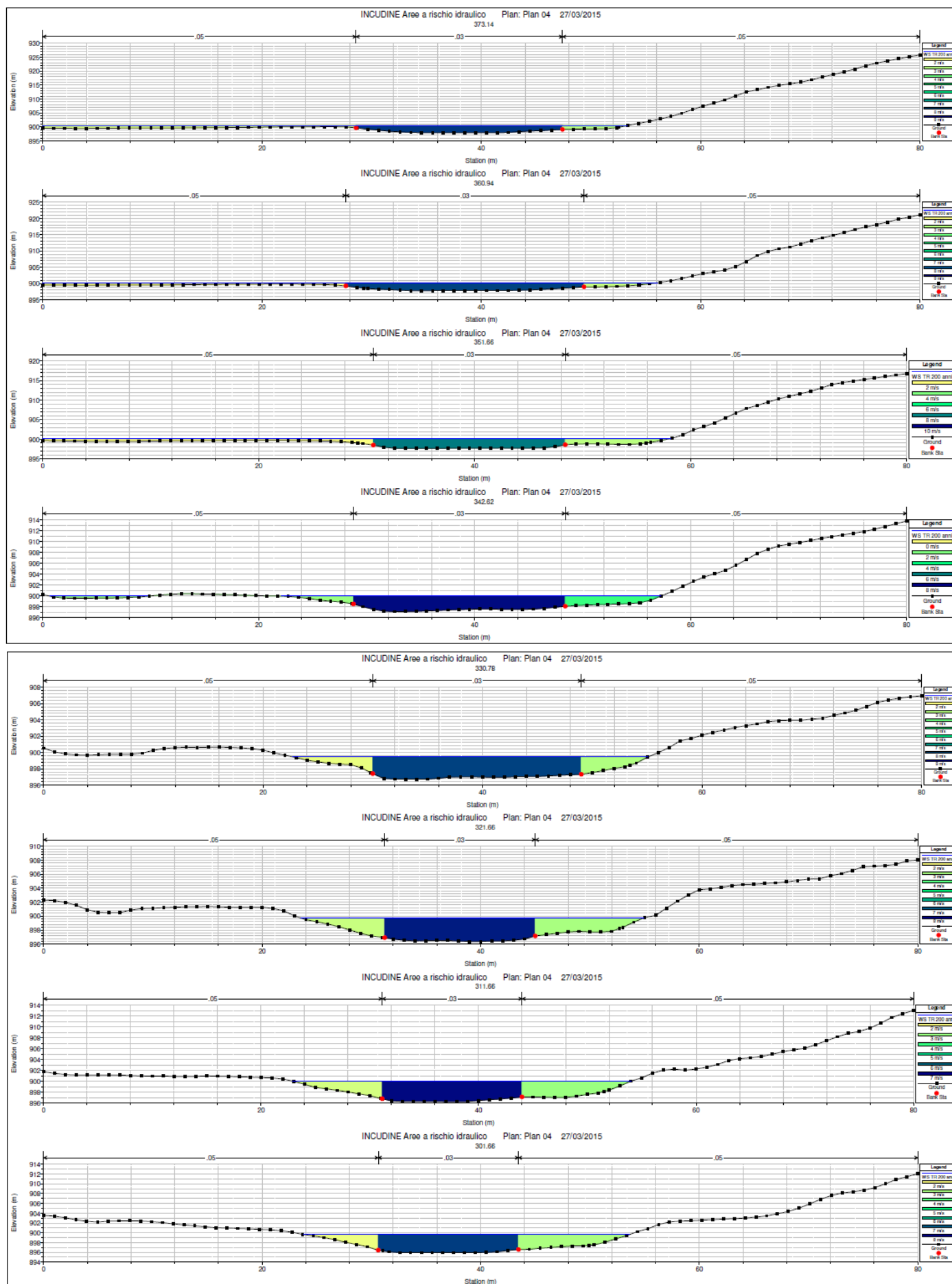


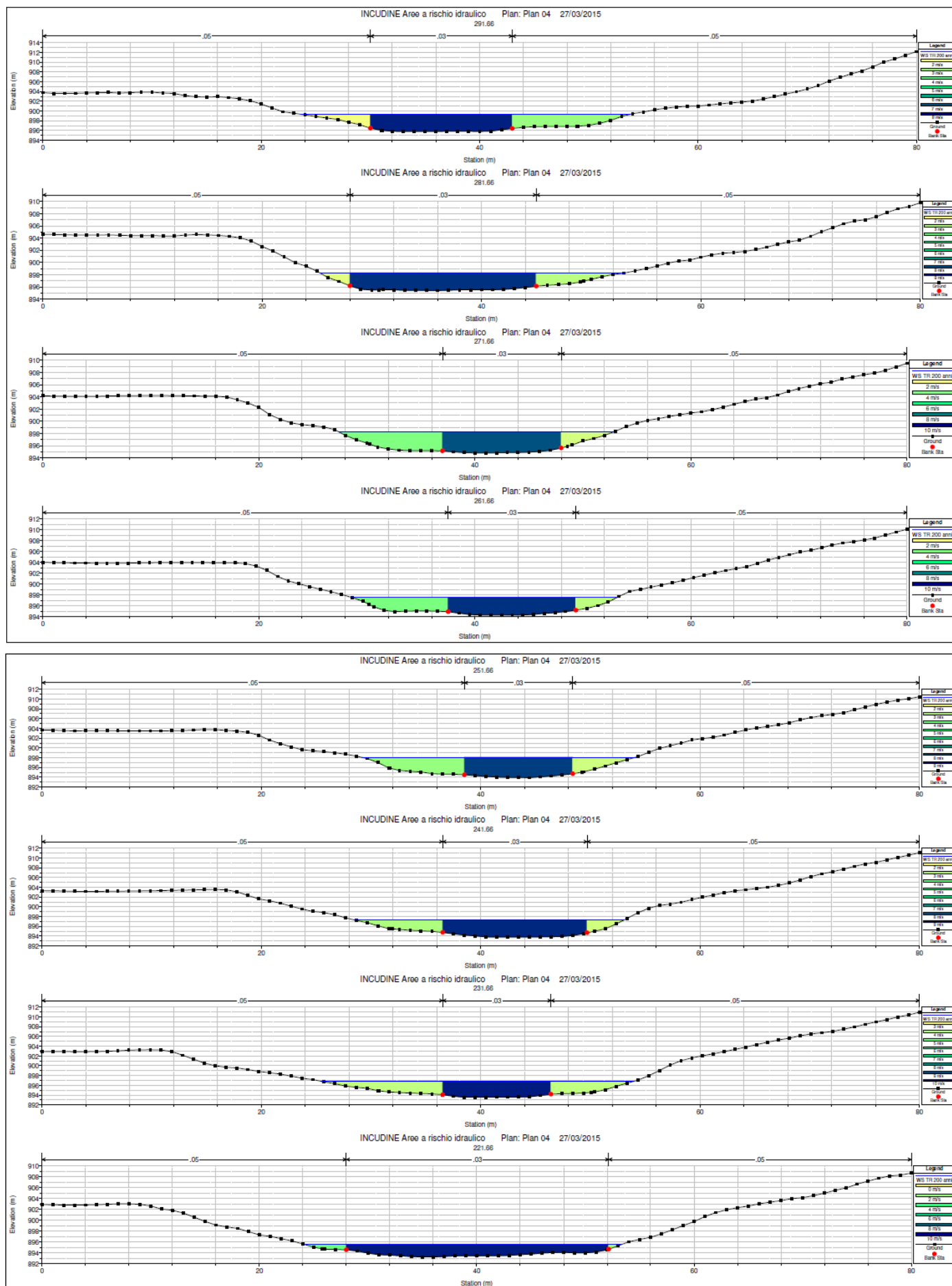


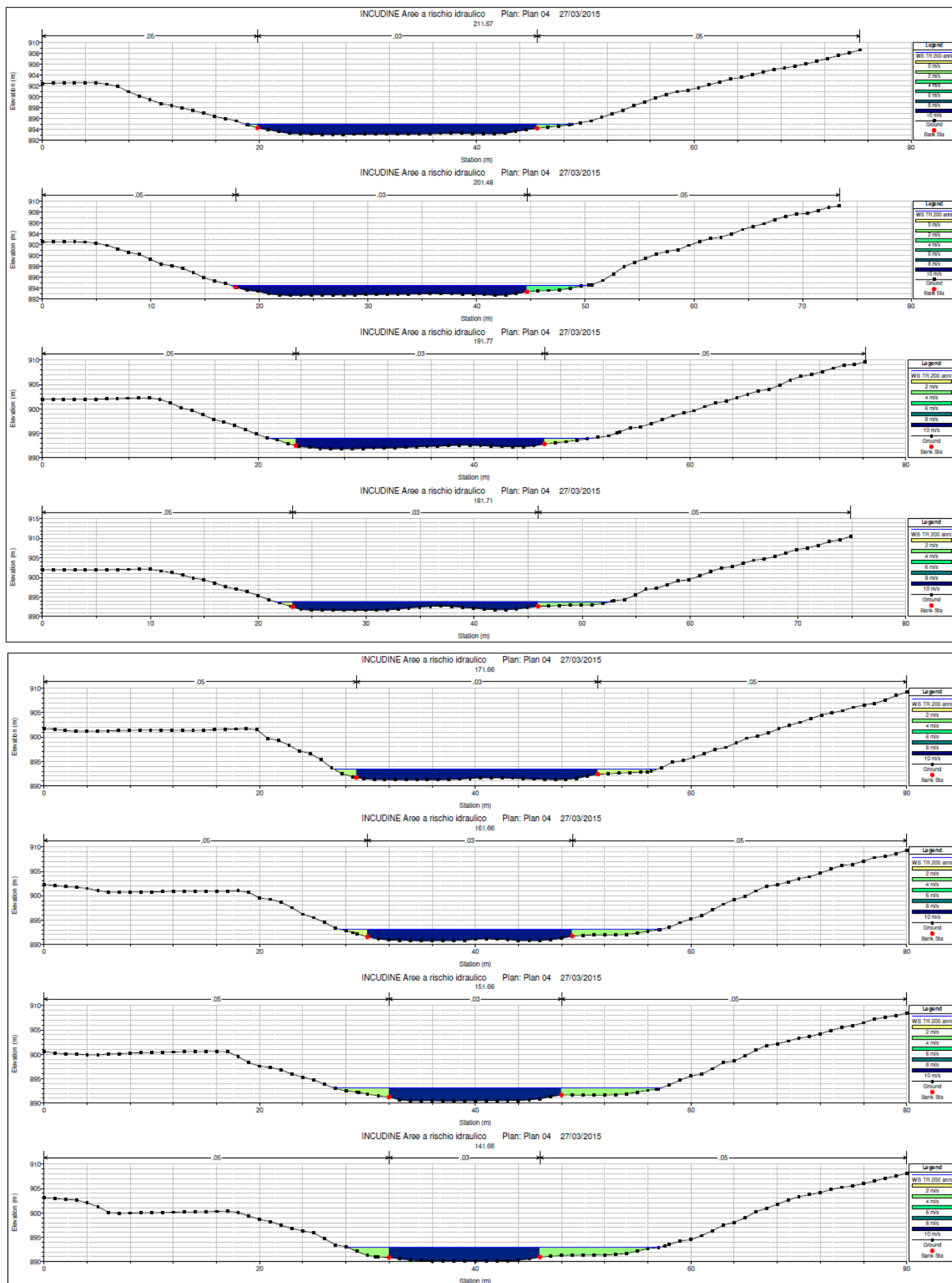


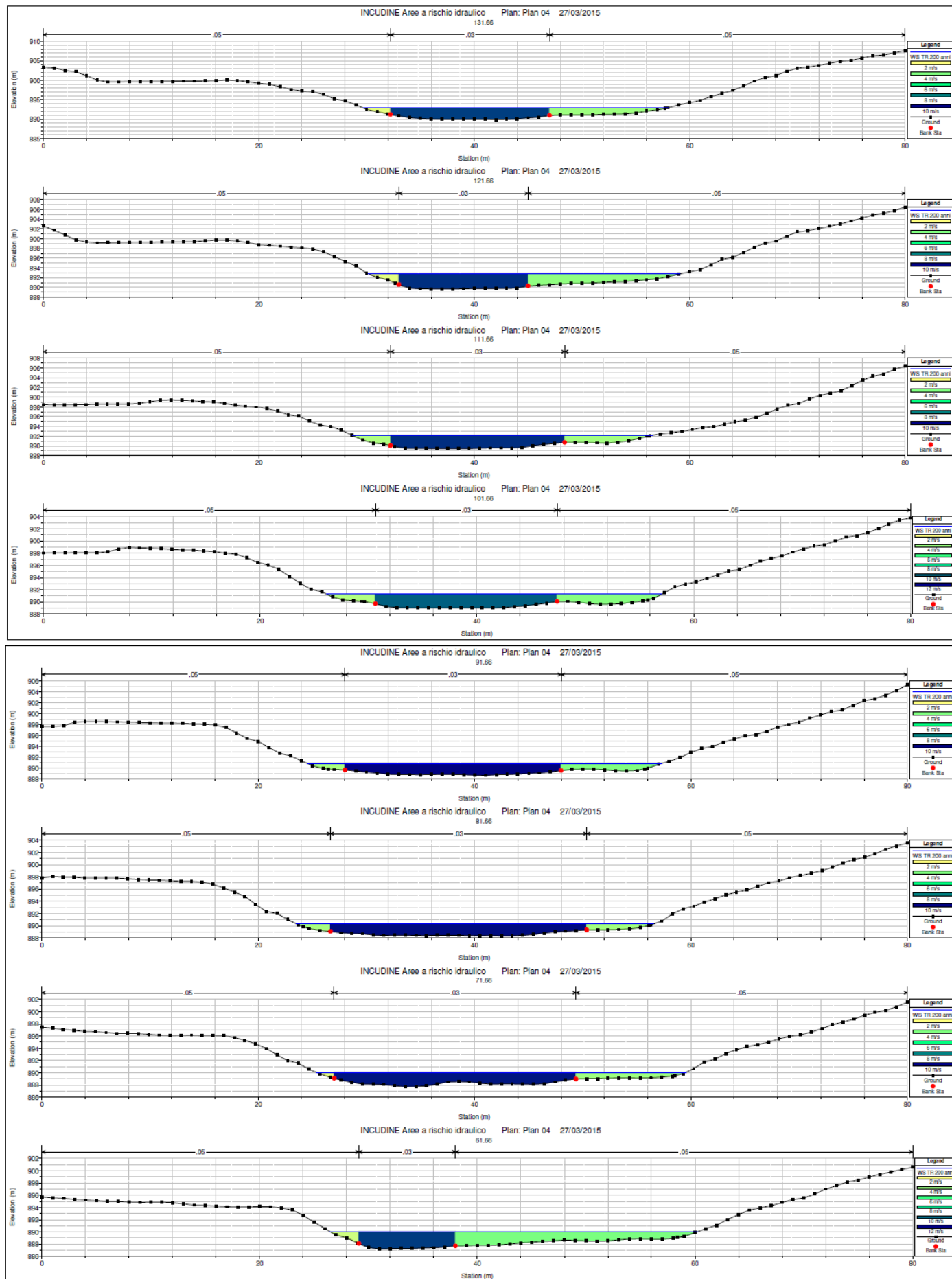


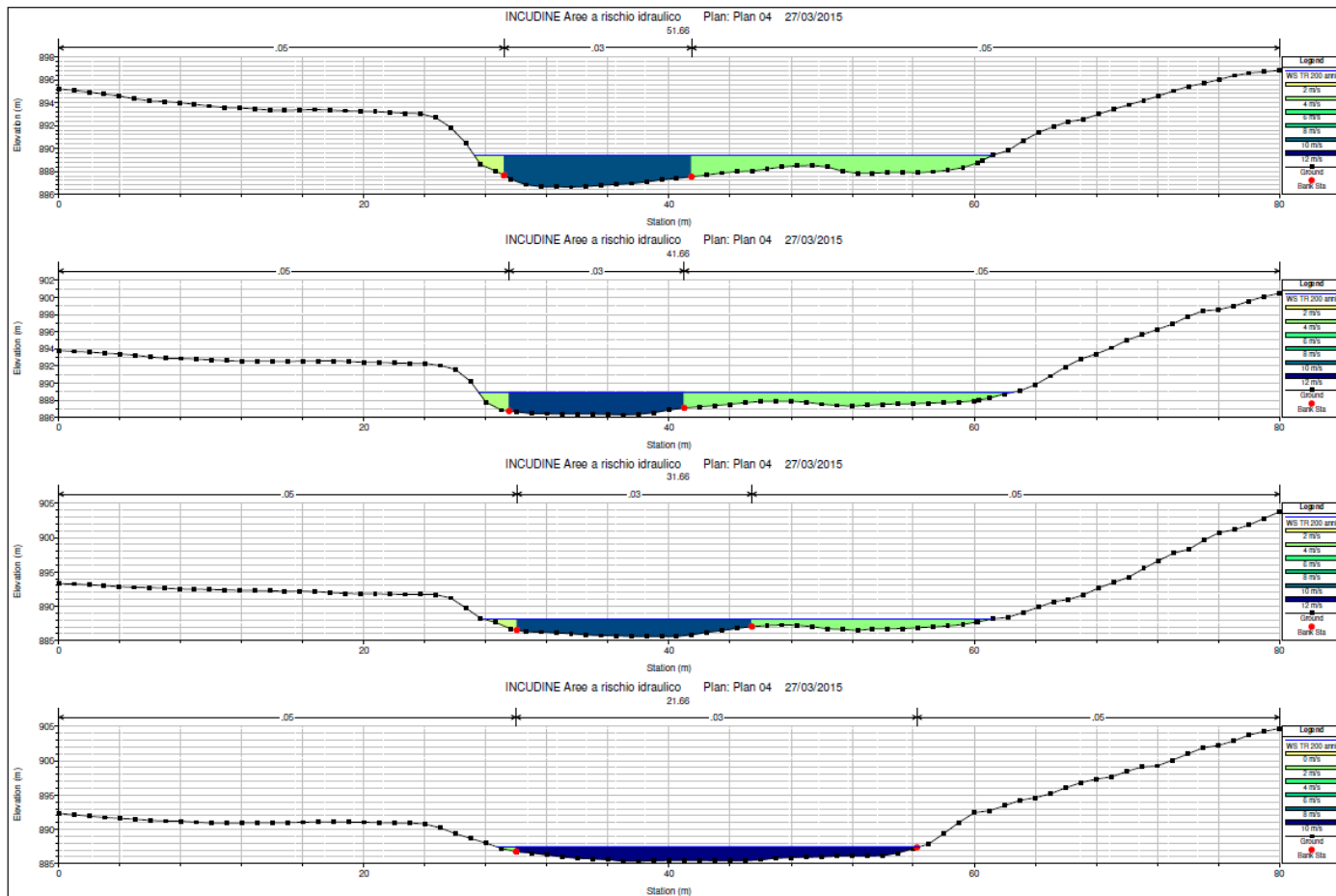












Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Froude # Chl
INCUDINE	864	TR 200 anni	423.00	905.49	908.77	909.76	7.87	53.74	1.47
INCUDINE	844	TR 200 anni	423.00	905.35	910.20	910.20	5.28	102.79	0.82
INCUDINE	824	TR 200 anni	423.00	905.30	909.28	909.90	6.59	82.69	1.17
INCUDINE	804	TR 200 anni	423.00	905.09	908.17	908.98	7.93	68.04	1.53
INCUDINE	784	TR 200 anni	423.00	904.77	908.70	908.70	5.45	105.37	0.92
INCUDINE	764	TR 200 anni	423.00	904.37	907.98	908.48	6.38	86.63	1.19
INCUDINE	744	TR 200 anni	423.00	904.09	907.38	908.05	6.96	77.25	1.38
INCUDINE	724	TR 200 anni	423.00	903.90	907.00	907.74	7.21	74.44	1.42
INCUDINE	704	TR 200 anni	423.00	903.60	906.62	907.40	7.42	71.60	1.47
INCUDINE	684	TR 200 anni	423.00	903.14	906.48	907.20	7.18	69.45	1.42
INCUDINE	664	TR 200 anni	423.00	902.58	906.16	906.94	7.38	68.80	1.52
INCUDINE	662	TR 200 anni	423.00	903.56	908.34	908.34	5.67	104.43	0.86
INCUDINE	652	TR 200 anni	423.00	903.35	907.27	907.94	7.14	78.88	1.20
INCUDINE	642	TR 200 anni	423.00	903.12	906.33	907.29	8.40	67.40	1.61
INCUDINE	632	TR 200 anni	423.00	902.96	906.44	907.28	7.81	71.62	1.43
INCUDINE	622	TR 200 anni	423.00	902.75	906.19	907.07	7.92	69.69	1.46
INCUDINE	612	TR 200 anni	423.00	902.50	906.41	907.12	7.30	76.94	1.27
INCUDINE	602	TR 200 anni	423.00	902.31	906.33	906.97	7.31	77.34	1.24
INCUDINE	592	TR 200 anni	423.00	902.00	906.26	906.95	7.37	80.24	1.20
INCUDINE	582	TR 200 anni	423.00	901.80	906.24	906.87	7.45	86.75	1.15
INCUDINE	572	TR 200 anni	423.00	901.65	905.31	906.36	8.52	74.38	1.46
INCUDINE	563	TR 200 anni	423.00	901.56	904.85	905.84	8.95	69.84	1.64
INCUDINE	551	TR 200 anni	423.00	901.27	904.75	905.72	9.18	71.85	1.63
INCUDINE	545	TR 200 anni	423.00	901.13	904.51	905.50	9.32	71.30	1.67
INCUDINE	534	TR 200 anni	423.00	900.88	904.36	905.37	9.23	69.96	1.64
INCUDINE	519	TR 200 anni	423.00	900.78	904.03	905.06	9.14	67.52	1.66
INCUDINE	512	TR 200 anni	423.00	900.64	903.71	904.75	9.11	65.85	1.74

INCUDINE	502	TR 200 anni	423.00	900.54	903.39	904.47	9.10	64.40	1.80
INCUDINE	492	TR 200 anni	423.00	900.30	903.09	904.15	9.09	62.93	1.88
INCUDINE	482	TR 200 anni	423.00	899.92	902.51	903.50	10.46	67.45	2.23
INCUDINE	472	TR 200 anni	423.00	899.75	902.49	903.55	10.28	70.79	2.09
INCUDINE	462	TR 200 anni	423.00	899.59	902.28	903.33	10.11	70.77	2.06
INCUDINE	452	TR 200 anni	423.00	899.49	902.11	903.14	9.70	72.89	1.97
INCUDINE	442	TR 200 anni	423.00	899.22	902.05	903.03	9.15	76.48	1.81
INCUDINE	431	TR 200 anni	423.00	898.88	902.08	903.00	8.72	83.61	1.62
INCUDINE	422	TR 200 anni	423.00	898.71	901.98	902.81	8.77	86.12	1.59
INCUDINE	412	TR 200 anni	423.00	898.52	901.53	902.40	8.69	77.57	1.68
INCUDINE	403	TR 200 anni	423.00	898.35	901.02	901.93	8.68	68.37	1.89
INCUDINE	392	TR 200 anni	423.00	898.22	901.05	901.89	8.23	73.81	1.69
INCUDINE	382	TR 200 anni	423.00	898.06	900.85	901.69	8.33	74.55	1.73
INCUDINE	373	TR 200 anni	423.00	897.94	900.56	901.43	8.25	71.56	1.77
INCUDINE	361	TR 200 anni	423.00	897.81	900.26	901.12	8.09	68.86	1.78
INCUDINE	352	TR 200 anni	423.00	897.64	900.20	901.03	8.06	75.05	1.66
INCUDINE	343	TR 200 anni	423.00	897.13	899.97	900.92	7.85	66.40	1.60
INCUDINE	331	TR 200 anni	423.00	896.72	899.47	900.44	8.11	61.62	1.64
INCUDINE	322	TR 200 anni	423.00	896.36	899.75	900.46	7.68	73.27	1.37
INCUDINE	312	TR 200 anni	423.00	896.28	900.06	900.38	6.92	83.56	1.17
INCUDINE	302	TR 200 anni	423.00	895.94	899.64	900.13	7.30	77.55	1.23
INCUDINE	292	TR 200 anni	423.00	895.82	899.31	900.00	7.64	73.67	1.32
INCUDINE	282	TR 200 anni	423.00	895.39	898.29	899.30	8.34	59.54	1.61
INCUDINE	272	TR 200 anni	423.00	894.81	898.27	899.05	8.72	65.33	1.53
INCUDINE	262	TR 200 anni	423.00	894.31	897.56	898.62	9.25	59.79	1.70
INCUDINE	252	TR 200 anni	423.00	893.92	898.08	898.70	8.15	72.54	1.32
INCUDINE	242	TR 200 anni	423.00	893.81	897.33	898.27	8.46	62.11	1.49
INCUDINE	232	TR 200 anni	423.00	893.55	896.81	897.92	9.64	63.55	1.74
INCUDINE	222	TR 200 anni	423.00	893.26	895.54	896.83	9.46	46.94	2.24
INCUDINE	212	TR 200 anni	423.00	893.04	895.00	896.30	9.56	45.71	2.34
INCUDINE	201	TR 200 anni	423.00	892.67	894.49	895.75	9.70	46.17	2.47
INCUDINE	192	TR 200 anni	423.00	891.81	894.02	895.34	9.76	46.67	2.31
INCUDINE	182	TR 200 anni	423.00	891.56	893.80	895.06	9.58	48.65	2.26
INCUDINE	172	TR 200 anni	423.00	891.26	893.36	894.64	9.58	47.99	2.22
INCUDINE	162	TR 200 anni	423.00	890.76	893.13	894.40	9.59	50.56	2.09
INCUDINE	152	TR 200 anni	423.00	890.44	893.10	894.31	9.43	55.19	1.92
INCUDINE	142	TR 200 anni	423.00	890.16	892.97	894.13	9.46	57.52	1.85
INCUDINE	132	TR 200 anni	423.00	889.93	892.94	894.02	9.02	58.27	1.75
INCUDINE	122	TR 200 anni	423.00	889.70	892.80	893.91	9.27	61.59	1.72
INCUDINE	112	TR 200 anni	423.00	889.45	892.20	893.42	9.28	55.02	1.88
INCUDINE	102	TR 200 anni	423.00	889.02	891.28	892.54	10.13	51.82	2.25
INCUDINE	92	TR 200 anni	423.00	888.65	890.82	892.09	9.98	50.16	2.33
INCUDINE	82	TR 200 anni	423.00	888.37	890.32	891.58	9.84	47.82	2.40
INCUDINE	72	TR 200 anni	423.00	887.71	890.06	891.28	9.67	49.89	2.30
INCUDINE	62	TR 200 anni	423.00	887.22	890.05	891.23	10.85	60.87	2.13
INCUDINE	52	TR 200 anni	423.00	886.63	889.40	890.64	10.46	57.36	2.13
INCUDINE	42	TR 200 anni	423.00	886.31	888.93	890.18	10.82	57.66	2.21
INCUDINE	32	TR 200 anni	423.00	885.57	888.12	889.44	10.63	51.70	2.34
INCUDINE	22	TR 200 anni	423.00	885.33	887.47	888.84	9.98	42.77	2.51
INCUDINE	12	TR 200 anni	423.00	884.77	887.19	888.58	10.05	46.34	2.25
INCUDINE	0	TR 200 anni	423.00	883.88	886.89	888.32	9.66	44.29	1.97

8 Verifica della instabilità dei massi accatastati

Allo scopo di verificare l'idoneità dei massi presenti a resistere alle correnti di piena (l'allontanamento dei massi innescherebbe inoltre processi erosivi al piede del muro d'argine con conseguente destabilizzazione dell'opera esistente), viene di seguito proposta una modellazione speditiva condotta attenendosi al metodo proposto da Armanini A. & Scotton P. (1995).

8.1 Il modello Armanini A. & Scotton P. (1995).

Il diametro minimo dei massi costituenti l'opera di protezione deve garantire la stabilità della stessa: tale diametro dipende dalla geometria della sponda/sezione idraulica oltre che alla velocità ed altezza delle acque che caratterizzano il canale.

Il *Metodo Armanini e Scotton* (Armanini A. e Scotton P., 1995), la cui teoria è riportata di seguito, permette il calcolo di tale parametro. I criteri che stanno alla base dell'impostazione seguita da Armanini e Scotton derivano dalla teoria del moto incipiente di Shields, portando in conto l'effetto delle forze di gravità nel caso di sponde inclinate o di pendenza del fondo non trascurabile.

Il metodo di calcolo è iterativo e consiste nei seguenti passi:

- si considera un valore di primo tentativo del diametro D dei massi;
- ipotizzando un regime di moto uniforme, si determina l'altezza idrica h di moto uniforme;
- si determina lo sforzo tangenziale massimo τ_0 ricavabile mediante grafici (Fig. 1) dove sono riportati i valori ξ dello sforzo tangenziale massimo adimensionalizzato sul fondo e sulle sponde, in funzione del tipo di sezione e del rapporto B/h con B larghezza del fondo.

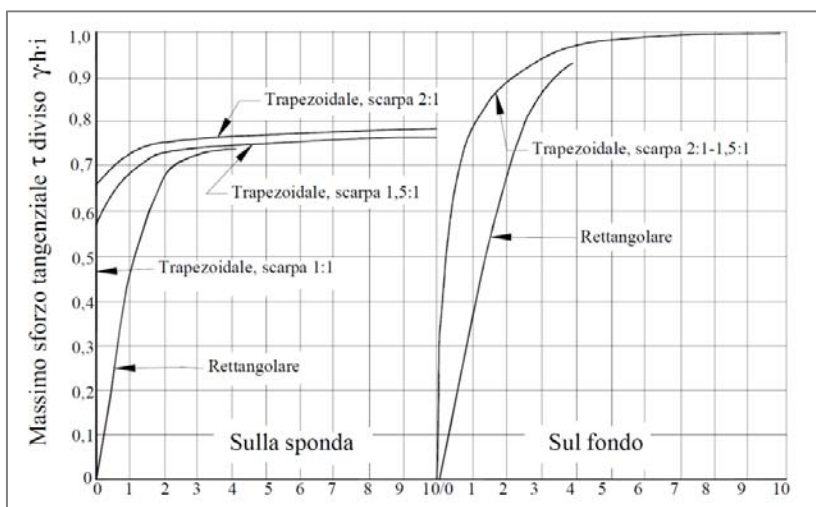


Fig. 1 - Massimi sforzi tangenziali sul fondo e sulle sponde di alvei a sezione trapezoidale o rettangolare (Lane e Carlson, 1953)

Lo sforzo tangenziale è adimensionalizzato rispetto alla quantità $\gamma_w \cdot h \cdot j$, con j pendenza locale della linea dell'energia e γ_w peso specifico dell'acqua, e quindi può essere espresso dalla relazione: $\tau_0 = \xi \cdot \gamma_w \cdot h \cdot j$

si calcola la velocità di attrito locale: $u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_w}} = \sqrt{\xi \cdot \gamma_w \cdot h \cdot j}$

si calcola il numero di Reynolds del grano: $Re_* = \frac{u_* \cdot D}{\nu_w}$

dove ν_w è la viscosità cinematica dell'acqua;

sulla base del valore del numero di Reynolds si calcola il parametro di mobilità critico Π_c , che viene desunto dall'abaco di Shields (Fig. 2).

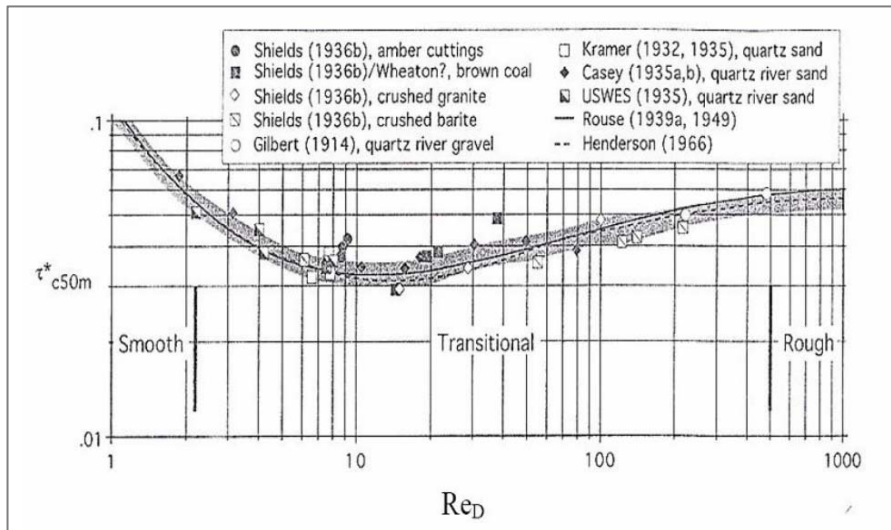


Fig. 2 - Abaco di Shields

Il valore del parametro di mobilità critica deve venire, se necessario, opportunamente corretto:

$$\theta_c \rightarrow \theta^*_c$$

al fine di tener conto di tre effetti:

effetto della pendenza del fondo; in tal caso il valore base θ_c viene moltiplicato per il coefficiente: $K_1 = \cos \alpha - \frac{\sin \alpha}{\tan \vartheta}$

con α = angolo di inclinazione del fondo alveo sull'orizzontale

ϑ = angolo di attrito del materiale

effetto della pendenza delle sponde; in tal caso il valore base θ_c viene moltiplicato per il coefficiente: $K_2 = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \beta}{\sin^2 \vartheta}}$

con β = angolo di inclinazione della sponda sull'orizzontale.

effetto della sommergenza relativa; in tal caso il valore base θ_c viene moltiplicato per il coefficiente: $s = 1 + 0.67 \cdot \sqrt{\frac{D}{h}}$

I coefficienti appena illustrati devono essere applicati anche insieme se si presentano contemporaneamente alcune delle situazioni descritte.

Sulla base del parametro di mobilità corretto θ^*_c si determina il minimo diametro di grano stabile mediante la formula: $D' = \frac{(u^*)^2}{g \cdot \Delta \cdot \theta^*_c}$

con Δ = densità relativa del grano immerso

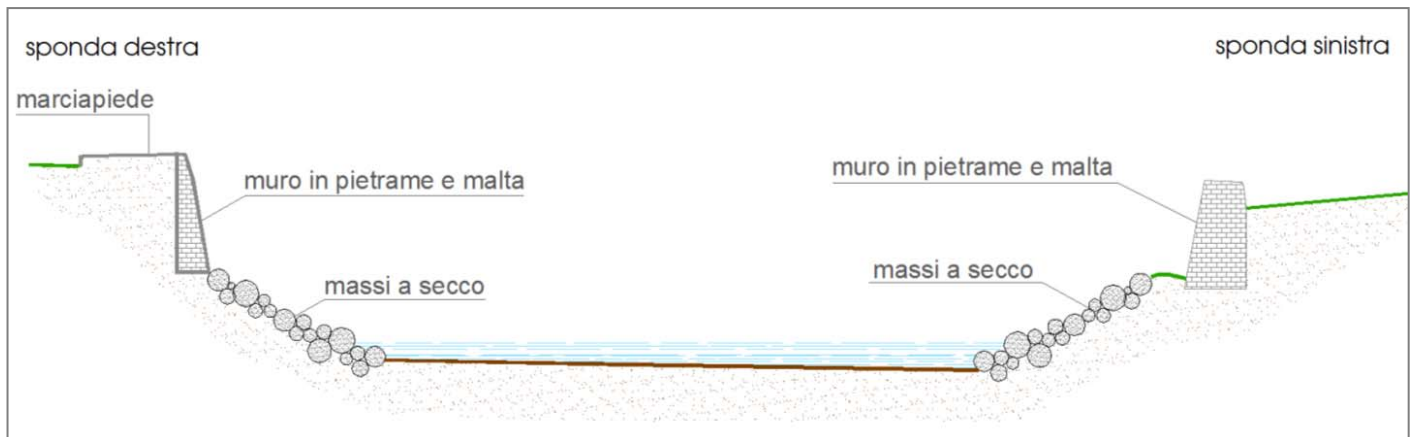
g = accelerazione gravitazionale

Il processo è iterativo e termina quando $D = D'$; a tale dimensione viene applicato un fattore di sicurezza $FS = 1.3$.

8.2 Valutazione della stabilità dei massi presenti

Nella tabella seguente si riporta la modellazione secondo il modello di Armanini A. & Scotton P. (1995) condotta considerando la geometria della sezione idraulica del Fiume Oglio per il tratto in esame (vedasi rilievo topografico) ed i parametri idraulici (pendenza fondo, velocità corrente idrica ed altezza media della piena) desunti dallo studio di pericolosità idraulica in precedenza citato.

Sezione tipo del Fiume Oglio all'altezza dell'abitato di Incudine



$D =$	0.3	m	diámetro del grano
$V =$	0.014	m ³	volumen del grano
$W =$	0.375	kN	peso del blocco
$x =$	3.5		
$y =$	1.4		scarpa
$\beta =$	21.80	°	angolo sponda su orizzontale
$i =$	0.018		pendenza media sul fondo
$\alpha =$	1.03	°	angolo fondo su orizzontale
$B =$	16	m	larghezza canale
$h =$	4	m	profondità media della corrente
$B/h =$	4		
$\xi =$	0.75		fattore di correzione per posizione
$j =$	0.02		cadente linea energia
$\gamma_w =$	9.81	kN/m ³	peso specifico acqua
$\rho_w =$	1000	kg/m ³	densità dell'acqua
$\nu_w =$	1.31E-06	m ² /s	viscosità cinematica dell'acqua
$\gamma_s =$	26.5	kN/m ³	peso specifico del grano
$\Delta =$	1.701		densità relativa del grano immerso
$\Phi =$	35	°	angolo di attrito del grano
$\tau_0 =$	0.589	kPa	sforzo di trascinamento
$u^* =$	0.767	m/s	velocità di attrito del grano
$h/D =$	13.33		parametro di sommergenza relativa
$Re^* =$	175695		numero di Reynolds del grano
θ_c (per $h/D > 6$) =	0.0600		parametri di mobilità
K_2	0.762		correzione per pendenza sponde
θ_c^* (per $h/D > 6$) =	0.045		parametro di mobilità corretto
D' (per $h/D > 6$) =	0.79	m	diámetro del grano stabile
$FS =$	1.3		
D progetto =	0.75		

Le valutazioni condotte dimostrano come le dimensioni minime dei massi per garantire la stabilità della scogliera, nelle condizioni considerate, sia pari a 0.75 m (con un fattore di sicurezza di 1.3 come da normativa vigente).

I blocchi attualmente presenti con dimensione media di 0.3 m sono facilmente asportabili dalla corrente di piena prevista: infatti il fattore di sicurezza risulta pari a 0.38.

9 Indicazioni progettuali

Per il tratto di corso a valle del ponte del municipio di Incudine, la pericolosità idraulica delle aree esterne all'alveo è da imputare a:

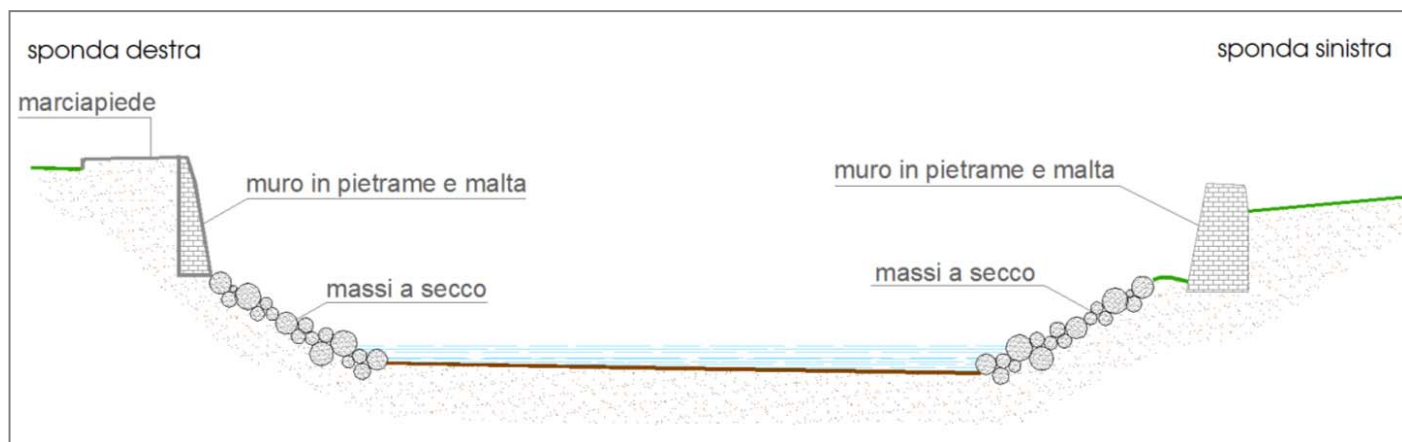
1. attraversamento stradale (ponte del municipio) a sezione ristretta: il superamento della criticità è oggetto di progettazione in corso;
2. sezioni d'alveo non idonee a supportare il deflusso delle portate di piena per gli aspetti geometrici:
 - a) larghezza;
 - b) altezze degli argini;
 - c) pendenze del fondo;
3. scabrosità del fondo alveo;
4. presenza di massi accatastati alla base dei muri d'argine di dimensione non idonea a resistere alla forza di trascinamento delle correnti;
5. presenza di aperture nell'argine in sinistra idraulica: il superamento della criticità è contemplato nel progetto MITIGAZIONE DEL RISCHIO ALLUVIONALE TRATTO SUPERIORE FIUME OGLIO – LOTTO 3 redatto nel 2023 da Ing. F. Bongiovanni e ing. C. Catana per conto dell'Unione dei Comuni dell'Alta Valle Camonica.

L'eliminazione completa del rischio idraulico nel tratto oggetto degli interventi necessita di significative modifiche delle geometrie sia della sezione di deflusso che della pendenza del fondo.

Il superamento delle criticità legate al punto 2a risulta contingentato dall'impossibilità pratica di ampliare l'alveo se non comportando sensibili modifiche all'assetto territoriale: in destra idraulica l'alveo è delimitato da Via Sandro Pertini, strada comunale di limitata larghezza che non può essere ulteriormente ridotta (almeno per il tratto di circa 180 m a valle del ponte); in sinistra idraulica, le abitazioni esistenti sono a ridosso degli argini.

Le basse pendenze del fondo alveo risultano vincolate su un lungo tratto.

Lungo il tratto di corso d'acqua in esame, alla base dei muri d'argine esistenti, sono presenti massi accatastati alla rinfusa: tali massi (la cui apposizione in sito è da ricondurre ad attività antropica) presentano dimensioni medie non sufficienti a supportare gli sforzi indotti dal deflusso delle portate di piena. Ne consegue che nelle condizioni attuali può facilmente verificarsi l'asportazione dei blocchi con conseguenti innesco di fenomeni erosivi alla base delle scarpate esistenti.



Le opere di difesa idraulica realizzate nel tratto a monte dell'abitato possono essere ritenute sufficienti a contenere il trasporto solido del corso d'acqua di fondovalle mentre l'unico effetto attendibile sulle portate di piena è quello di ritardare di circa 20% il deflusso della massima portata.

9.1 Linee d'intervento

Preso atto delle limitazioni introdotte dalla modellazione idraulica e delle nuove opere in fase di progettazione (ponte), in linea con le finalità del progetto (MITIGAZIONE DEL RISCHIO IDRAULICO) l'indicazione delle linee d'intervento è ottenuta integrando l'analisi critica dei risultati e lo stato di fatto delle opere di regimazione esistenti: valutato lo stato dei luoghi e gli interventi già progettati in destra idraulica, nonché le finalità dell'intervento (MITIGAZIONE DEL RISCHIO IDRAULICO), si consiglia la realizzazione di interventi in alveo mirati all'aumento della sezione idraulica ed al contemporaneo incremento della velocità di deflusso. Dovranno inoltre essere estese a valle le difese spondali in destra idraulica.

A tale scopo si consiglia la realizzazione di un **selciatoone di fondo** a superficie liscia e la **rimozione dei blocchi presenti in alveo alla base dei muri d'argine** con contemporanea realizzazione di una **scogliera cementata a consolidamento/sottofondazione degli argini esistenti.**



Nel TRATTO di sponda destra COMPRESO FRA LA CONFLUENZA DELLA VALLE DEL FOSSATO DEL CASTELLO, si consiglia la realizzazione di un **muro d'argine**.

9.2 Aspetti idraulici

La realizzazione degli interventi consigliati comporta una modifica degli aspetti idraulici che sono riassunti nel seguente diagramma, nel quale i risultati delle verifiche idrauliche condotte alla SEZIONE P4 (vedasi rilievo topografico allegato al progetto: la sezione è posta immediatamente a valle del ponte del Municipio) nell'assetto attuale - Stato di Fatto SF - sono messi a confronto con i risultati ottenuti nelle ipotesi di progetto (SP).

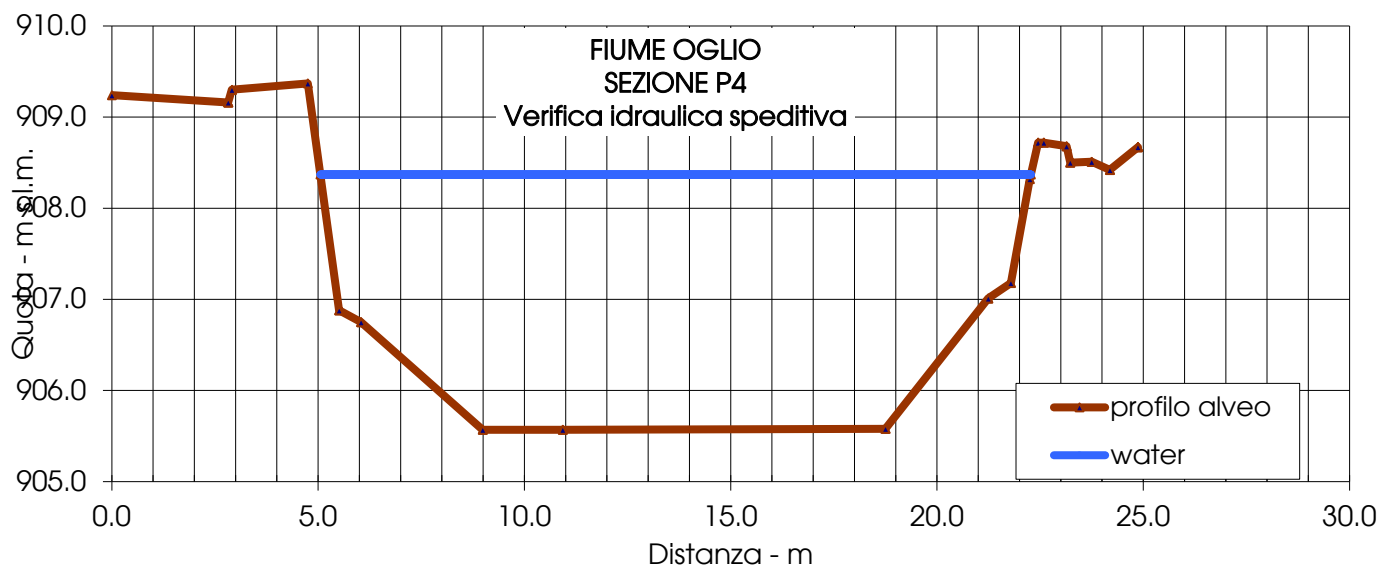
Stato di fatto

geometria		caratteristiche sezione		
n. p.	PROG.	QUOTE	Pendenza media (-)	0.013
1.00	0.00	909.24		
2.00	2.82	909.16	Coefficiente di Manning	0.030
3.00	2.91	909.30		
4.00	4.75	909.37	H water (m)	2.800
5.00	5.51	906.88	Quota pelo libero (m)	908.37
6.00	6.04	906.75	Area sezione idrica (mq)	41.13
7.00	8.99	905.57	Perimetro bagnato B (m)	19.77
8.00	10.93	905.57	Raggio Idraulico (m)	2.080
9.00	18.75	905.58		
10.00	21.24	907.01		
11.00	21.79	907.18		

12.00	22.25	908.32	Velocità V (m/s)	6.190
13.00	22.45	908.72	Portata q (mc/s)	254.59
14.00	22.59	908.72	Energia specifica E(m)	4.7500
15.00	23.14	908.68	V critica (m/s)	15.40
16.00	23.23	908.50	Y media (m)	2.39
17.00	23.75	908.51	Y critica (m)	1.32
18.00	24.19	908.42	numero di Froude	4.78
19.00	24.87	908.67	Pendenza critica (-)	0.2052

Stato di progetto

geometria		caratteristiche sezione		
n. p.	PROG.	QUOTE	Pendenza media (-)	0.013
1.00	0.00	909.24		
2.00	2.82	909.16	Coefficiente di Manning	0.015
3.00	2.91	909.30		
4.00	4.75	909.37	H water (m)	2.800
5.00	5.51	907.00		
6.00	6.04	907.00		
7.00	8.99	905.57		
8.00	10.93	905.57	Quota pelo libero (m)	908.37
9.00	18.75	905.58	Area sezione idrica (mq)	40.73
10.00	21.24	907.00	Perimetro bagnato B (m)	19.88
11.00	21.79	907.00	Raggio Idraulico (m)	2.050
12.00	22.25	908.32	Velocità V (m/s)	12.270
13.00	22.45	908.72	Portata q (mc/s)	499.76
14.00	22.59	908.72	Energia specifica E(m)	10.4700
15.00	23.14	908.68	V critica (m/s)	30.94
16.00	23.23	908.50	Y media (m)	2.37
17.00	23.75	908.51	Y critica (m)	1.32
18.00	24.19	908.42	numero di Froude	9.46
19.00	24.87	908.67	Pendenza critica (-)	0.20182

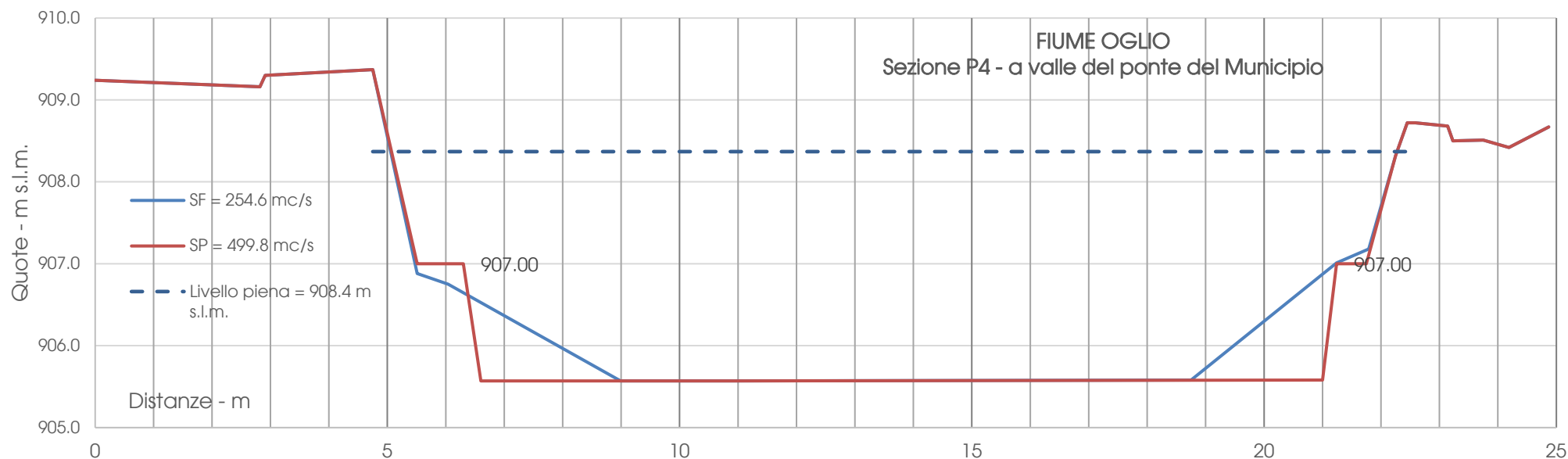


Considerando un livello idrometrico di 908.4 m s.l.m., l'ampliamento seppure modesto della sezione idraulica, associato alla lastricatura del fondo (con conseguente riduzione dell'indice di Manning: da 0.03 a 0.01 con un aumento della velocità di deflusso della corrente), consente - a parità di livello idrometrico - il deflusso di una portata sensibilmente superiore:

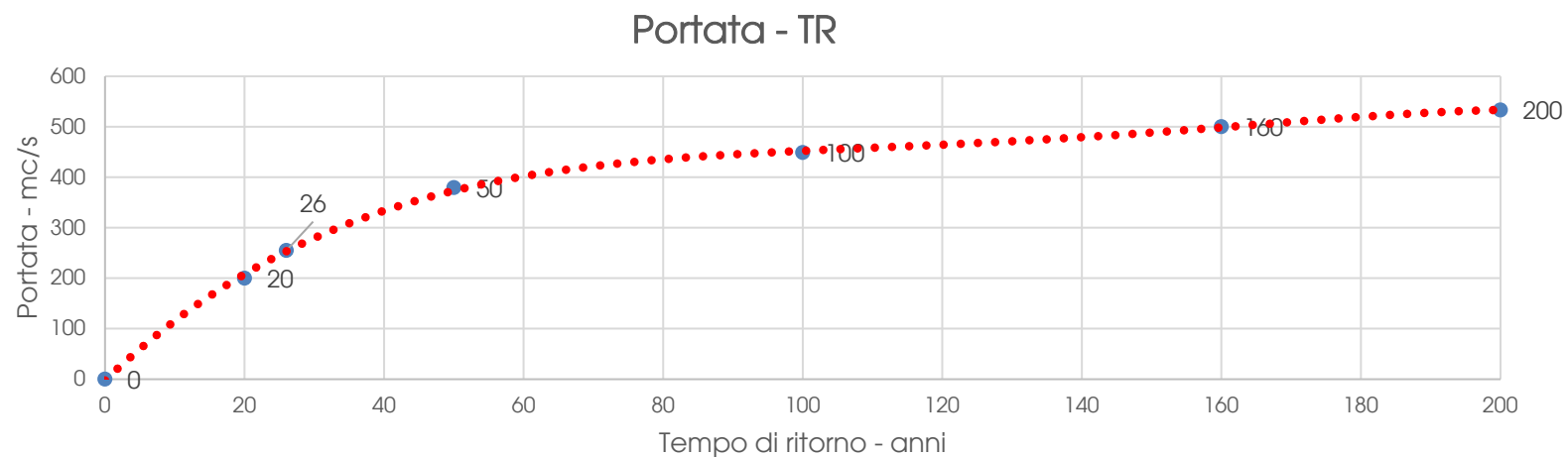
$$Q_{sf} = 254.6 \text{ mc/s}$$

$$Q_{sp} = 499.8 \text{ mc/s}.$$

Come illustrato nel successivo grafico, le portate transitabili nell'assetto geometrico attuale sono associabili ad eventi con TR = 26 anni; nelle condizioni geometriche di progetto (SF) le portate transitabili sono associabili ad un evento con TR = 160 anni.



TR	Q
26	255
50	379
100	449
160	500
200	533
anni	mc/s



10 Il rischio residuo

Al fine di esprimere una valutazione della bontà dei risultati ottenibili dall'intervento in termini di riduzione del RISCHIO è condotta un'analisi in accordo a quanto riportato in *Proposta metodologica per l'aggiornamento delle mappe di pericolosità e di rischio - Attuazione della Direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi da alluvioni (Decreto Legislativo n. 49/2010) - ISPRA Manuali e linee guida 82/2012* considerando come scenari d'evento l'ipotesi del deflusso delle acque di esondazione per scenari d'evento con Tempi di ritorno di 100 e 200 anni.

Nel DPCM 1998, il RISCHIO (R) è definito dalla seguente relazione:

$$R = P \times E \times V$$

Dove:

- P** pericolosità o probabilità di accadimento di un evento alluvionale di data intensità in un intervallo temporale prefissato e su una determinata area;
- E** valore degli elementi a rischio (intesi come persone, beni, patrimonio culturale ed ambientale ecc.) presenti nell'area alluvionabile;
- V** vulnerabilità degli elementi a rischio, è il grado di perdita o danno associato a un elemento o a un gruppo di elementi a rischio risultante dal verificarsi di un fenomeno naturale di una data magnitudo.

La combinazione di E e V rappresenta il danno potenziale D.

Attenendosi alla classificazione riportata nella Tab. 8.15 del Manuale ISPRA, la classificazione del rischio si basa sulle seguenti definizioni:

CLASSE	DEFINIZIONE	VALORI	DESCRIZIONE
R1	MODERATO	$0 < R < 0.25$	Per il quale i danni sociali, economici e al patrimonio ambientale sono marginali
R2	MEDIO	$0.25 < R < 0.50$	Per il quale sono possibili danni minori agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale che non pregiudicano l'incolumità del personale, l'agibilità degli edifici e la funzionalità delle attività economiche
R3	ELEVATO	$0.50 < R < 0.75$	Per il quale sono possibili problemi per l'incolumità delle persone, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture con conseguente inagibilità degli stessi, la interruzione di funzionalità delle attività socioeconomiche e danni rilevanti al patrimonio ambientale
R4	MOLTO ELEVATO	$0.75 < R < 1.00$	Per il quale sono possibili la perdita di vite umane e lesioni gravi alle persone, danni gravi agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale, la distruzione di attività socioeconomiche

10.1 La pericolosità residua

Come illustrato nei paragrafi precedenti, gli interventi proposti portano ad un aumento delle portate defluibili in alveo, senza raggiungere tuttavia le dimensioni necessarie a contenere il deflusso della portata di massima piena prevista per tempi di ritorno (T_R) di 200 anni: gli interventi non eliminano il rischio alluvionale (per esondazione) delle aree in destra e sinistra idraulica ma riducono la pericolosità dei fenomeni attesi, che viene espressa come probabilità del verificarsi dell'esondazione.

$$P_N[x(T_R)] = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_R}\right)^N$$

Considerando la vita utile (N) delle abitazioni pari a 50 anni, le probabilità che le stesse possano essere raggiunte dalle acque di esondazione per gli eventi attesi con risultano pari a:

TR	Q	Vu	P _N	
26	255	50	86%	Pericolosità attuale
50	379	50	64%	
100	449	50	39%	
140	500	50	30%	Pericolosità residua
200	533	50	22%	
anni	mc/s	anni	-	

10.2 Valutazione del danno

Il danno atteso è espresso in termini di *vulnerabilità* e *danno esposto* associati alla presenza di persone (D_p) ed alle attività economiche (D_e) espresse come:

	Presenza umana	Attività economiche
Vulnerabilità	$V_p = f(h, v)$	$V_e = f(h, v)$
Valore esposto	$E_p = f(\text{densità}, \text{durata})$	$E_e = f(\text{uso del suolo})$
Danno	$D_p = V_p \times E_p$	$D_e = V_e \times E_e$

10.2.1 Danno associato alla presenza umana (D_p)

Da cui il danno associato alla presenza umana

$$D_p = V_p \times F_{\text{densità}} \times F_{\text{durata}}$$

dove:

V_p Vulnerabilità

F_{densità} Fattore di densità

F_{durata} Fattore di durata dell'esposizione.

In via cautelativa, ai parametri sopra riportati sono assegnati i seguenti valori:

$$V_p = 1$$

F_{densità} = 0.9 (valido per 1-40 abitanti per km² come indicato nella **tabella 8.7** della normativa di riferimento)

F_{durata} = 1 (valido per ambiti residenziali come indicato nella **tabella 8.8** della normativa di riferimento)

Da cui, la stima del danno associato alla presenza umana risulta:

$$D_p = 0.9$$

10.2.2 Danno associato alle attività economiche (D_e)

Nelle aree raggiungibili dalle acque di esondazione sono presenti edifici. Da cui il danno associato alle attività economiche

$$D_e = V_e \times V_{\text{relativo}}$$

In accordo ai contenuti della **Tab. 8.11** del testo ISPRA di riferimento, la vulnerabilità associata alle attività economiche ("residenziale") è espressa in funzione dell'altezza della corrente attesa:

Uso del suolo	Vulnerabilità
Residenziale	$V_e(h) = 0.5 \times h$

Considerando come le acque di esondazione raggiungono le aree a tergo degli argini in sinistra idraulica formando lame d'acqua con altezze medie di 1.0 m, $V_e = 0.5$.

In accordo ai contenuti della **Tab. 8.13** del testo ISPRA di riferimento, il valore economico associato alle attività economiche ("residenziale") risulta pari a:

Uso del suolo	Valore relativo
Residenziale	1.0

Da cui il danno associato alle attività economiche

$$D_e = 0.5$$

10.3 Determinazione del rischio

Il rischio specifico per la singola categoria di elementi esposti deriva dalla combinazione di danno e probabilità per gli scenari di pericolosità, normalizzata rispetto al rischio specifico massimo ed è espresso come:

$$R_i = \frac{\sum_{j=1}^3 P_{i,j} \cdot D_{i,j}}{\sum_{j=1}^3 P_{i,j}}$$

Considerando come scenari gli eventi alluvionali per TR pari a 20, 100 e 200 anni, dall'analisi dei risultati delle verifiche idrauliche condotte nelle ipotesi attuali e nelle condizioni di progetto consigliato si rileva come la sezione d'alveo attuale sia in grado di supportare il transito della sola portata calcolata per TR = 20 mentre nelle ipotesi di progetto è transitabile in alveo una portata superiore alla portata di piena di TR = 100 anni ma inferiore ad una portata stimata per TR = 200 anni.

I calcoli del RISCHIO TOTALE nelle condizioni attuali (RISCHIO ATTUALE) e nelle ipotesi di progetto (RISCHIO RESIDUO) sono riassunti nella seguente tabella:

Dp - Danno per persone							RISCHIO TOTALE			
TR	V	PN	Vp	Fdensità	Fdurata	Dp	Dp x PN	RISCHIO ATTUALE	Dp x PN	RISCHIO RESIDUO
20	80	98%	1	0.9	1	0.9		0.735		0.583
100	80	55%	1	0.9	1	0.9	0.50			
200	80	33%	1	0.9	1	0.9	0.30		0.30	
De - Danno per attività economiche										
	Vu	PN	Ve	Vrelativo		DE				
20	50	92%	0.5	1		0.5				
100	50	39%	0.5	1		0.5	0.20			
200	50	22%	0.5	1		0.5	0.11		0.025	
anni										

La realizzazione dei lavori nelle ipotesi consigliate comporta una MITIGAZIONE DEL RISCHIO associato ad eventi alluvionali per le aree poste in sinistra idrografica.

Dott. Geol. Gilberto Zaina

(documento firmato digitalmente)

Malonno (Brescia), dicembre 2025