

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Civile

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Civile**

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi idraulica e morfologica del tratto di Torrente Gesso che costeggia la città di Cuneo



Relatore

Prof. Carlo Vincenzo Camporeale

Candidato

Mario Gazzola

Dicembre 2017

Ringraziamenti

Questo lavoro segna una tappa importante di un viaggio in cui mi sono incamminato tempo fa, dopo aver intrapreso la svolta per il percorso universitario. Mi preme sottolineare che il traguardo che con la laurea raggiungo, rappresenta, per fortuna, un nuovo punto di partenza per un cammino in cui non si smette mai di crescere e di apprendere, ma non è ancora il momento di farsi prendere dalle fantasie sul futuro.

In questo istante sento di dover esprimere il mio ringraziamento alle persone che mi sono state vicine e mi hanno accompagnato fino a qui. Colgo quindi l'occasione per ringraziare il mio relatore, il professor Carlo Vincenzo Camporeale, per avermi dato fiducia sulla scelta del tema e autonomia nella stesura del contenuto. Lo studio di cui mi sono occupato nasce da una idea dell'Ingegnere Stefano Ferrari e da una collaborazione con l'Ente Parco Fluviale Gesso e Stura della città di Cuneo, nella figura del direttore Ing. Luca Gautero e del Geometra Marco Viada, che ha fornito i dati di partenza.

Il cammino di questi ultimi 5 anni è stato impegnativo e faticoso, soprattutto quando dopo una delusione occorreva rimettersi in carreggiata e non demordere. In questo sono state fondamentali le persone che tra i banchi ho conosciuto, con cui ho condiviso tensione, preoccupazione, allegria e risate, gli stessi che oggi chiamo amici.

Esprimo un grazie sincero, forse troppo spesso scontato e poco pronunciato alla mia famiglia che da sempre mi supporta e accompagna nelle mie scelte e difficoltà. Sento di dover manifestare un particolare riconoscimento a mio nonno per avermi portato a Torino nelle settimane in cui ero rimasto infortunato e per aver preso parte, insieme a mia mamma, ai sopralluoghi e alle misurazioni in campo al torrente. In un modo o nell'altro ognuno di voi ha posato un mattoncino per me, tuttosommato questo non è il mio lavoro, bensì il nostro.

Mario

Indice dei contenuti sviluppati nella tesi

Indice dei contenuti sviluppati nella tesi	5
1 Introduzione	1
1.1 Il software BASEMENT	1
2 Caratteristiche generali del Torrente Gesso e dell'area in studio	5
3 Problematiche storiche.....	9
4 Studio della criticità di erosione spondale in località Tetto Bruciato	11
5 Evoluzione storica del corso d'acqua	13
6 Elementi utilizzati.....	15
6.1 Digital Terrain Model (DTM) realizzato nell'anno 2003	15
6.2 Idrogramma di piena per TR di 200 anni.....	15
6.3 Serie storica delle portate misurate.....	16
6.4 Curva granulometrica	17
6.4.1 Curva derivata dallo studio dell'Ing. Giordano	19
6.4.2 Curva ricavata da misure dirette	21
Campionamento in un alveo secondario	23
Campionamento su un isola di sedimento	28
6.4.3 Confronto con la curva ricavata dall'Ing. Giordano	43
7 Componenti di BASEMENT	45
7.1 Modulo fisico-matematico.....	45
7.1.1 Legge di conservazione della massa.....	45
7.1.2 Legge di conservazione della quantità di moto	46
7.1.3 Condizioni di chiusura del problema	47
7.1.4 Condizioni al contorno per il problema	48
7.1.5 Condizioni di chiusura interne.....	50
7.1.6 Condizioni di chiusura al contorno.....	51
7.1.7 Dinamiche di trasporto solido.....	51
7.1.8 Condizioni di chiusura per il trasporto solido	52
7.2 Modulo topografico	53
7.2.1 Realizzazione della mesh tridimensionale.....	53
7.2.2 Considerazioni sulla qualità della mesh	55
7.3 Modulo numerico	63
7.3.1 Metodo della soluzione esatta di Riemann	63
7.3.2 Metodo di risoluzione approssimata al problema di Riemann	64

7.3.3	Taratura del modello idraulico.....	65
8	Componente relativa al trasporto solido	67
9	Visualizzazione risultati e correzione dei bug	69
10	Modello accoppiato	73
10.1	Modello monodimensionale	73
10.2	Modello bidimensionale	75
10.3	Modalità di accoppiamento: Sequential.....	77
11	Simulazione di trasporto solido della configurazione nel 2003.....	79
11.1	Simulazione monodimensionale.....	79
11.2	Simulazione bidimensionale con modello accoppiato.....	84
12	Modello HEC-RAS 1D.....	89
12.1	Il software HEC-RAS	91
12.1.1	Modello spaziale.....	92
12.1.2	Modello idraulico	94
12.1.3	Modello morfologico.....	96
12.1.4	Taratura del modello morfologico	97
12.2	Simulazione con idrogramma lungo	99
12.3	Simulazione con evento di piena	100
13	Simulazione di trasporto solido sotto lo scenario attuale	107
13.1	Simulazione lunga con HEC-RAS	111
13.2	Simulazione evento piena con HEC-RAS	114
13.3	Simulazione lunga con BASEMENT	116
14	Conclusioni.....	119
	Allegati.....	121
	Bibliografia	169

1 Introduzione

La finalità principale di questo lavoro è quella di esaminare il comportamento del Torrente Gesso nel circondario della città di Cuneo per quanto concerne il comportamento idraulico e le dinamiche di trasporto solido. In particolare si vuole calcolare l'erosione a valle di un guado ciclo-pedonale realizzato nel letto del torrente in corrispondenza del Santuario degli Angeli. Al fine di perseguire tale scopo occorre costruire un opportuno modello da implementare con il software numerico BASEMENT, sviluppato e distribuito dal Politecnico di Zurigo (ETHZ).

Un secondo obiettivo dello studio consiste nell'analizzare le discrepanze tra una simulazione eseguita con il software HEC-RAS, largamente utilizzato in ambito ingegneristico in Italia, e una effettuata con BASEMENT, a partire dal medesimo modello spaziale, per valutare le differenze dei modelli numerici e le informazioni aggiuntive che può restituire il software dispensato dal Politecnico Federale di Zurigo.

1.1 Il software BASEMENT

BASEMENT è un programma che consente di simulare i processi nei corsi d'acqua, tenendo conto del flusso idrico e del trasporto solido. I processi possono essere descritti con un modello monodimensionale, bidimensionale o "accoppiato" con combinazione di due o più dei precedenti. Gli effetti delle opere idrauliche sono presi in considerazione imponendo opportune condizioni di vincolo interne; per quanto concerne l'analisi morfologica, il moto dei sedimenti si distingue in trasporto di fondo e in trasporto in sospensione. La granulometria è un aspetto che può venir misurato direttamente in situ secondo le metodologie di campionamento o sulla base di prese fotografiche analizzate con il software sperimentale BASEgrain, sviluppato anch'esso da ETH di Zurigo. Per configurare agevolmente il modello, l'utilizzatore dispone di un'interfaccia grafica in forma di elenco e tendine dal quale si inseriscono i vari box contenenti comandi e parametri. Per utilizzatori più esperti è prevista la scrittura di file di testo, opportunamente compilati, che vengono letti dal programma.

In futuro è prevista un'estensione di BASEMENT con funzioni che consentano di simulare le acque sotterranee, le correnti di densità e di modellare i deflussi nelle tre dimensioni. Il programma, attualmente rilasciato nella versione 2.7 e la relativa documentazione (Fäh et al. 2011) sono disponibili gratuitamente sul sito www.basement.ethz.ch. Il Politecnico federale di Zurigo fornisce all'utilizzatore una licenza singola, non esclusiva e gratuita adatta per fini commerciali e non del programma sviluppato nell'anno 2006.

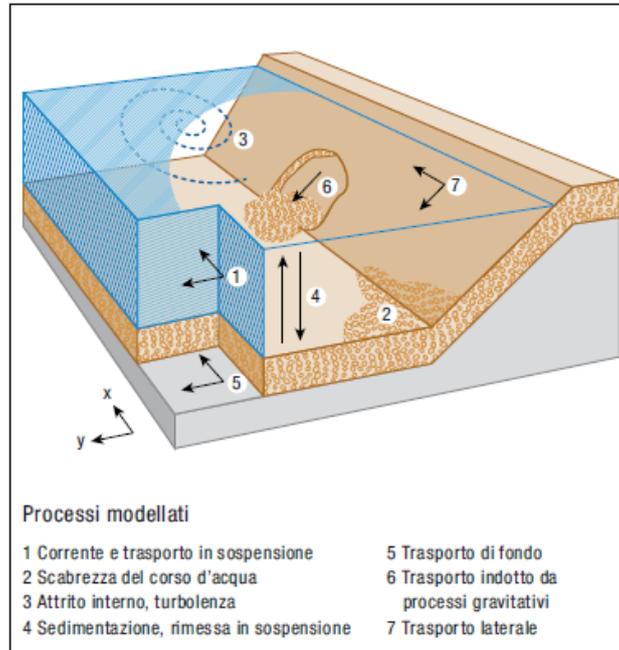


Figura 1.1: Schema rappresentativo dei processi simulati in un modello 2D

Il risolutore del software consiste in un insieme di 3 sottosistemi numerici che possono essere utilizzati in modo indipendente o combinando più moduli tra loro.

Lo strumento numerico monodimensionale denominato *BASEchain* consente di simulare la portata del fiume con la possibilità di integrare calcoli relativi ai fenomeni di trasporto dei sedimenti. Il corso d'acqua è ricostruito sulla base di sezioni.

BASEplane è lo strumento di risoluzione numerica per sistemi bidimensionali che permette la simulazione del comportamento di torrenti e piane alluvionali, sistemi più complessi i cui fenomeni idraulici e di trasporto solido non avrebbero una completa rappresentazione con un modello più semplice. È inoltre possibile accoppiare il modello 2D con uno o più modelli monodimensionali. In Figura 1.1 sono mostrati i processi che possono essere simulati con un modello bidimensionale.

Lo strumento numerico a tre dimensioni denominato *BASEsub* è destinato alla simulazione di campi di flusso di superficie sottostanti il pelo libero, basati sulla geometria spaziale. Il modulo è accoppiato con quello di flusso di superficie *BASEplane*.

Teoricamente, è possibile risolvere il problema matematico fino a fenomeni di piccola scala come le strutture di turbolenza. Tuttavia, in un problema naturale, è per lo più impossibile determinare tutti i limiti e le condizioni iniziali in maniera esatta. Inoltre, il tempo di calcolo necessario per risolvere il sistema completo di equazioni cresce vertiginosamente all'aumentare della risoluzione spaziale e temporale. Pertanto, a discrezione dell'ambito, vengono utilizzati modelli matematici semplificati.

La distribuzione del flusso e di pressione nelle tre dimensioni è descritta in modo completo dalle equazioni di Navier-Stokes. Queste equazioni possono essere risolte numericamente, in quanto soluzioni analitiche esistono solo per problemi fortemente semplificati. L'approccio tridimensionale è adatto solo a studi locali, in cui i fenomeni di turbolenza e il flusso in tutte

le direzioni sono essenziali per i risultati, ad esempio nel caso in cui si voglia valutare il campo di moto attorno alle pile di un ponte.

Assumendo una distribuzione di pressione statica e trascurando le componenti di flusso lungo la verticale, le equazioni di Navier-Stockes sono ricondotte alle equazioni a due dimensioni che descrivono le acque poco profonde. Questo insieme di equazioni fornisce risultati accurati per il comportamento del profilo idrico e del campo delle velocità. Gli effetti legati alla turbolenza non possono essere direttamente risolti, ma sono considerati da un fattore di scabrezza artificiale nelle condizioni di chiusura, che stabilisce la relazione tra velocità di flusso e sforzo di taglio. Le equazioni delle acque basse (Shallow Water Equations) sono utilizzate per flussi bidimensionali come ad esempio la rottura delle dighe, il campo di moto in curva o in aree golenali estese.

Riducendo la dimensione spaziale ancora una volta, si ottengono le equazioni 1D di De Saint-Venant: i principali risultati di questo modello sono il tirante idrico e la velocità media nella direzione del flusso. Questo metodo è ancora in uso per il calcolo esteso di un sistema fluviale, mentre per analisi locali è preferibile ricorrere a un modello di studio più complesso.

2 Caratteristiche generali del Torrente Gesso e dell'area in studio

Il torrente Gesso trae origine dalle Alpi Marittime, sullo spartiacque ligure-francese, e confluisce in sponda destra dello Stura di Demonte a Cuneo, con un bacino imbrifero di 546 km² ed un'asta principale di circa 30 km, a direzione Sud Ovest-Nord Est, interamente in provincia di Cuneo. È costituito dal ramo detto Gesso della Valletta che scende da S. Anna di Valdieri nella parte più occidentale del bacino, sullo spartiacque con lo Stura di Demonte, e dal ramo detto Gesso di Entracque, con il quale si incontra a monte di Valdieri formando un bacino imbrifero di circa 260 km². Dopo circa 2 km a valle dell'abitato di Roccavione riceve in sponda destra il torrente Vermenagna che scende nella vallata di Vernante e Limone, con un bacino imbrifero all'immissione di 166 km². Superato l'abitato di Borgo San Dalmazzo, il torrente Gesso presenta un tratto finale di circa 10 km fino all'immissione nello Stura di Demonte a Cuneo.

Il bacino imbrifero è limitato dalla catena alpina che dal colle di Tenda si estende fino alla cima Malinvern, su di una lunghezza di circa 35 km, caratterizzata dalla presenza di importati vette quali, partendo da sud verso nord, la Testa Ciaudon (2.386 m s.l.m.), la Rocca dell'Abisso (2.755 m s.l.m.), la cima del Gelas (3.143 m s.l.m.), l'Argentera (3.297 m s.l.m.), il M. Malinvern (2.939 m s.l.m.). La morfologia alpina ed il regime delle precipitazioni determinano per il T. Gesso una alimentazione di tipo "nivopluviale" con deflussi condizionati nel periodo primaverile dalla fusione dei nevai sommate ai contributi delle precipitazioni piovose, parzialmente smorzate da numerosi laghi naturali, per cui il regime delle portate presenta valori minimi durante l'inverno e massimi in estate con variazioni giornaliere sensibili in relazione all'escursione termica tra il giorno e la notte. A tali apporti idrici superficiali deve essere sommato il contributo della circolazione idrica sotterranea, condizionata dalla presenza nell'ammasso roccioso di fasce e zone a maggiore permeabilità, che si manifesta con diverse sorgenti, anche di tipo perenne, localizzate sui fianchi vallivi. La piovosità della zona presenta un totale annuo variabile attorno ai 1100 mm; le precipitazioni sono distribuite essenzialmente nelle stagioni primaverile ed autunnale, con differenze minime di precipitazione nei due periodi.

Nel suo sviluppo il torrente costeggia una serie di Comuni, tra cui ricordiamo il Comune di Cuneo, il Comune di Borgo San Dalmazzo, il Comune di Boves, ed il Comune di Roccavione.

Dal documento denominato Piano di Tutela delle Acque sono state estratte alcune informazioni relative alla pianificazione territoriale del Torrente Gesso, riportate nelle Figure 2.1, 2.2 e 2.3.

Sottobacino principale	Province	N° comuni
GESSO	CUNEO	16

Figura 2.1: Inquadramento amministrativo (P.T.A)

Sottobacino principale	ATO	ARPA	ASL	Comunità Montane/Aree Omogenee
GESSO	ATO4	Cuneo	15	AO CUNEESE, CM VALLE STURA, CM VALLI GESSO E VERMENAGNA

Figura 2.2: Inquadramento organizzativo (P.T.A)

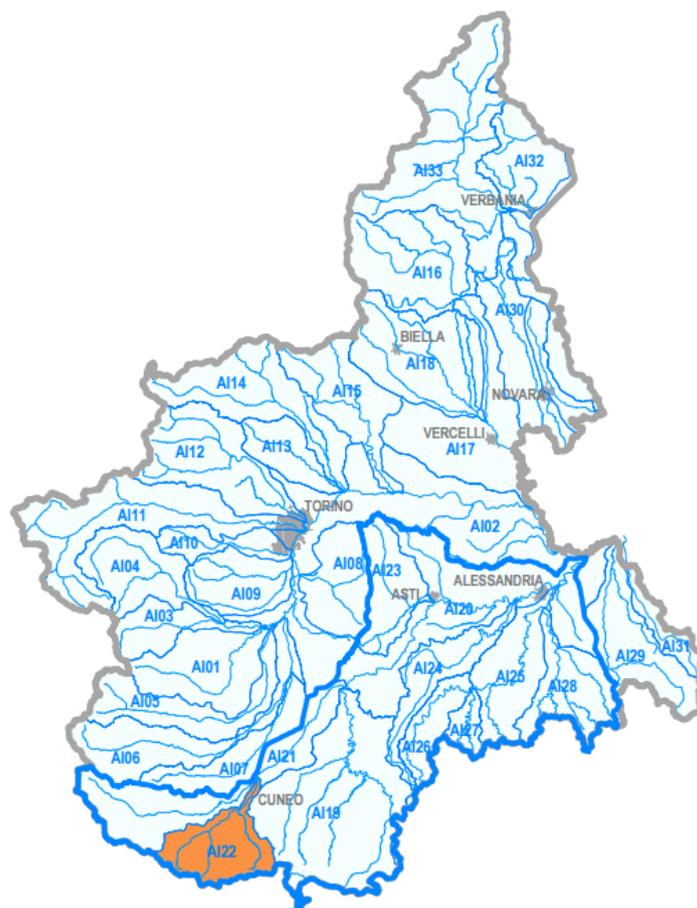


Figura 2.3: Inquadramento territoriale (P.T.A)

Il tronco di torrente interessato dallo studio ha inizio in corrispondenza della frazione La Mellana e termina a monte del Viadotto della Pace (SS705) che si collega alla Galleria Cittadina che attraversa la città di Cuneo; il tratto investigato, mostrato in Figura 2.5, presenta un dislivello di 35 m su uno sviluppo di circa 2,5 km, ne consegue una pendenza media del 14%.

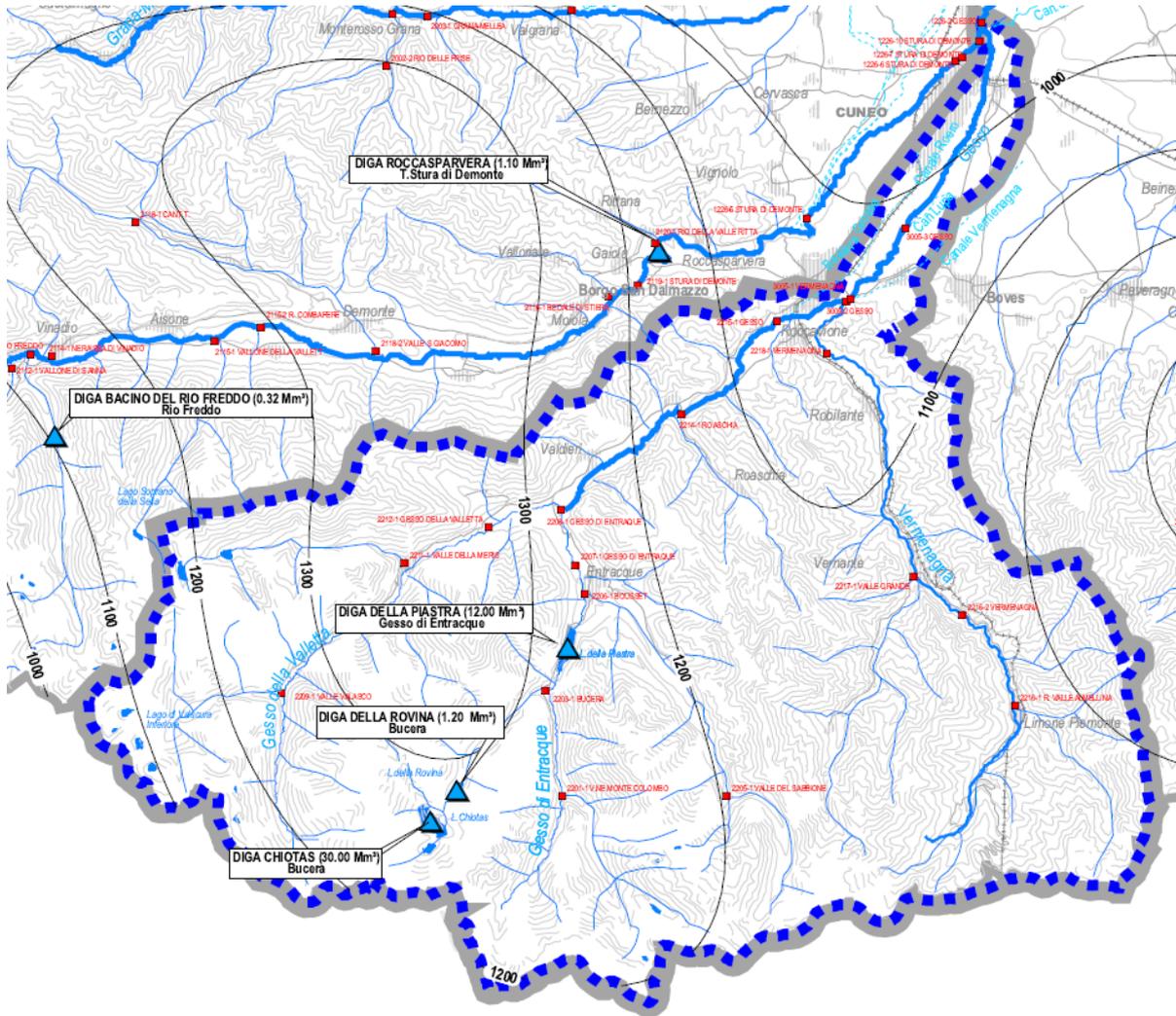


Figura 2.4: Inquadramento territoriale acque superficiali (P.T.A)

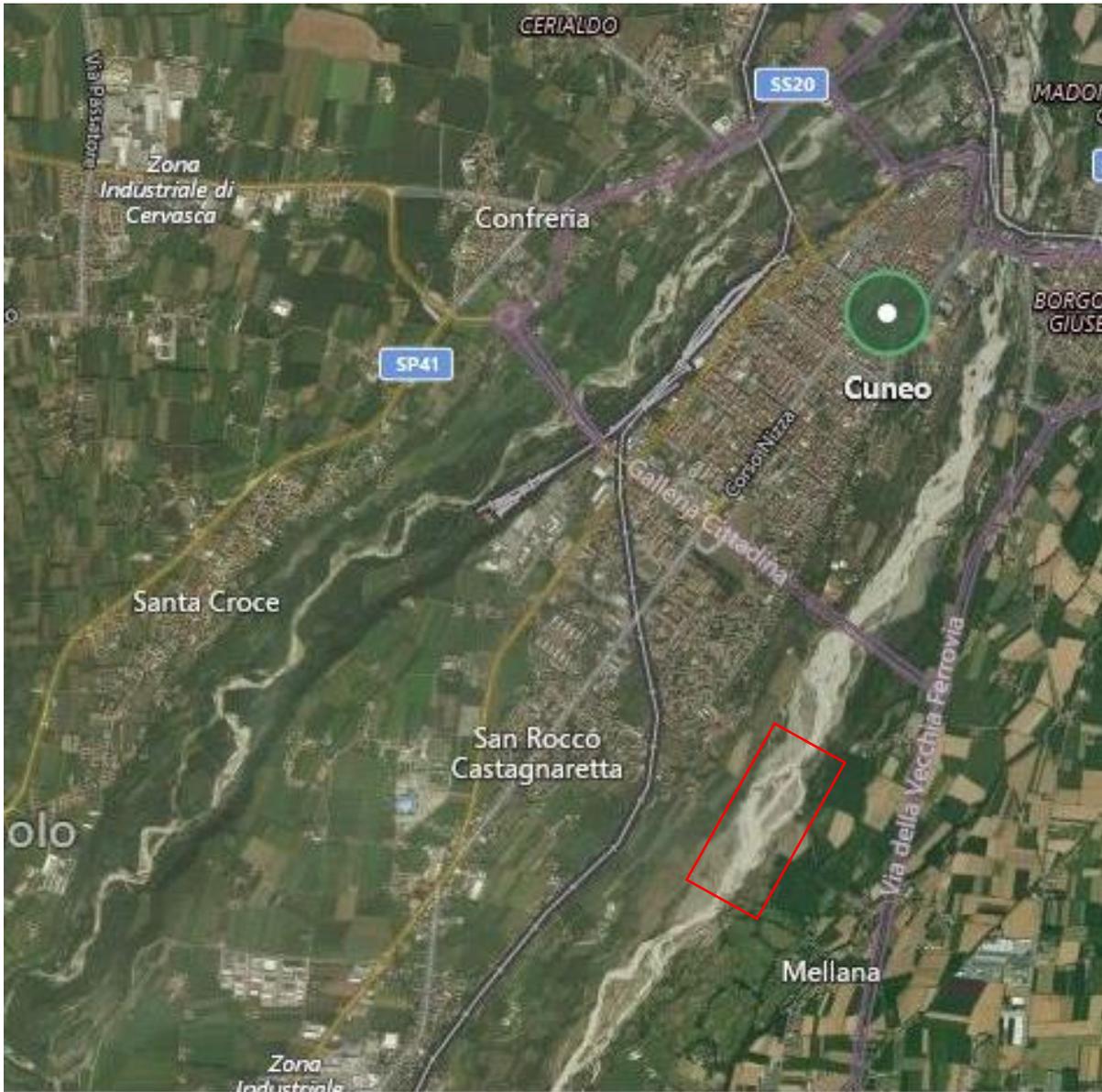


Figura 2.5: Individuazione del tronco di torrente simulato

3 Problematiche storiche

Il torrente Gesso comporta per molti dei contesti territoriali che attraversa un certo grado di rischio legato alla presenza di attività e insediamenti che sono stati spesso soggetti a danni con conseguenti interventi di protezione frequenti e costosi. In passato, l'approccio classico alla risoluzione dei problemi idraulici verificatisi è stato quello di tentare di "fissare il fiume" con una serie di opere di difesa spondale, tuttavia l'esperienza maturata negli anni ha spesso dimostrato l'inefficienza di tale modo di operare.

Le recenti piene del Torrente Gesso, a partire dal novembre 1994, hanno avuto effetti significativi sulle sponde e sui manufatti di attraversamento. Il Gesso attraversa il territorio comunale percorrendo una profonda incisione delimitata da ripide scarpate. L'alveo appare molto ampio, con andamento pluricursale e forti dislivelli fra rami attivi e rami temporaneamente abbandonati. In particolare, l'alveo attivo appare inciso entro depositi alluvionali posti al piede delle citate ripide scarpate, la cui superficie irregolare è generalmente al di sopra della quota idrometrica delle piene maggiori, ma localmente esposta alla corrosione. Il Gesso è attraversato da tre ponti. Da valle verso monte, si osserva il ponte della ferrovia Cuneo-Mondovì, il ponte della strada statale per Mondovì, il più recente ponte della circonvallazione. Il ponte della statale è stato oggetto di un intervento di raddoppio della carreggiata realizzato mediante costruzione di un nuovo impalcato in cemento armato in continuità dell'esistente in muratura di mattoni. Con l'occasione, vennero anche realizzati lavori di protezione delle pile consistenti in corone di micropali. I lavori alle pile erano in corso di esecuzione, quando si verificò, con limitati danni al cantiere, la piena del novembre 1994, mentre erano appena conclusi al momento della piena dell'ottobre 1996, che non fece danni al ponte stradale ma determinò il crollo del ponte ferroviario, posto a valle.

Merita segnalare che la piena dell'ottobre 1996 ha prodotto un vistoso abbassamento dell'alveo a valle del ponte ferroviario. L'entità dell'abbassamento risultò evidente in quanto la traversa provvisoria che permetteva l'attraversamento a raso del canale irriguo dovette essere sostituita da un attraversamento con tubi sostenuti da cavalletti e successivamente, in via definitiva, sostituita da un sifone. Durante la piena, venne in parte asportata la soglia in massi che proteggeva il ponte ferroviario, la cui pila sinistra crollò determinando il collasso della struttura. Il nuovo ponte, realizzato in c.a. su pali, non presenta più la soglia e pertanto si è avviato un processo di erosione regressiva dell'alveo, che ha coinvolto il ponte della strada statale. Gli effetti più vistosi delle piene susseguitesisi dal novembre 1994 al giugno 2002 consistono nell'apertura di profonde lunate, che hanno localmente avvicinato l'alveo al piede delle scarpate, inghiottendo settori golenali. Nel corso degli ultimi anni, sono state collocate opere di protezione delle sponde sotto forma di scogliere in massi di cava e pennelli in gabbioni.



Figura 3.1: Pedancola danneggiata in seguito a un evento di piena (fotografia del giugno 2010)

Allo scopo di comprendere e indirizzare le amministrazioni locali verso un adeguato trattamento delle problematiche suddette, nel 2005 il CIRF (Centro Italiano per la Riquilificazione Fluviale) ha provveduto alla stesura dello “Studio propedeutico ad un piano partecipato di gestione e di intervento sostenibile per la zona fluviale del Torrente Gesso tra Roccavione, Borgo San Dalmazzo, Boves e Cuneo” da cui sono state ricavate le informazioni utili per questo lavoro. Lo scopo principale dello studio citato è quello di indirizzare gli enti e le amministrazioni che operano nell’ambito degli interventi in ambito di protezione idraulica del territorio verso un approccio progettuale basato su una buona conoscenza geomorfologica del torrente, cambiando quindi l’approccio di “costrizione” del torrente in aree ristrette e cercando invece di capire quali aree debbano essere “lasciate al fiume” allo scopo di permettere un adeguato deflusso dello stesso.

4 Studio della criticità di erosione spondale in località Tetto Bruciato

In località tetto Bruciato, situata a monte del Viadotto della Pace (SS705) è presente un'evidente lunata di erosione presumibilmente dovuta alla migrazione delle forme di fondo presenti in alveo con conseguente indirizzamento della corrente verso la sponda erosa.

La sponda in erosione è stata protetta da tre pennelli realizzati in gabbioni e disposti lungo la sponda. Si noti che il primo presenta un angolo di circa 30° rispetto alla sponda, mentre gli altri sono ortogonali alla stessa.



Figura 4.1: Immagine aerea della zona caratterizzata dalla lunata di erosione relativa all'aprile 2003

La zona presentava evidenti criticità dal punto di vista dell'erosione all'epoca del rilievo, di conseguenza si è ritenuto di fornire i valori dei tiranti idrici prevedibili, per le portate di riferimento, nelle condizioni risalenti all'epoca del rilievo DTM.

I pennelli in esame sono realizzati in gabbioni secondo tre strati sovrapposti, sono inoltre protetti, nella zona di innesto nella sponda da ulteriori gabbioni, questa volta appiattiti allo scopo di rendere stabile il corpo del pennello stesso.



Figura 4.2: Pennello realizzato in gabbioni riempiti da materiale sciolto

L'intervento è stato senza dubbio risolutivo, è infatti sufficiente confrontare la foto aerea del 2003 con le immagini aggiornate di Google Maps per vedere un evidente avanzamento della vegetazione riparia che ha quasi completamente ricoperto la lunata di erosione.



Figura 4.3: Confronto dell'erosione sondale in due tempi diversi: configurazione nell'anno 2003 a sinistra e vista attuale a destra

Dalle immagini è altresì possibile notare che il canale più esterno presente nell'immagine del 2003 in prossimità della sponda sinistra non è più presente nell'immagine aggiornata, questo potrebbe essere dovuto a interventi di riprofilatura come fa presupporre la presenza di un filare di alberi vicino alla zona dove si trovava il canale.

5 Evoluzione storica del corso d'acqua

Particolarmente interessante è l'analisi eseguita nello studio CIRF riguardante i cambiamenti del corso d'acqua negli anni al fine di definire lo stato di evoluzione morfologica del torrente all'epoca della realizzazione dello studio (2005).

A questo scopo è stata necessaria la comparazione di dati storici relativi allo sviluppo planimetrico del bacino e dell'asta fluviale, alle sezioni trasversali, ai profili di fondo longitudinali, alle larghezze di alveo attivo (bankfull) e alla piana inondabile (floodplain).

Questi dati sono stati reperiti dal confronto cartografico ottenuto dall'Ente Parco Fluviale del Torrente Gesso avente sede nella città di Cuneo.

I risultati dell'analisi hanno portato a comprendere che il torrente ha subito negli anni un comportamento di contrazione-espansione notevole, dall'inizio del '900 al 1980 si è osservata una tendenza al restringimento mentre a partire dagli anni 90 fino ai tempi odierni si è osservata una notevole espansione della larghezza di alveo attivo.

Per quanto riguarda la morfologia si è notata una notevole tendenza all'evoluzione della morfologia a "canali intrecciati" a partire dagli anni 90 con un'evoluzione dei caratteri tipici della pluricursualità.

Nel seguito si riporta come riferimento la "carta di divagazione storica" estratta dallo studio in questione. Già dal confronto delle due immagini che descrivono l'effetto dell'installazione dei pennelli si può notare il carattere attivo del torrente che, specialmente in seguito a eventi rilevanti, tende a modificare il proprio percorso nel tempo.

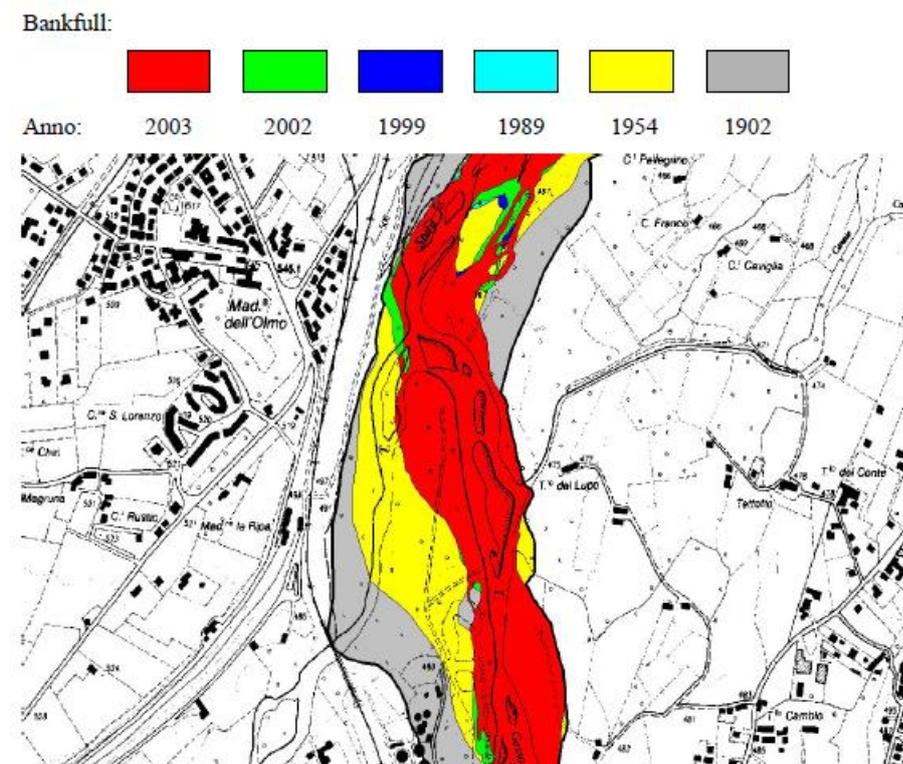


Figura 5.1: Carta di divagazione storica del torrente

6 Elementi utilizzati

Volendo simulare il comportamento di un corso d'acqua naturale si rendono necessarie una serie di informazioni atte a descrivere nel modo più realistico possibile la reale morfologia del sito e il suo comportamento nel tempo. Il campo delle variabili che descrivono l'evoluzione del Torrente Gesso è vasto e in molti casi i valori sono poco conosciuti, pertanto si eseguiranno analisi e si effettueranno misurazioni dirette per ottenere dei valori verosimili per lo studio.

6.1 Digital Terrain Model (DTM) realizzato nell'anno 2003

Date le caratteristiche del Torrente Gesso risulta più consona l'adozione di un modello bidimensionale; un modello 3D risulterebbe infatti eccessivamente dispendioso per uno studio così esteso, mentre uno studio più semplificato non sarebbe in grado di interpretare tutti i processi in atto. Per la costruzione della superficie del terreno si utilizza il plugin di QGIS denominato BASEmesh, il quale fornisce alcuni comandi che portano alla triangolazione dei punti. L'Ente Parco Fluviale della città di Cuneo, che da anni si occupa della gestione delle aree circostanti il letto del Torrente Gesso, ha richiesto la realizzazione di un DTM da presa aerea con valori in elevazione caratterizzati da una precisione centimetrica in data 18/04/2003. Il tronco di Torrente Gesso ricadente in territorio di Cuneo è stato oggetto di una ripresa a bassa quota da cui ha avuto origine un piano quotato secondo una griglia di punti con maglie di 5x5 m in alveo e 20x20 m nelle aree golenali. Inoltre sono state individuate con poli-linee 3D le principali discontinuità del terreno (ciglio di sponda, piede delle scarpate, isole, etc.). I punti hanno tolleranza altimetrica dell'ordine di 25-30 cm e pertanto si ritiene che il modello del terreno sia adeguato a rappresentare le condizioni di convogliamento mediante modelli numerici.

La tecnica di rilievo che utilizza un volo LIDAR prevede la possibilità di utilizzare segnali a basse frequenze per acquisire informazioni relative anche a quelle porzioni di territorio che si trovano sommerse al momento della misurazione. Nel caso in esame non è stata adottata questa tecnica per ragioni di costo, e per la ricostruzione completa del modello si è deciso di adottare una pendenza costante del fondale sommerso, corrispondente al valore medio riscontrato negli alvei secondari in secca al momento della presa dati. In seguito, per validare l'assunzione fatta e avere una morfologia più realistica si effettuerà una simulazione idraulica e morfologica della durata di alcuni anni per dare luogo alle dinamiche del fondo.

6.2 Idrogramma di piena per TR di 200 anni

Il Torrente Gesso non è stato oggetto di analisi da parte del Piano Stralcio delle Fasce Fluviali redatto nel 1997 dall'Autorità di Bacino del Fiume Po, pertanto la Direttiva del PAI non fornisce le portate di riferimento. L'area oggetto di studio non è dotata di strumenti per la registrazione delle portate posti in zone adeguate (si ricorda che l'idrometro di Borgo San Dalmazzo è stato attivato solo nell'ottobre 2000) per cui, non essendo possibile effettuare la regionalizzazione del dato idrometrico, occorre procedere all'applicazione dei modelli afflussi-deflussi.

Il documento intitolato "Relazione Anselmo", commissionato allo scopo di esaminare le condizioni di convogliamento dell'alveo e di proporre interventi di difesa in due tratti della sponda sinistra del torrente, nei pressi della località Tetto Bruciato, descrive uno studio che ha portato alla definizione delle portate di riferimento per il Gesso.

Per prima cosa occorre disporre di un'analisi statistica delle osservazioni pluviometriche per definire una curva di probabilità pluviometrica delle diverse aree, che consiste in una relazione che lega l'altezza di pioggia caduta alla durata dell'evento per un determinato periodo di ritorno. In seguito si devono fare delle ipotesi sul modello:

1. ipotesi sulla distribuzione spaziale delle precipitazioni;
2. sezione di chiusura del bacino imposta alla confluenza con lo Stura di Demonte;
3. l'imbibizione del terreno è assunta media;
4. definizione dei tempi di ritorno per la precipitazione sui vari sottobacini per la determinazione delle portate aventi un dato tempo di ritorno;
5. definizione dei tipi di suolo per le zone del bacino.

Tra i risultati dell'analisi afflussi-deflussi si ritrova l'idrogramma di piena per un evento caratterizzato da un Tempo di Ritorno di 200 anni, riportato in Figura 6.1, la cui portata di picco raggiunge i 1000 m³/s.

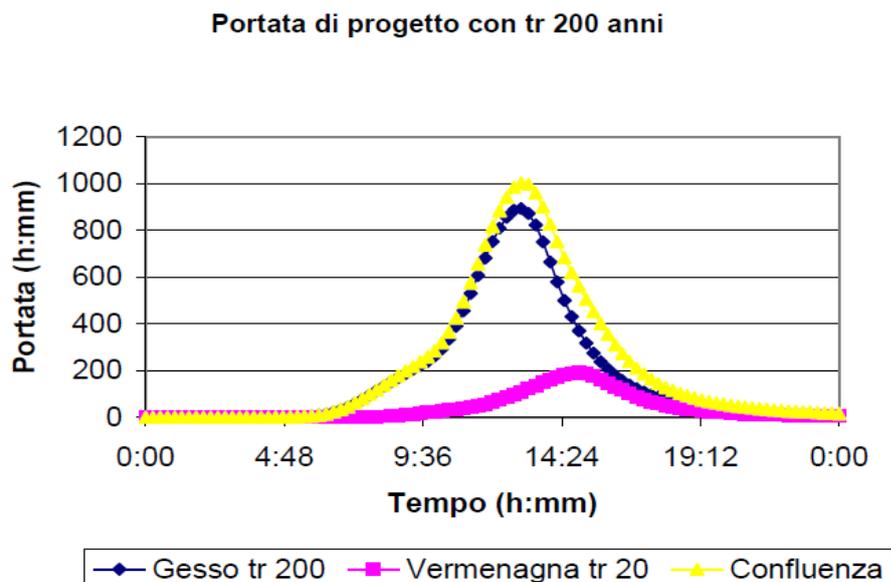


Figura 6.1: Idrogramma di piena per un evento TR 200 anni

6.3 Serie storica delle portate misurate

Allo scopo di avviare una simulazione idraulica occorre disporre di una serie misurata di portate o almeno di valori che offrono un'idea generale dei valori tipici che si possono riscontrare. Queste informazioni sono reperibili dal portale informatico dell'ARPA che mette a disposizione del pubblico le misurazioni di deflusso medio giornaliero e di precipitazione delle stazioni disposte sul territorio piemontese. Nonostante alcune stazioni di misura siano entrate in funzione solo in periodi recenti, il portale ARPA rappresenta un'utile fonte di informazioni.

Per quanto riguarda il caso in esame non si individua una stazione di misura posta in prossimità della zona in studio pertanto si ricercano le stazioni a monte del tronco di torrente e si effettua un'operazione di proporzione delle portate misurate sulle aree dei sottobacini che servono la stazione. I due punti di misura utili per lo studio consistono nello strumento posto sul torrente Gesso all'altezza del ponte della S.P. 219 ad Andonno (Valdieri), e da quello

posto sul torrente Vermenagna (principale tributario del torrente Gesso nel tratto da Andonno alla confluenza) a Robilante. Successivamente sono stati sommati i valori delle due serie, ipotizzando che l'andamento delle portate del torrente Gesso a Borgo San Dalmazzo sia circa uguale all'andamento nei pressi di Cuneo e per tenere conto dell'aumento del bacino alla confluenza si è attuata una proporzione sulle aree dei sottobacini. Questa operazione, non rigorosa, consente di stimare i valori di portata nei pressi della confluenza con lo Stura di Demonte.

6.4 Curva granulometrica

Una simulazione di trasporto solido richiede la definizione di una o più curve granulometriche che consentano l'individuazione del materiale presente in alveo e sulle sponde del torrente. La curva granulometrica contiene l'informazione sui diametri e le percentuali di sedimento che rientrano nelle diverse classi di diametro.

Nel 2011 il torrente Gesso è già stato oggetto di una campagna di misurazione ad opera dell'Ing. Jessica Giordano. I dati recepiti sono allora stati impiegati per la valutazione delle dinamiche di trasporto solido con una serie di formulazioni analitiche (Parker, Meyer-Peter Muller, ecc.). In questa sede si ritiene utile procedere a una nuova campagna di misurazione in un sito prossimo a quello investigato dall'Ing. Giordano per verificare una deviazione più o meno marcata nei dati, dopo anni di deflusso.

A tal scopo si possono innanzitutto considerare due categorie di metodi di misura delle dimensioni granulometriche di alvei ghiaiosi rimanendo per quelli sabbiosi esclusivamente il metodo della setacciatura:

- 1) Campionamento superficiale: si campiona un numero prefissato di particelle sulla superficie di un'area predefinita;
- 2) Campionamento volumetrico: si preleva un volume prefissato di sedimenti da un livello predefinito che può essere quello superficiale o sottostante ad esso.

Nell'ambito della categoria dei campionamenti superficiali si possono distinguere tre principali metodologie:

- a) campionamento statistico (pebble counts): si procede raccogliendo un numero predefinito di particelle superficiali secondo un passo costante (definito tenendo conto delle dimensioni dei clasti maggiori) lungo determinati stendimenti paralleli in modo da ricoprire superfici relativamente ampie (dell'ordine dei 100 m^2);
- b) metodo della griglia (grid counts, quadrillage, ecc.): si raccolgono tutti i ciottoli in corrispondenza dei nodi di una griglia il cui lato, pari a 10 volte il valore di d_{\max} esistente nella zona di campionamento (Meunier & Carion, 1987), è tale suddiviso in 10 parti, in modo da ricoprire superfici che vanno da 1 m^2 a 100 m^2 ;
- c) campionamento areale: si raccolgono 100 elementi ricadenti in un'area di piccole dimensioni ($0,1-1 \text{ m}^2$), e si procede come per il punto precedente.

Il numero dei 100 elementi è giustificato dal fatto che si dimostra (Meunier & Carion, 1987) che la frequenza in peso corrisponde perfettamente alla frequenza in numero.

In modo più preciso la AdbPo (Autorità di bacino del fiume Po) nella specifica tecnica delle attività fornisce alcune indicazioni per le attività di rilievo e la descrizione quantitativa delle caratteristiche granulometriche dell'alveo di un corso d'acqua. Nella sezione introduttiva della specifica viene ricordato che "il rilievo della granulometria è finalizzato alle valutazioni di

trasporto solido e di bilancio di materiale movimentato, alla quantificazione della scabrezza del fondo alveo e delle sponde, dei fenomeni erosivi che interessano il corso d'acqua e le opere in esso presenti”.

Le modalità di campionamento individuate dalla specifica differiscono sulla base del tipo di deposito, che può essere sommerso o emerso, ghiaioso, sabbioso o misto. Si riportano nel seguito alcuni accorgimenti da adottare nelle diverse situazioni.

Depositi emersi a granulometria grossolana:

- pezzatura media del materiale dell'ordine della decina di centimetri (ciottoli);
- valutazione diretta con applicazione del metodo della “griglia di campionamento” (prelievo e misura dei ciottoli disposti ai vertici di un reticolo 5x5 m con passo 0,5 m, eseguito su un appezzamento con granulometria omogenea), cui si aggiunge un rilievo sub-superficiale secondo la tecnica proposta da Church e Al nel (1987). Quest'ultimo prevede, per ogni sezione di interesse, l'identificazione e la pesatura del sedimento di maggiori dimensioni identificabile in superficie;
- per avere una misura statisticamente significativa occorre prelevare un numero di campioni, uniformemente distribuiti lungo la sezione, il cui peso totale sia almeno superiore a 200 volte il peso del sedimento identificato in ambito del rilievo sub-superficiale.

Depositi sabbiosi emersi:

- si procede prelevando in zone omogenee un quantitativo minimo di 2 kg di materiale.

Depositi sabbiosi-limosi sommersi:

- si procede da imbarcazione (in casi particolari a guado o da ponte) utilizzando campionatori benna tipo Van Velde, in modo da evitare il dilavamento del campione;
- le operazioni di prelievo vengono ripetute fino al raggiungimento del quantitativo minimo di 2 kg di materiale;
- in presenza di depositi particolarmente potenti, dei quali risulti utile stabilire la costituzione interna (per definire ad esempio la corazzatura degli strati superficiali di fondo alveo) si può ricorrere all'uso di specifici carotatori a vibrazione (cfr. Normativa ISO).

L'ubicazione dei punti di campionamento deve essere stabilita in funzione dell'assetto del tratto di corso d'acqua indagato ed i conseguenti prelievi eseguiti in periodi caratterizzati da stadi idrometrici di magra.

Nel caso in cui si voglia eseguire l'indagine su un alveo pluricursuale devono essere prelevati, all'interno della sezione oggetto del rilievo, un numero di campioni così ubicati:

- almeno due campioni per ciascuna sponda dell'alveo;
- un numero di campioni uniformemente distanziati all'interno dell'alveo e comunque posizionati in modo da caratterizzare le seguenti forme fluviali: alveo principale, alvei secondari, barre e isole fluviali.

In caso di alvei con presenza di barre o di isole fluviali, le sezioni di rilievo devono essere uniformemente posizionate in corrispondenza del limite di valle delle stesse forme fluviali.

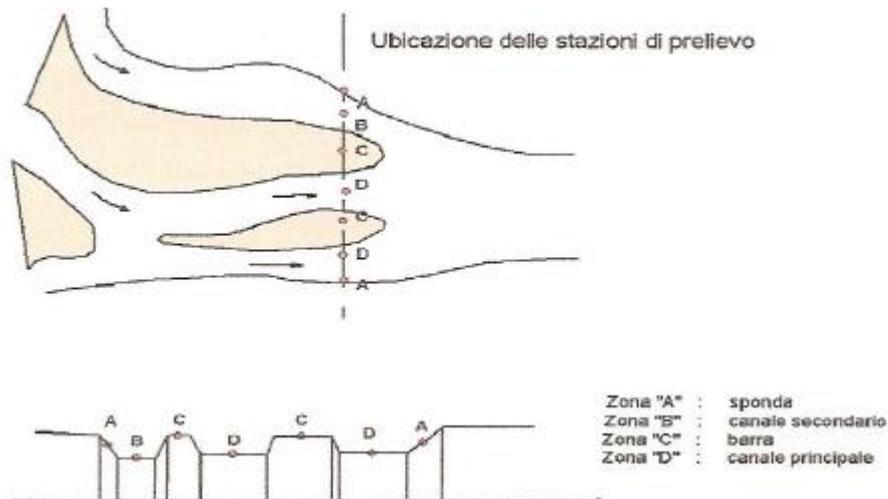


Figura 6.2: Schema tipo delle sezioni di campionamento e individuazione delle stazioni di campionamento per alveo di tipo pluricursuale

6.4.1 Curva derivata dallo studio dell'Ing. Giordano

Sono state condotte due campagne di rilevamento successive, la seconda delle quali di verifica, affinamento ed integrazione delle misure effettuate nella prima campagna. In questo modo, sottoponendo a elaborazioni statistiche i dati acquisiti in occasione del primo sopralluogo, si possono evidenziare ambiguità e anomalie che si possono testare in un secondo momento.

Si è deciso di effettuare quindici prelievi distribuiti lungo il tratto come indicato dall'Autorità di Bacino del fiume Po; si sottolinea come la scelta dei siti sia derivata da una serie di condizioni, non contenute nelle specifiche tecniche, indicate in seguito:

Rappresentatività del campione: i campioni devono essere rappresentativi delle differenti condizioni morfo-metriche che si presentano lungo l'asta fluviale.

Accessibilità: i siti devono essere facilmente raggiungibili (per consentire il trasporto in loco di attrezzatura varia).

Pendenze: siccome la stabilità dei grani è correlata con la pendenza del fondo ci si aspetta il riscontro, laddove la pendenza sia più elevata, di un valore di d_{50} superiore, causato dall'asportazione del materiale più fine.

Esclusione delle sezioni rimaneggiate: è bene evitare di effettuare le misure laddove siano state realizzate delle opere in alveo per la protezione idraulica del territorio, che hanno determinato una sagomatura della sezione e un'alterazione della distribuzione delle granulometrie presenti sul fondo (dovuta ad esempio ad operazioni di asportazione di materiale o alla presenza di materiale di riporto).

Esclusione delle sezioni in prossimità delle opere di regolazione in alveo: è possibile, se possibile, evitare di collocare i siti in prossimità di dighe, traverse ed altre opere che determinino un'alterazione della granulometria dell'alveo rispetto alle condizioni naturali.

Sulla base delle considerazioni sopra effettuate sono stati scelti, procedendo da monte verso valle, i siti indicati nella Figura 6.3:

- Fontanelle;
- C. Nerone;
- T.to del Lupo.

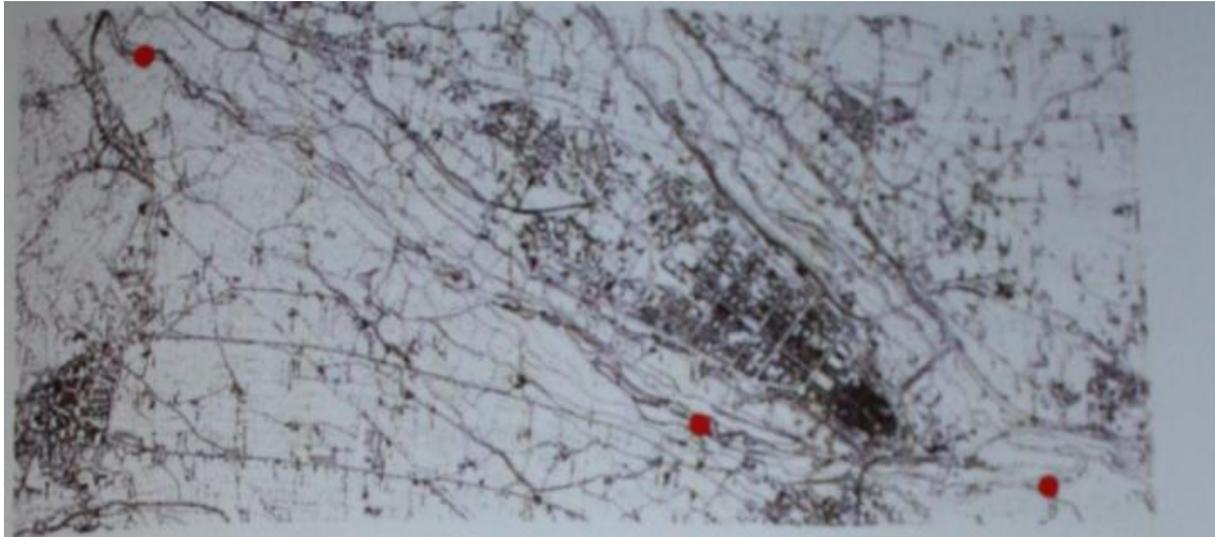


Figura 6.3: Inquadramento territoriale dei tre siti dove è avvenuto il campionamento granulometrico ad opera dell'Ing. Giordano

Si riporta nella Tabella 6.1 la curva ottenuta nei pressi di Cascina Nerone, la più prossima alla zona in cui è stato effettuato il campionamento.

Tabella 6.1: Curva granulometrica dello studio dell'Ing. Giordano

Località Cascina Nerone	
Passante cumulato [%]	diametro [mm]
22.7	3.75
27.7	9.00
28.7	11.25
31	15.00
34	18.75
45	27.00
55	37.00
77	47.50
105	55.75
124	65.00
140	75.00
170	83.75
210	91.50
313.5	99.00
330.1	100.00

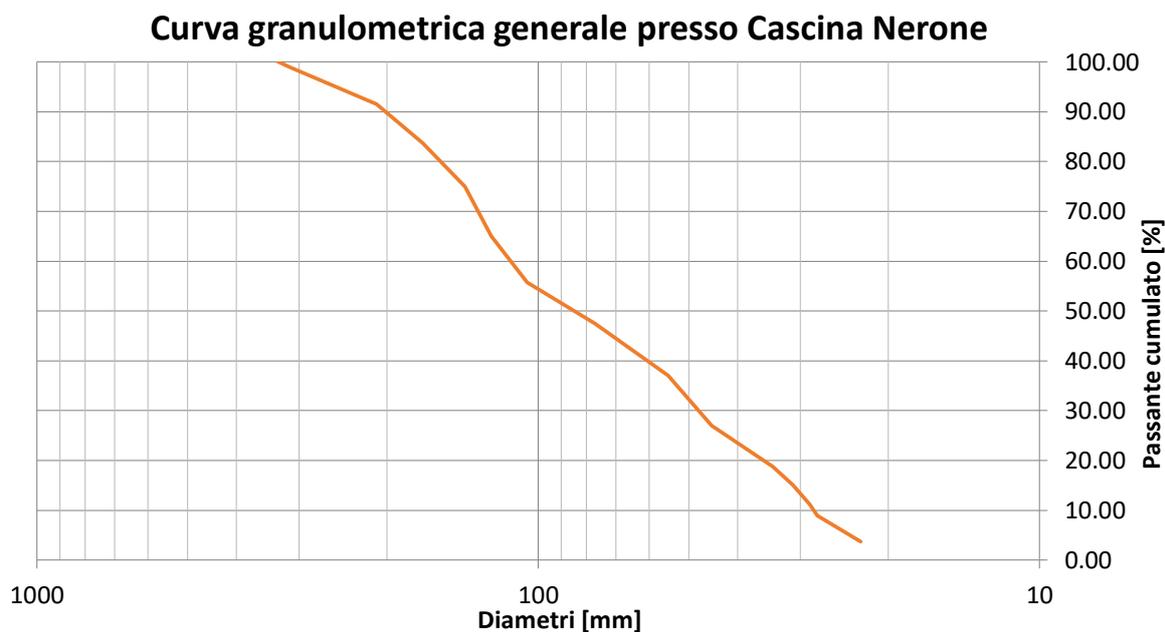


Figura 6.4: Curva granulometrica generale ottenuta dall'Ing. Jessica Giordano dalle misure del 2010

6.4.2 Curva ricavata da misure dirette

Un primo campionamento è stato effettuato in data 03/11/2017 e ha interessato un alveo secondario del torrente nella zona a monte del viadotto della Strada Statale 705. Guardando verso valle, sulla sponda sinistra, si trova un pennello realizzato in gabbioni parzialmente danneggiato dalle alluvioni degli anni passati.



Figura 6.5: Pennello realizzato con gabbionate, in prossimità della zona di campionamento

Strumentazione utilizzata:

- Rotella metrica (portata 10 m) e metro lineare;
- Picchetti in ferro;
- Funicelle;
- Compasso comparatore (portata 15 cm);
- Bilancia (portata 200 kg);
- Setacci graduati (laboratorio del Politecnico di Torino);
- Macchina fotografica Canon EOS 450 D.

Il regime di magra in cui si è trovato il T. Gesso ha consentito la disposizione del reticolo di 5x5 m, proprio del metodo del quadrillage (Figura 6.6), che consente di determinare la componente grossolana del sedimento secondo un criterio statistico. La misura ha interessato i grani di dimensione superiore ai 3 cm che si trovano in corrispondenza delle intersezioni dei fili disposti con passo di 0,5 m. La presa delle misure interessa i tre diametri principali che si individuano assimilando il ciottolo a un ellissoide.

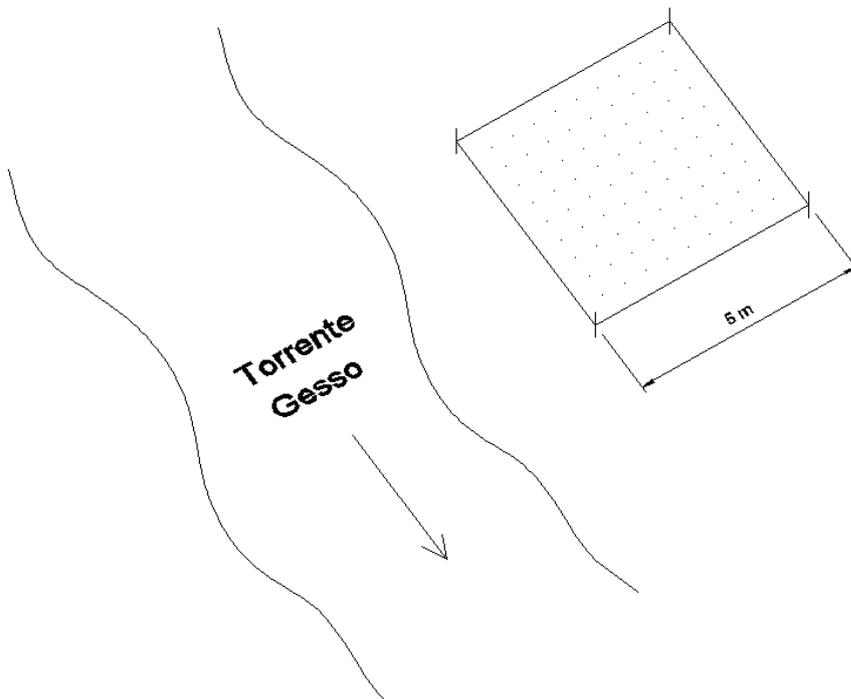


Figura 6.6: Rappresentazione schematica del metodo di campionamento della frazione grossolana del sedimento



Figura 6.7: Individuazione delle zone di campionamento in Località Cascina Nerone, in ordine da sinistra a destra: alveo secondario, isola, alveo principale

Campionamento in un alveo secondario

In un primo momento è stato investigato il materiale costituente il fondo dell'alveo secondario in sinistra orografica del torrente.



Figura 6.8: Fase di posa dei picchetti della rete del quadrillage



Figura 6.9: Vista del reticolo e particolare di un picchetto di estremo

Al termine della fase di presa delle misure si procede al trattamento dei dati; innanzitutto viene calcolato il diametro medio per ogni grano campionato dalla media delle tre misure registrate. In seguito, dalle 121 quantità così ottenute si individuano 4 classi di dati scorrendo iterativamente le misure su 2 lati esterni e adiacenti della rete. Nella Tabella 6.2 si riportano i 121 diametri medi relativi ai granuli misurati (valori in mm); con il colore giallo si individuano le misure scartate per la definizione della prima classe.

Tabella 6.2: Valori misurati con il metodo della griglia di campionamento

	0 m	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5 m	
	85.67	54.33	158.33	61.67	100.00	61.67	115.00	188.33	55.00	173.33	69.00	0 m
	38.33	78.33	35.00	54.33	69.00	48.33	118.33	91.67	65.00	216.67	61.67	0.5
	172.67	60.00	86.67	78.33	163.33	71.67	215.00	95.00	70.00	73.33	50.00	1
	67.67	116.67	175.00	41.67	360.00	111.67	54.67	87.67	33.67	210.00	80.00	1.5
	136.67	141.67	100.00	50.00	125.67	56.67	118.33	107.33	76.67	85.00	138.33	2
	211.67	61.67	103.33	226.67	63.33	57.33	61.67	57.67	75.00	75.00	40.00	2.5
	70.00	36.67	100.00	33.00	48.33	151.67	350.00	33.33	68.33	81.67	31.67	3
	113.33	115.00	78.33	303.33	95.00	128.33	49.33	49.67	43.33	65.00	105.00	3.5
	80.00	80.00	107.67	109.67	54.00	93.33	54.33	113.33	155.00	141.67	71.67	4
	75.00	138.33	40.00	211.67	44.33	54.00	170.00	151.67	75.67	46.67	96.67	4.5
	78.33	195.00	57.67	276.67	60.67	69.00	89.67	61.67	47.67	60.00	65.00	5 m

Delle 4 classi individuate si conta il numero di valori ricadenti in intervalli di diametro e si realizza un diagramma delle frequenze riportato in Figura 6.10.

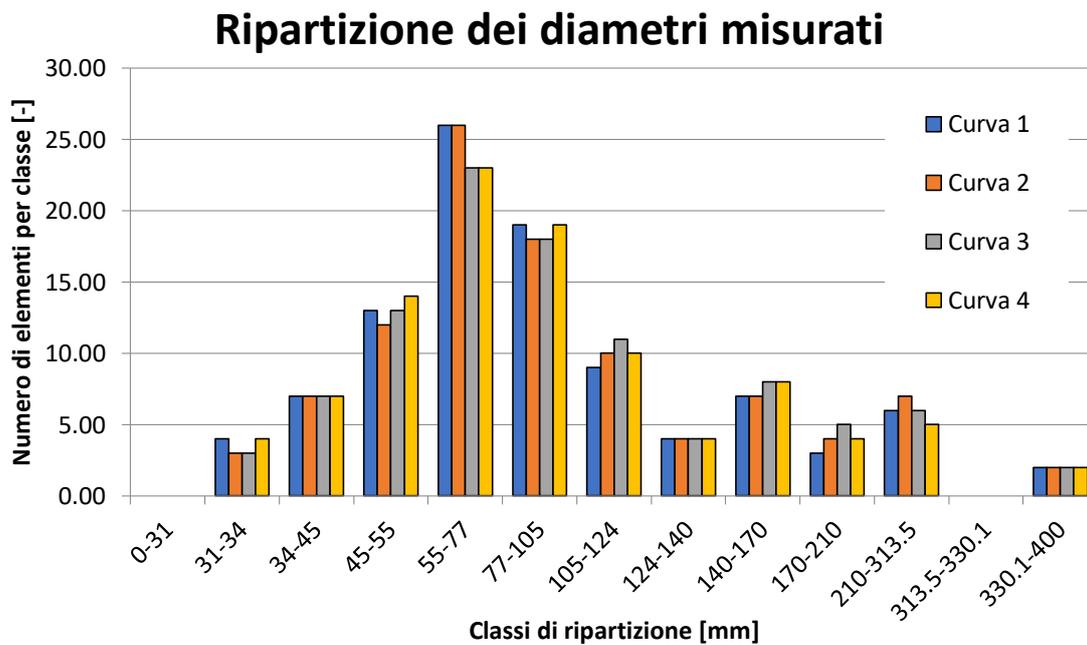


Figura 6.10: Istogramma delle frequenze dei diametri misurati (Alveo secondario)

Per ogni classe di sedimento individuata, a partire dall'informazione contenuta nell'istogramma, si definiscono il passante cumulato e il trattenuto ad ogni salto di diametro. L'utilizzo di campioni costituiti da 100 elementi rappresenta un vantaggio non trascurabile: in serie di queste dimensioni, infatti, le percentuali in peso e quelle in numero si equivalgono, il che rende più agevole l'operazione di costruzione della curva granulometrica.

Nel seguito si riportano le Tabelle 6.3, 6.4, 6.5 e 6.6 con i dati per le 4 classi e in Figura 6.11 la curva media che verrà utilizzata per definire la componente grossolana in situ.

Tabella 6.3: Dati relativi alla prima classe (Alveo secondario)

CURVA 1	Classi [mm]	numero di elementi [-]	Passante [%]	Passante cumulato [%]	Trattenuto cumulato [%]
	0-31	0	0	0	100
	31-34	4	4	4	96
	34-45	7	7	11	89
	45-55	13	13	24	76
	55-77	26	26	50	50
	77-105	19	19	69	31
	105-124	9	9	78	22
	124-140	4	4	82	18
	140-170	7	7	89	11
	170-210	3	3	92	8
	210-313.5	6	6	98	2
	313.5-330.1	0	0	98	2
330.1-400	2	2	100	0	

Tabella 6.4: Dati relativi alla seconda classe (Alveo secondario)

CURVA 2	Classi [mm]	numero di elementi [-]	Passante [%]	Passante cumulato [%]	Trattenuto cumulato [%]
	0-31	0	0	0	100
	31-34	3	3	3	97
	34-45	7	7	10	90
	45-55	12	12	22	78
	55-77	26	26	48	52
	77-105	18	18	66	34
	105-124	10	10	76	24
	124-140	4	4	80	20
	140-170	7	7	87	13
	170-210	4	4	91	9
	210-313.5	7	7	98	2
	313.5-330.1	0	0	98	2
330.1-400	2	2	100	0	

Tabella 6.5: Dati relativi alla terza classe (Alveo secondario)

CURVA 3	Classi [mm]	numero di elementi [-]	Passante [%]	Passante cumulato [%]	Trattenuto cumulato [%]
	0-31	0	0	0	100
	31-34	3	3	3	97
	34-45	7	7	10	90
	45-55	13	13	23	77
	55-77	23	23	46	54
	77-105	18	18	64	36
	105-124	11	11	75	25
	124-140	4	4	79	21
	140-170	8	8	87	13
	170-210	5	5	92	8
	210-313.5	6	6	98	2
	313.5-330.1	0	0	98	2
330.1-400	2	2	100	0	

Tabella 6.6: Dati relativi alla quarta classe (Alveo secondario)

CURVA 4	Classi [mm]	numero di elementi [-]	Passante [%]	Passante cumulato [%]	Trattenuto cumulato [%]
	0-31	0	0	0	100
	31-34	4	4	4	96
	34-45	7	7	11	89
	45-55	14	14	25	75
	55-77	23	23	48	52
	77-105	19	19	67	33
	105-124	10	10	77	23
	124-140	4	4	81	19
	140-170	8	8	89	11
	170-210	4	4	93	7
	210-313.5	5	5	98	2
	313.5-330.1	0	0	98	2
330.1-400	2	2	100	0	

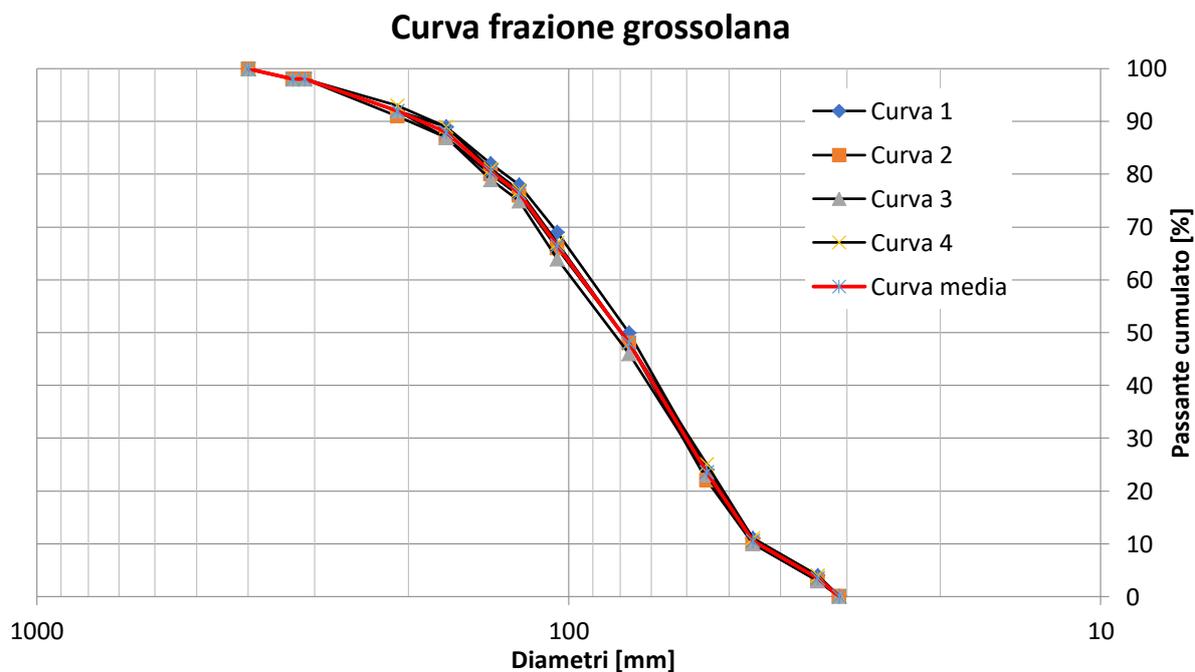


Figura 6.11: Curve granulometriche per la frazione grossolana (Alveo secondario)

Campionamento su un'isola di sedimento

In un secondo momento la misura è stata ripetuta secondo le stesse modalità applicate in precedenza su un'isola di sedimento che separa l'alveo centrale principale da quello secondario da cui sono state dedotte le misure indicate in precedenza.



Figura 6.12: Sito di campionamento sull'isola



Figura 6.13: Indicazioni sul posizionamento del sito: il cerchio indica il pennello in gabbionate, mentre la freccia mostra la zona dove ha avuto luogo il primo campionamento

Come per la misura precedente si riportano in Tabella 6.7 i dati raccolti, l'istogramma con la suddivisione in campi di diametro medio in Figura 6.14 e le tabelle per le 4 classi.

Tabella 6.7: Valori medi ottenuti con il metodo della griglia di campionamento

0 m	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5 m	
138.33	73.33	85.00	135.00	125.00	183.33	103.33	86.67	110.00	133.33	126.67	0 m
138.33	151.67	113.33	66.67	90.00	150.00	143.33	76.67	220.00	101.67	50.00	0.5
218.33	61.67	210.00	98.33	71.67	150.00	106.67	156.67	110.00	63.33	78.33	1
83.33	160.00	78.33	145.00	78.33	56.67	100.00	120.00	141.67	75.00	113.33	1.5
156.67	145.00	85.00	190.00	246.67	148.33	118.33	91.67	141.67	86.67	115.00	2
86.67	95.00	78.33	145.00	153.33	130.00	110.00	53.33	106.67	101.67	88.33	2.5
73.33	113.33	121.67	83.33	240.00	98.33	180.00	246.67	138.33	71.67	81.67	3
60.00	95.00	85.00	58.33	83.33	128.33	113.33	183.33	68.33	150.00	126.67	3.5
55.00	168.33	105.00	183.33	86.67	80.00	86.67	136.67	148.33	150.00	75.00	4
110.00	65.00	105.00	126.67	68.33	108.33	88.33	101.67	106.67	91.67	115.00	4.5
108.33	96.67	93.33	121.67	78.33	71.67	91.67	256.67	106.67	173.33	108.33	5 m

Ripartizione dei diametri misurati

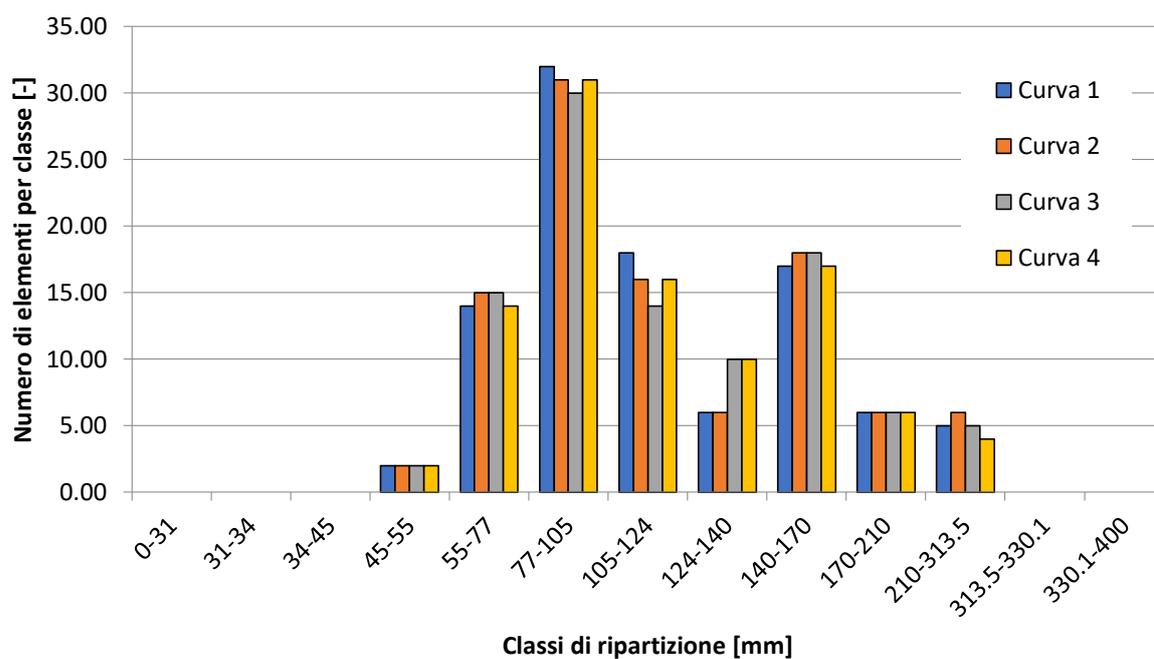


Figura 6.14: Istogramma delle frequenze dei diametri misurati (Isola)

Tabella 6.8: Dati relativi alla prima classe (Isola)

CURVA 1	Classi [mm]	numero di elementi [-]	Passante [%]	Passante cumulato [%]	Trattenuto cumulato [%]
	0-31	0	0	0	100
	31-34	0	0	0	100
	34-45	0	0	0	100
	45-55	2	2	2	98
	55-77	14	14	16	84
	77-105	32	32	48	52
	105-124	18	18	66	34
	124-140	6	6	72	28
	140-170	17	17	89	11
	170-210	6	6	95	5
	210-313.5	5	5	100	0
	313.5-330.1	0	0	100	0
330.1-400	0	0	100	0	

Tabella 6.9: Dati relativi alla seconda classe (Isola)

CURVA 2	Classi [mm]	numero di elementi [-]	Passante [%]	Passante cumulato [%]	Trattenuto cumulato [%]
	0-31	0	0	0	100
	31-34	0	0	0	100
	34-45	0	0	0	100
	45-55	2	2	2	98
	55-77	15	15	17	83
	77-105	31	31	48	52
	105-124	16	16	64	36
	124-140	6	6	70	30
	140-170	18	18	88	12
	170-210	6	6	94	6
	210-313.5	6	6	100	0
	313.5-330.1	0	0	100	0
330.1-400	0	0	100	0	

Tabella 6.10: Dati relativi alla terza classe (Isola)

CURVA 3	Classi [mm]	numero di elementi [-]	Passante [%]	Passante cumulato [%]	Trattenuto cumulato [%]
	0-31	0	0	0	100
	31-34	0	0	0	100
	34-45	0	0	0	100
	45-55	2	2	2	98
	55-77	15	15	17	83
	77-105	30	30	47	53
	105-124	14	14	61	39
	124-140	10	10	71	29
	140-170	18	18	89	11
	170-210	6	6	95	5
	210-313.5	5	5	100	0
	313.5-330.1	0	0	100	0
330.1-400	0	0	100	0	

Tabella 6.11: Dati relativi alla quarta classe (Isola)

CURVA 4	Classi [mm]	numero di elementi [-]	Passante [%]	Passante cumulato [%]	Trattenuto cumulato [%]
	0-31	0	0	0	100
	31-34	0	0	0	100
	34-45	0	0	0	100
	45-55	2	2	2	98
	55-77	14	14	16	84
	77-105	31	31	47	53
	105-124	16	16	63	37
	124-140	10	10	73	27
	140-170	17	17	90	10
	170-210	6	6	96	4
	210-313.5	4	4	100	0
	313.5-330.1	0	0	100	0
330.1-400	0	0	100	0	

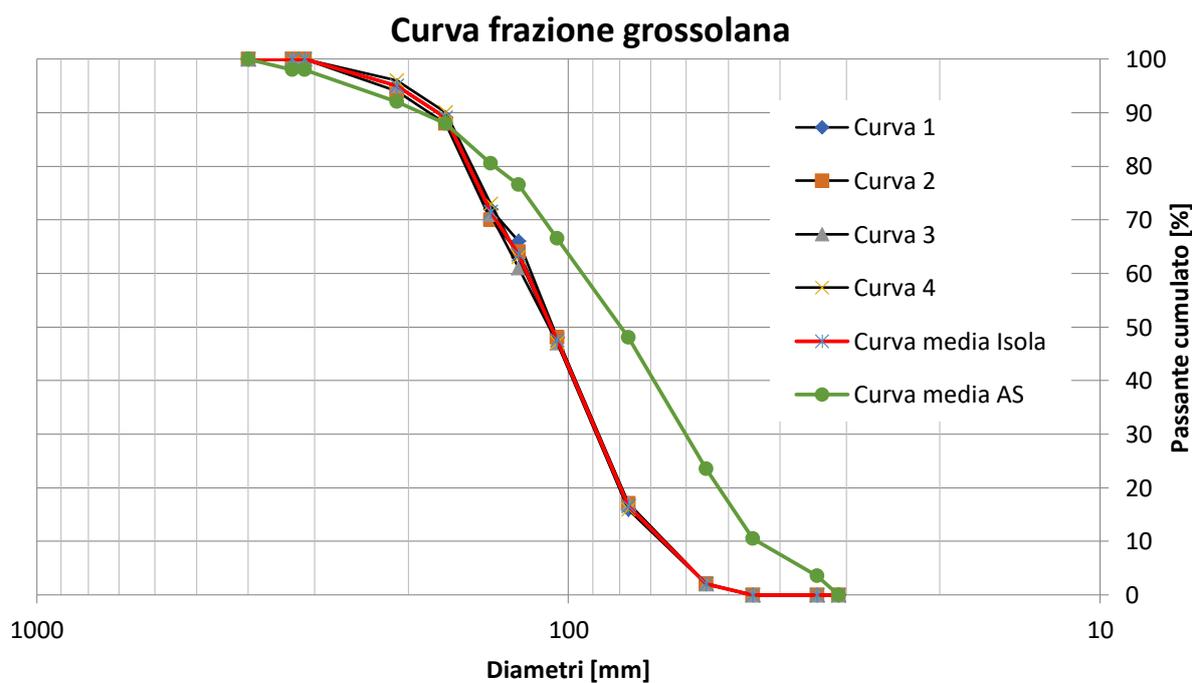


Figura 6.15: Curve granulometrica per la frazione grossolana dell'isola e confronto con quella ottenuta per l'alveo secondario (AS)

La Figura 6.15 mette in evidenza una netta differenza tra le due curve ricostruite. Per disporre di un'informazione univoca per l'intera sezione si procede a una terza misura nei pressi dell'alveo principale del torrente. Da una media delle tre curve si ottiene l'informazione relativa alla componente granulometrica grossolana, che poco differisce dalla curva ricavata per l'alveo secondario.

Dopo aver determinato una curva descrittiva per la componente grossolana occorre valutare la frazione intermedia e quella fine. Si individua un'area quadrata di dimensione 1x1 m all'interno del reticolo di 5x5 m relativo al campionamento nell'alveo secondario e si misurano le dimensioni medie di 100 elementi che appartengono allo strato superficiale, andando sempre ad assimilare i grani ad ellissoidi e valutandone i tre assi principali. Questa operazione viene portata a termine con un altro software sperimentale fornito da ETH di Zurigo: BASEgrain. Il programma consente di ricavare le informazioni geometriche dei grani da una immagine scalata. Delicata e complessa è la sequenza di passaggi che portano alla definizione dei parametri che regolano l'acquisizione dei grani e dei vuoti interstiziali. L'output può essere salvato in forma di tabelle visualizzabili e gestibili con il programma Microsoft Excel.

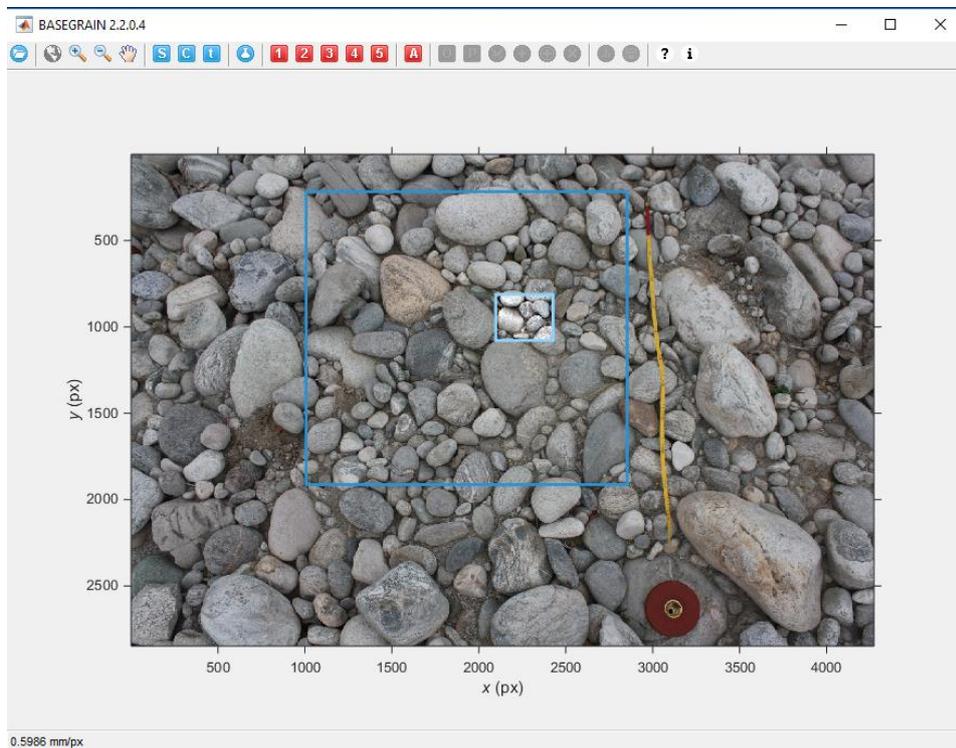


Figura 6.16: Schermata del programma BASEgrain con i due rettangoli che consentono di individuare la porzione di foto elaborata e quella da cui si definiscono i parametri di generazione

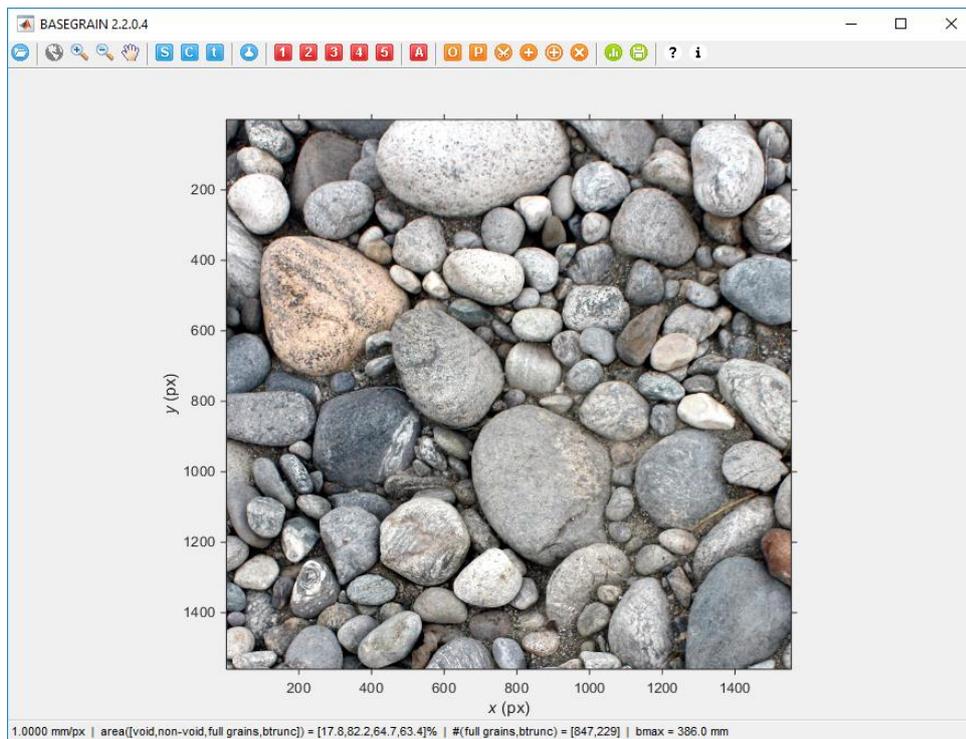


Figura 6.17: Porzione della foto da cui si estrae l'informazione sulla granulometria

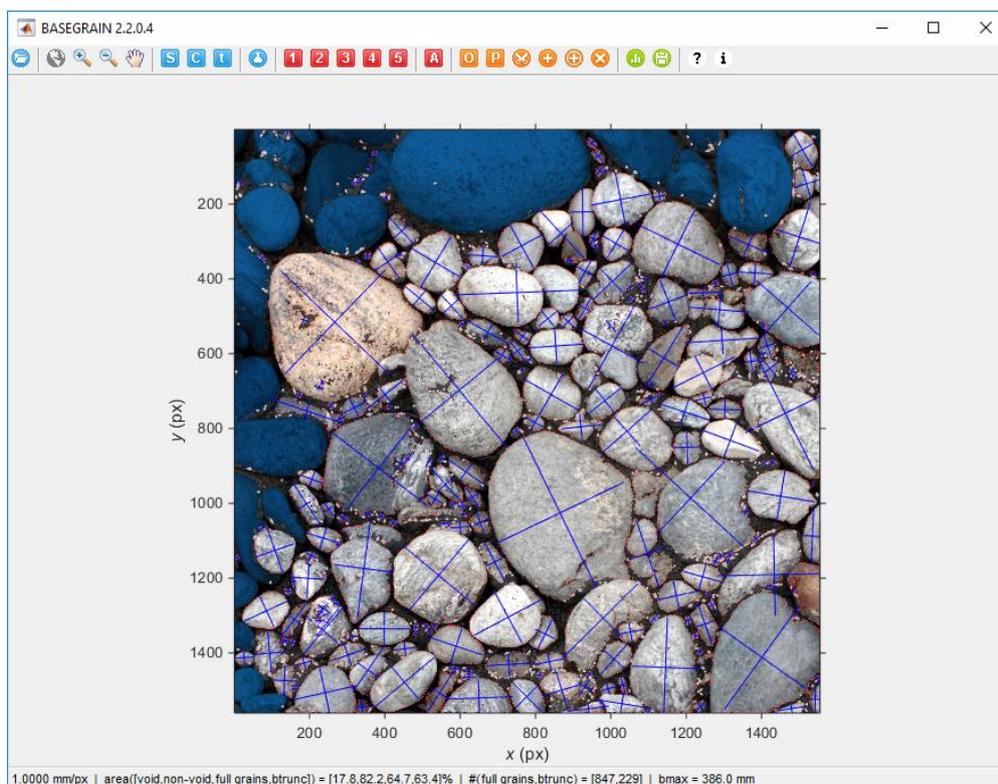


Figura 6.18: Fotografia di input con i grani assimilati a ellissoidi

Come per la frazione di sedime grossolano si trattano i dati fino a calcolare il passante per una serie di diametri caratteristici e si costruisce la curva granulometrica della frazione intermedia (Figura 6.19).

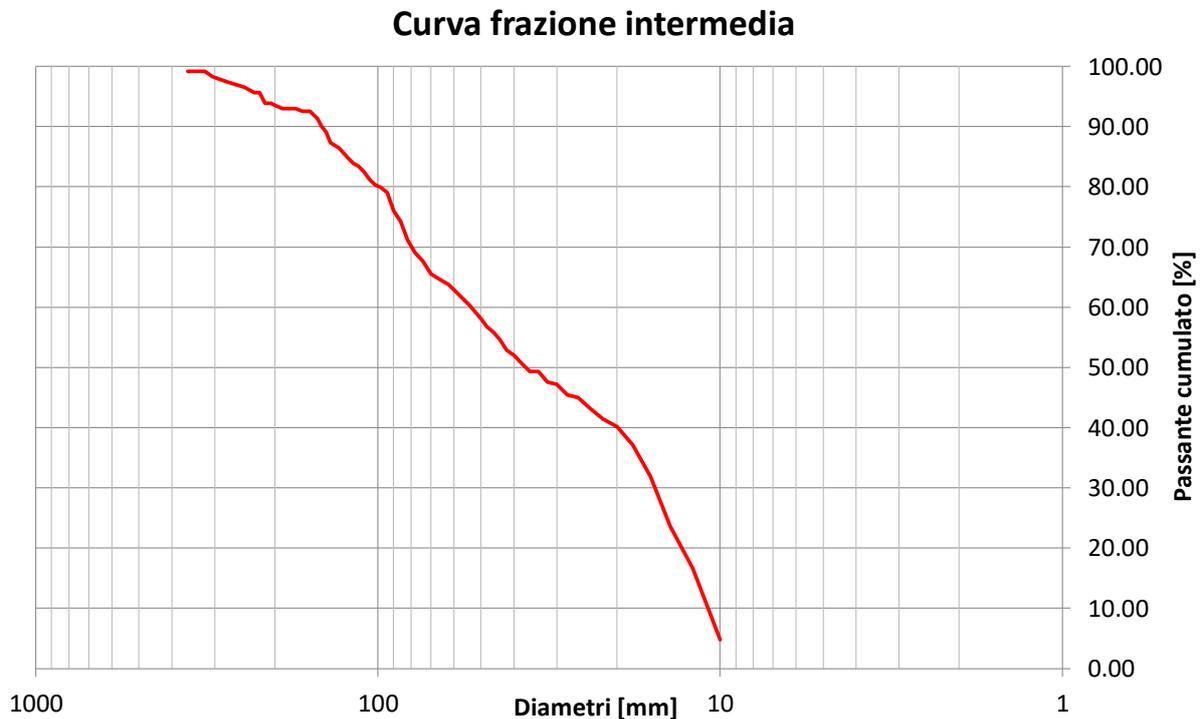


Figura 6.19: Curva granulometrica per la frazione intermedia

Lungo la sezione di rilievo si asportano campioni di materiale fine costituente il substrato dell'alveo dopo la rimozione del materiale superficiale. I campioni vanno prelevati lungo la sezione per ottenere un valore rappresentativo e fino al prelievo di 10 kg di materiale. Il sedimento prelevato viene sottoposto ad asciugatura in forno e disposto su una pila di setacci con maglie standardizzate e decrescenti verso il basso. Dopo aver sottoposto la pila a vibrazione si misura il peso di trattenuto da ogni setaccio e si costruisce la curva granulometrica della frazione fine.

Le Figure 6.20 e 6.21 mostrano la strumentazione utilizzata presso il laboratorio di Idraulica del Politecnico di Torino.



Figura 6.20: Pila dei setacci disposta sulla piattaforma vibrante



Figura 6.21: Setaccio di dimensione maggiore avente spigolo della maglia di 9,5 mm

La dimensione della maglia degli stacci, la tara in grammi e le misure in peso per ogni trattenuto sono riportate nella Tabella 6.12.

Nella stessa tabella sono indicati per ogni elemento della pila i valori di passante cumulato, utili alla realizzazione della curva granulometrica per il sedime fine visibile in Figura 6.22.

Tabella 6.12: Dati relativi alla setacciatura

Misura maglia [micron]	Tara [g]	Peso lordo [g]	Peso netto [g]	Trattenuto [g]	Trattenuto cumulato [g]	Passante cumulato [g]
9500	597.4	2214	1616.6	18.51	18.51	81.49
4750	553.8	1506.1	952.3	10.90	29.42	70.58
2000	525.7	2325	1799.3	20.60	50.02	49.98
850	435.7	2318.2	1882.5	21.56	71.58	28.42
425	418.1	1965.3	1547.2	17.72	89.29	10.71
180	385.6	1221.4	835.8	9.57	98.87	1.13
106	364.7	435.7	71	0.81	99.68	0.32
75	368.5	385.1	16.6	0.19	99.87	0.13
<	390.8	402.3	11.5	0.13	100.00	0.00

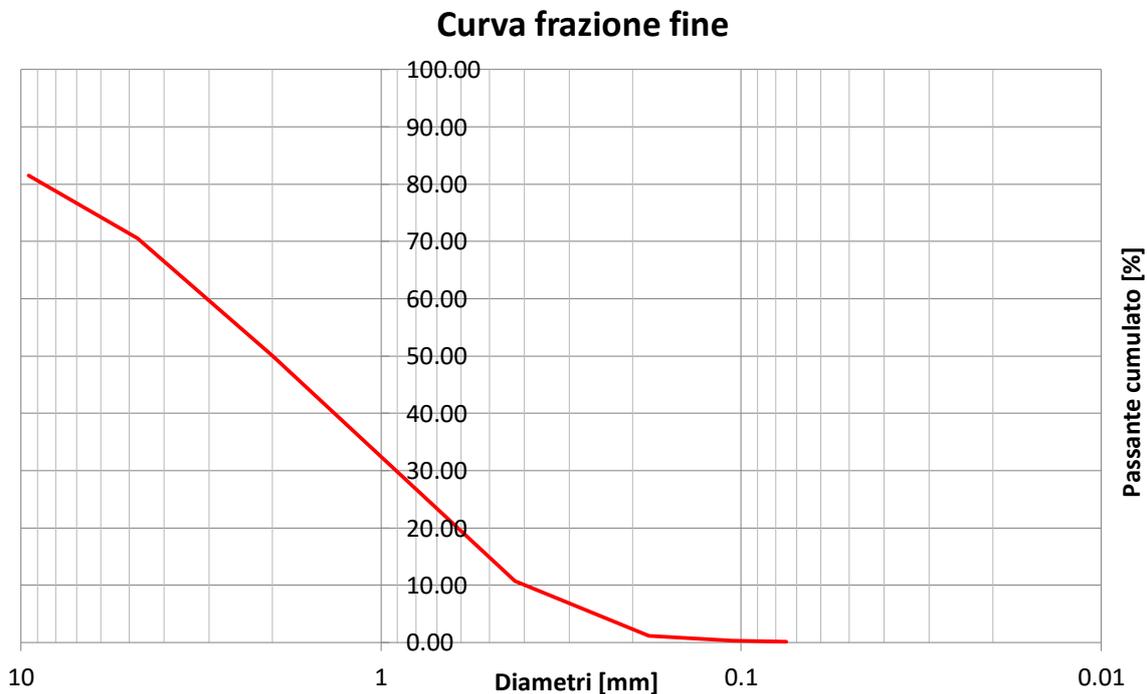


Figura 6.22: Curva granulometrica per la frazione fine

Le tre informazioni ricavate devono essere assemblate scalando le curve fino ad ottenere una rappresentazione globale delle informazioni del sedimento. Sovrapponendo la curva di materiale fine con quelle di materiale intermedio e grossolano, si ottiene una informazione più accurata della distribuzione dei diametri nella porzione inferiore della curva globale. Questa operazione di scalo viene condotta individuando, per tentativi, il punto di incontro ottimale tra le coppie di curve locali.

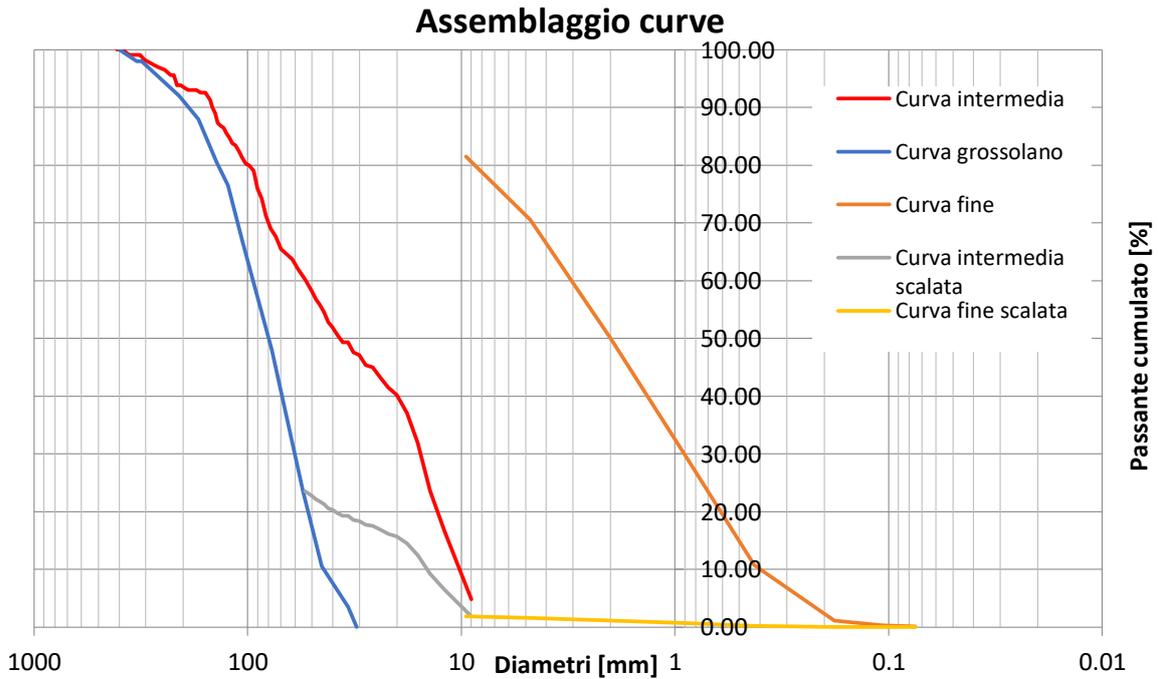


Figura 6.23: Operazione di scalo delle tre curve su quella del materiale grossolano

I punti ottimali rispetto ai quali le curve della frazione inferiore sono scalate su quelle relative ai grani più grossi sono a 55 mm e a 9,5 mm. Sulla base di queste zone sono stati scalati i valori dei passanti cumulati per i diametri inferiori per ottenere la curva granulometrica generale riportata in figura.

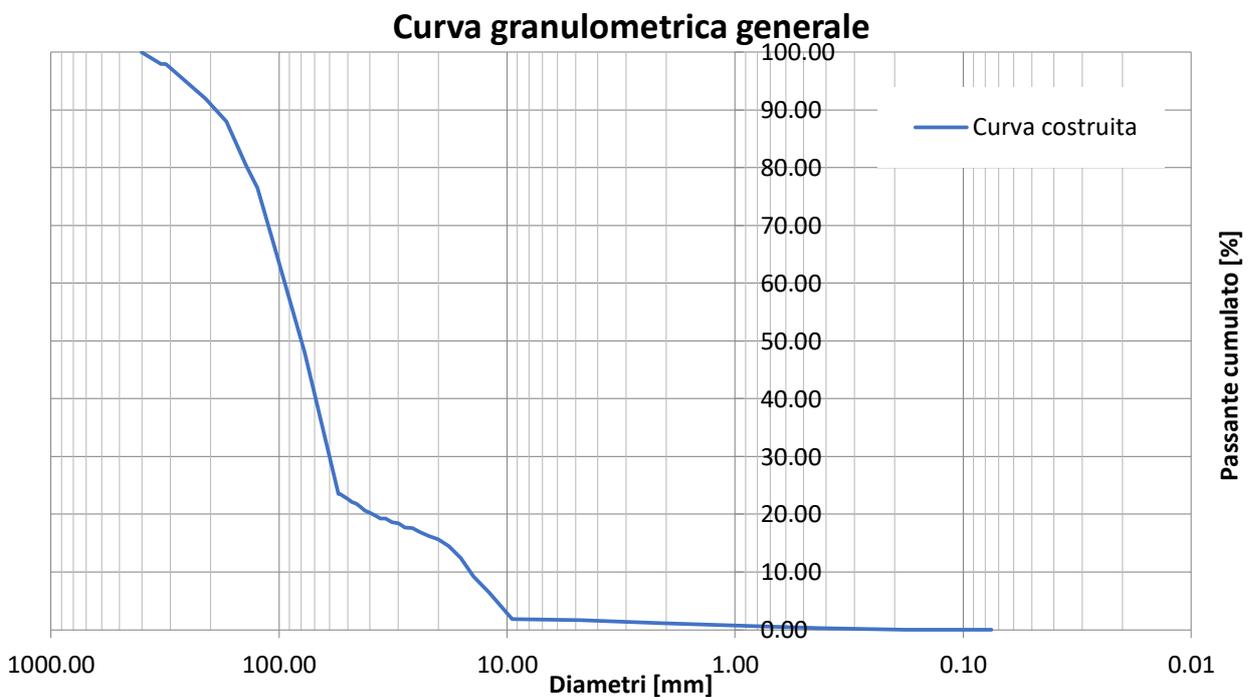


Figura 6.24: Curva granulometrica generale del sito

Tabella 6.13: Curva granulometrica generale

Passante cumulato [%]	Diametro [mm]
0.00	0.08
0.01	0.11
0.03	0.18
0.25	0.43
0.65	0.85
1.15	2.00
1.63	4.75
1.88	9.50
6.48	12.00
9.21	14.00
14.49	18.00
15.68	20.00
16.88	24.00
17.73	28.00
18.58	32.00
19.26	34.00
19.77	38.00
20.29	40.00
20.63	42.00
21.82	46.00
22.67	50.00
23.52	54.00
23.50	55.00
48.00	77.00
66.50	105.00
76.50	124.00
80.50	140.00
88.00	170.00
92.00	210.00
98.00	313.50
98.00	330.10
100.00	400.00

Poiché le distribuzioni granulometriche possono essere assimilate a curve gaussiane, la descrizione dello spettro dimensionale segue le regole dei parametri statistici classici. Nella pratica, ogni sedimento viene caratterizzato da una serie di parametri statistici, detti granulometrici, che possono essere dedotti graficamente o mediante metodi analitici.

I parametri statistici più utilizzati sono:

- la moda: diametro più frequente, desumibile dalla curva di frequenza;
- mediana: diametro corrispondente al 50% di passante cumulato nella curva granulometrica;
- coefficiente di asimmetria (S_k): informazione legata alla prevalenza di componenti fini o grossolani rispetto alla moda;
- coefficiente di appuntimento (K_u): grado di cernita attorno alla moda principale;
- coefficiente di cernita o sorting (K_c): indica il grado di omogeneità o eterogeneità nella dimensione dei clasti di un sedimento.

I parametri granulometrici possono essere calcolati a partire dai dati analitici mediante il calcolo dei momenti secondo un rigoroso calcolo analitico; valida alternativa si conferma il calcolo grafico, visivamente o mediante i percentili.

Il coefficiente di classazione (o sorting) rappresenta la misura della variabilità dimensionale entro il campione. Folk & Ward propongono di calcolare la dispersione della curva entro un intervallo maggiore rispetto a come si calcola in statistica, considerando anche le code della distribuzione:

$$\sigma = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} - \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6} \quad (6.1)$$

$$\phi = \log_2 D \quad (6.2)$$

in cui D è il diametro espresso in millimetri.

L'aumento del sorting è dato da un incremento del numero di classi dimensionali che, a parità di diametro medio, tende ad appiattire la curva di frequenza. Questo, nella curva cumulativa, si evidenzia con una diminuzione della pendenza della retta. Se un sedimento è composto da una sola classe dimensionale, la curva è perfettamente verticale.

A seconda del grado di sorting il sedimento può essere definito secondo quanto indicato in Tabella 6.14.

Tabella 6.14: Indicazione delle classi di definizione del livello di sorting, con Φ si indica il diametro massimo della distribuzione

Molto ben classato	$0 < \sigma < 0.35\Phi$
Ben classato	$0.35\Phi < \sigma < 0.50\Phi$
Moderatamente classato	$0.50\Phi < \sigma < 1.00\Phi$
Mal classato	$1.00\Phi < \sigma < 2.00\Phi$
Molto mal classato	$2.00\Phi < \sigma < 4.00\Phi$
Estremamente mal classato	$\sigma > 4.00\Phi$

Il coefficiente di Skewness (o asimmetria) rappresenta la misura della simmetria della distribuzione. I valori possono variare da -1.0 a +1.0. Un valore nullo indica che la distribuzione è simmetrica mentre con asimmetria positiva ($S_k > 0$), la distribuzione presenta un eccesso di componenti fini rispetto ad una curva simmetrica (si parlerà di coda fine).

$$S_k = \frac{\phi_{84} + \phi_{16} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_{95} + \phi_5 - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)} \quad (6.3)$$

Sulla base del valore ottenuto si può stabilire il carattere del sedimento sulla base delle definizioni riportate in Tabella 6.15.

Tabella 6.15: Indicazione delle classi di definizione del coefficiente di asimmetria

Asimmetrico molto negativo	$-1.00 < S_k < -0.30$
Asimmetrico negativo	$-0.30 < S_k < -0.10$
Simmetrico	$-0.10 < S_k < 0.10$
Asimmetrico positivo	$0.10 < S_k < 0.30$
Asimmetrico molto positivo	$0.30 < S_k < 1.00$

Il coefficiente di Kurtosis (o appuntimento) rappresenta la misura dell'acutezza della distribuzione in rapporto al sorting.

$$K_u = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})} \quad (6.4)$$

Sulla base del valore ricavato, il sedimento può essere definito sulla base della classificazione riportata in Tabella 6.16.

Tabella 6.16: Indicazione delle classi di definizione del coefficiente di appuntimento

Molto platicurtico	$K_u < 0.67$
Platicurtico	$0.67 < K_u < 0.90$
Mesocurtico	$0.90 < K_u < 1.11$
Leptocurtico	$1.11 < K_u < 1.50$
Molto leptocurtico	$1.50 < K_u < 3.00$
Estremamente leptocurtico	$K_u > 3.00$

Ad ogni classificazione corrisponde una forma della curva dei diametri, come mostrato in Figura 6.25.

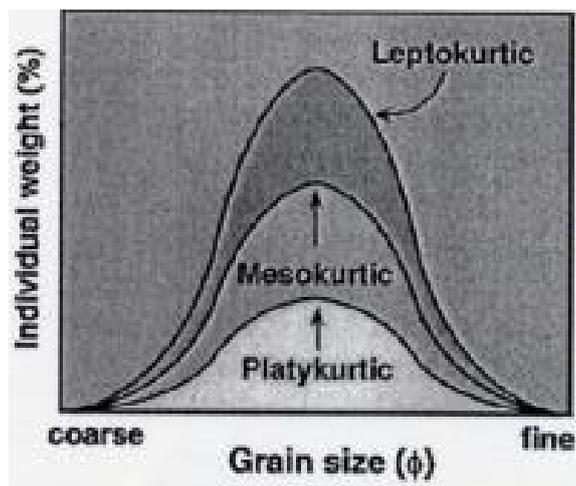


Figura 6.25: Possibili forme della curva di ripartizione dei diametri

Dalla distribuzione granulometrica generale è possibile ricavare i quantili, ovvero specifici valori di diametro corrispondenti a una certa percentuale di passante. Nella Tabella 6.17 si riportano i quantili utilizzati per la determinazione delle caratteristiche del sedimento, indicate nella Tabella 6.18.

Tabella 6.17: Quantili della distribuzione generale

	mm	ϕ
D_{max}	400	8.64
D_5	11.0	3.46
D_{16}	21.2	4.41
D_{25}	56.3	5.82
D_{50}	80.0	6.32
D_{75}	121.2	6.92
D_{84}	154	7.27
D_{90}	190	7.57
D_{95}	262	8.03

Tabella 6.18: Classificazione del sedimento

S_k	0.30	Asimmetrico positivo
K_u	1.70	Molto leptocurtico
$K_{cernita}$	0.00	Molto ben classato

6.4.3 Confronto con la curva ricavata dall'Ing. Giordano

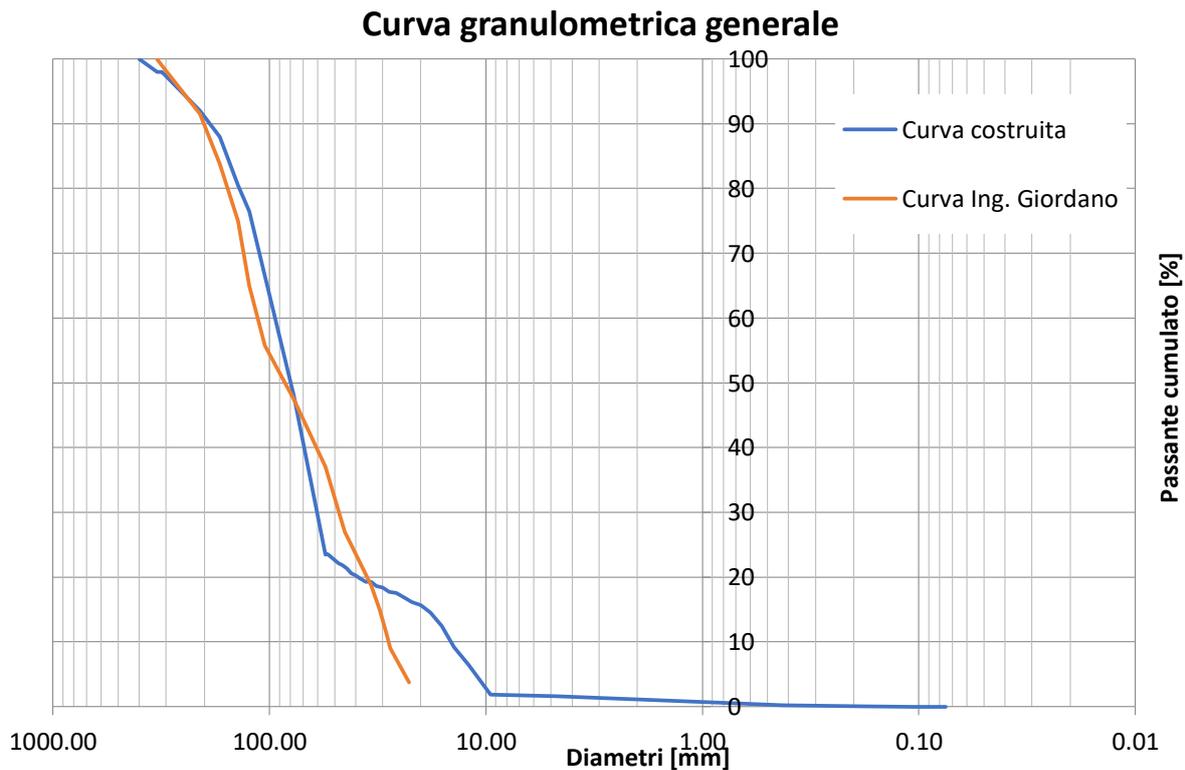


Figura 6.26: Confronto grafico tra misure attuali e da indagini svolte dall'Ing. Jessica Giordano

Dal confronto tra i dati misurati nel 2010 dall'Ing. Giordano e quelli elaborati in questo studio si nota una contenuta deviazione delle misure per quanto concerne la frazione grossolana, il divario cresce per la porzione intermedia. Per la componente fine non è possibile alcun confronto in quanto non sono stati eseguiti prelievi e analisi dall'Ing. Giordano.

Da notare è anche il diverso diametro massimo della serie dei dati per le due misure; per lo studio corrente è stato individuato con il metodo del quadrillage un grano di 400 mm, mentre le analisi passate mostrano un valore massimo pari a 330,1 mm.

7 Componenti di BASEMENT

Gli strumenti utilizzati dal programma possono essere suddivisi in tre differenti categorie:

- il modulo fisico-matematico comprendente le equazioni che governano il modello;
- la categoria che raccoglie gli strumenti utili alla creazione e alla modifica della griglia computazionale che rappresenta in forma discreta la topografia del problema;
- il modulo numerico, costituito dai metodi di risoluzione adottati per le equazioni reggenti il problema.

7.1 Modulo fisico-matematico

Gli strumenti messi a disposizione dell'utilizzatore e le informazioni che si devono dare in input variano sulla base del grado di studio che si richiede al software e del modulo che si intende utilizzare (BASEchain, BASEplane o BASEsub).

Il modulo BASEchain si fonda sulle equazioni di Saint Venant (SVE) che descrivono un flusso unidimensionale instabile. La validità di questo modello di approccio implica le seguenti condizioni e ipotesi:

- 1) distribuzione idrostatica delle pressioni: questo è garantito se le curvature sono piccole e le componenti di accelerazione lungo la verticale sono trascurabili;
- 2) velocità uniforme nella sezione trasversale del corso d'acqua;
- 3) ridotto valore della pendenza del fondo del canale, in modo che il coseno dell'angolo che il profilo del fondo forma con l'orizzontale possa essere assunto con valore unitario;
- 4) le leggi di resistenza allo stato di moto permanente sono applicabili per un flusso di moto vario.

Le condizioni di deflusso in una sezione trasversale del canale possono essere descritte in funzione di due variabili; pertanto, sono necessarie due delle tre leggi di conservazione per analizzare una simulazione di deflusso. Se le variabili del flusso non sono continue, queste devono essere la legge di conservazione della massa e della quantità di moto (Couge et al., 1980).

7.1.1 Legge di conservazione della massa

Per il volume di controllo illustrato in Figura 7.1 la conservazione della massa è formulata assumendo che la densità di massa sia costante (flusso incomprimibile). Questo assunto porta fondamentalmente a una conservazione in termini di volume.

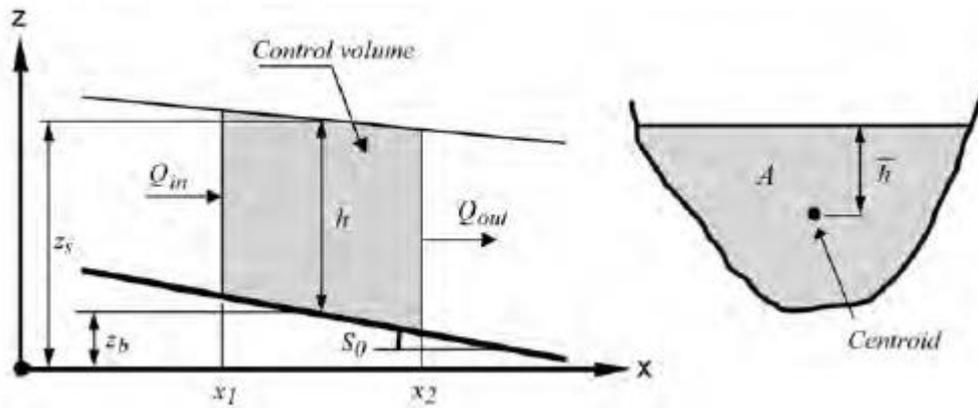


Figura 7.1: Indicazione del volume di controllo e delle variabili che descrivono il deflusso

7.1.2 Legge di conservazione della quantità di moto

La seconda legge del moto di Newton enuncia: *L'accelerazione di un oggetto è direttamente proporzionale alla forza risultante agente su di esso e inversamente proporzionale alla sua massa.* Da questa espressione si può dimostrare come la variazione di quantità di moto sia uguale alla sommatoria delle forze esterne applicate al volume di controllo, in termini matematici:

$$\frac{dp}{dt} = ma = \sum F \quad (7.1)$$

Dove $p = mu$ è definita quantità di moto.

Utilizzando il teorema di trasporto di Reynolds (Chaudhry, 1993) e riferendosi al volume di controllo si ottiene una formulazione conservativa del primo membro dell'equazione precedente.

Con la regola di Leibnitz e esprimendo la portata come prodotto tra l'area della sezione e la velocità media della stessa, con ulteriori semplificazioni e l'applicazione del teorema del valore medio per più variabili si ottiene la formulazione seguente:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A_{red}} \right) + g A_{red} \frac{\partial zS}{\partial x} + g A_{red} S_f - q u_x = 0 \quad (7.2)$$

che rappresenta l'equazione del moto della massa fluida del modello SVE.

Dove compaiono i termini:

Q valore della portata di deflusso;

x indica l'asse di sviluppo del corso d'acqua, per valori ridotti di pendenza del fondo si assume l'asse coincidente con il profilo medio del fondo;

β coefficiente del ragguglio;

A_{red} è l'area ridotta della sezione, individuata dalla porzione occupata dall'acqua;

g accelerazione di gravità;

z_s elevazione del pelo libero della corrente;

S_f pendenza di attrito.

Nell'espressione precedente compare la portata laterale in ingresso o in uscita per unità di larghezza q_l , termine il cui contributo non è considerato dal modulo BASEchain.

7.1.3 Condizioni di chiusura del problema

La chiusura del problema consiste nella definizione della pendenza di attrito S_f , la quale può essere ricondotta a una relativa tensione al fondo secondo la seguente relazione:

$$\frac{\tau_B}{\rho} = gRS_f \quad (7.3)$$

Il termine a primo membro dell'equazione corrisponde al quadrato della velocità di parete u_* .

Secondo la formulazione di Chezy la velocità nel canale è proporzionale per mezzo di un coefficiente alla velocità di parete:

$$u = c_f \sqrt{gRS_f} \quad (7.4)$$

Il termine c_f è il coefficiente adimensionale di Chezy; se si vuole esprimere in termini dimensionali tale coefficiente si riscrive la formulazione classica di Chezy:

$$u = C \sqrt{RS_f} \quad (7.5)$$

Con C espresso in $[m^{1/2}/s]$.

Il coefficiente adimensionale di Chezy può essere determinato:

- con un approccio basato su una legge di potenza utilizzando il coefficiente di Strickler k_{str} (o in alternativa quello di Manning n):

$$c_f = \frac{k_{str} R^{1/6}}{\sqrt{g}} \quad (7.6)$$

La relazione che lega i due valori di scabrezza è riportata di seguito:

$$k_{str} = \frac{1}{n} \quad (7.7)$$

- con un approccio con legge logaritmica che ricorre a una scabrezza equivalente alla Nikuradse k_s ; BASEMENT implementa una serie di formulazioni tra cui:
 - Chezy
 - Yalin
 - Bezzola
 - Darcy-Weissbach (la scabrezza è determinata in funzione del diametro caratteristico d_{90} del sedimento)

7.1.4 Condizioni al contorno per il problema

Per la sezione più a monte e quella a valle del canale è necessario conoscere l'influenza delle zone al di fuori del dominio simulato. Sulla base delle velocità di propagazione di una perturbazione è possibile determinare la distanza dalla sezione da considerare per determinare la condizione al contorno per il modello.

Nella sezione detta di inflow il valore noto tra le variabili è in genere la portata di imbocco del canale. Se il deflusso avviene secondo una condizione supercritica ($F_r > 1$) si richiede una seconda boundary condition: l'area della sezione del canale occupata dall'acqua al momento di inizio della simulazione. Questa seconda variabile è calcolata con una legge di resistenza che lega la variabile Q alla scabrezza del fondo; pertanto si ritiene necessaria l'indicazione di un valore relativo alla pendenza del fondo.

Nella sezione a valle si richiede una unica condizione di vincolo se il deflusso avviene nello di deflusso sub-critico; non si richiede alcuna condizione nel caso di flusso super-critico. Nel caso più generale vi sono diverse possibilità sul tipo di vincolo che si può imporre:

- nel caso di presenza di una soglia o paratoia è definibile una legge di flusso dipendente dal tirante a monte della struttura;
- settare il livello idrico del pelo libero con una funzione temporale;
- definire una relazione che lega il tirante idrico alla portata defluente (strumento definito rating curve).

I modelli matematici adottabili in condizioni di acqua poco profonda governano un'ampia varietà di fenomeni fisici. Per ragioni di semplicità, le equazioni saranno da ora in avanti abbreviate come SWE. Una classe importante di problemi di interesse pratico comporta flussi d'acqua con una superficie libera sotto l'influenza della gravità, in questo campo si ricordano i seguenti casi-studio:

- le maree negli oceani;
- le onde di propagazione delle piene nei fiumi;
- le onde originate dalla rottura di una diga.

La validità del SWE implica le condizioni 1) 3) e 4) assunte per la formulazione del modello SVE. Un requisito fondamentale per l'applicabilità di questa teoria riguarda il primo aspetto, la distribuzione di pressione idrostatica. Supponendo che la componente verticale della velocità delle particelle d'acqua sia trascurabile, si può assumere una distribuzione di pressione idrostatica. Questo consente infine l'integrazione sulla profondità di flusso, che determina un problema iniziale non lineare, vale a dire le equazioni SWE che rappresentano un sistema bidimensionale a dipendenza temporale di equazioni differenziali parziali non lineari di tipo iperbolico.

L'ottenimento delle shallow water equations deriva dall'integrazione delle equazioni di Navier-Stokes sul tirante o da un approccio diretto di studio su un volume di controllo tridimensionale.

In modo simile al caso delle equazioni del modello SVE si scrivono le equazioni che reggono la conservazione della massa e della quantità di moto (equazione del moto) dopo aver definito per il pelo libero e il fondo del fiume le condizioni al contorno di tipo cinematico, in funzione dei campi di velocità, o dinamico sulla base di equilibri di forze e tensioni. A titolo di esempio si riportano le condizioni che possono essere assunte per la superficie idrica:

- condizione cinematica: in questo caso la condizione impone l'assenza di flusso in uscita dalla superficie libera, la condizione è espressa nel modo che segue

$$w_s = \frac{\partial z_s}{\partial t} + u_s \frac{\partial z_s}{\partial x} + v_s \frac{\partial z_s}{\partial y} = \frac{dz_s}{dt} \quad (7.8)$$

- condizione dinamica: la medesima imposizione è definita come

$$\tau = (\tau_{sx}, \tau_{sy}) \quad (7.9)$$

$$P = P_{atm} \quad (7.10)$$

In modo simile la condizione assunta per la superficie del fondo stabilisce l'assenza di un flusso attraverso il fondo. Tale condizione va modificata nel caso in cui si vogliono tenere in conto gli effetti di flusso iporreico, ovvero lo scambio di acqua con la falda tramite il sedimento che costituisce il fondo. Questo fenomeno è importante per l'idraulica ambientale in quanto garantisce l'ossigenazione del fondo e la crescita della flora.

L'integrazione sulla verticale dell'equazione che esprime la conservazione del moto da origine a sforzi viscosi e turbolenti presso il confine del volume di controllo; la nascita di questi termini rende necessaria la definizione di una chiusura del problema.

Suddividendo i termini del campo di velocità in componente media e termine di deviazione, similmente alla decomposizione di Reynolds si scorporano i termini di dispersione, che sono la causa della non uniformità del campo di moto.

In conclusione il set complessivo delle equazioni della teoria delle SWE si scrivono nel sistema:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}h)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}h)}{\partial y} = 0 \quad (7.11)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = -g \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{1}{\rho h} \tau_{Bx} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial [h(\bar{\tau}_{xx} + D_{xx})]}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial [h(\bar{\tau}_{xy} + D_{yx})]}{\partial y} \quad (7.12)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} = -g \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{1}{\rho h} \tau_{By} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial [h(\bar{\tau}_{yx} + D_{yx})]}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial [h(\bar{\tau}_{yy} + D_{yy})]}{\partial y} \quad (7.13)$$

I termini che compaiono nelle formule (7.11), (7.12) e (7.13) sono:

h	tirante idrico
g	accelerazione di gravità
P	pressione
\bar{u}	valore media del campo di velocità in direzione x
u_s, v_s, w_s	velocità in direzione x, y, z sul pelo libero

u_B, v_B, w_B	velocità in direzione x, y, z sul fondo (in genere ha valore nullo)
\bar{v}	valore medio del campo di velocità in direzione y
z_s	elevazione della superficie libera
z_B	elevazione del fondo
τ_{Sx}, τ_{Sy}	tensioni tangenziali in direzione x, y sulla superficie libera (trascurato)
τ_{Bx}, τ_{By}	tensioni tangenziali in direzione x, y sul fondo
$\bar{\tau}_{xx}, \bar{\tau}_{xy}, \bar{\tau}_{yx}, \bar{\tau}_{yy}$	valore medio degli sforzi turbolenti e viscosi lungo la verticale
$D_{xx}, D_{xy}, D_{yx}, D_{yy}$	deviazione degli sforzi turbolenti e viscosi lungo la verticale

7.1.5 Condizioni di chiusura interne

La chiusura del problema avviene con la definizione degli sforzi viscosi e turbolenti.

Turbolenza

Le sollecitazioni turbolente e le vibrazioni viscosi possono essere quantificate in base al concetto di eddy viscosity di Boussinesq, che può essere espresso come

$$\tau_{xx} = 2\rho v \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \tau_{yy} = 2\rho v \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \tau_{xy} = \rho v \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (7.14)$$

Se il flusso è dominato dalle forze di attrito, la viscosità totale è la somma della eddy viscosity (quantità dovuta alla modellazione operata dalla turbolenza) e della viscosità molecolare (viscosità cinematica del fluido):

$$v = v_t + v_m \quad (7.15)$$

La viscosità turbolenta viscosa può essere calcolata dinamicamente come $v_t = k u_* \frac{h}{6}$

La viscosità molecolare è una proprietà fisica del fluido ed è costante se si assume l'ipotesi di fluido isotermico.

Sforzo di taglio al fondo (Bed Shear Stress)

Lo sforzo di taglio in prossimità del fondo è legato alla componente media della velocità per mezzo di una legge di attrito quadratica:

$$\tau_{Bx} = \rho \frac{|\mathbf{u}|u}{c_f^2}, \quad \tau_{By} = \rho \frac{|\mathbf{u}|v}{c_f^2} \quad (7.16) (7.17)$$

Dove $|\mathbf{u}| = \sqrt{u^2 + v^2}$ è il modulo del vettore velocità.

Termini dispersivi

I termini dispersivi sono originati da una non uniformità del campo di velocità lungo la direzione verticale. Al momento BASEMENT non consente di modellare in modo esplicito questi termini, che generalmente vengono considerati modificando il termine di viscosità turbolenta nella determinazione degli sforzi turbolenti (Wu, 2007).

7.1.6 Condizioni di chiusura al contorno

La soluzione delle SWE necessita l'imposizione di condizioni di bordo appropriate come tutte le altre equazioni differenziali parziali. I confini fisici possono essere divisi in due categorie: uno *closed*, l'altro *open*. Il primo generalmente esprime che nessuna massa può fluire attraverso il confine, che in genere consiste in una scarpata o un muro. La tipologia open riguarda un confine immaginario fluido-fluido e si riferisce alla sezione di ingresso e a quella di uscita della portata fluida.

7.1.7 Dinamiche di trasporto solido

Lo stress di taglio critico:

$$\tau_{Bcr} = \theta_{cr}(\rho_s - \rho)gd_g \quad (7.18)$$

è la soglia superata la quale si assume abbia inizio il movimento incipiente della classe di grano con diametro d_g . Il parametro critico di Shields θ_{cr} è una funzione del numero di Reynolds Re^* e può essere impostato su un valore costante, ad es. Meyer-Peter Muller adotta un valore costante di 0,047 per un flusso completamente turbolento ($Re^* > 10^3$). In alternativa, tale valore può essere determinato dinamicamente da un diagramma di Shields adimensionalizzato in funzione del diametro del grano D^* .

Le sperimentazioni eseguite per la teoria del moto incipiente di Shields hanno interessato canali a fondo orizzontale. Nel caso in cui il fondo sia caratterizzato da una pendenza nella direzione del flusso o in direzione trasversale, la stabilità del sedimento può essere incrementata o diminuita per effetto della gravità. Un valido approccio per computare gli effetti della pendenza sul valore di soglia per il moto consiste nell'introdurre due coefficienti dipendenti dall'inclinazione longitudinale e trasversale del canale; in questo modo si ottiene lo sforzo critico al fondo come:

$$\tau_{Bcr} = k_\beta k_\gamma \tau_{Bcr, Shields} \quad (7.19)$$

In presenza di forme di fondo occorre introdurre ulteriori resistenze dovute alla complessità dei campi di moto e all'origine di turbolenza vicino alle “*bed forms*”.

Quando si ha a che fare con un sedimento costituito da più granulometrie differenti occorrerà prendere in conto l'effetto di *armouring* offerto dalla frazione più grossolana, che rimanendo sul fondo opera una azione di protezione per gli strati sottostanti.

Il fenomeno di trasporto solido di fondo in un modello bidimensionale tiene in conto la presenza di più meccanismi, diversamente dal caso monodimensionale nel quale si computa il solo effetto del flusso nella direzione principale di moto:

$$q_{Bg,x} = q_{Bg,xx} + q_{Bg,xlateral} + q_{Bg,xcurv} + q_{Bg,xgrav} \quad (7.20)$$

I termini dell'espressione precedente sono riferiti a una unità di larghezza del canale, e rappresentano:

$q_{Bg,xx}$	il trasporto solido di fondo dovuto al flusso in direzione 'x'
$q_{Bg,xlateral}$ (trasversale)	il trasporto laterale generato dal flusso in direzione 'y' (dovuto alla pendenza trasversale)
$q_{Bg,xcurv}$	trasporto solido dovuto alla curvatura in direzione 'x'
$q_{Bg,xgrav}$	trasporto solido indotto dalla gravità (include il collasso delle sponde)

7.1.8 Condizioni di chiusura per il trasporto solido

BASEMENT fornisce un'ampia varietà di formule di trasporto solido che possono essere implementate nel modello. In generale si dispone di una serie di parametri con i quali è possibile operare una calibrazione della formulazione.

7.2 Modulo topografico

Le simulazioni richiedono un modello basato su sezioni caratteristiche o punti georiferiti. Nel primo caso si tratta di un modello monodimensionale e il letto del fiume viene ricostruito in base alla forma delle successive sezioni, delle distanze reciproche, nonché dalla pendenza media tra esse. Questa tipologia di modello rappresenta una buona interpretazione della realtà quando il corso d'acqua si presenta tendenzialmente lineare e monocorsuale. Per sistemi più complessi si raccomanda il ricorso a schemi più sofisticati, come quello bidimensionale, limitando l'adozione del modello tridimensionale per lo studio di aree ridotte (ad es. la zona intorno a una pila da ponte). Naturalmente all'aumentare della complessità del modello crescono notevolmente la richiesta computazione e i tempi di calcolo, a beneficio però dei risultati che si possono ottenere dalle analisi.

7.2.1 Realizzazione della mesh tridimensionale

Allo scopo di creare il modello per le simulazioni si utilizza il programma di gestione layer QGIS con l'apposito plugin denominato BASEmesh che consente con una serie di passaggi di trasformare un file di punti georeferenziati in una mesh tridimensionale. L'ente Parco Fluviale della città di Cuneo ha fornito un file .dxf che, una volta convertito nel formato shape è stato aperto come layer in QGIS. Il software consente l'importazione e la manipolazione di formati .dxf e .dwg ma, alcune informazioni, come quelle relative all'elevazione dei punti del rilievo possono non essere correttamente salvate, pertanto può risultare necessaria la conversione del formato. In pratica è stato utilizzato il software "CAD2shape" scaricabile da internet con una licenza gratuita per 30 giorni. Nella conversione è possibile selezionare gli attributi del file di disegno che si vogliono mantenere nello shape-file e che saranno visualizzabili sotto forma di tabella in QGIS. In questa fase occorre fare attenzione alla precisione con cui si vogliono salvare le informazioni per evitare di conservare i valori con la precisione del metro, quando i dati plano-altimetrici sono forniti con la precisione centimetrica.

Introdotta il file DTM (digital terrain model) come shapefile si disporrà di due layer differenti:

- il layer contenente i punti di rilievo caratterizzati da longitudine, latitudine e elevazione;
- un secondo layer con le breaklines, ovvero quelle linee caratteristiche del terreno che definiscono le scarpate e gli isolotti riscontrabili in alveo.

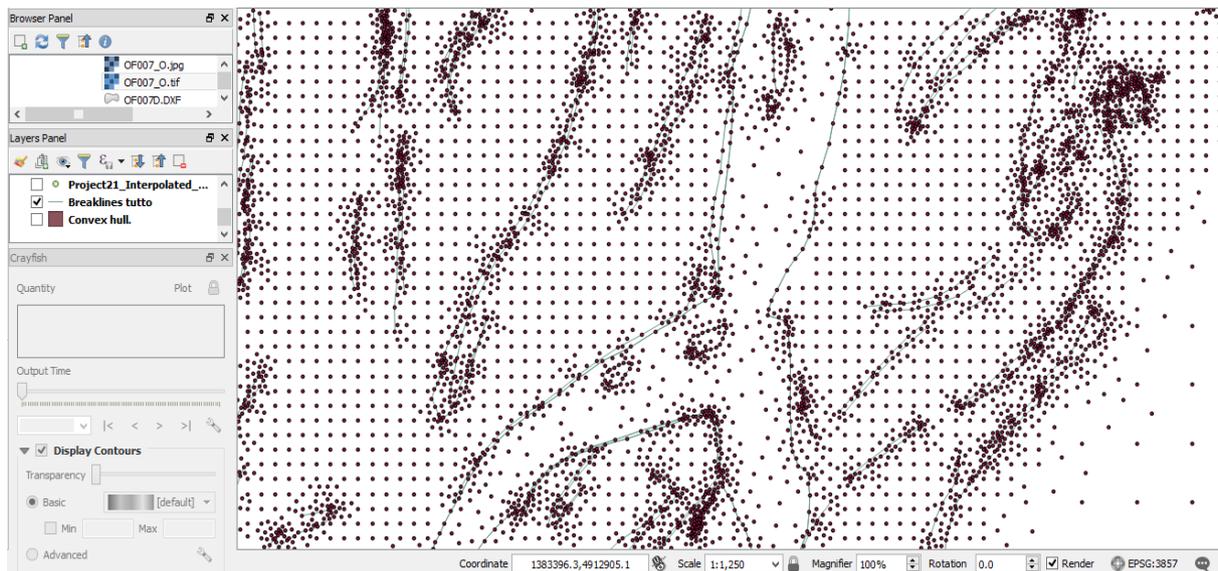


Figura 7.2: Vista dei layer attivi: punti di rilievo e breaklines

Sulla base della distribuzione spaziale dei punti di rilievo, si definisce una “*convex hull*”, in altri termini una regione all’interno della quale si andranno ad effettuare le operazioni di interpolazione e di triangolazione.

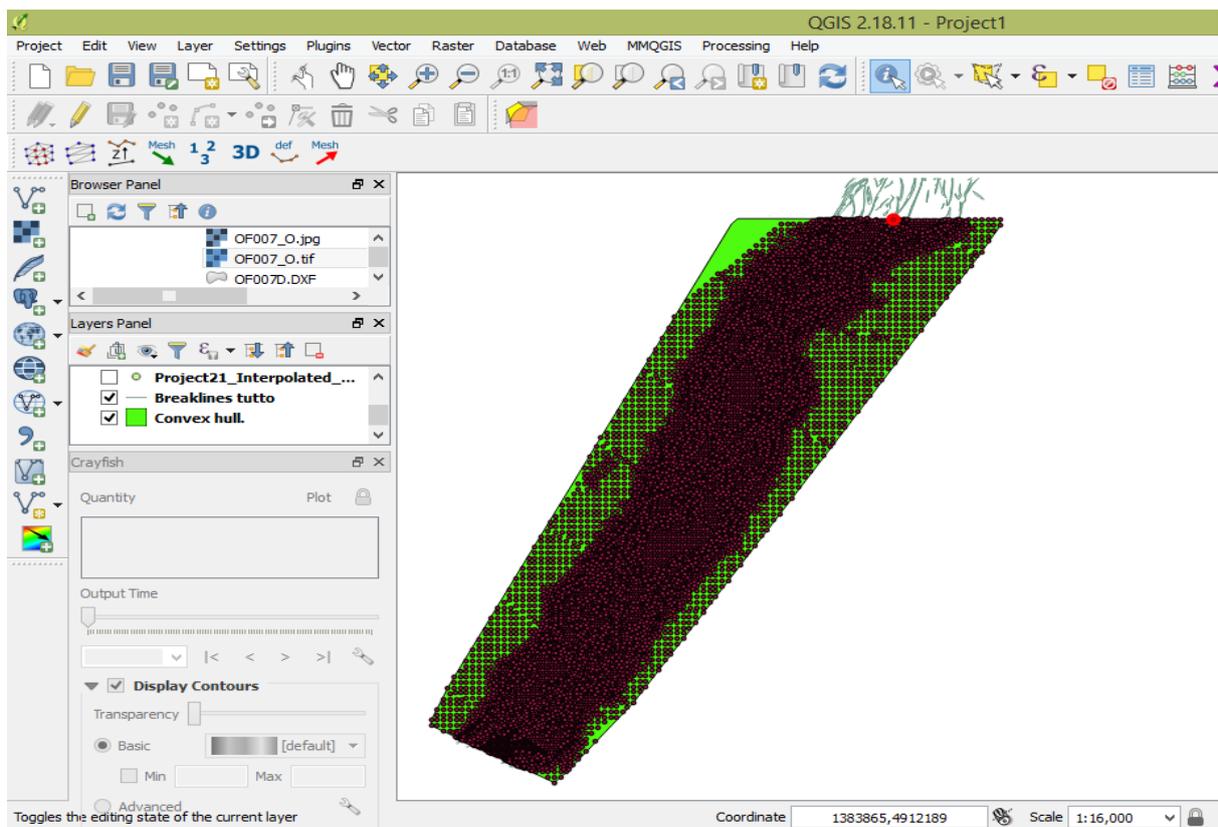


Figura 7.3: Vista dei layer attivi: punti di rilievo, breklines e convex hull

7.2.2 Considerazioni sulla qualità della mesh

La forma degli elementi della mesh ha un'importante effetto sull'applicabilità dei modelli matematici di BASEMENT. In particolare la velocità (legata al tempo necessario per avere convergenza), l'accuratezza e la stabilità della simulazione sono variabili dipendenti dalla qualità della triangolazione; in conseguenza occorre tenere presente la dimensione, la forma e il numero degli elementi generati, perché da questi fattori dipenderà la possibilità di eseguire le simulazioni idrauliche e l'affidabilità dei risultati. I criteri che possono essere indicati per vincolare la generazione della mesh sono il range di angoli ammissibili per la costruzione della maglia di triangoli e quadrilateri, la massima distanza tra i punti o la densità degli stessi, l'area delle forme generate.

Il criterio da adottare dipende dal tipo di studio e dal modello reale, oltre che dal numero e tipo di informazioni di cui si dispone. Nel caso più generale le maglie triangolate con differenze altimetriche importanti, angoli ridotti o troppo elevati tra le forme portano a una bassa risoluzione del problema in termini di precisione. Inoltre l'esistenza di elementi adiacenti caratterizzati da una estensione sostanzialmente diversa provoca un effetto negativo sulla simulazione.

Il plugin BASEmesh consente di scegliere la tipologia di triangolazione tra un'ampia gamma di metodi che si differenziano per il tipo di algoritmo e i criteri adottati.

In seguito si utilizza il primo comando sbloccato con l'installazione del plugin BASEmesh: *Elevation meshing* che apre la finestra indicata in Figura 7.4.

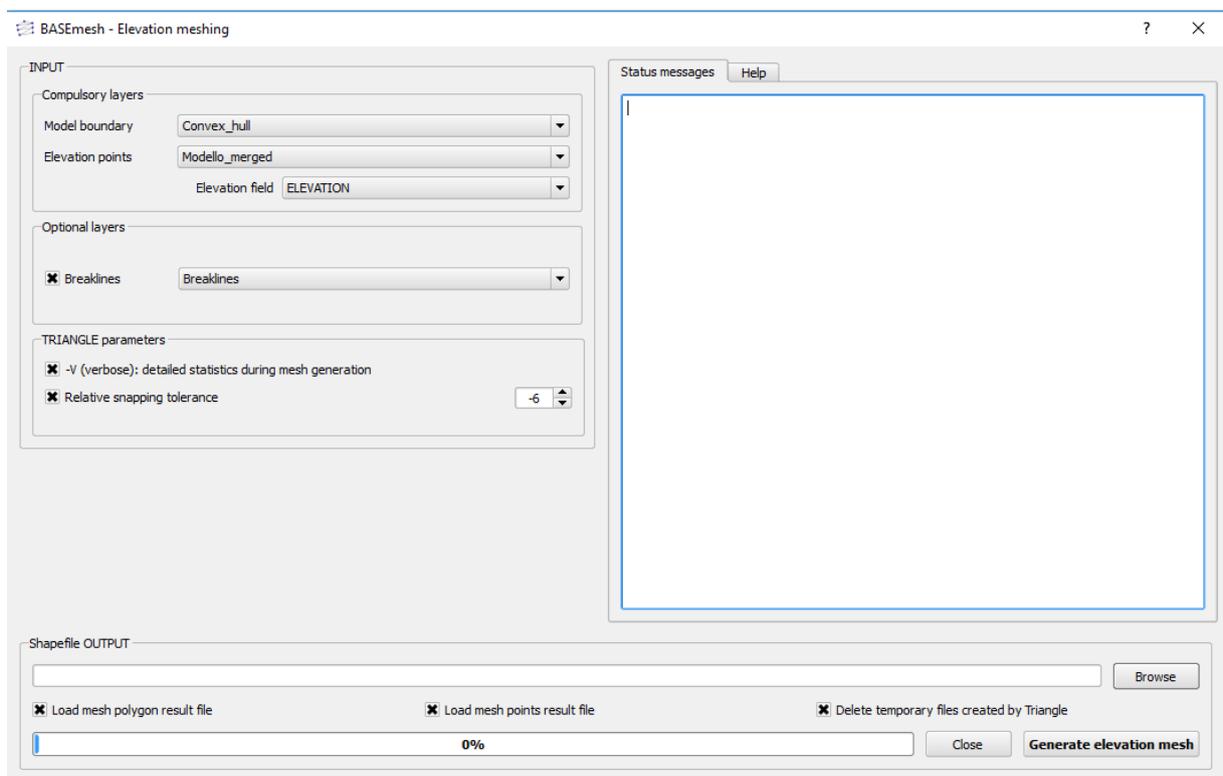


Figura 7.4: Finestra del comando Elevation meshing

Con questa azione i punti di elevazione nota e le breaklines (opzionale) vengono triangolati all'interno dell'area definita dal convex hull (anche detto *model boundary*) al fine di creare una mesh senza stringenti vincoli di qualità nella generazione.

La mesh creata rappresenta un passo intermedio e deve essere usata come base per le successive operazioni di interpolazione dei valori in elevazione. Per questa ragione non potrà essere usata direttamente per le simulazioni con BASEMENT.

In Output si ottengono due shape-file:

- PROJECTNAME_Elevation_elements.shp che contiene la mesh generata in forma di poligoni;
- PROJECTNAME_Elevation_nodes.shp contenente i nodi della mesh e le coordinate.

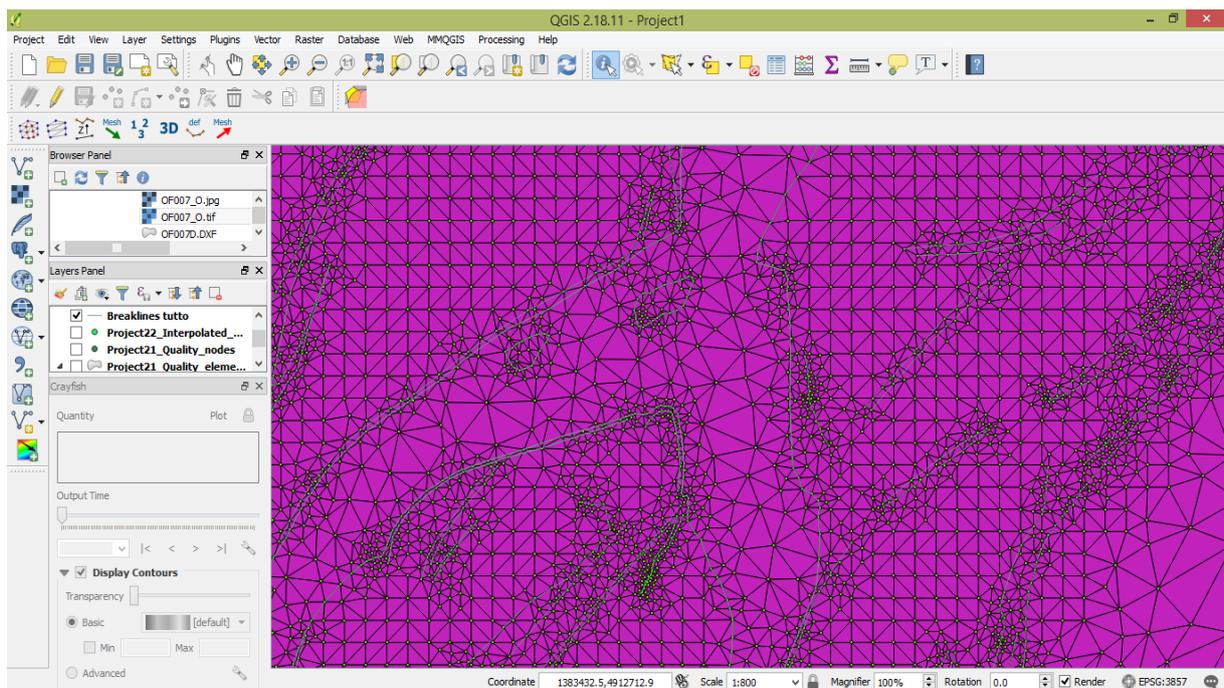


Figura 7.5: Output del comando Elevation meshing

Il fatto di aver interpolato in modo grossolano le informazioni relative all'elevazione dei punti del DTM non conclude il problema di generazione della mesh. La zona individuata dal model boundary deve essere sottoposta a triangolazione secondo specifici criteri di qualità. Questa operazione può essere svolta con il comando *Quality meshing* che apre la finestra indicata in Figura 7.6.

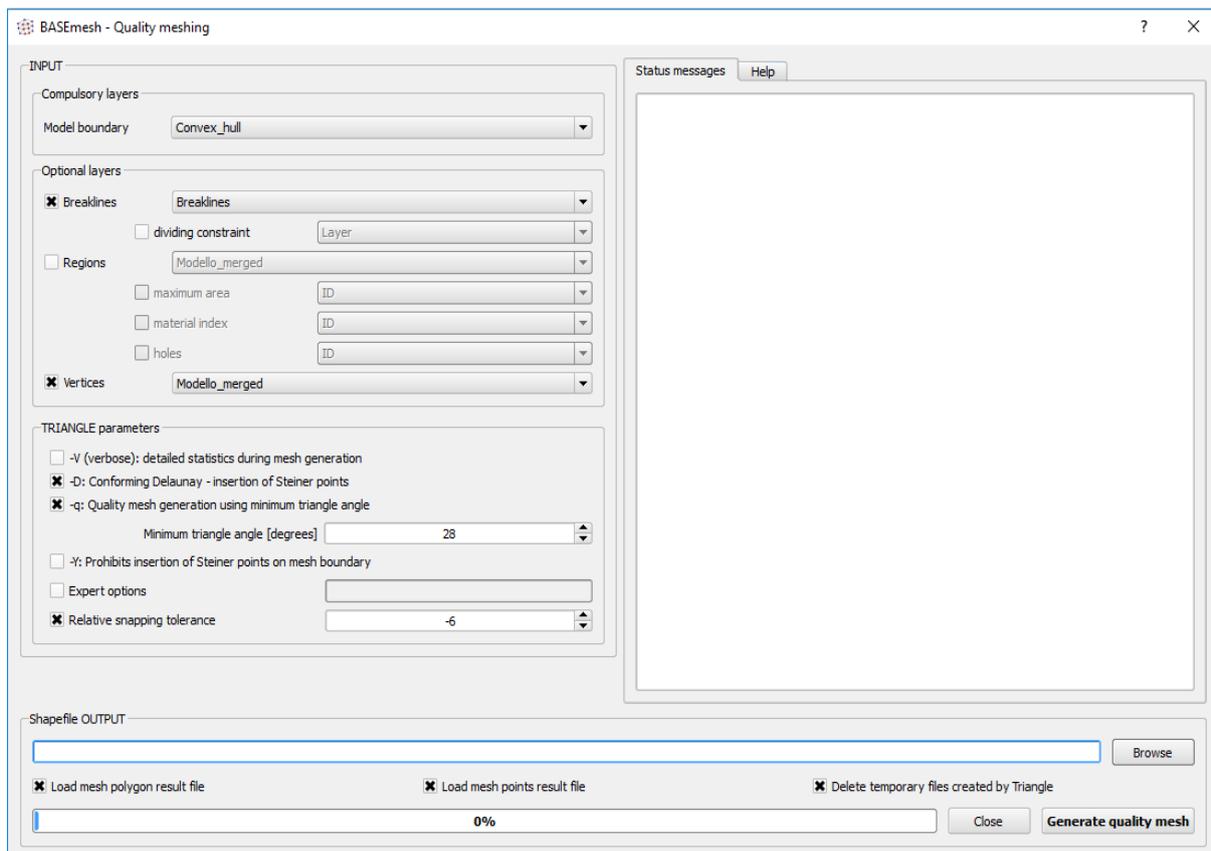


Figura 7.6: Finestra del comando Quality meshing

Dalla finestra generata possono essere inseriti 3 tipi di informazioni:

- Breaklines: layer di polilinee che vengono preservate nella mesh risultante;
- Regions: layer di punti che identifica una regione delimitata da linee chiuse;
- Vertices: layer costituito dai punti che verranno conservati nella mesh generata; in genere sono costituiti dai punti rilevati o da quelli di cui si vuole disporre nell'output.

In aggiunta alle informazioni di carattere geometrico, è possibile impostare una serie di criteri che influenzano il risultato del processo di interpolazione.

Il risultato della triangolazione è salvato in due separati shapefile che possono essere caricati in automatico sul programma:

- PROJECTNAME_Quality_elements.shp che contiene la mesh dettagliata e piana generata, in forma di poligoni;
- PROJECTNAME_Quality_nodes.shp contenente i nodi della mesh e le coordinate planimetriche.

Anche in questo caso la mesh generata non deve essere utilizzata per le simulazioni, in quanto non contiene le informazioni in elevazione (tutti i valori sono infatti impostati a 0 metri s.l.m.).

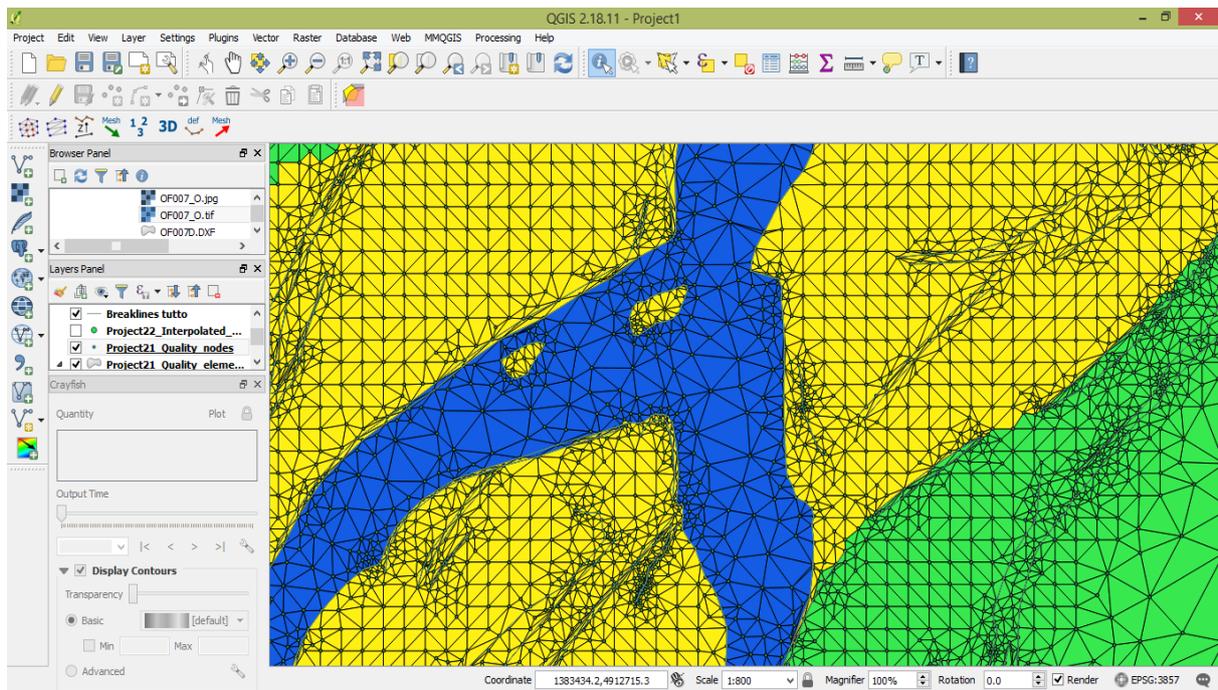


Figura 7.7: Output del comando Quality meshing

Dal confronto con la mesh generata con l'Elevation meshing si nota immediatamente come in questo caso la triangolazione sia più fitta.

A questo punto occorre combinare i risultati dei passaggi indicati in precedenza con il comando *Interpolation*. In questo modo le informazioni di elevazione vengono interpolate su una mesh di qualità (quella ottenuta con Quality meshing).

La serie di passaggi illustrati consente di ottenere un file di dimensione 2.5 e non di fatto un modello 3D. Il carattere proprio di questo tipo di shapefile, in genere utilizzato con il software ArcGIS, consiste nel poter visualizzare graficamente le coordinate nel piano, mentre i valori in elevazione sono salvati in forma di attributi e non direttamente visibili a schermo, a meno del ricorso a plugin appositamente studiati.

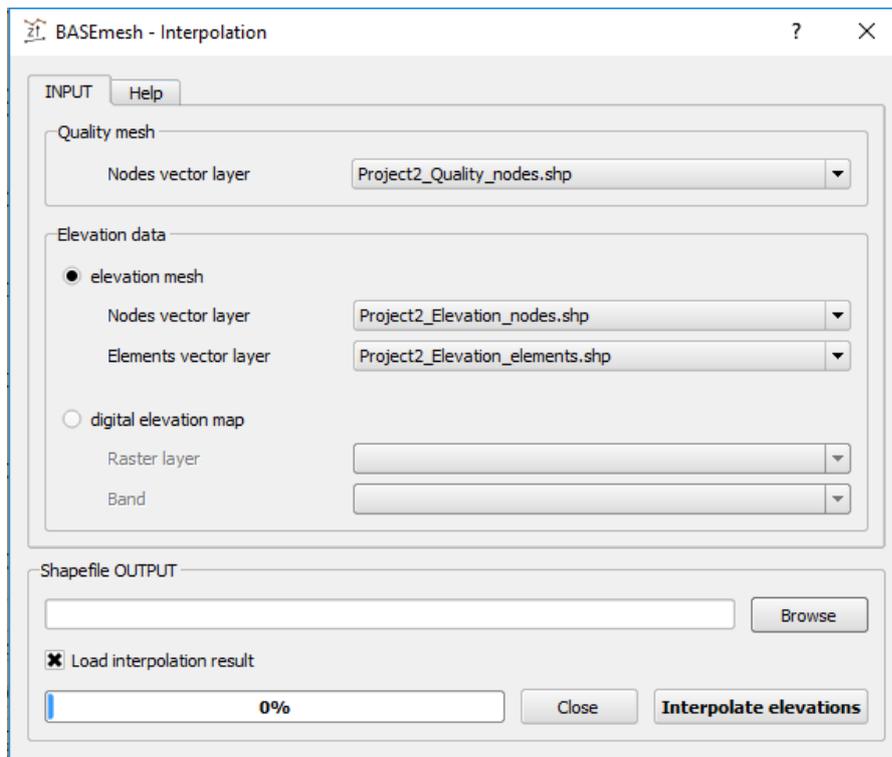


Figura 7.8: Finestra del comando Interpolation

In questo modo si ricostruisce una mesh adatta ad essere esportata nel formato .2dm (con opportuno comando) per essere processata con il software BASEMENT. Durante la fase di esportazione ogni vertice della mesh generata con il comando quality mesh riceve il valore di elevazione dal corrispondente nodo del layer ottenuto dalla operazione di interpolation.

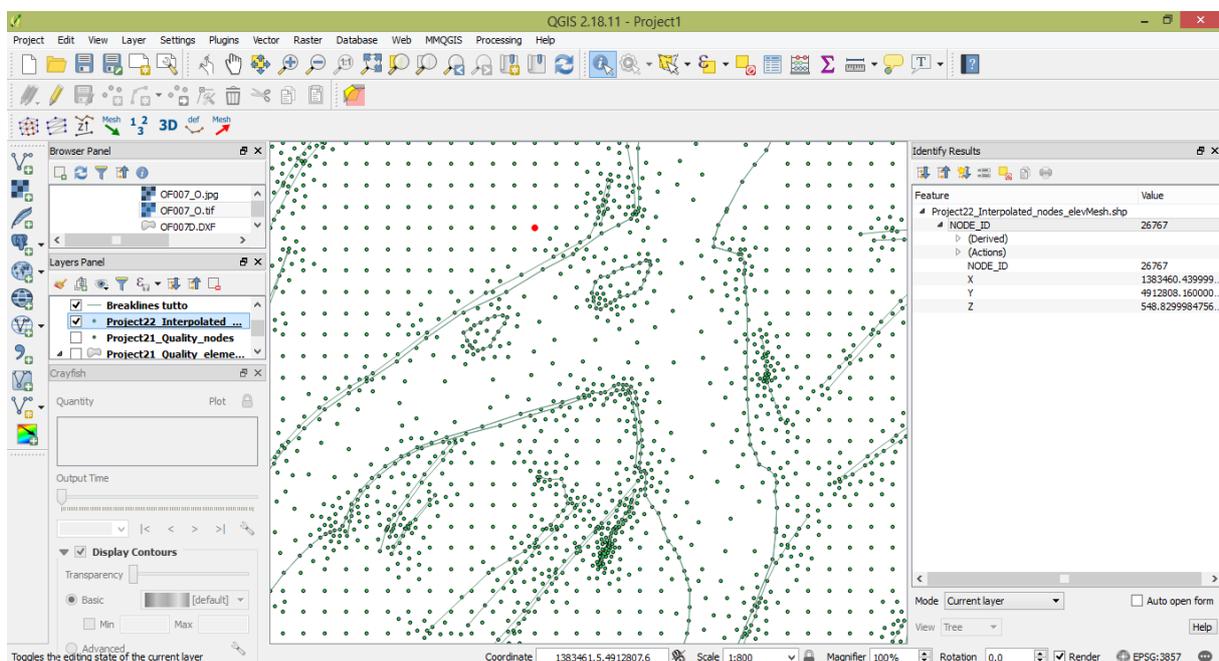
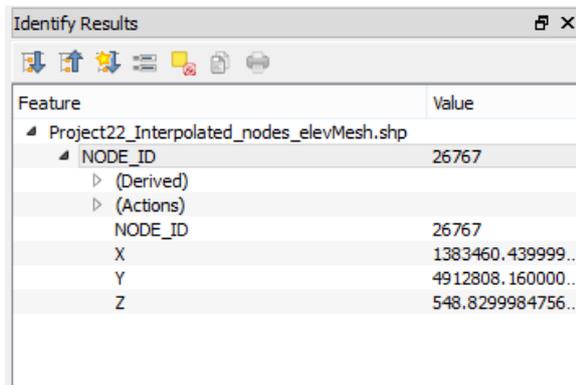


Figura 7.9: Output del comando Interpolation

Se si seleziona nel pannello dei layer quello relativo ai nodi interpolati (PROJECTNAME_Interpolation_nodes.shp) con il tasto destro è possibile aprire la tabella che mostra gli attributi dei vari elementi. Ogni punto può per esempio essere caratterizzato da:

- Node ID: attributo che identifica in modo unico l'elemento;
- X, Y: coordinate planimetriche del punto, nel sistema di riferimento definito nel progetto;
- Z: coordinata in elevazione in metri s.l.m. che consente alla definizione spaziale del punto.



Feature	Value
Project22_Interpolated_nodes_elevMesh.shp	
NODE_ID	26767
(Derived)	
(Actions)	
NODE_ID	26767
X	1383460.439999...
Y	4912808.160000...
Z	548.8299984756...

Figura 7.10: Finestra degli attributi dei nodi interpolati

Definita la mesh piana e i nodi con relativa elevazione si esporta la mesh tridimensionale nel formato .2dm, leggibile da una serie di programmi, tra cui BASEMENT. Per fare questo risulta necessario il comando *Export Mesh*.

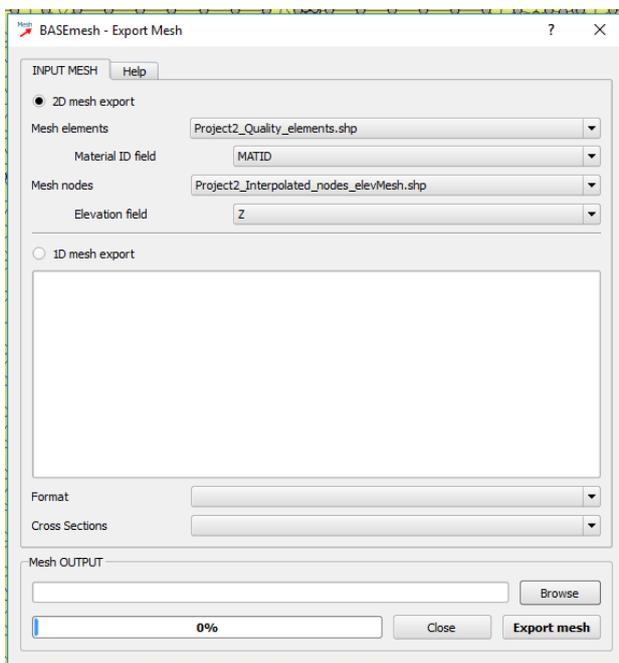


Figura 7.11: Finestra del comando Export Mesh

I comandi descritti in precedenza possono richiedere tempi di computazione elevati in caso di complessità del modello di punti utilizzato, per esempio per la corretta descrizione delle lingue che si distaccano dai canali principali e che hanno una larghezza modesta. Per la realizzazione di una fitta Quality mesh è stato impiegato un tempo di circa 8 ore.

La mesh può essere caricata nel programma QGIS che consente alcune impostazioni grafiche di visualizzazione per valutare la presenza di zone anomale.

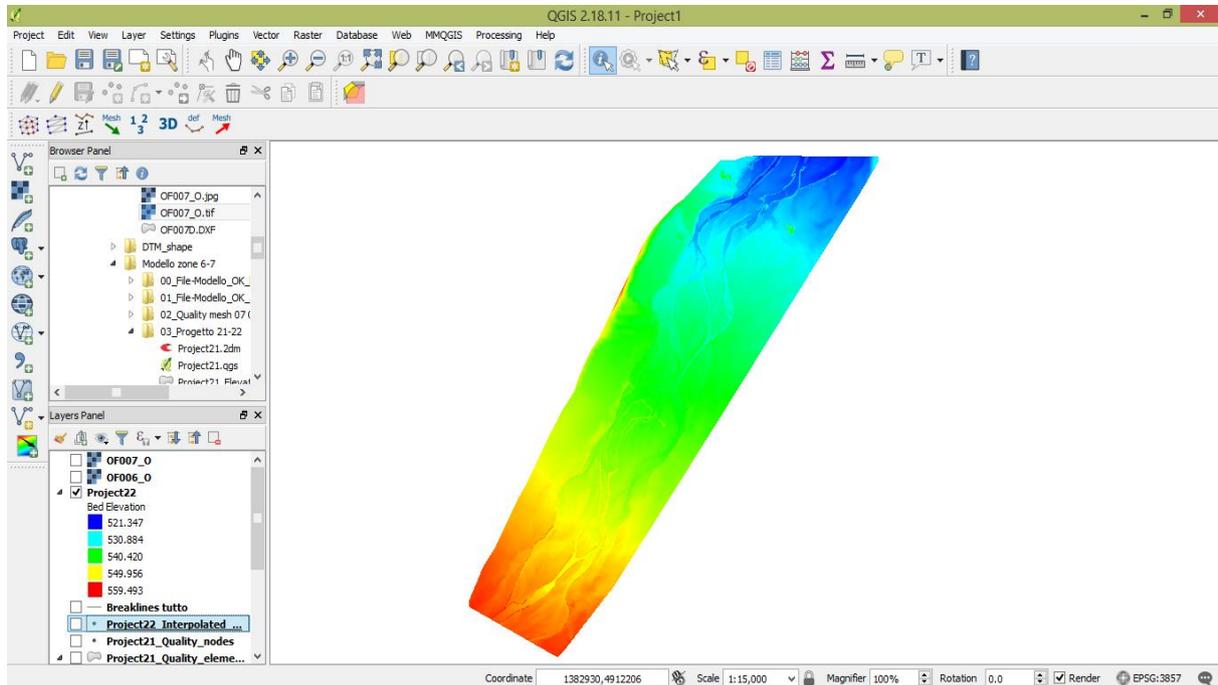


Figura 7.12: Mesh tridimensionale con visualizzazione cromatica delle elevazioni del terreno

I comandi del plugin BASEmesh sono molto efficaci in quanto se si dispone di un numero limitato di dati, ad esempio un file con pochi punti georiferiti è possibile costruire una mesh, non pienamente consistente con la situazione reale, e su tale mesh è possibile effettuare una modellazione. Grande attenzione deve invece essere posta qualora si avesse a disposizione una grande quantità di dati; in effetti alcune informazioni potrebbero risultare ridondanti o peggio alcuni elementi di diversa tipologia potrebbero essere sovrapposti provocando una ingiustificata complessità della mesh nonché problemi di instabilità per il programma BASEMENT. In certi casi è sufficiente utilizzare una mole contenuta di dati, opportunamente scelti da chi sta effettuando la simulazione, al fine di ottenere un buon compromesso tra accuratezza e densità dei risultati.

Se nel reticolo sono presenti tanti elementi di dimensione ridotta, conseguenti a un'elevata densità dei punti di presa, si incorrerà in probabili instabilità nella modellazione con il software BASEMENT. In questi casi occorre evitare, per quanto possibile la presenza di zone ad elevata densità, facendo attenzione a non compromettere la precisione del modello. In tal caso in effetti si rischia di semplificare troppo la mesh e le evoluzioni del fondo dovute ai meccanismi di trasporto solido potrebbero provocare squilibri non realistici dell'alveo del fiume.

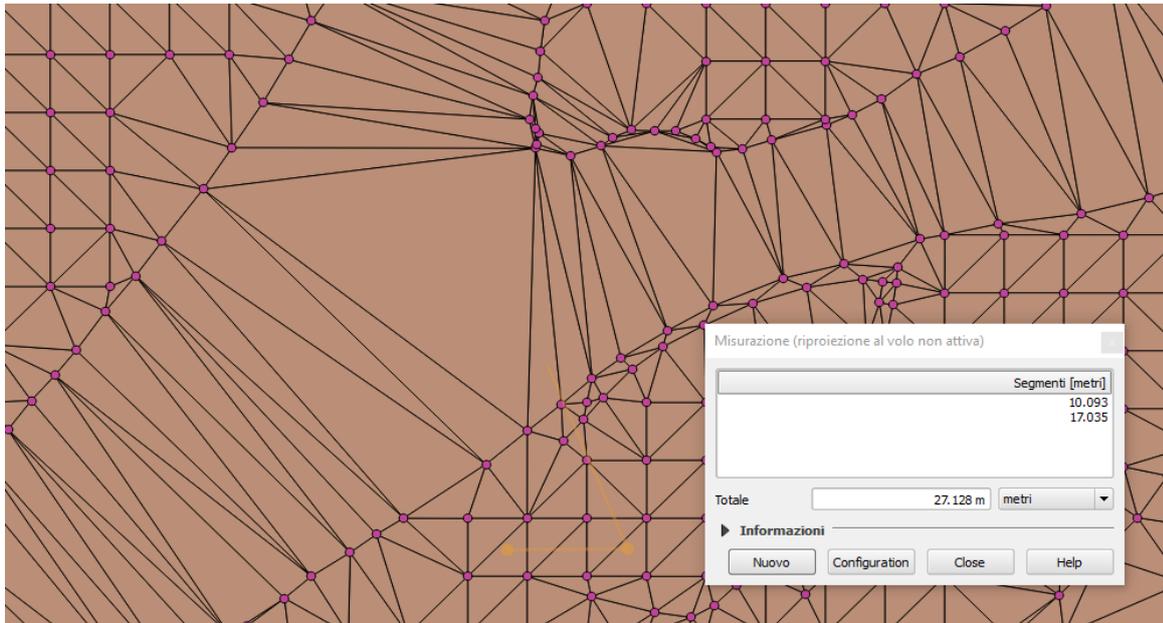


Figura 7.13: Elevation mesh con densità dei nodi troppo piccola

Una ulteriore accorgimento che occorre assumere in questa fase consiste nell'ignorare eventuali punti che possono essere generati all'esterno del model boundary specificato; questo meccanismo si verifica in generale quando si utilizza un layer di breaklines che si estende al di fuori dal limite che si intende modellizzare (definito attraverso il model boundary). In questa circostanza occorre cancellare i punti e le forme generate nell'area esterna, per evitare di considerare questi elementi, frutto di estrapolazioni, nella costruzione della mesh.

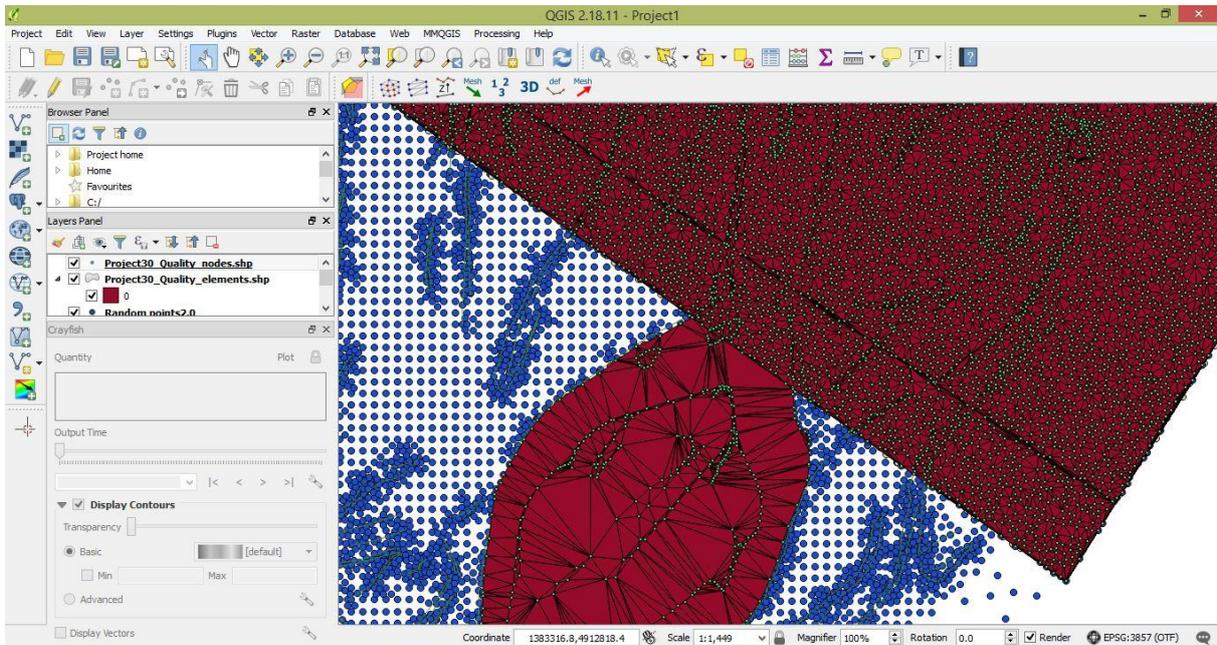


Figura 7.14: Errata esecuzione del comando Quality meshing in cui si generano elementi esterni al model boundary

7.3 Modulo numerico

Le SWE e le equazioni che reggono i fenomeni di trasporto solido costituiscono un sistema di equazioni non lineari alle derivate parziali. Per un tale sistema un approccio analitico è utile unicamente per casi ideali e in condizioni semplificate. Nei casi pratici si richiede l'applicazione di un metodo numerico la cui soluzione deriva dalla discretizzazione delle equazioni. Attualmente si conoscono diversi metodi di discretizzazione:

- Metodi alle differenze finite (FD)
- Differenze finite di volume (FV)
- Elementi finiti (FE)
- Metodi alle caratteristiche (CM)

Nei metodi di tipo FD le derivate parziali delle equazioni vengono approssimate utilizzando le serie Taylor. Questo metodo è particolarmente adatto per una rete Cartesiana con reticoli regolari.

In metodi FV le derivate parziali delle equazioni non sono approssimate direttamente come nel FD. In questo caso le equazioni sono integrate su un volume definito da nodi di griglie della mesh. I termini integrali del volume verranno sostituiti da integrali di superficie utilizzando la formula di Gauss. Questi integrali di superficie definiscono i flussi convettivi e diffusivi attraverso le superfici. A causa dell'integrazione sul volume, il metodo è completamente conservativo. Questa è una proprietà importante dei metodi FV. È noto che per simulare i fenomeni di transizione discontinui, come la propagazione delle onde di piena, occorre utilizzare metodi numerici conservativi.

Il metodo delle FE è risultato di molti anni di ricerca nel campo dell'analisi strutturale, principalmente tra gli anni 1940 e 1960. In questo sistema di risoluzione il dominio viene suddiviso in una moltitudine di regioni più piccole, di dimensione finita, chiamate elementi finiti. Le regioni possono avere forma triangolare e quadrilatera e i bordi possono essere lineari o curvilinei. Dopo aver suddiviso il dominio, si assume che la soluzione abbia una certa forma, strettamente connessa alla suddivisione geometrica e alla configurazione iniziale della mesh. L'errore della soluzione assunta va computato su ogni singolo elemento costituente e deve essere minimizzato sull'intero sistema al fine di individuare la soluzione più corretta.

BASEMENT riconduce la soluzione dei problemi alla risoluzione della forma numerica approssimata delle SWE (BASEplane). Il flusso idrico viene stimato secondo il problema di Riemann, che rappresenta un problema di cui si conosce la configurazione iniziale (IVP initial-value problem).

7.3.1 Metodo della soluzione esatta di Riemann

Un algoritmo utile alla soluzione del IVP consiste nel Riemann solver; l'idea di Riemann venne ripresa nel 1959 da Godunov che creò un sistema in grado di risolvere problemi di interazione tra onde, inclusi gli effetti della turbolenza. Il metodo è stato inizialmente applicato in campo scientifico e aerospaziale, per poi essere utilizzato in tempi recenti (1988) da Glaister per l'applicazione a sistemi di deflusso in acque basse 1D.

Nell'algoritmo elaborato da Godunov, i dati iniziali in ciascuna cella su entrambi i lati di un'interfaccia sono rappresentati con una discontinuità all'interfaccia cellulare. All'interfaccia

il problema di Riemann è risolto in termini esatti. La soluzione esatta in ciascuna cella viene quindi sostituita da una nuova approssimazione costante in una zona di transizione.

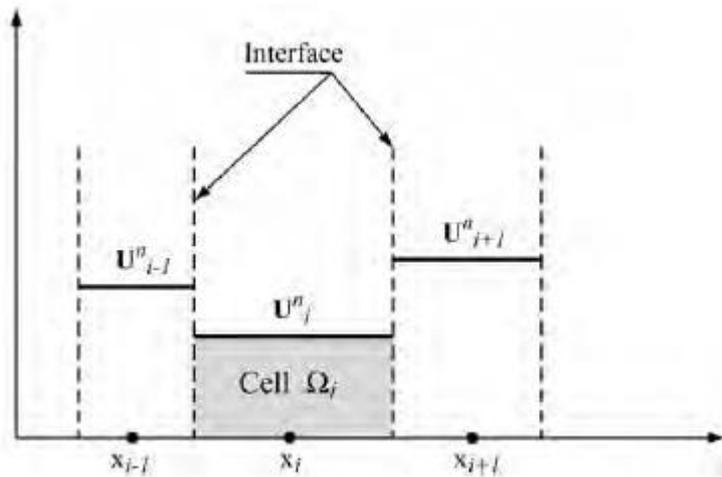


Figura 7.15: Metodo di risoluzione di Godunov all'interfaccia cellulare

Questa soluzione costituisce una soluzione esatta del problema di Riemann, ma è relativa a una configurazione iniziale semplificata in ogni cella.

L'implementazione di un risolutore esatto può causare la complicazione del problema, in termini di tempo impiegato e numero di equazioni generate; per questa ragione può risultare conveniente ricorrere a metodi alternativi approssimati, in genere non iterativi e più efficienti dei risolutori esatti.

7.3.2 Metodo di risoluzione approssimata al problema di Riemann

Diversi ricercatori nel campo dell'aerodinamica hanno scoperto metodi di risoluzione approssimati per le equazioni di Eulero. Nel codice BASEMENT alcuni di questi algoritmi sono stati implementati:

HLL-Riemann solver

L'algoritmo approssimato HLL (Harten, Lax e Van Leer) per la risoluzione del problema di Riemann, scoperto nel 1983, venne largamente impiegato nei modelli a basso tirante. È fondato sullo schema di Godunov e la stima delle velocità di due onde che si incontrano prevede una approssimazione con uno stadio costante di transizione. Questo metodo è adatto solo per campi monodimensionali.

HLLC-Riemann solver

Nasce come sviluppo dell'algoritmo precedente ad opera di Toro (1994); in questo caso si tiene conto della presenza di onde intermedie e con tali ipotesi si estende la validità al campo bidimensionale.

Il modello numerico, nel campo del trasporto solido si occupa principalmente della determinazione delle seguenti quantità:

- Sforzi di taglio al fondo;
- Valore della pendenza del fondo che garantisce la stabilità;
- Approssimazione numerica delle equazioni di bed-updating (aggiornamento della configurazione del fondo).

Gli algoritmi impliciti per la risoluzione delle equazioni del flusso idrico non sono al momento implementabili per modellazioni che vogliono tenere in conto gli effetti del trasporto solido.

7.3.3 Taratura del modello idraulico

La taratura del modello idraulico si rende necessaria al fine di ottenere risultati consistenti con la realtà. Il problema è infatti descritto da una moltitudine di parametri che influenzano l'output delle simulazioni. Per quanto riguarda la componente idraulica spiccano per importanza la pendenza e la scabrezza del fondo. La prima grandezza è definita dalla mesh generata in QGIS; la seconda è invece un valor da ricercare. Una operazione di taratura del modello può essere effettuata confrontando quanto ottenuto da più simulazioni caratterizzate un diverso valore di scabrezza con una fotografia aerea che raffigura l'area in un tempo in cui è noto il valore di deflusso. Avendo a disposizione la presa aerea del sito al tempo di realizzazione del DTM si ricerca il valore di portata media riferito a quel giorno. Dalla consultazione degli archivi ARPA si scopre che le misurazioni di portata nelle stazioni di interesse hanno avuto inizio solo nell'anno 2008, dato che il DTM è stato realizzato in data 18/04/2003 non si dispone di un valore di portata media per tale giorno.

La tabella seguente mostra i valori di portata media giornaliera per il giorno 18/04 degli anni 2008-2012 misurati dalle due stazioni a monte del tratto di torrente analizzato.

Tabella 7.1: Portate misurate presso le due stazioni di riferimento

Portate [m³/s]	2008	2009	2010	2011	2012
Andonno	3.64	11	10	5.79	4.37
Robilante	5.33	15.40	14.50	6.12	4.91

Confrontando i valori per quel giorno degli anni misurati si scopre che non esiste alcuna correlazione; il confronto tra misurato e simulato non è quindi perseguibile. Il torrente Gesso nel 2010 è stato oggetto di un intervento autorizzato dall'ARPA che ha determinato l'apertura di un'ulteriore canale per consentire il deflusso e evitare l'allagamento dei terreni circostanti per cui la comparazione con immagini aeree più recenti non viene ritenuta attendibile per la selezione dei valori di scabrezza.

Per perseguire l'obiettivo si adottano tabelle empiriche di correlazione che definiscono per diverse tipologie di suolo la relativa scabrezza. In particolare si adotta per l'alveo principale del fiume, quelli secondari e le isole un valore di Manning pari a 0.044, mentre per le aree golenali si assume un valore superiore per la presenza di una bassa vegetazione, pari a 0.055.

8 Componente relativa al trasporto solido

BASEMENT annovera tra le sue capacità la possibilità di effettuare uno studio dei fenomeni di trasporto solido connessi al deflusso idrico. Il modello adottato è basato sulle equazioni di Hirano-Exner e nel caso in cui sono definite più tipologie di sedimento si adotta in aggiunta una sorting equation.

Le formule che è possibile settare per il calcolo del trasporto solido di fondo sono molte, ricordiamo: MPM, MPM multi, power law, MPM-H, Parker, Rickenmann, Wu, Van Rijn, Smart-Jaeggi, Wilcock and Crowe, Engelund and Hansen.

Per consentire la taratura del modello, oltre alla scelta della formula che meglio si adatta alle condizioni granulometriche del caso in studio, è possibile intervenire sui coefficienti che reggono le stesse e settare un parametro che riduce l'effetto di asportazione al fondo.

Le condizioni al contorno vanno definite a monte e a valle del modello come per la componente idraulica del problema. A monte è possibile indicare un idrogramma delle portate solide in ingresso o una curva che definisca per ogni portata liquida la corrispondente portata solida (transport capacity). L'unica condizione assegnabile a valle è quella che impone l'uguaglianza tra la portata solida in ingresso a monte e quella in uscita dell'ultima cella.

In aggiunta alla valutazione delle dinamiche di trasporto solido di fondo il programma può considerare il materiale che, a causa della ridotta dimensione o dell'effetto della corrente rimane in prossimità della superficie libera. La legge adottata per la definizione del trasporto solido di superficie è l'equazione di Advezione e diffusione con termini di scambio definiti secondo Van Rijn of Zyserman et al./Lin.

9 Visualizzazione risultati e correzione dei bug

Dopo aver effettuato una prima simulazione idraulica è possibile consultare i file di output del programma, che possono essere restituiti in una ampia gamma di formati, con l'utilizzo di software esterni. Le Figure 9.1 e 9.2 mostrano per ogni cella della mesh i valori di tirante idrico per un determinato istante temporale.

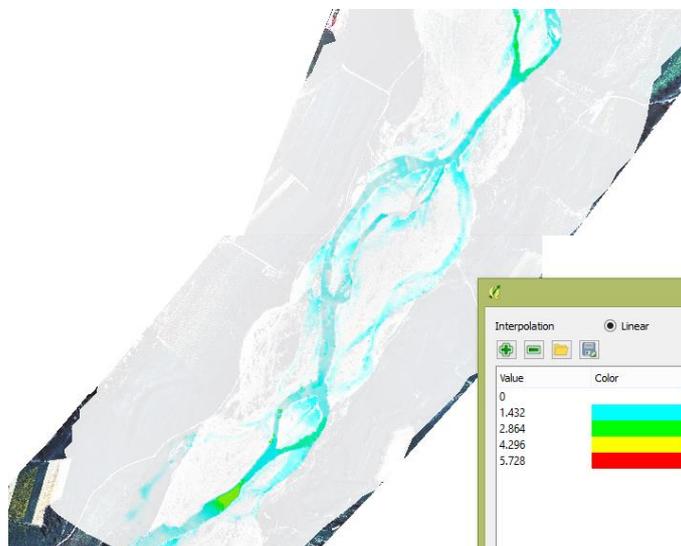


Figura 9.1: Visualizzazione del tirante idrico a un determinato istante con il plugin Crayfish di QGIS



Figura 9.2: Confronto tra l'immagine raster e l'output della simulazione

Osservando l'output finale della simulazione con il plugin di QGIS, Crayfish, appare immediatamente chiaro che alcune zone dell'alveo presentano una profondità anomala rispetto alla sezione trasversale e al profilo longitudinale e che alcune aree vengono allagate in modo inconsistente con l'immagine da acquisizione fotografica. Le ambiguità riscontrate trovano spiegazione nell'errata acquisizione dei punti o con maggiore probabilità in una non

corretta interpolazione durante la fase di triangolazione della mesh. Per ovviare al problema si attribuisce al punto anomalo una elevazione pari a quella del punto in alveo più vicino.

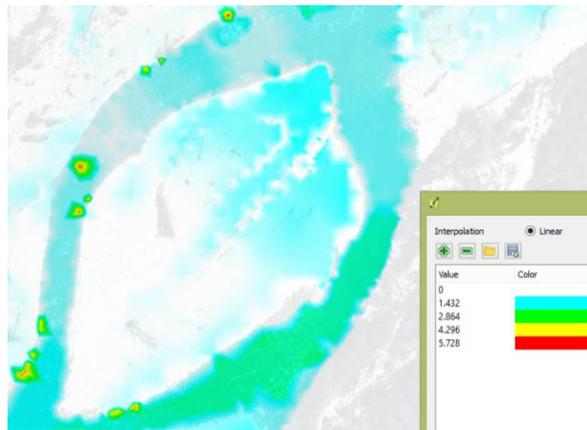


Figura 9.3: Vista delle zone aventi una elevazione del fondo non realistica

Invece di attribuire arbitrariamente al punto anomalo un valore plausibile di elevazione, in alternativa è consigliabile ripetere le operazioni che portano alla definizione della maglia di triangoli con differenti impostazioni e con l'aggiunta di informazioni. Se per esempio si importa un file contenente le breaklines, ovvero le linee che segnano le principali discontinuità dell'alveo del fiume e le isolette che rimangono in secca per deflussi ridotti, la mesh sarà più consistente con la situazione reale, a scapito però dei tempi di calcolo che aumentano pesantemente.

La ricerca di un modello morfologico il più coerente possibile con la situazione reale rappresenta il grande problema della fase di modellizzazione. La ricostruzione precisa e dettagliata dell'intera area non rappresenta un'operazione semplice, e il tentativo di modellizzare zone complesse può rivelarsi una problematica che il software non riesce a risolvere. Quando in una zona si addensano punti e linee, il programma può non trovare una soluzione che rispetta i vincoli imposti dall'utente e la procedura si conclude con il report di uno o più errori. In tal caso si dovranno settare impostazioni meno stringenti, che causano ripercussioni sulla precisione dell'intera area modellizzata; in alternativa si accetta di aver un minor grado di dettaglio in certe regioni del modello.

Un secondo strumento utile a valutare la correttezza della mesh risiede in *Profile Tool*, plugin di Quantum GIS. Questo comando consente di raffigurare una polilinea che descrive il profilo da una immagine raster o da un layer di punti. Le polilinee generate possono in seguito essere esportate in formato .dxf o visualizzate sotto forma di tabelle e in seguito elaborate in programmi di gestione di dati (ad es. Microsoft Excel).

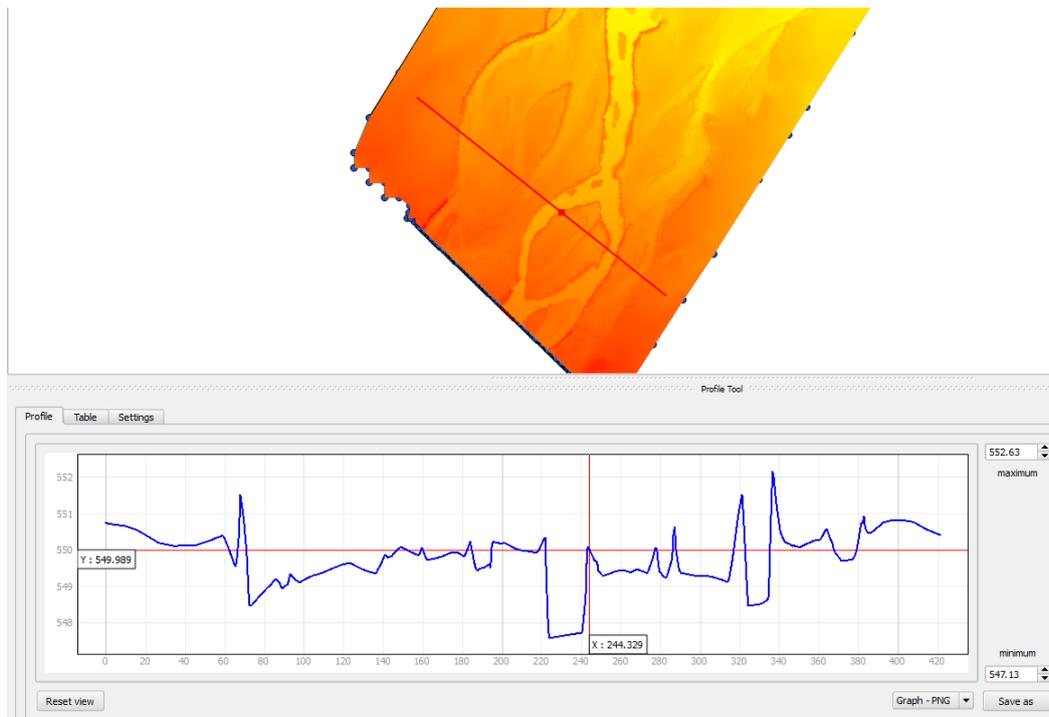


Figura 9.4: Finestra relativa al comando Profile Tool per l'interrogazione del profilo della mesh

Nel tentativo di eseguire analisi rigorose e sul modello spaziale per tempi prolungati di deflusso idrico ci si rende conto dell'elevato peso computazionale cui è sottoposto il programma e del conseguente eccessivo tempo di calcolo (200 ore per una simulazione di 2000 secondi). Al fine di ottenere risultati densi e a lungo termine si accettano tali compromessi, nel caso in esame invece, siccome la finalità è capire in modo dettagliato il comportamento della zona prossima al guado si opta per una simulazione più speditiva.

Tra le possibilità offerte da BASEMENT vi è quella di accoppiare più modelli spezzati, in cui ogni zona può essere realizzata secondo metodi più o meno spinti. In questa direzione si adotta una prima zona del Torrente Gesso, a monte del guado realizzata sulla base di sezioni piane. La tecnica è attuabile in quanto si riscontra per il corso d'acqua un andamento lineare e tendente alla formazione di un singolo canale in tale tratto. Per il tronco successivo, in cui il torrente è caratterizzato da biforcazioni e confluenze si utilizza un modello bidimensionale descritto dalle shallow water equations, ovvero una simulazione analoga a quella che in precedenza si voleva applicare all'intero modello.

10 Modello accoppiato

Allo scopo di ridurre i tempi richiesti per il calcolo si opta per la realizzazione di un modello accoppiato, in particolare a una zona modellata con sezioni trasversali seguirà un'area più complessa ottenuta dalla triangolazione di punti georeferenziati. Il vantaggio di una tale configurazione consiste nell'avere la zona 2D, della quale si intendono determinare effetti e grandezze, che non risente di effetti legati a una condizione al contorno imposta dall'utilizzatore. Il vincolo che riceve l'interfaccia del sistema è infatti calcolata sulla base dei meccanismi sviluppati nel sottosistema a monte.

A fronte delle semplificazioni di calcolo si ricorda che per la zona calcolata con il modulo monodimensionale si otterrà una minore risoluzione di risultato.

10.1 Modello monodimensionale

La porzione di torrente che viene modellata con l'uso di sezioni trasversali imposte ortogonali alla direzione principale del flusso è un tratto con sviluppo di circa 580 metri caratterizzato, al principio, da un canale principale che incide il largo alveo del Gesso e conferisce semplicità e linearità, fattori che rendono conveniente una modellazione di tipo monodimensionale. Al suddetto tronco segue una zona più complessa in cui il canale si suddivide in più percorsi, ma si reputa ancora sufficiente uno studio basato su sezioni, volendo limitare il più possibile l'ampiezza della zona analizzata con il modulo bidimensionale per ragioni di peso computazionale.

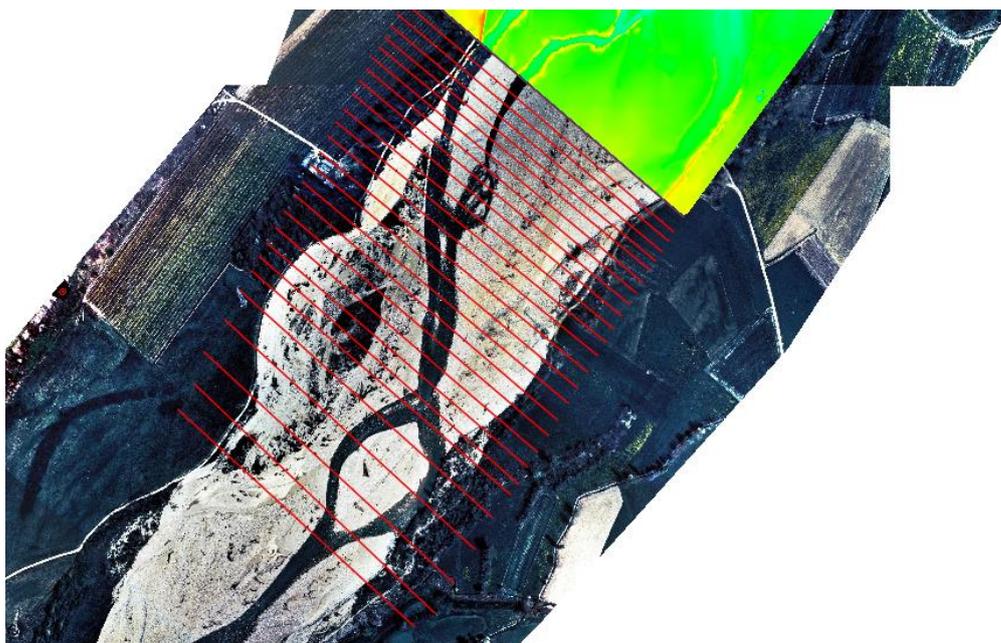


Figura 10.1: Individuazione del tronco modellato con sezioni

Le sezioni volte a definire la geometria del modello sono ottenute dal plugin Profile Tool di QGIS applicato a un modello in formato .2dm realizzato con i comandi di BASEmesh. Il numero e il passo delle sezioni, variabile tra i 20 e i 60 m, sono assunti in modo da descrivere

in modo compatto la forma del letto del torrente. Le grandezze relative alla singola sezione vengono interpolate tra i valori calcolati nella fase di preprocessing. Nella pratica sono costruite tabelle e curve che definiscono le variabili in funzione di una grandezza che deriva dalla risoluzione delle equazioni; in genere la variabile indipendente è il tirante idrico.

Il risolutore adottato per il problema di Riemann è quello approssimato di Roe e Harten e il sistema di simulazione di tipo esplicito, essendo quello implicito particolarmente adatto per canali completamente sommersi e in regime non fortemente vario.

La scabrezza è specificata secondo Strickler individuando porzioni di sezione per ogni diverso coefficiente; unica alternativa per la simulazione monodimensionale viene rappresentata con la tipologia Manning. Nella costruzione della sezione devono essere fornite una serie di informazioni, quali la posizione del canale principale e la zona in cui si ammette il flusso liquido, che corrisponde all'indicazione dei levee in HEC-RAS. Per non incorrere in un errore che riguarda il superamento della cresta in sinistra o destra orografica della sezione, dovuto alla complessità della sezione, caratterizzata da più canali, si decide di incrementare la quota dei due punti di estremità di 10 metri; in tal modo la cresta della sezione viene assunta agli estremi delle sezioni e l'errore non si verifica. Tale approccio non comporta assurdità o modifiche sul comportamento del modello in quanto nel caso in cui il livello idrico raggiungesse il limite della sezione specificata il software assumerebbe in maniera simile la presenza di una parete verticale a scabrezza nulla per convogliare il flusso.

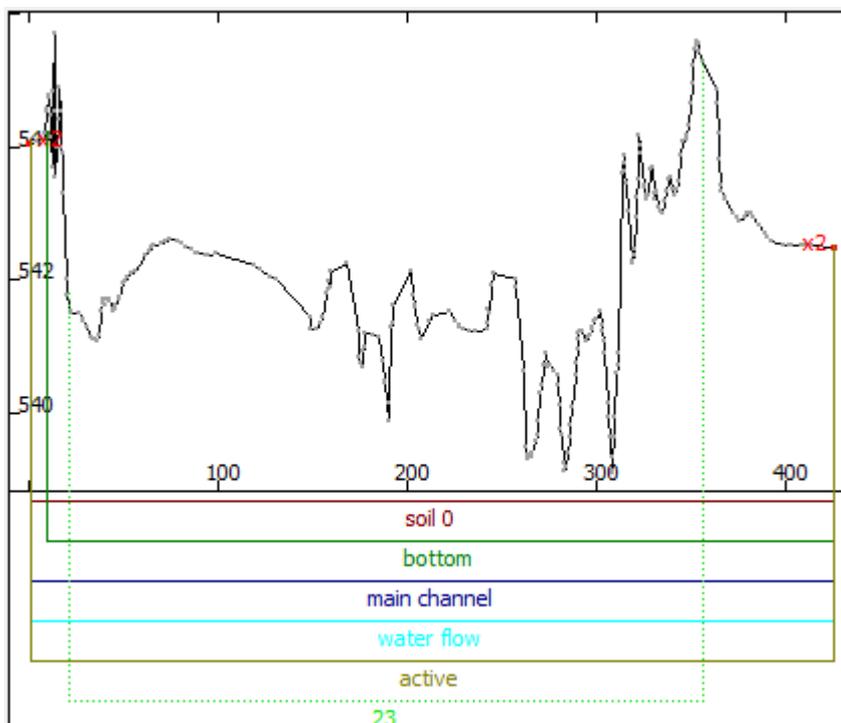


Figura 10.2: Immagine della sezione 12 con progressiva in ascissa e elevazione in ordinata, misure in metri. Compare anche l'indicazione della scabrezza per il letto del torrente; il valore assegnato alle aree golenali verrà definito direttamente nello script di BASEMENT

La zona in cui non viene indicato alcun valore di scabrezza assume quello indicato di default nel listato di comandi del programma.

Per quanto concerne le condizioni al contorno, a monte del modello viene specificato l'idrogramma di piena caratteristico del tempo di ritorno di 200 anni, definito sulla base dei risultati ottenuti nella Relazione Anselmo. Siccome in caso di flusso supercritico sono richieste due condizioni di vincolo si indica il valore della pendenza media del fondo della sezione più a monte. La condizione a valle del dominio viene stabilita secondo la tipologia "zero gradient". Questo vincolo di confine è utilizzato solo per le condizioni di downstream. In sostanza, le principali variabili nell'ultima cella rimangono costanti su tutto l'elemento.

La condizione iniziale del problema viene imposta con la tipologia "backwater" con la quale si definisce un profilo idrico iniziale sulla base di due indicazioni fornite relative alla sezione di valle: la portata uscente dal dominio e l'altezza del pelo libero. Queste quantità possono essere calcolate avviando una simulazione idraulica con i suddetti valori imposti inizialmente in maniera arbitraria.

10.2 Modello bidimensionale

A valle del tronco di torrente descritto al punto precedente si prevede la modellazione di una superficie al fine di approfondirne l'analisi idraulica e l'evoluzione morfologica.

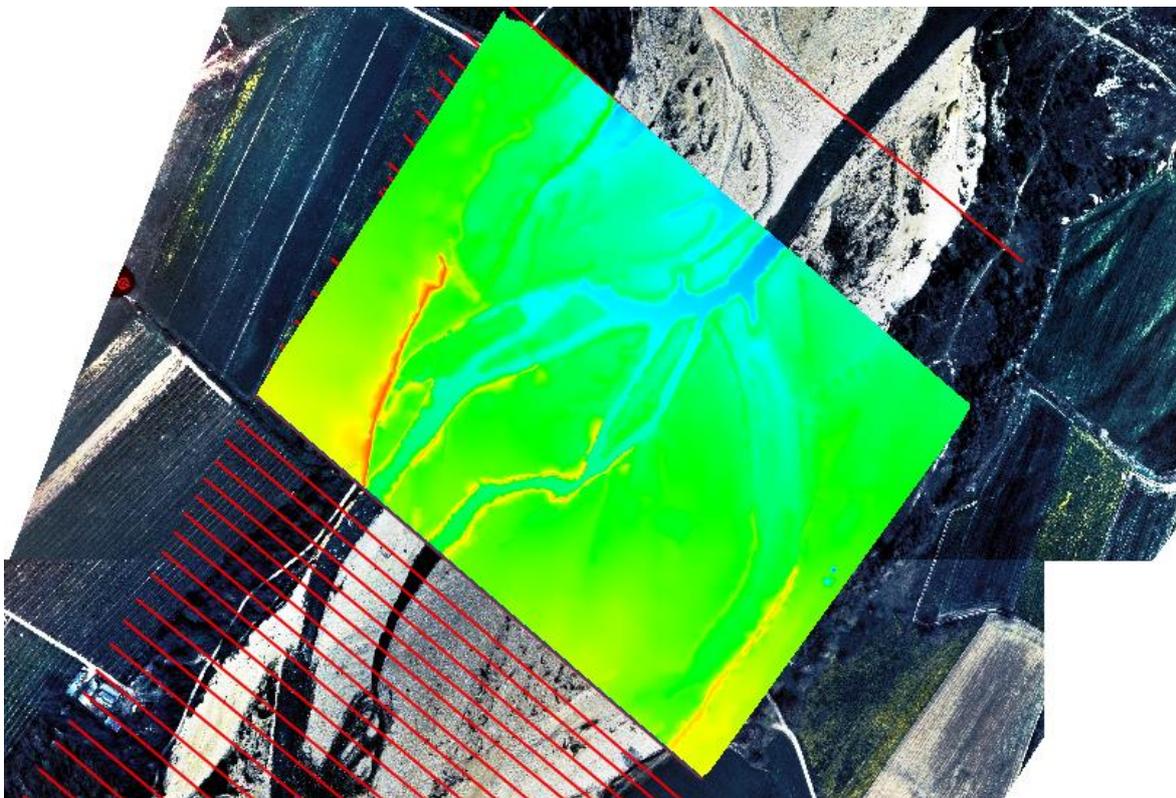


Figura 10.3: Individuazione dell'area interessata da modellazione bidimensionale

Caratteristiche di integrazione numerica

Il sottodominio BASEplane utilizza i metodi di integrazione e risoluzione spaziale e temporale riportati in Tabella 10.1.

Tabella 10.1: Principali caratteristiche di calcolo della simulazione 2D

Spatial Discretization	Finite Volumes
Time integration	Explicit Euler
Riemann Solvers	Exact, Hllc

L'adozione del risolutore HLLC è indicata per lunghe simulazioni morfologiche in modo da beneficiare di un contenuto risparmio dei tempi di simulazione.

Geometria

Le celle della griglia che costituisce il modello del terreno possono avere forma triangolare, quadrilatera o in casi particolari una conformazione ibrida tra le precedenti.

Per quanto riguarda i fenomeni di trasporto solido, è possibile definire una condizione di fondo fisso (inerodibile) o stabilire i criteri di protezione dello stesso ad opera del materiale granulare grossolano (armored soil).

Il formato di input del programma è un grid-file con estensione .2dm; questo tipo di file può essere realizzato con i programmi QGIS (open source) o SMS.

Componente idraulica

La simulazione utilizza le equazioni 2D di De-Saint-Venant semplificate nella forma del modello SWE. Le variabili conservative del problema sono il tirante h , e le derivate del campo di moto lungo il tirante (indicate con la dicitura $u.h$ e $v.h$).

La scabrezza dei vari elementi del modello può essere indicata con il valore di Strickler, Manning, Darcy-Weissbach, Log. Friction law, Yalin, Bezzola.

Le condizioni al contorno (boundary conditions) devono essere imposte:

- a monte (inlet) si utilizza un idrogramma che descrive la variazione delle portate nel tempo;
- a valle si ha la possibilità di modellare un ponte, un gate, impostare una relazione che lega il tirante al deflusso (curva $h-Q$) o un idrogramma dei deflussi;

Inoltre è consentita l'imposizione di una o più inner boundaries all'interno del modello che consentono l'inserimento di ponti e gates e la loro influenza sul regolare deflusso.

In questo caso non è necessario indicare un idrogramma a monte del sotto-dominio, le portate sono infatti calcolate all'uscita dal modello monodimensionale posto a monte. Come per il modello monodimensionale si indica il valore della pendenza media del fondo per garantire la chiusura del problema anche in caso di flusso supercritico.

La simulazione richiede l'imposizione di una condizione iniziale che può consistere in letto del fiume completamente asciutto (dry) o nell'indicazione dei valori di tirante e di campo di moto al principio del calcolo. Se si dispone di una simulazione già completata è possibile ripartire dalla configurazione finale di quel file. In questa direzione si effettua una simulazione strettamente idraulica con canale inizialmente asciutto fino al riempimento dell'alveo di magra per poi simulare il trasporto dei sedimenti senza incorrere in eccessivi fenomeni di erosione determinati dall'assenza di acqua nel letto del torrente. Durante la simulazione idraulica è possibile individuare zone in cui il canale percorso dal fluido subisce un brusco restringimento a V, carattere conseguente al fatto che nella triangolazione della mesh un punto interno al letto viene collegato a due punti situati sulle sponde. Questa conformazione geometrica comporta la presenza di una sorta di parete che impedisce il deflusso fino al raggiungimento di un certo livello idrico e quindi un rallentamento del processo di riempimento del canale. Ricontrato il comportamento, se ritenuto non consistente con la realtà, occorre ripetere l'operazione di triangolazione o infittire localmente la geometria.

10.3 Modalità di accoppiamento: Sequential

La tipologia di accoppiamento Sequential consente di combinare diversi sottodomini mediante le loro boundary conditions in corrispondenza delle interfacce. Questo sistema di collegamento può essere operato tra modelli monodimensionali o tra 1D e bidimensionali.

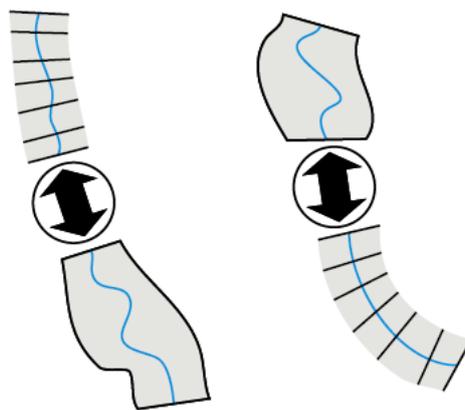


Figura 10.4: Modalità di accoppiamento 1D-2D (sinistra) e 2D-1D (destra)

Il collegamento tra due sotto-sistemi viene implementato con un approccio esplicito, che sta a significare che i dati vengono scambiati in modo esplicito a determinati intervalli temporali. Un approccio di questo tipo è più semplice da implementare rispetto a uno implicito, specie se la dimensione dei due modelli connessi è differente. In ogni caso, per qualunque tipo di approccio occorre fare particolare attenzione alla robustezza e alla stabilità della simulazione.

Tipologia di collegamento

Un metodo semplice per combinare più domini consiste nello scambiare i dati solo nella direzione del flusso principale, ovvero dal dominio di monte a quello di valle. Questa

configurazione prende il nome di “one-way coupling”. Con un tale approccio il primo sottodominio può essere processato in modo indipendente dal dominio di valle e le variabili di deflusso sono trasferite ad esso a intervalli discreti di tempo (metodo esplicito). Dato che le informazioni e gli effetti non vengono trasmessi da valle a monte questo sistema funziona a rigore nei casi in cui non si formano effetti di backwater, ovvero di reflusso, e ogniqualvolta tali effetti siano trascurabili.

In contrapposizione, un sistema di collegamento “two-way coupling” tiene in conto delle interazioni in entrambe le direzioni. In questo tipo di analisi gli effetti di reflusso idrico provenienti dal dominio di valle provocano effetti anche su quello a monte. Invece di eseguire i due domini in modo sequenziale da monte a valle, in questo caso la simulazione è simultanea. L’applicazione di un approccio di questo tipo porta ad avere più di una variabile di deflusso all’interfaccia, da cui possono essere determinati differenti livelli idrici a monte e a valle di una sezione allo stesso istante temporale. Per risolvere questa incongruenza si può intervenire con iterazioni di calcolo che rendono l’analisi complessa e lunga. Le iterazioni non sono previste nel programma BASEMENT e, adottando un metodo di tipo esplicito si riesce nella maggior parte dei casi ad ottenere una soluzione comunque accurata.

Condizioni di scambio

Alcuni dati possono essere scambiati tra i sottodomini accoppiando le interfacce mediante l’utilizzo di particolari condizioni al contorno. La Tabella 10.2 riporta le variabili trasferite e le direzioni di scambio delle stesse:

Tabella 10.2: Variabili scambiate per le differenti direzioni di flusso

Direzione di scambio	Tipo di accoppiamento	Variabile di scambio
Da monte a valle	Condizioni al contorno e sorgenti dati	Portata fluida (Q) Portata solida ($q_{b,g}$) Concentrazione solida (C_g)
Da valle a monte	Condizioni al contorno e sorgenti dati	Quota del pelo libero (z_s)

Con l’obiettivo di semplificare e rendere più flessibile e efficiente le simulazioni accoppiate si fanno alcune assunzioni:

- la direzione del flusso presso l’interfaccia è nota a priori e non si verifica alcuna inversione del moto, con eccezione per il caso dei lateral coupling;
- le sezioni e le celle dei due modelli devono trovarsi idealmente nella stessa zona o al limite nelle vicinanze e devono presentare la medesima geometria;
- si assume il flusso ortogonale all’interfaccia;
- nell’accoppiamento di modelli 2D, solo alcune informazioni, o al limite le variabili mediate vengono trasmesse al fine di alleggerire il peso del dato trasmesso e non determinare limiti al numero di nodi o di elementi ammissibile all’interfaccia.

11 Simulazione di trasporto solido della configurazione nel 2003

In questo capitolo si riportano i risultati principali delle simulazioni condotte con BASEMENT per il modello topografico relativo all'anno 2003.

11.1 Simulazione monodimensionale

Allo scopo di effettuare un confronto dei risultati e di semplificare le fasi di taratura del modello morfologico è stata inizialmente avviata una simulazione idraulica e morfologica con il modello interamente rappresentato da sezioni. Durante il calcolo è possibile visualizzare lo stato di evoluzione di alcune grandezze del problema. Nel seguito si riportano gli screen che rappresentano le informazioni del modello all'istante in cui transita la portata di picco dell'evento caratterizzato da un TR di 200 anni, con valore pari a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$.

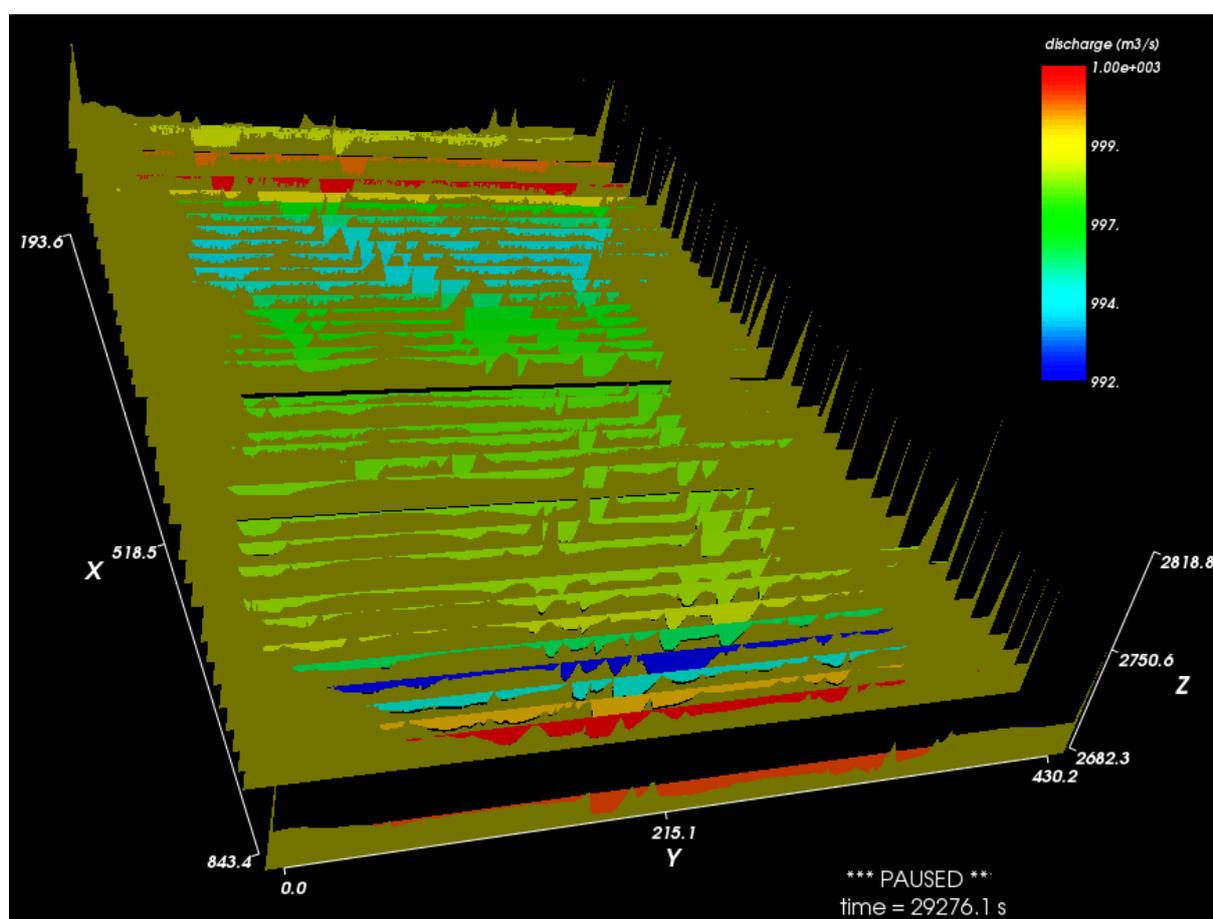


Figura 11.1: Plottaggio dei valori di portata transienti in ogni sezione

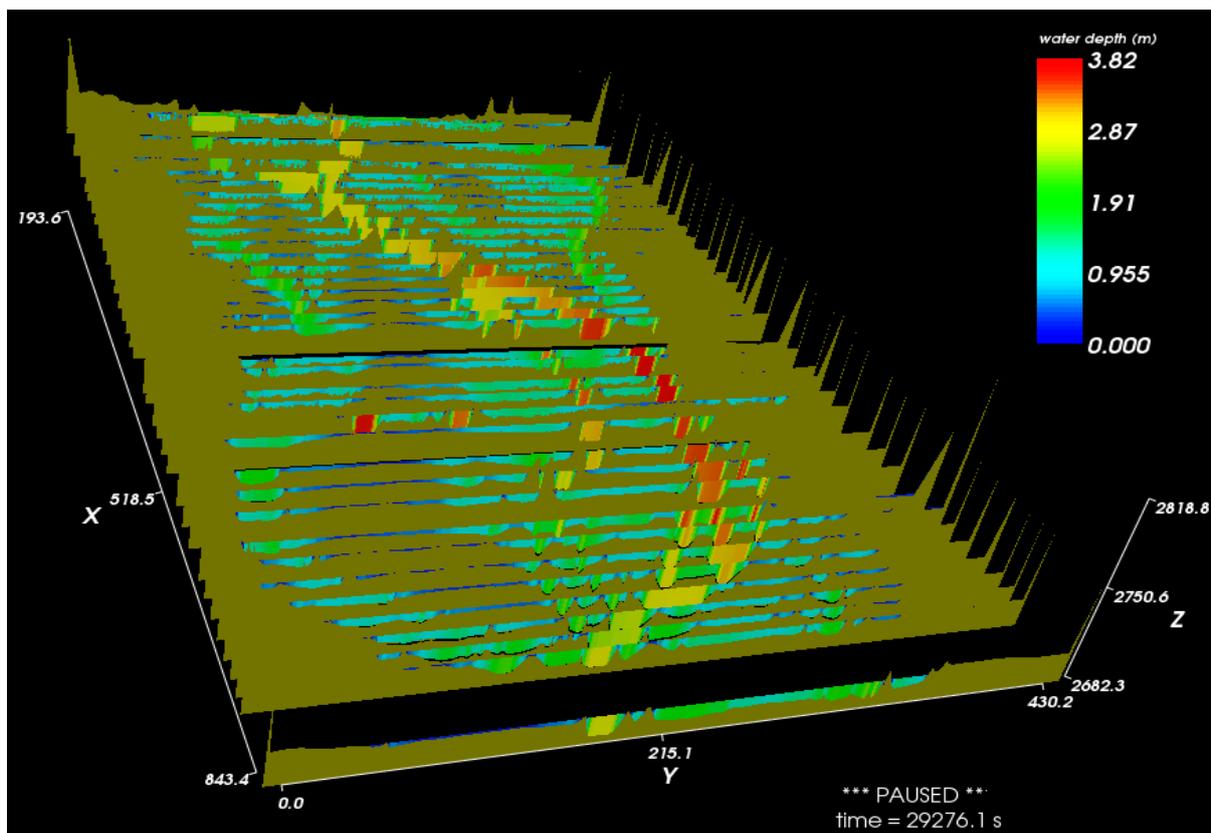


Figura 11.2: Plottaggio dei valori di tirante idrico per le porzioni di ogni sezione

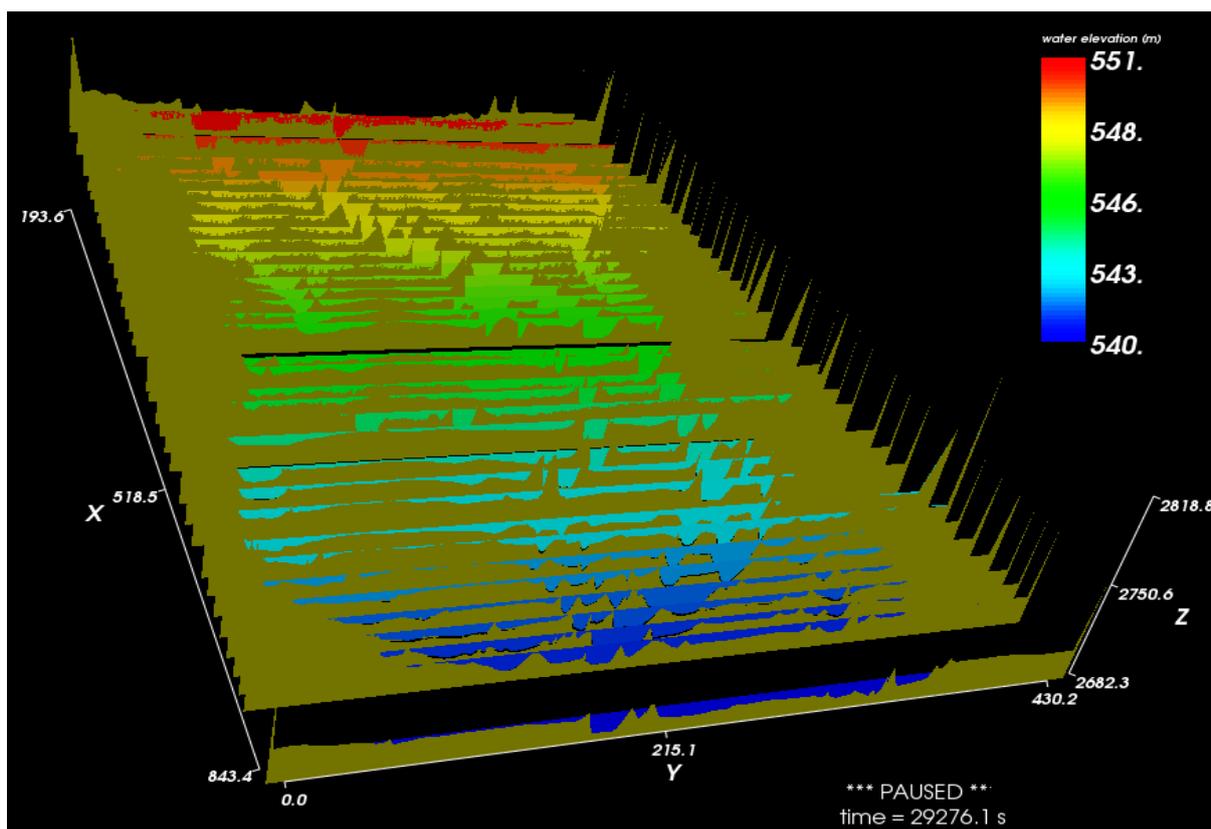


Figura 11.3: Plottaggio dell'elevazione del pelo libero idrico per ogni sezione

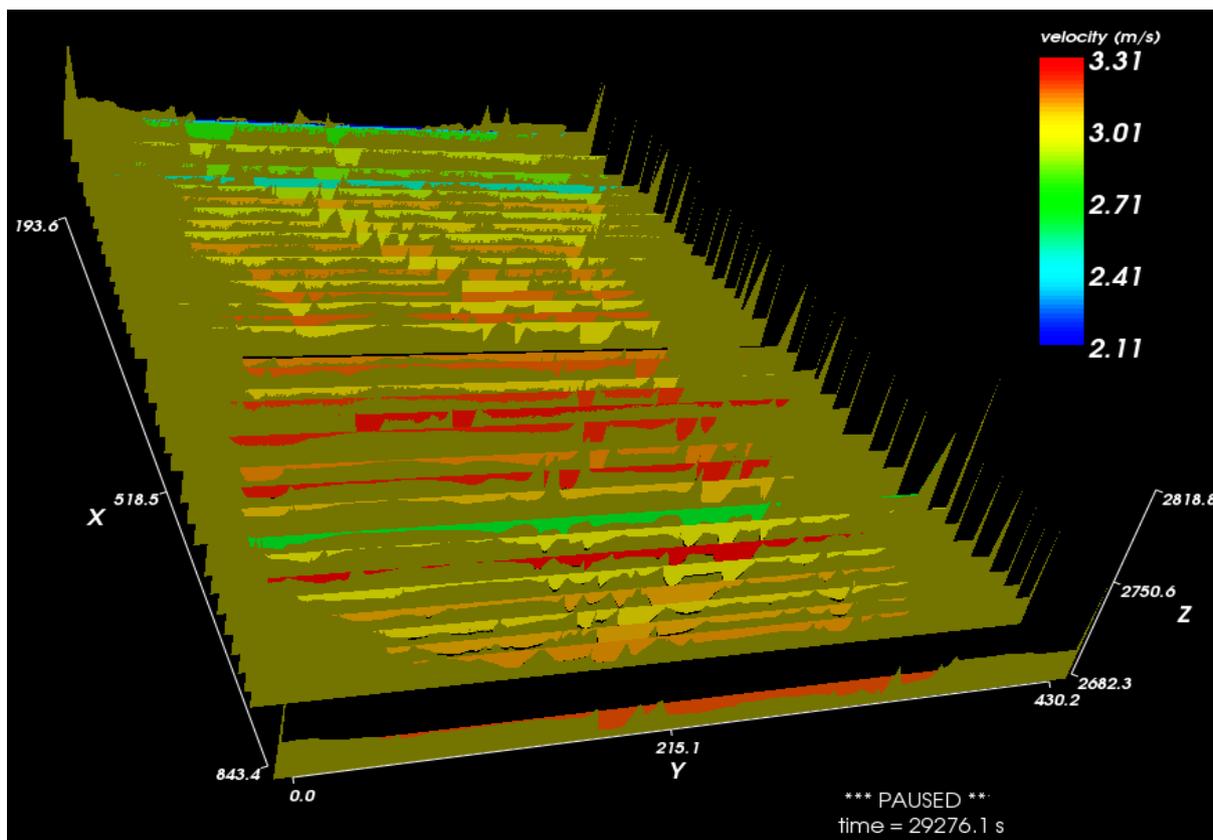


Figura 11.4: Plottaggio dei valori medi di velocità in ogni sezione

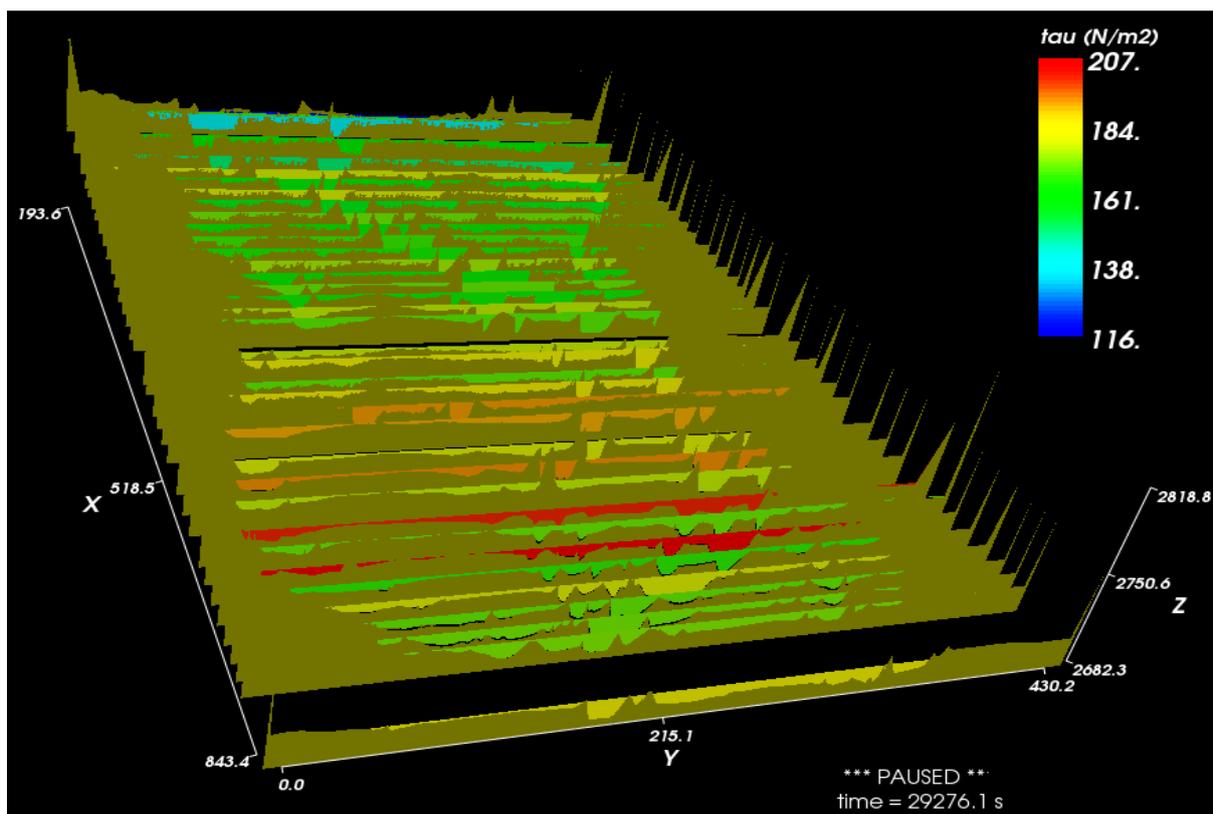


Figura 11.5: Plottaggio delle tensioni medie al fondo per ogni sezione

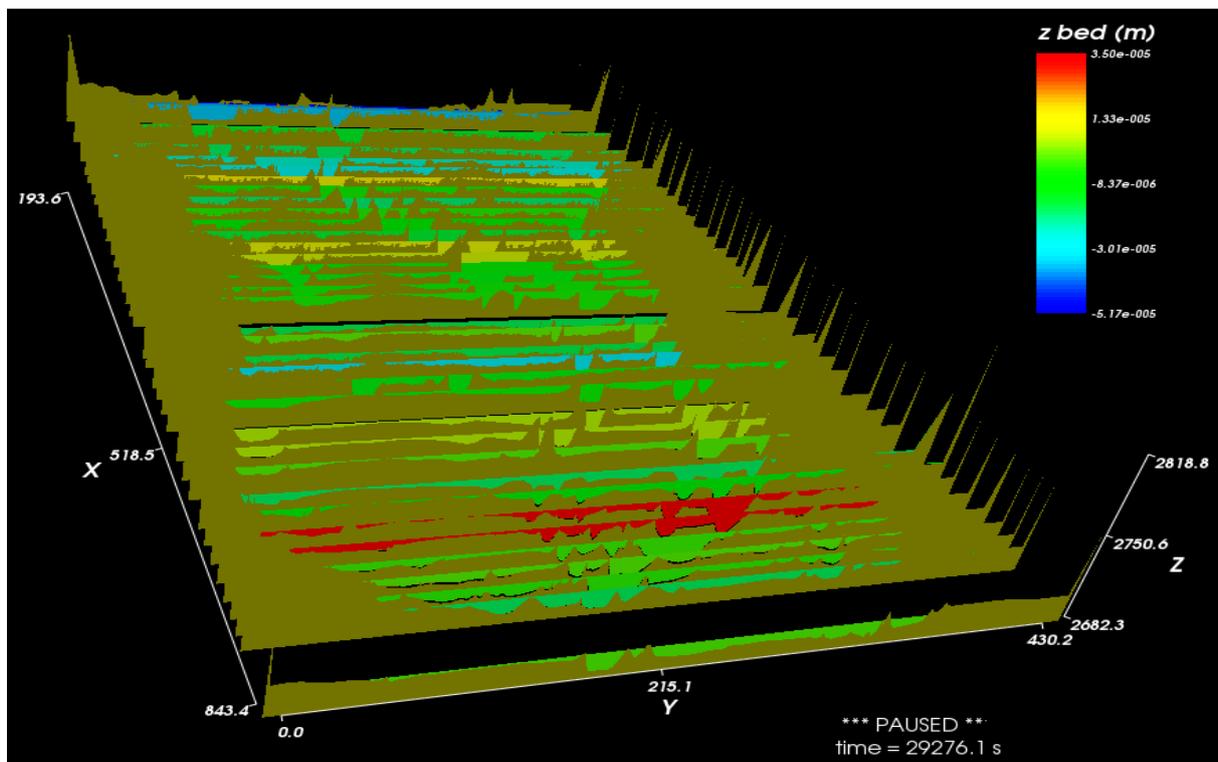


Figura 11.6: Plottaggio del valore medio di variazione del fondo

Nella Tabella 11.1 si riporta l'output definito Transport diagram, ovvero per la sezione stabilita, in questo caso la numero 12 del modello, si memorizzano a tempi determinati i valori di portata solida per ogni classe granulometrica.

Tabella 11.1: Valori di portata solida per diversi tempi e categorie granulometriche

Time	Sediment flux [m ³ /s]									
	<11.2 mm	11.2-21.2	21.2-56.3	56.3-80.0	80.0-121.2	121.2-154	154-190	190-261.8	261.8-400	>400 mm
0.74	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5000	0.042	0.004	0.009	0.007	0.013	0.007	0.001	0	0	0
10000	1.188	0.100	0.221	0.172	0.386	0.235	0.055	0.019	0	0
15000	0.656	0.066	0.146	0.112	0.229	0.093	0.009	0	0	0
20000	0.964	0.082	0.181	0.146	0.340	0.181	0.029	0.003	0	0
25000	2.649	0.165	0.364	0.303	0.833	0.690	0.189	0.084	0.021	0
30000	4.557	0.288	0.633	0.509	1.311	1.150	0.366	0.199	0.089	0.011
35000	2.251	0.157	0.345	0.281	0.716	0.532	0.143	0.064	0.011	0
40000	0.631	0.056	0.124	0.100	0.228	0.110	0.013	0.00002	0	0
45000	0.068	0.009	0.020	0.015	0.022	0.001	0	0	0	0
50000	0.820	0.074	0.162	0.127	0.285	0.148	0.023	0.002	0	0
55000	0.236	0.030	0.066	0.049	0.085	0.007	0	0	0	0
60000	0.084	0.013	0.029	0.020	0.021	0.000	0	0	0	0
60000	0.084	0.013	0.029	0.020	0.021	0.000	0	0	0	0

Se si vuole conoscere il flusso cumulato di sedimenti attraverso una sezione (come in precedenza si fa riferimento alla sezione numero 12) si può invece utilizzare il comando di output Bedload discharge che restituisce a tempi crescenti il volume di sedimento in metri cubi.

Tabella 11.2: Volume di sedimento transitato attraverso la sezione numero 12 per successivi tempi

Time	Bedload discharge [m ³]									
	<11.2 mm	11.2-21.2	21.2-56.3	56.3-80.0	80.0-121.2	121.2-154	154-190	190-261.8	261.8-400	>400 mm
0.74	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5000	925.6	63.0	138.5	111.4	277.6	212.3	61.1	33.6	19.5	8.7
10000	7097.8	573.0	1260.5	989.9	2286.7	1466.3	343.6	135.9	33.1	8.7
15000	9888.9	859.2	1890.2	1470.2	3255.1	1848.3	385.0	139.1	33.1	8.7
20000	14482.1	1268.9	2791.6	2180.5	4833.6	2661.2	523.3	172.4	41.3	9.3
25000	24198.3	1935.5	4258.1	3398.4	8021.4	4992.6	1099.7	398.7	84.5	9.3
30000	42531.7	3070.3	6754.7	5433.1	13441.1	9779.4	2547.3	1125.5	362.4	17.8
35000	59941.7	4214.4	9271.8	7473.6	18669.5	14033.6	3829.8	1796.0	621.2	31.8
40000	65373.6	4644.0	10216.8	8240.1	20519.1	15171.6	4063.9	1861.7	624.5	31.8
45000	66260.1	4737.4	10422.2	8403.4	20842.1	15266.0	4070.9	1861.7	624.5	31.8
50000	69656.0	5026.5	11058.2	8910.1	22006.1	15915.8	4189.0	1889.6	628.8	31.8
55000	71858.6	5256.7	11564.7	9300.7	22793.7	16182.6	4209.1	1890.6	628.8	31.8
60000	72623.2	5361.3	11795.0	9470.1	23044.0	16192.6	4209.1	1890.6	628.8	31.8
60000	72623.2	5361.3	11795.0	9470.1	23044.0	16192.6	4209.1	1890.6	628.8	31.8

Dalla Tabella 11.2 si nota un brusco salto dei volumi che raddoppiano quasi dallo scaglione temporale dei 25000 secondi a quello successivo; la ragione di tale comportamento risiede ovviamente nel raggiungimento del valore di picco della portata liquida che comporta una maggiore capacità di mobilitazione dei sedimenti.

Tra gli output è possibile visualizzare, in Tabella 11.3, i valori di velocità mediata sulla sezione ai diversi istanti temporali.

Tabella 11.3: Valori di velocità media per la sezione 12 e diversi tempi di misura

Time [s]	0.74	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
U_{mean} [m/s]	0.036	2.247	2.659	2.254	1.987	2.263	2.568	2.230	1.982	2.117	2.344	2.143	2.044

11.2 Simulazione bidimensionale con modello accoppiato

Per apprezzare con maggiore accuratezza i fenomeni idrodinamici del torrente si decide di utilizzare un modello accoppiato, come descritto nel capitolo 10. Una simulazione idraulica e morfologica è stata condotta con un idrogramma contenente una serie di valori di portata descriventi una condizione di magra del torrente. Tale configurazione ha consentito la determinazione delle zone in cui sono in atto fenomeni di erosione o deposito sul fondo. L'idrogramma utilizzato contiene portate di morbida non superiori ai $20 \text{ m}^3/\text{s}$ per simulare una condizione di tipo standard per la stagione primaverile del torrente.

Le Figure 11.7, 11.8 e 11.9 riportano gli output della simulazione condotta per la porzione di dominio rappresentato con un modello 2D; in particolare si mostrano in scala cromatica il livello iniziale del fondo alveo, la variazione di quota del fondo e il tirante idrico per ogni elemento della mesh tridimensionale.

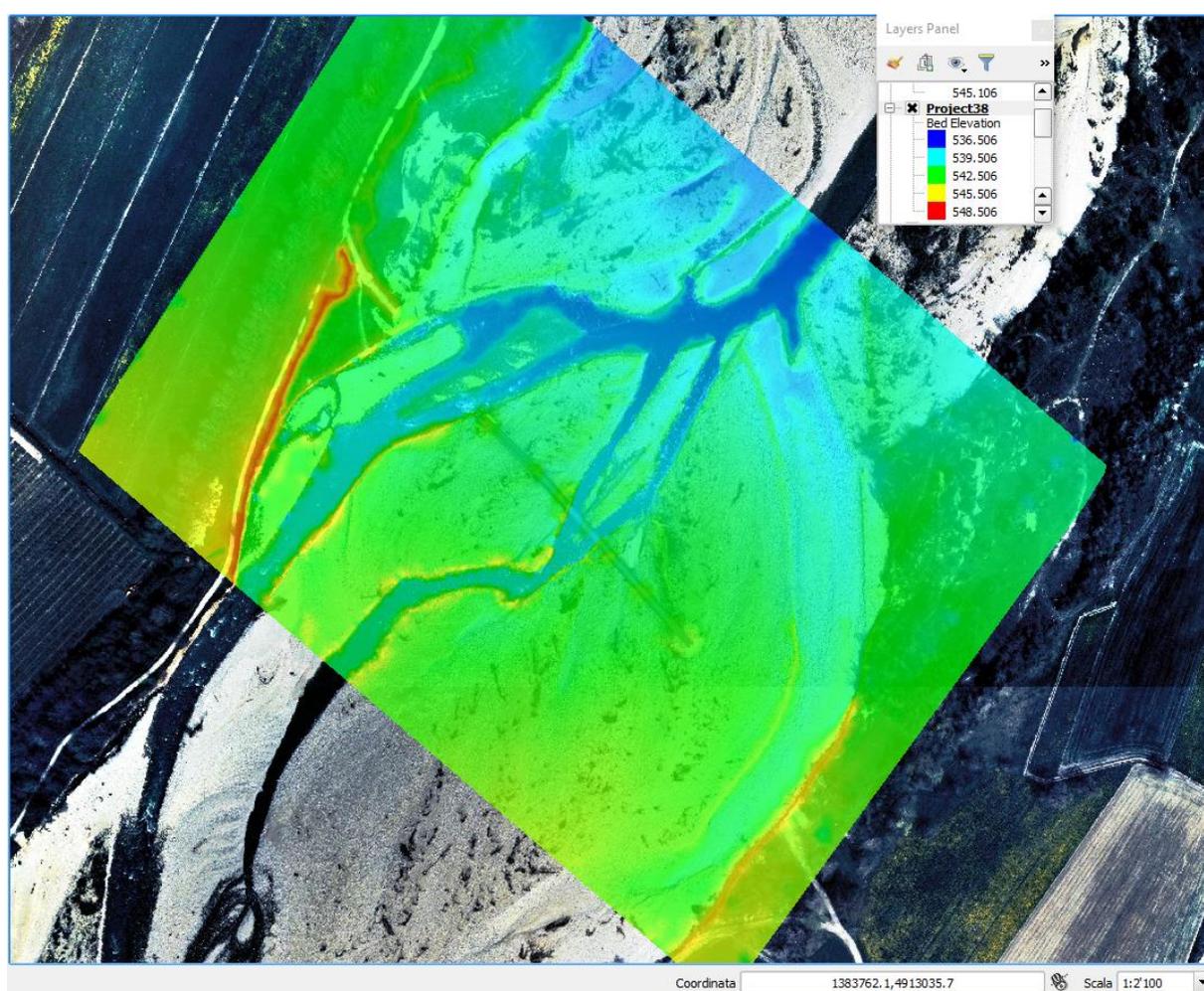


Figura 11.7: Vista cromatica dell'elevazione del terreno per il modello bidimensionale relativo alla configurazione del 2003

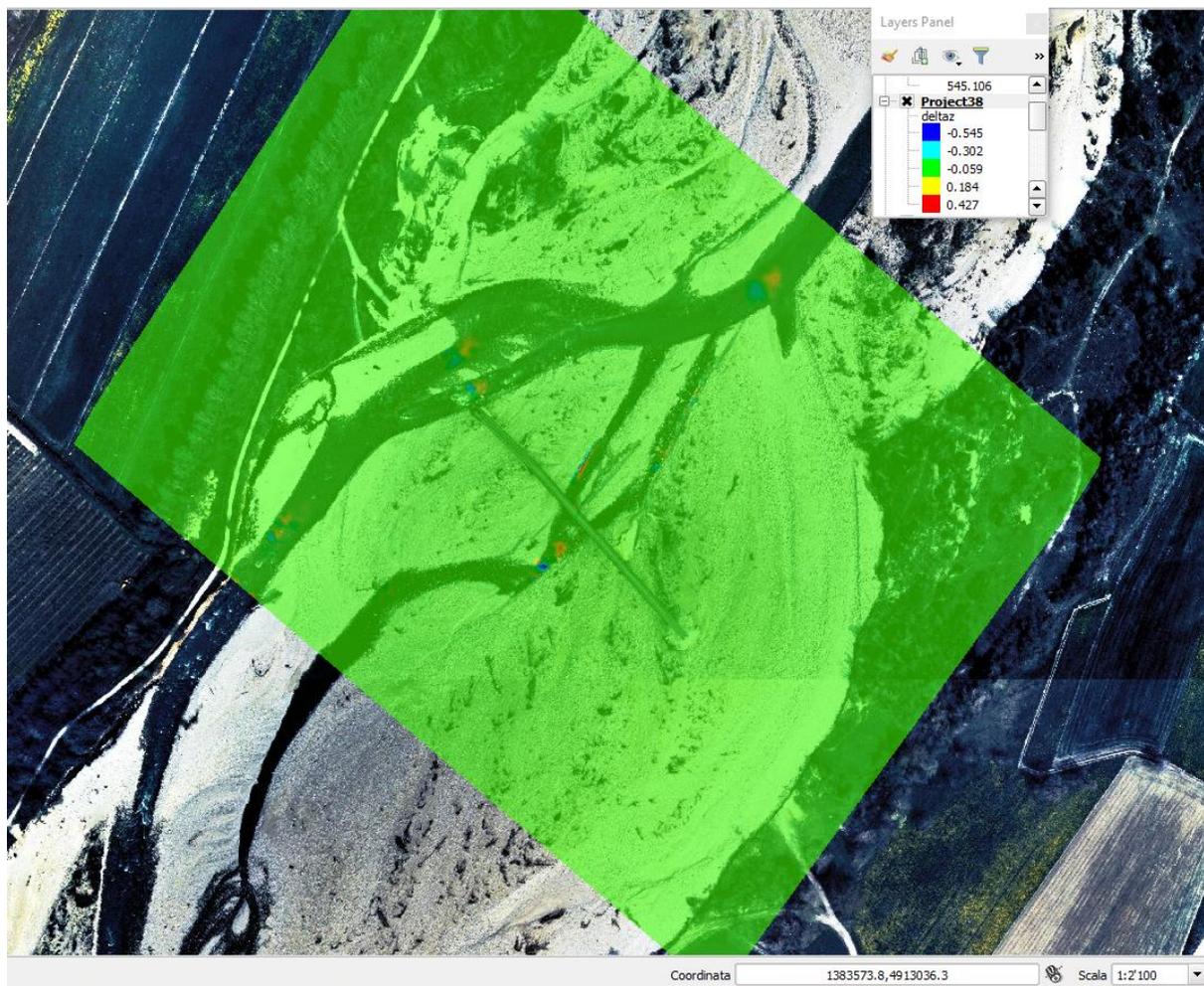


Figura 11.8: Visualizzazione delle zone in cui si verifica un fenomeno localizzato di erosione (valore con segno negativo) o di deposito del sedimento trasportato dalla corrente

La Figura 11.8 mostra uno stato di equilibrio generale del fondo alveo, risultato atteso per deflussi moderati, con locali fenomeni concentrati di erosione nelle zone in cui si verifica un restringimento del canale.

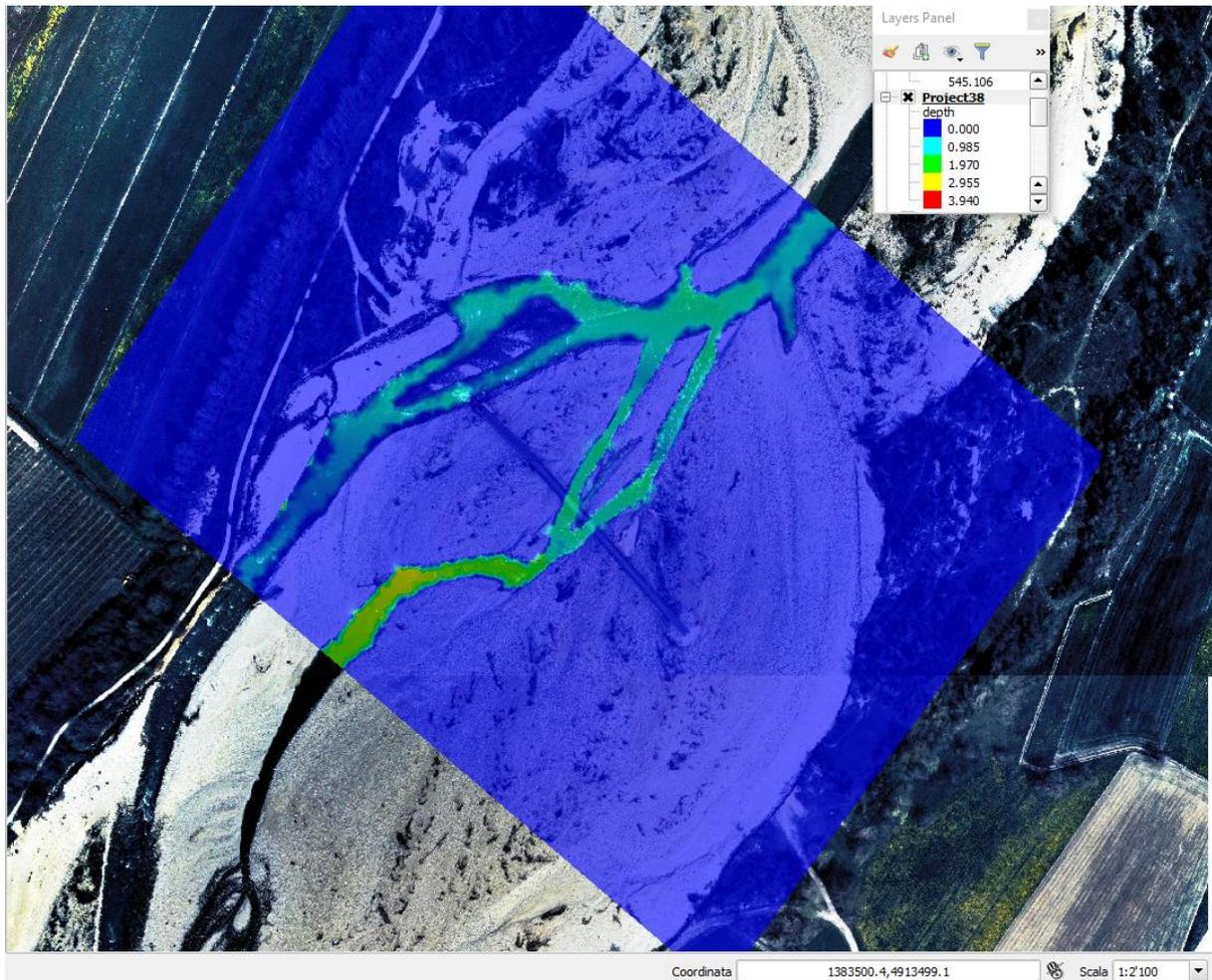


Figura 11.9: Individuazione del tirante idrico per ogni elemento della mesh

In Figura 11.10 è possibile osservare con rappresentazione cromatica e vettoriale il campo di velocità del Torrente Gesso, mentre nella successiva Figura 11.11 si osserva l'informazione relativa alla velocità unitamente alle variazioni del livello del fondo. Da questa sovrapposizione di layer si evidenzia lo stretto legame tra le due variabili; in effetti si nota che, nelle zone in cui il canale subisce un restringimento, la velocità aumenta localmente e da origine a un fenomeno di asportazione del sedimento presente sul fondo. A valle, laddove la corrente non ha più la capacità di trasportare il materiale, si verifica una deposizione dello stesso materiale.

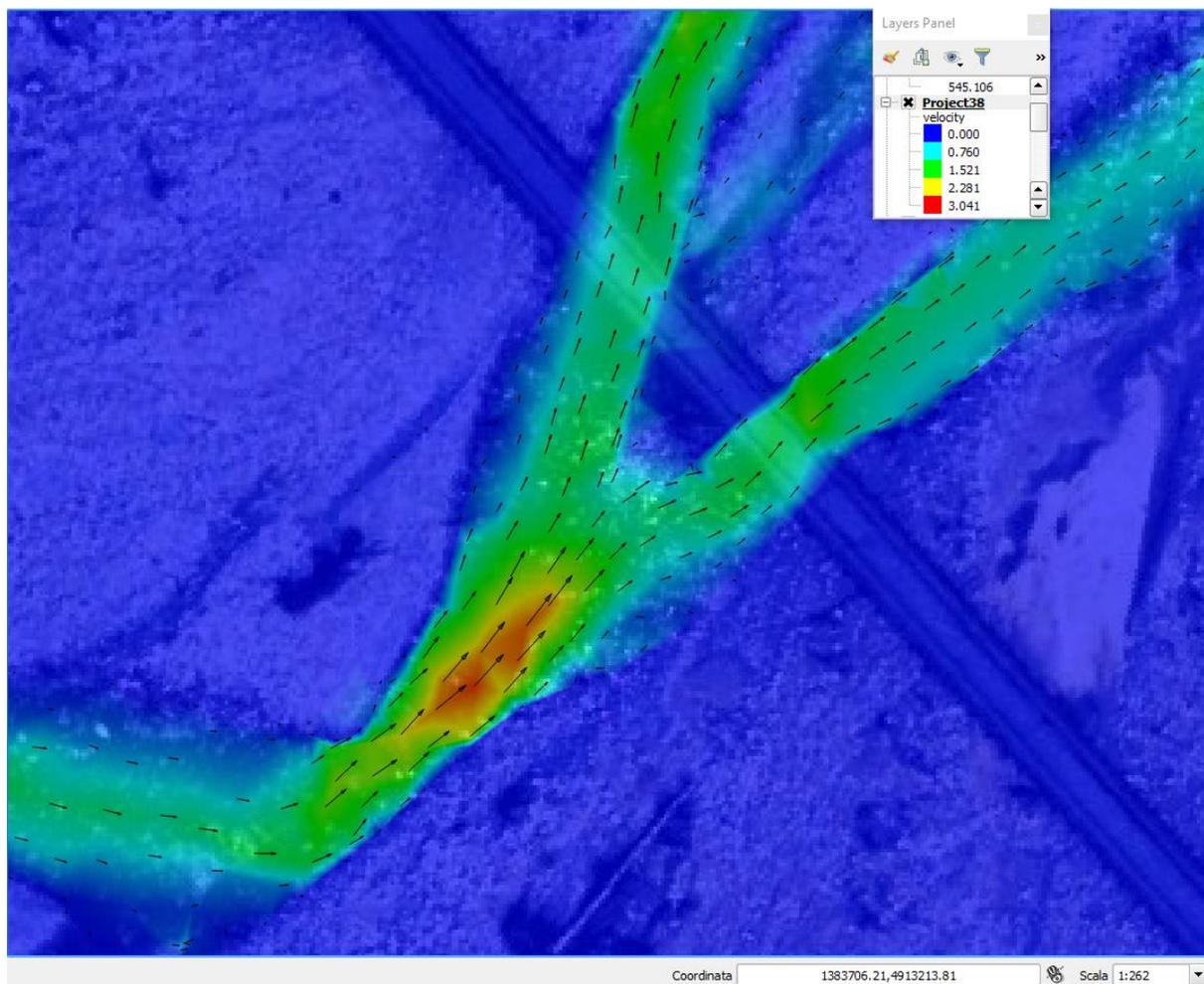


Figura 11.10: Rappresentazione mediante colore e vettori dei principali campi di velocità del corso d'acqua

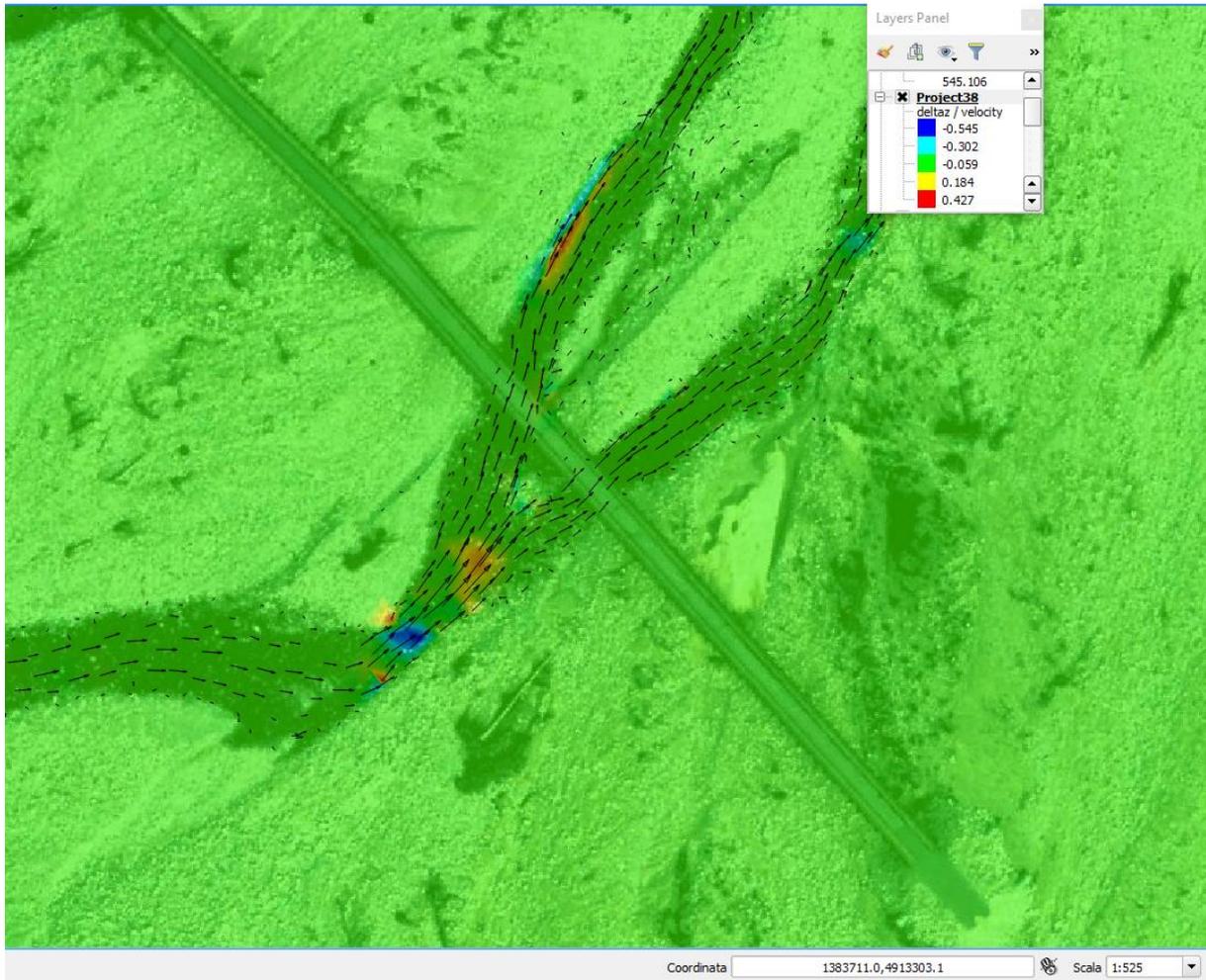


Figura 11.11: Rappresentazione combinata del campo di velocità e della variazione del fondo di una zona del torrente Gesso

12 Modello HEC-RAS 1D

Il Torrente Gesso è stato oggetto nel marzo del 2017 di una simulazione di trasporto solido con il software HEC-RAS. L'obiettivo della simulazione è stato il valutare l'erosione a valle di un guado pedonale e ciclabile che garantisce l'attraversamento del corso d'acqua nella zona del Santuario degli Angeli, situato lungo il Viale degli Angeli della città di Cuneo. Il progetto prevedeva la realizzazione di un rilevato in materiale sciolto, reperito in situ, con una altezza contenuta tra 1,5-2 m sul fondo alveo. Al fine di impedire la completa ostruzione al deflusso, sono stati inseriti dei tubi in calcestruzzo nei tre canali principali in cui si suddivide il torrente.

In Figura 12.1 è mostrato l'attraversamento dalla zona di accesso sulla sponda in sinistra orografica del torrente. Le successive Figure 12.2 e 12.3 raffigurano due canali del Gesso con i tubi in calcestruzzo a dimora nel rilevato.



Figura 12.1: Immagine del guado di attraversamento ciclo-pedonale



Figura 12.2: Canale di sinistra con guado ciclo-pedonale; foto scattata da monte



Figura 12.3: Canale centrale del torrente con guado in materiale sciolto e tubi in calcestruzzo

E' importante notare che il canale centrale mostrato in Figura 12.3 è stato interessato da contenuti lavori di manutenzione in quanto la struttura e i tubi sono relativi a un intervento passato che non ha subito particolari danneggiamenti.

La struttura così progettata è stata verificata dal punto di vista idraulico per consentire il deflusso di una portata di $20 \text{ m}^3/\text{s}$, valore superiore alla portata media invernale del torrente. Per valori di deflusso superiori, caratteristici del periodo estivo, l'opera diventa trasparente al flusso e subisce danneggiamenti conseguenti a fenomeni di erosione locale o diffusa del materiale costituente; l'attraversamento sarà poi oggetto di interventi di manutenzione nel periodo successivo alla piena, per consentire il passaggio e liberare i tubi in calcestruzzo da sedimenti e materiale organico.

Questo approccio al problema rappresenta una soluzione rapida, semplice ed economica per offrire un servizio fortemente richiesto dalla popolazione locale. Negli anni passati sono state molteplici le proposte avanzate da enti e professionisti, ma la suddetta è stata portata a realizzazione per i caratteri sopra elencati. I lavori hanno avuto inizio nei primi giorni del luglio 2017 e si sono conclusi nell'arco del mese.

Nel seguito si utilizzerà il software HEC-RAS per eseguire una simulazione simile a quella affrontata con BASEMENT, per valutare eventuali discrepanze e differenze dei modelli adottati e validare i risultati ottenuti in precedenza.

12.1 Il software HEC-RAS

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) consente di analizzare le meccaniche di deflusso in moto permanente e vario, in campo monodimensionale e bidimensionale e le dinamiche di trasporto solido, nonché di effettuare modellazione su temperatura e qualità dell'acqua.

Il software è studiato per effettuare simulazioni monodimensionali, bidimensionali o modelli accoppiati 1D e 2D per una rete di canali naturali o artificiali. Si sottolinea che l'accoppiamento tra sistemi di diversa dimensione è previsto per la modellizzazione di casse di espansione a lato del fiume oggetto dell'analisi principale.

Regime permanente (Steady flow)

Il componente steady flow consente di calcolare i profili idrici per un moto permanente a variazione graduale. Questo sistema è applicabile al caso più semplice di un singolo canale fino a sistemi più complessi a maglia e per condizioni di regime subcritico, supercritico o misto. La risoluzione del problema per la determinazione dei profili idrici si basa sulla risoluzione dell'equazione monodimensionale dell'energia. Le perdite di carico sono valutate tenendo conto della scabrezza delle pareti e degli indici di contrazione ed espansione del canale. Nel caso in cui il profilo idrico sia sottoposto a rapide variazioni si fa riferimento all'equazione del momento.

Gli effetti dovuti alla presenza di ostruzioni come ponti, culvert, soglie e altre strutture presenti nel letto del fiume possono essere presi in conto nel calcolo. Le caratteristiche particolari del componente di flusso permanente (steady flow system) includono: analisi di inondazione, calcolo di profili idrici; effetto di aperture, ponti, canalizzazioni multiple e l'ottimizzazione dei flussi in giunzioni e traverse laterali.

Regime vario (Unsteady flow)

Un secondo componente previsto nel sistema consente la risoluzione di problemi in regime vario (unsteady flow). Il risolutore dell'equazione di tipo monodimensionale è stato adattato dal modello UNET (Barkau, 1992 e HEC, 1997), quello per il campo bidimensionale è stato scoperto direttamente dal centro HEC ed è stata integrata nel software per consentire l'accoppiamento con un sistema 2D, ad esempio per la simulazione di una mappa di allagamento o di una cassa di espansione.

I metodi di calcolo implementati per l'analisi di sezioni, ponti, aperture e altre strutture idrauliche previsti per l'analisi steady flow sono previsti anche per quella in regime vario (unsteady).

Trasporto solido

La componente di trasporto del sedimento del sistema di modellazione è intesa per la simulazione del trasporto solido unidimensionale e dei calcoli dei limiti mobili derivanti da erosione e deposizione su periodi di tempo estesi (tipicamente anni, sebbene siano possibili applicazioni a singoli eventi di inondazione).

Il calcolo delle dinamiche legate al trasporto solido può essere effettuato adottando un regime di moto vario o al più quasi-vario (quasi-unsteady) se l'altra tipologia di analisi è impossibilitata dall'insorgere di instabilità.

La capacità di trasporto solido è calcolata dalla frazione di granulometria, consentendo così la quantificazione del sedimento per ogni classe granulometrica e la simulazione dei fenomeni di corazzamento del fondo ad opera del sedimento più grossolano. Le caratteristiche principali includono la possibilità di modellare una rete completa di flussi, il dragaggio di un canale, varie alternative e l'utilizzo di diverse equazioni per il calcolo del trasporto dei sedimenti.

Il modello è stato progettato per simulare le tendenze a lungo termine di scorrimento e deposizione in un tratto del canale che potrebbero derivare dalla modifica della frequenza e della durata dello scarico dell'acqua di flusso e dello stadio o la modifica della geometria del canale. Questo sistema può essere utilizzato per valutare il deposito nei serbatoi, contrazioni di progettazione del fiume necessarie per mantenere le profondità di navigazione, prevedere l'influenza del dragaggio sul tasso di deposizione, stimare il massimo possibile scorrimento durante grandi eventi di inondazione e valutare la sedimentazione in canali a fondo fisso.

12.1.1 Modello spaziale

La simulazione effettuata per il progetto dell'attraversamento ha fatto riferimento a un modello spaziale generato con il software Global Mapper, con il quale è stata eseguita una triangolazione dei punti del DTM ottenuto nel 2003. In questo ambito invece, per non diversificare i modelli adottati e perseguendo la scelta di programmi *open source* si è partiti dallo stesso terreno digitale costruito in QGIS al punto 7.2. Il programma offre la possibilità, attraverso il plugin Q-RAS di esportare un file di geometria contenente le sezioni che verranno utilizzate in HEC-RAS. Siccome si vuole eseguire una analisi che annovera le dinamiche di trasporto solido, l'unica possibilità in questo caso cade su un modello monodimensionale, essendo il modulo 2D al momento disponibile esclusivamente per la componente idraulica.

Il plugin sperimentale funziona da preprocessore per HEC-RAS estrapolando l'informazione geometrica di più sezioni, indicate con un layer vettoriale da un layer raster. L'immagine raster può essere ottenuta dall'esportazione del modello realizzato in QGIS, selezionando una risoluzione della griglia di 0.25 m (corrisponde alla massima risoluzione consentita).

Le sezioni vanno inserite a partire da quella più a monte e guardando a valle, il numero identificativo decresce mano a mano che ci si muove verso valle.

In seguito si costruisce il file vettoriale delle sezioni disegnando delle linee a passo variabile in funzione del livello di dettaglio con cui si vuole rappresentare l'area, funzione a sua volta della complessità della zona.



Figura 12.4: Visualizzazione delle sezioni del terreno per la realizzazione del modello 1D in HEC-RAS

Una volta caricato il file generato con estensione .sdf come file di geometria in HEC-RAS occorre inserire le informazioni relative a scabrezza, levee e aree inefficaci per definire completamente le singole sezioni trasversali e i comandi per una consistente e corretta interpolazione lungo l'asse longitudinale del torrente.

In alternativa si consiglia l'utilizzo di River GIS, un altro plugin di QGIS che, diversamente da Q-RAS consente già sul programma di gestione layer la definizione di bank e levee e di conseguenza il file esportato risulta completo di ogni informazione.

A seguito dell'interpolazione dei dati si ottiene un modello spaziale definito dalle successive sezioni locali; in Figura 12.5 è possibile vedere il modello del terreno in una vista a tre dimensioni.

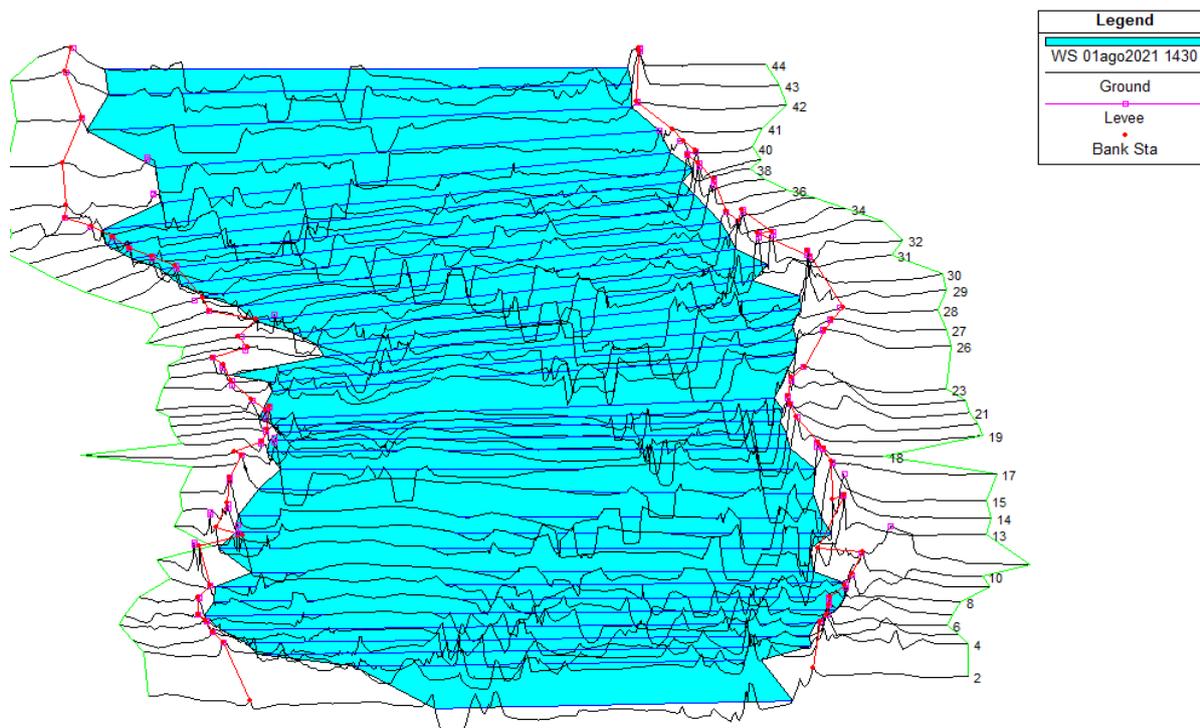


Figura 12.5: Visualizzazione tridimensionale delle sezioni in HEC-RAS con indicazione dei levee e delle zone di transizione alle golene

12.1.2 Modello idraulico

Il problema idraulico può essere affrontato con un approccio di moto permanente o vario, nel primo caso si incorre nelle seguenti limitazioni:

- il flusso è permanente, ovvero costante per ogni intervallo discreto di tempo e varia in modo graduale (ad eccezione delle zone adiacenti a ponti o strutture dove il flusso viene fatto variare rapidamente con riferimento all'equazione del momento o altre formulazioni empiriche);
- il flusso è monodimensionale (il campo di velocità nelle direzioni differenti da quella principale di deflusso viene trascurato);
- l'asta fluviale deve avere una pendenza contenuta, al di sotto di 1:10.

Per le suddette limitazioni si sceglie di operare nel campo di moto vario; in questo campo, le equazioni che reggono i fenomeni sono l'equazione di continuità e quella di conservazione del momento. Come per il software BASEMENT queste leggi sono espresse in forma di equazioni alle derivate parziali e possono essere ricondotte con le medesime ipotesi alle equazioni SW descritte in precedenza.

Il metodo più indicato per la risoluzione del moto vario è rappresentato dal modello implicito a quattro punti, anche noto come box scheme. Per un valore di portata del fiume, si ottiene un sistema di più equazioni simultanee. La soluzione simultanea è un aspetto importante di questo schema in quanto consente all'informazione di tutta la portata di influenzare la soluzione in un punto qualsiasi. Di conseguenza, il passo temporale può essere significativamente maggiore rispetto a schemi numerici espliciti.

Nel caso di un fiume con N nodi computazionali si originano $N-1$ celle dove utilizzare le differenze finite. Dato che le incognite sono $2N$ (dQ e dz per ogni nodo) e le celle possono essere scritte $2N-2$ equazioni sono necessarie due equazioni aggiuntive che vengono definite attraverso le condizioni al contorno.

Per quanto concerne le condizioni di vincolo al contorno del problema occorre inserire una chiusura a monte e una a valle. Nel primo caso si utilizza il comando *flow series* della finestra *Quasi unsteady flow editor* per definire un idrogramma in ingresso nella sezione più a monte del modello; la seconda condizione viene dettata inserendo l'altezza di moto uniforme nella sezione di valle del dominio, calcolata direttamente dal programma sulla base della pendenza del fondo indicata dall'utilizzatore, in questo caso pari a 0.014.

Il software HEC-RAS verrà utilizzato per una serie di simulazioni relative al tronco di Torrente Gesso già definito in precedenza; a tal merito le serie di portate che si andranno ad utilizzare sono così definite:

- 1) La sequenza delle portate di 5 anni di misurazione dal 2011 al 2015 registrate dalle stazioni ARPA (da cui sono eliminate quelle con valore inferiore ai $10 \text{ m}^3/\text{s}$ per diminuire il tempo della simulazione) e scalate sulle aree di bacino essendo i valori riferiti a due stazioni di misura poste a distanza dalla sezione di chiusura del bacino del Torrente Gesso; in seguito si prevede la manifestazione di un evento di piena corrispondente a un tempo di ritorno di 200 anni, con portata di picco a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$; si conclude l'analisi con un ulteriore periodo di 5 anni di portate misurate;

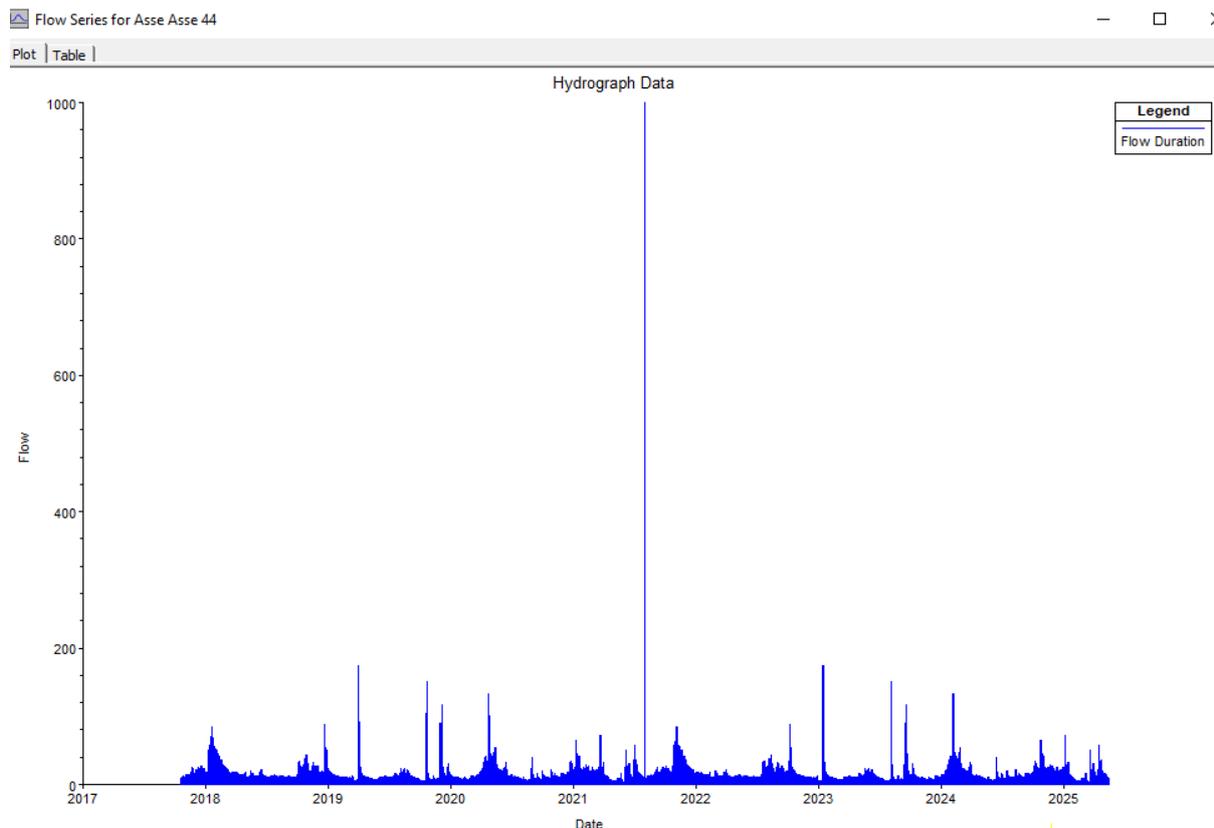


Figura 12.6: Idrogramma di lunga durata con portate espresse in m^3/s per la simulazione di trasporto solido con il software HEC-RAS (il tempo è definito in termini relativi alla data stabilita come inizio per la simulazione)

- 2) L'idrogramma dell'evento di piena con tempo di ritorno pari a 200 anni (Figura 6.2).

L'idrogramma descritto al primo punto verrà utilizzato per verificare la stabilità del modello o d'altra parte a determinare la sua tendenza a raggiungere un nuovo equilibrio sotto l'effetto di un evento rilevante. Il tratto dell'idrogramma relativo alle portate misurate presso le stazioni di monitoraggio è inoltre utilizzato per la calibratura del modello morfologico, come descritto nel seguito.

Una ulteriore simulazione verrà effettuata con l'idrogramma di piena con TR 200 anni per confrontare la configurazione finale del fondo con quanto ottenuto dal programma BASEMENT con la medesima serie di portate liquide.

12.1.3 Modello morfologico

Se si intende valutare il trasporto solido originato nel modello dal deflusso idrico occorre definire un file con le caratteristiche del sedimento. In ogni caso l'implementazione del modulo relativo al trasporto solido su un file di simulazione idraulica deve avvenire solamente dopo che la componente idraulica è stata testata e resa robusta attraverso molteplici simulazioni sotto differenti condizioni.

L'editor relativo alla finestra del trasporto solido consente di definire una formula di trasporto tra una vasta gamma di possibilità. Anche in questo caso occorre fare mente locale alle assunzioni, alle condizioni del problema e alle caratteristiche del sedimento al fine di scegliere quella più rappresentativa, anche a seguito di molteplici prove.

La curva granulometrica adottata per lo studio corrisponde con quella ricavata al punto 6.4 e mostrata in Figura 12.7.

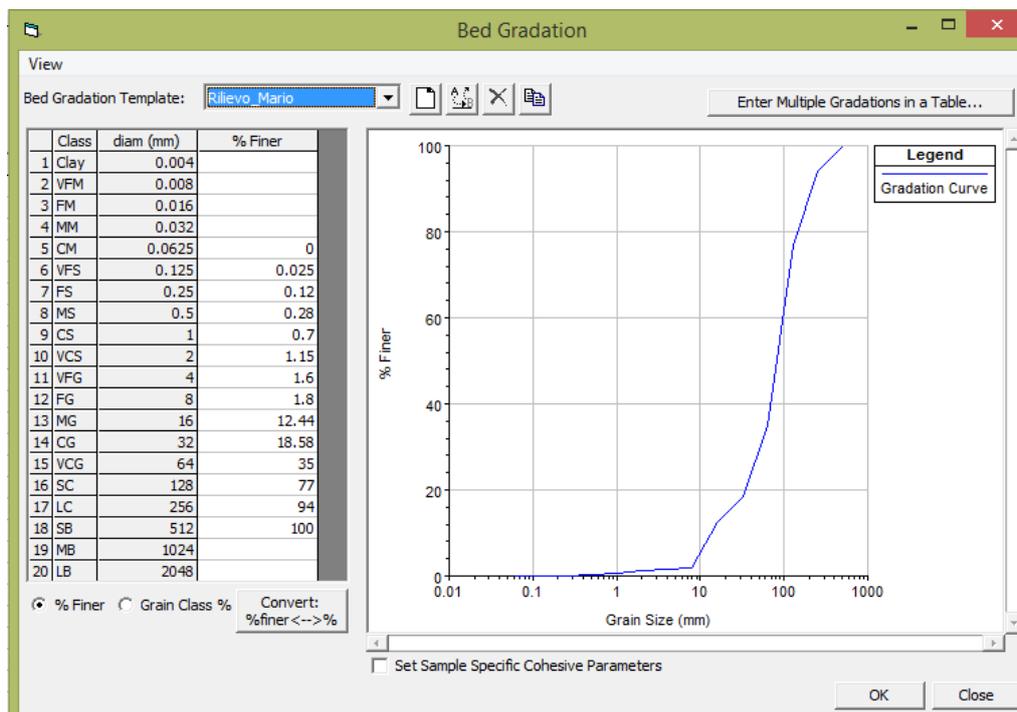


Figura 12.7: Curva granulometrica

12.1.4 Taratura del modello morfologico

La definizione del modello geometrico non conclude la fase di processo dei dati affidata all'utilizzatore del software, segue infatti una procedura laboriosa di simulazione e correzione dei parametri per la taratura del modello. Questa taratura si rende necessaria per ottenere un modello consistente con la realtà. Le prime impostazioni da settare per tarare un modello sono la formula di trasporto solido, la legge di caduta dei grani e lo schema di discretizzazione del terreno. Le varie alternative vanno testate con successive simulazioni al fine di individuare la scelta più adatta, che non porta a grandi variazioni morfologiche per deflussi moderati o che restituiscono valori simili in caso di misura diretta del trasporto solido.

La legge di trasporto solido che si decide di adottare è quella ottenuta da Meyer-Peter Muller (1948) studiata per un sedime a granulometria mista. La legge di caduta (Fall velocity method) utilizzata è quella di Ruby, mentre il fondo viene interpretato con l'approccio di Thomas a 3 strati che consente di simulare i processi di protezione del fondo per presenza di materiale grossolano e fine (corazzamento o armoring).

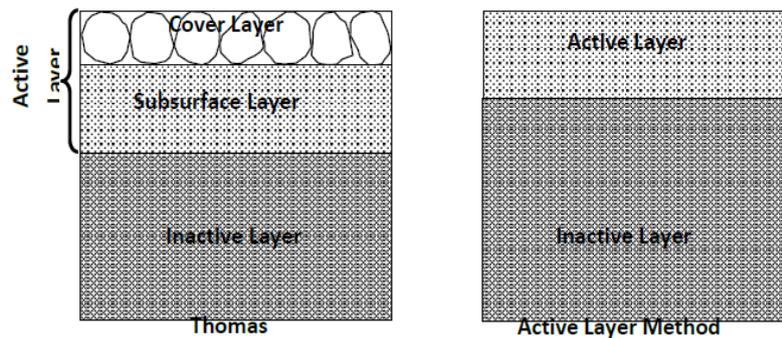


Figura 12.8: Schematizzazione delle tipologie di terreno adottabili per l'analisi

La formula di trasporto scelta è caratterizzata da un valore critico di pendenza del fondo che definisce l'inizio dei fenomeni di erosione o deposito, un fattore moltiplicativo e un termine di potenza; tutti questi valori possono essere modificati per adattare la formula al modello in studio.

Un'ulteriore variabile da aggiustare consiste nel friction slope assegnato come condizione idraulica nella sezione di valle del modello.

Infine occorre definire la corretta condizione al contorno nella sezione di monte per la componente morfologica del problema. Non disponendo di dati si raccomanda l'inserimento del vincolo "Equilibrium load" che rende fissa la sezione più a monte del dominio. In un secondo momento è possibile ricavare dagli output delle simulazioni la massa di materiale che viene trasportata per ogni classe granulometrica e deflussi crescenti. Con queste informazioni si costruisce una curva che lega alla portata idrica l'informazione relativa al sedimento trasportato. La legge ottenuta diventa la condizione al contorno definita come Rating curve.

Stabiliti i vincoli si esegue una simulazione e si valuta il risultato dell'analisi; se il profilo del letto o l'erosione del fondo delle sezioni non rispecchiano le attese è possibile intervenire modificando i dati precedentemente inseriti o inserendo ulteriori comandi che differenziano la tipologia di erosione o intervengono sulla legge del trasporto solido.

In Figura 12.9 è mostrata l'evoluzione del profilo dell'asta del torrente applicando la formula di trasporto solido di Meyer-Peter Muller (1948) secondo i parametri standard, mentre la Figura 12.10 riporta lo stato a fine simulazione, con il medesimo idrogramma in ingresso e la formula tarata secondo i valori riportati in Tabella 12.1.

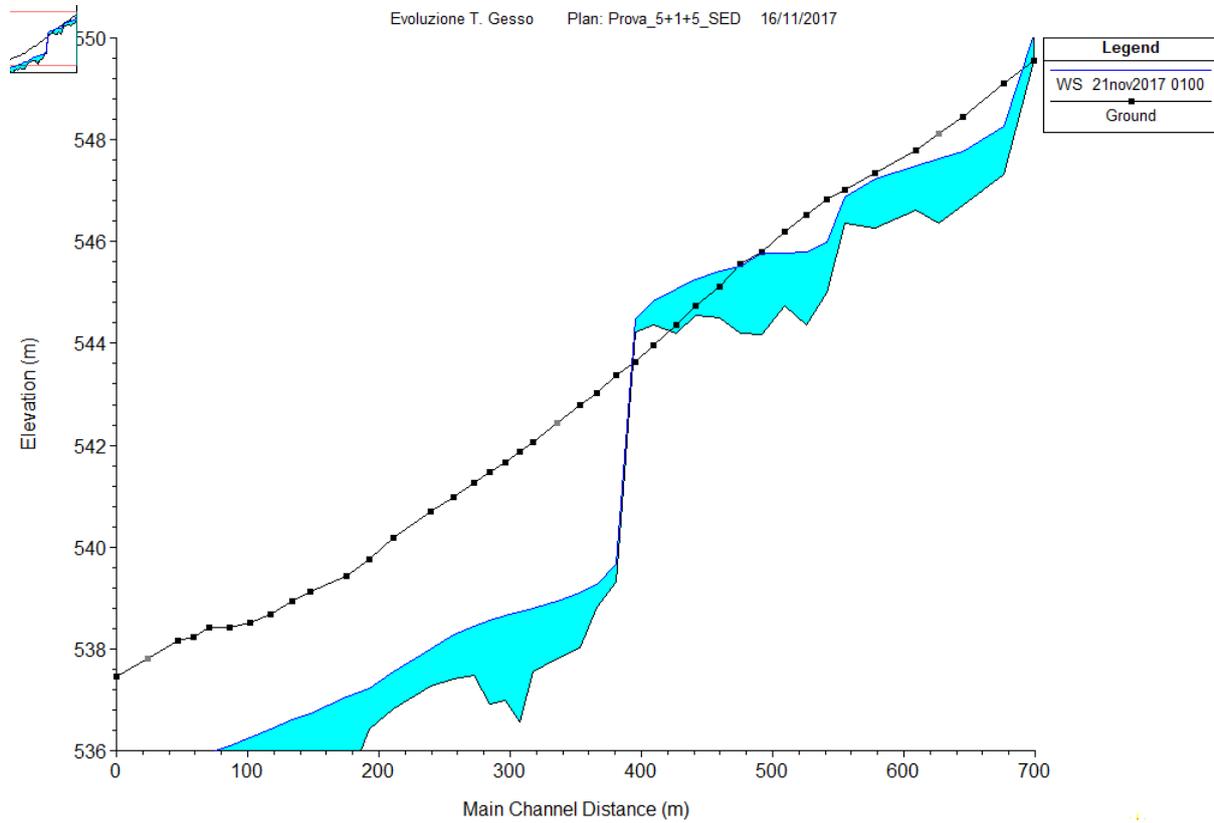


Figura 12.9: Evoluzione del profilo dell'asta del torrente con formula standard (la simulazione è stata interrotta prima del termine ultimo in quanto non consistente)

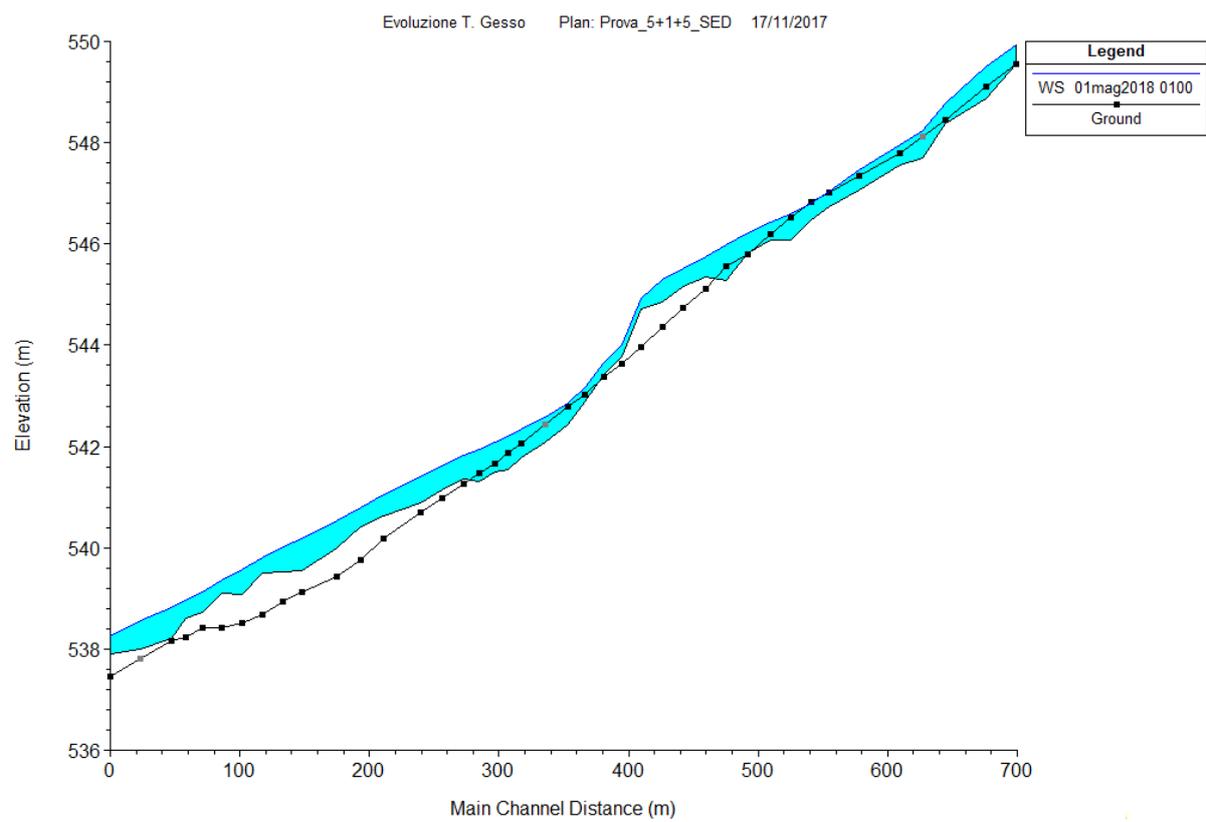


Figura 12.10: Evoluzione del profilo dell’asta del torrente con formula tarata

Tabella 12.1: Valori per la calibrazione del modello morfologico del 2003

Parametri di calibrazione			
α	θ_{cr}	C	P
0.01498	0.047	0.4	1.1

Nella Tabella 12.1 il termine α rappresenta la pendenza del tratto tra le ultime due sezioni a valle del profilo e viene utilizzato per il calcolo della altezza normale di corrente, condizione al contorno di valle per il modello idraulico.

Definita la formula di trasporto solida adottata, ovvero quella di Meyer-Peter Muller i parametri C e P consentono di modificare rispettivamente il coefficiente e il valore di potenza, per adattare la legge al caso in studio. In aggiunta è possibile intervenire anche sul valore della pendenza critica, informazione che definisce la frontiera tra erosione e deposito.

12.2 Simulazione con idrogramma lungo

Il modello realizzato con HEC-RAS è stato utilizzato per una simulazione idrodinamica di lunga durata con l'idrogramma riportato in Figura 12.6, in cui si nota la presenza di una portata corrispondente a un tempo di ritorno di 200 anni. Questa simulazione è stata effettuata

per valutare il raggiungimento di una conformazione di equilibrio per il profilo del torrente e la sua stabilità a fronte di un evento intenso.

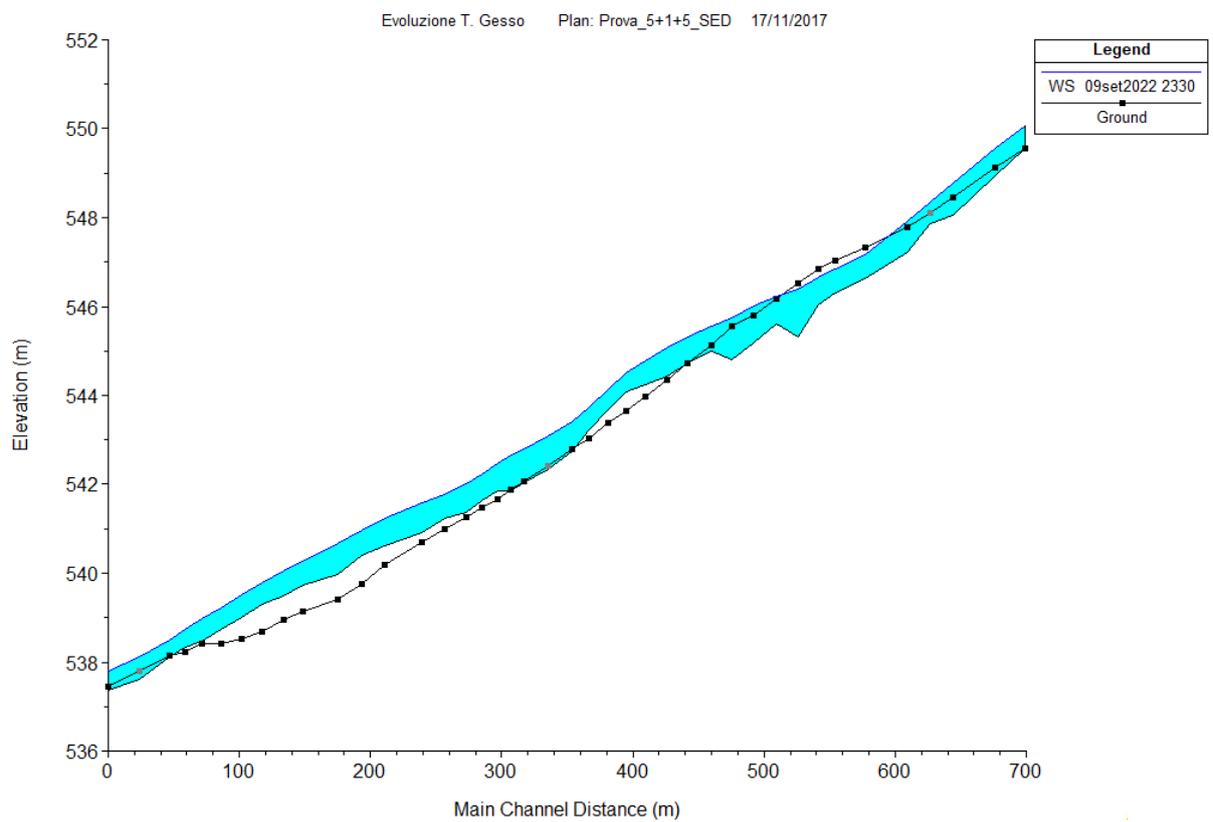


Figura 12.11: Configurazione finale del profilo di fondo dell’asta fluviale dopo la simulazione lunga contenente un evento di piena con TR di 200 anni

Il verificarsi dell’evento di piena ha portato, come atteso, a una modificazione del profilo di fondo del torrente, tale variazione risulta comunque contenuta e non da luogo a forti erosioni localizzate. L’effetto della piena viene attenuato durante la fase discendente dell’idrogramma, infatti le zone in cui ha avuto luogo una forma di asportazione vengono in parte colmate.

12.3 Simulazione con evento di piena

Una seconda simulazione con la conformazione relativa al DTM del 2003 ha visto il torrente soggetto a un deflusso imponente, rappresentato dall’evento di piena corrispondente a un tempo di ritorno di 200 anni. In questo modo si vuole valutare l’effetto del flusso confrontandolo con quello già riscontrato con un modello monodimensionale in BASEMENT al punto 11.1.

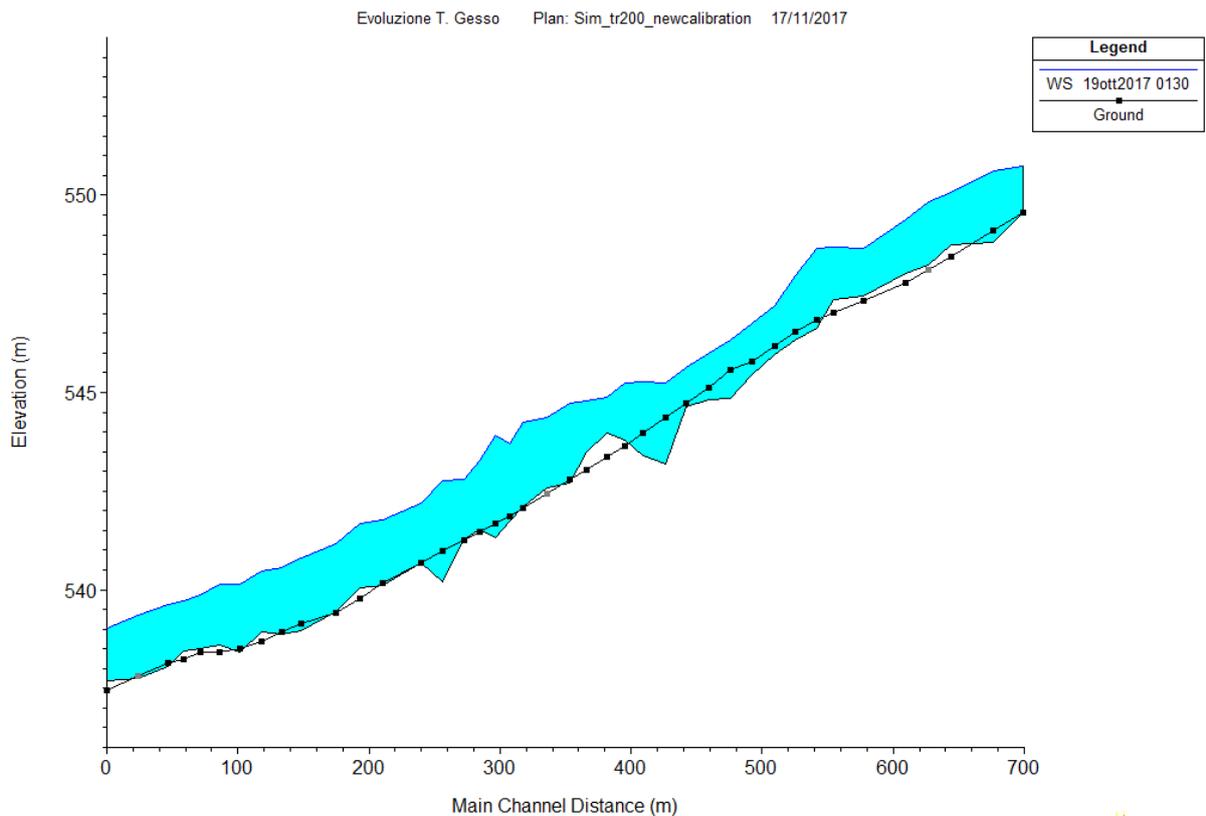


Figura 12.12: Configurazione del profilo dell'asta fluviale dopo l'evento di piena con TR 200 anni

Nelle Figure 12.13-12.18 si riportano i risultati per le simulazioni eseguite con BASEMENT (modello 1D) e HEC-RAS in termini di evoluzione temporale per tre sezioni caratteristiche. Nel seguito sono tratte alcune considerazioni sui risultati delle due prove, eseguite con lo stesso idrogramma in input.

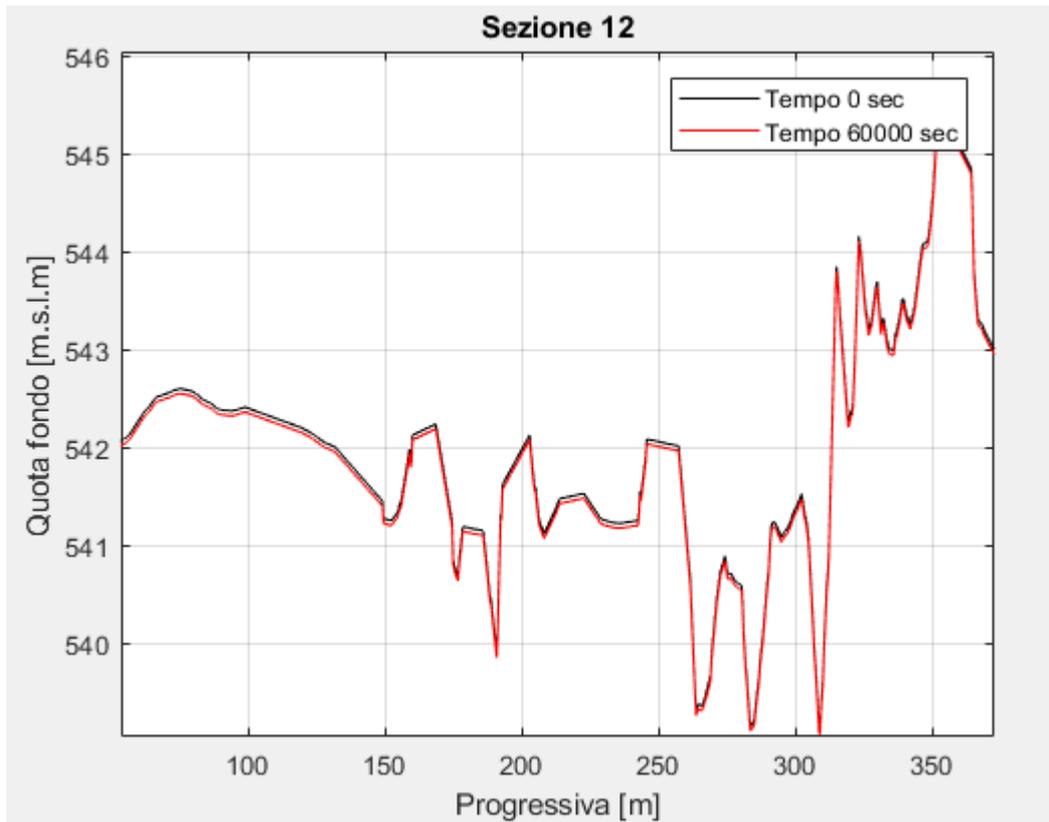


Figura 12.13: Evoluzione della sezione 12 con BASEMENT

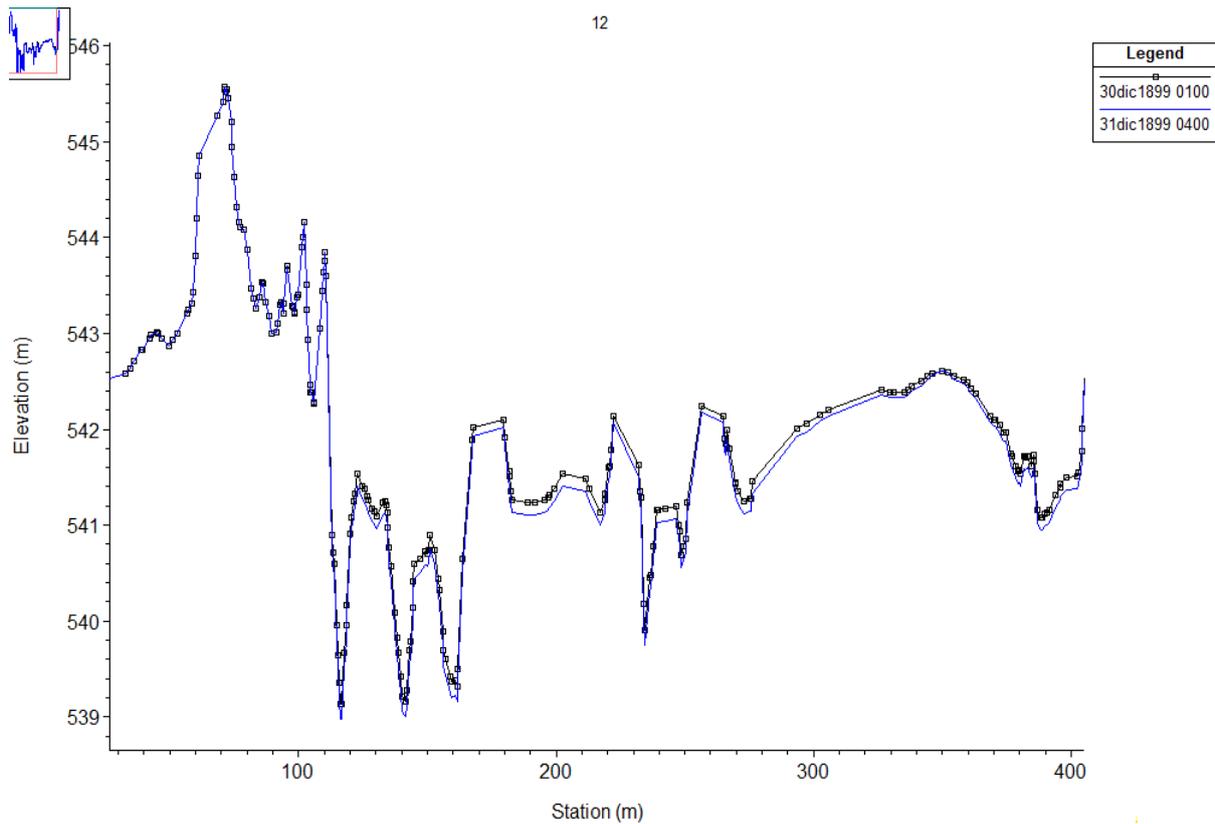


Figura 12.14: Evoluzione della sezione 12 con HEC-RAS

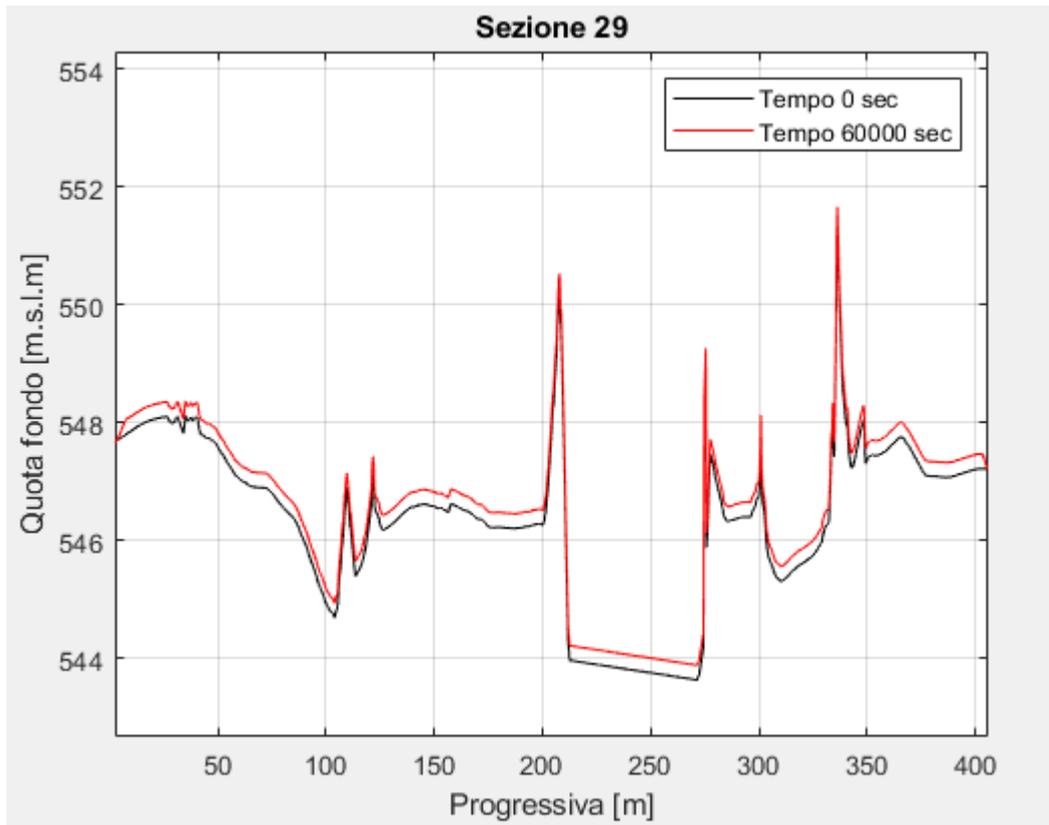


Figura 12.15: Evoluzione della sezione 29 con BASEMENT

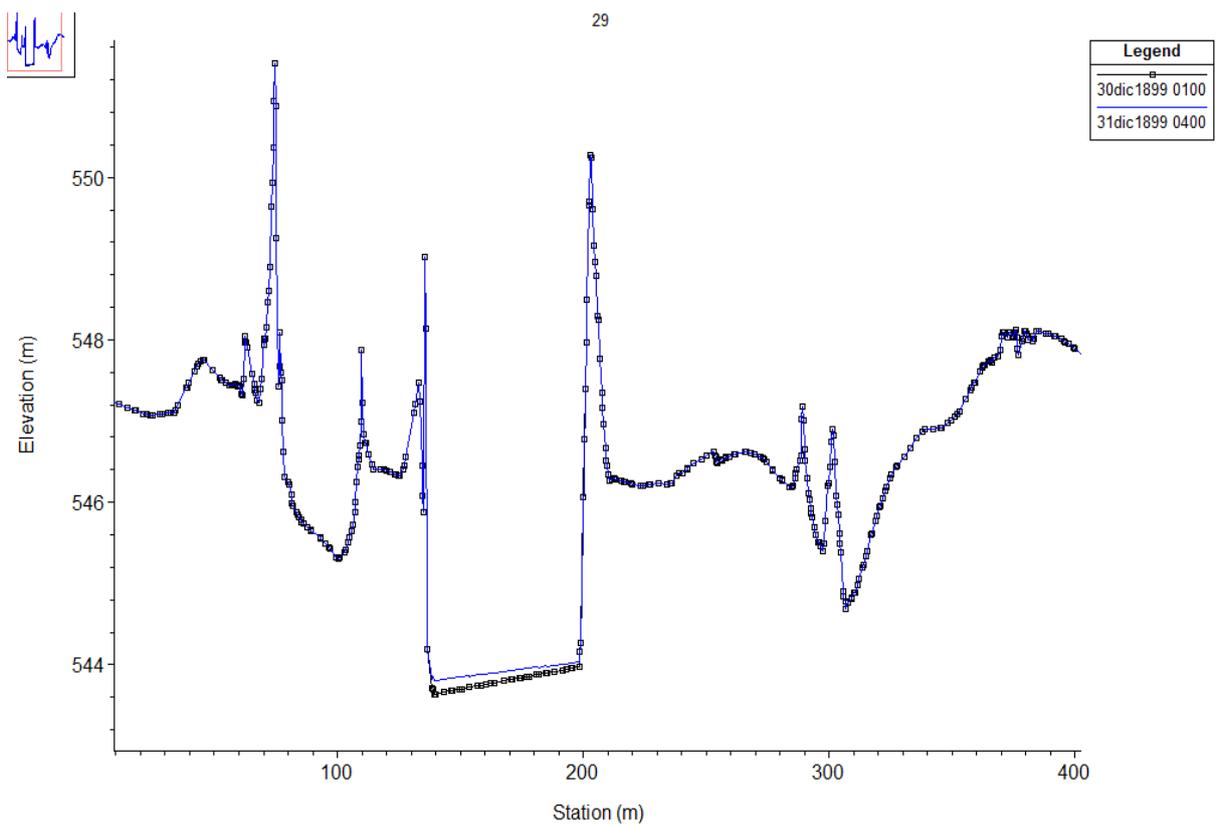


Figura 12.16: Evoluzione della sezione 29 con HEC-RAS

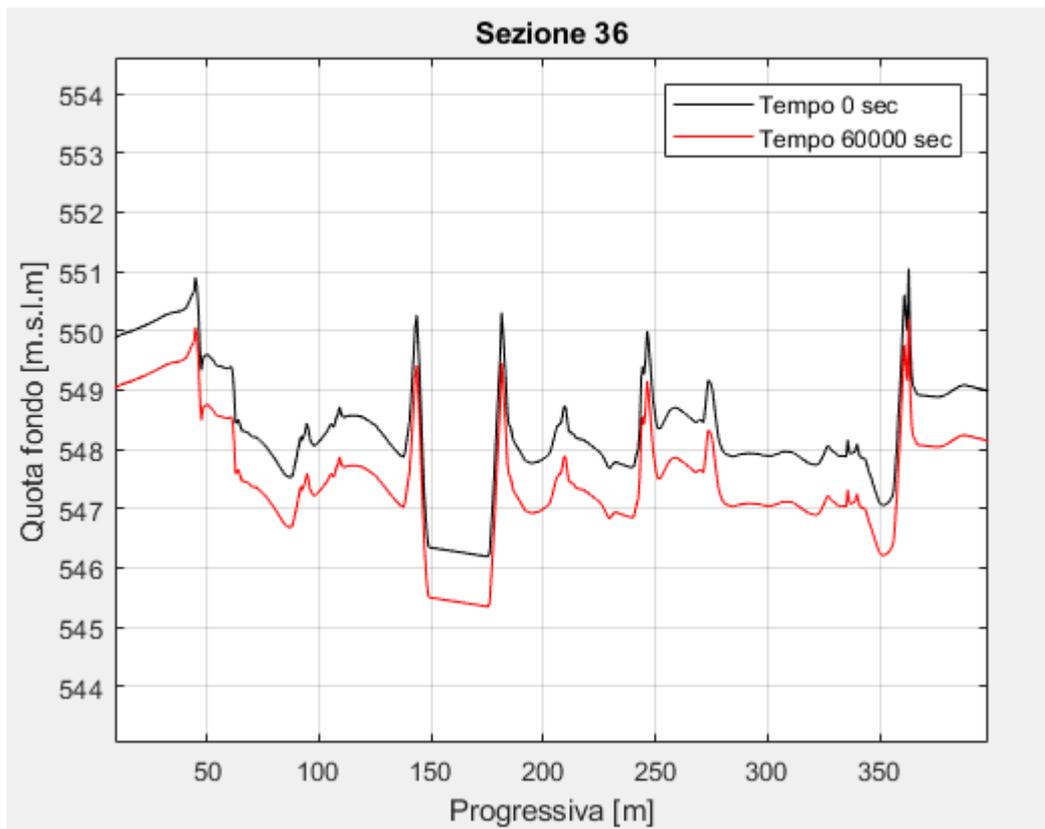


Figura 12.17: Evoluzione della sezione 36 con BASEMENT

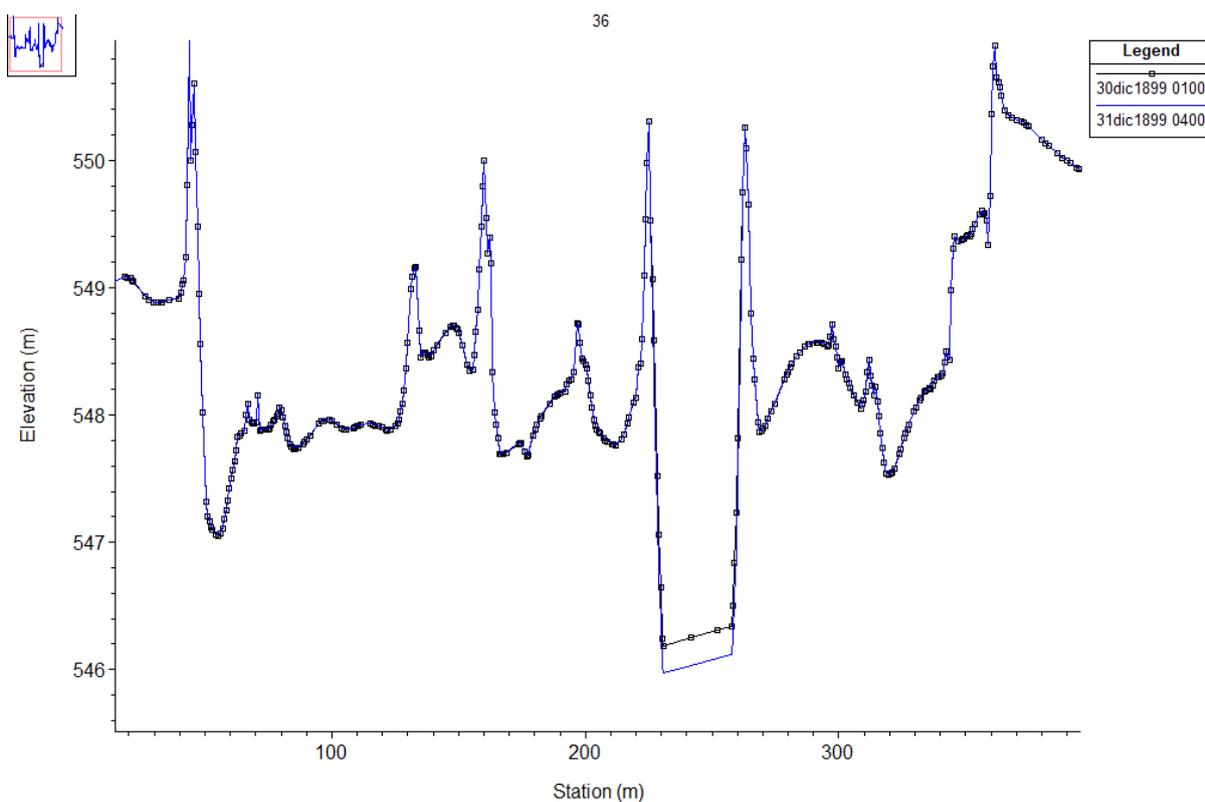


Figura 12.18: Evoluzione della sezione 36 con HEC-RAS

Dal confronto tra le Figure 12.13 e 12.14 appare subito chiaro che le due sezioni riportate risultano speculari; questo fatto è conseguente alle impostazioni dei due software che prevedono una concezione differente nella creazione del modello. Nel caso di HEC-RAS, infatti le sezioni vengono inserite da monte a valle guardando verso valle, BASEMENT vede invece la sezione nel modo speculare. Allo stesso modo il ragionamento per l'output dei risultati, i quali appaiono tra loro ruotati di 180°.

Le Figure 12.13 e 12.14 mostrano lo stato della sezione numero 12 nella configurazione iniziale e al termine della simulazione con l'idrogramma relativo alla piena con tempo di ritorno di 200 anni, della durata di circa 60000 secondi. Mettendo a confronto le due figure si osserva che la deviazione dalla configurazione indeformata è simile per le due situazioni, con un contenuto scarto dei valori. In entrambi i casi si verifica un fenomeno di erosione esteso su tutto l'alveo del torrente.

Le Figure 12.15 e 12.16 rappresentano l'evoluzione di una sezione posta più a monte di quella analizzata in precedenza. La sezione numero 29 simulata con il software BASEMENT e campo monodimensionale mostra una erosione diffusa per l'intero sviluppo con valore costante poco inferiore al metro. Il risultato ottenuto con HEC-RAS invece mostra che l'asportazione del sedimento avviene principalmente nel canale centrale dell'alveo del torrente, mentre nelle zone adiacenti il fenomeno è molto ridotto. Questa apparente differenza tra i risultati può trovare spiegazione in una non perfetta calibrazione del modello morfologico utilizzato con BASEMENT, i cui valori non sono facilmente individuabili. In effetti i parametri con cui è possibile agire per una taratura della capacità di trasporto solido sono coefficienti che riducono il valore di sedimento trasportabile dalla corrente e la forza di uplift; a una piccola variazione di queste quantità consegue un grande effetto sulla capacità di trasporto della corrente.

In maniera simile si comporta la sezione 36 mostrata nelle Figure 12.17 e 12.18 in cui la variazione tra le due configurazioni finali viene accentuata.

13 Simulazione di trasporto solido sotto lo scenario attuale

Per consentire il deflusso delle portate più intense ed evitare o comunque ridurre l'allagamento delle aree circostanti, l'ARPA ha provveduto all'allargamento del canale centrale del torrente in corrispondenza del Santuario degli Angeli, nella zona in cui si è nel seguito realizzata la passerella. Non disponendo di un rilievo diretto, la nuova morfologia può essere ricostruita sulla base degli elaborati grafici di progetto e delle immagini fotografiche. La pendenza delle scarpate viene mantenuta uguale a quella della situazione pre-intervento.

Il software HEC-RAS consente una rapida modifica delle caratteristiche del modello prevedendo l'inserimento o lo spostamento dei punti delle sezioni; per operare con BASEMENT invece occorre ripetere le operazioni di costruzione della mesh in QGIS, con tutte le complicazioni di calcolo e di tempo del metodo.

In QGIS è possibile importare una immagine raster della zona di interesse ottenuta per esempio da Google Maps. L'immagine sarà probabilmente caratterizzata da una scala e un sistema di riferimento differente da quelli settati nel programma e quindi immagine e modello potrebbero non essere perfettamente sovrapposti. Per risolvere questo problema è possibile utilizzare lo strumento *Georeferenzatore Raster GDAL* che prevede l'individuazione di almeno 4 punti fissi sul raster dei quali verranno indicate le coordinate esatte o il corrispondente punto nel modello. Questa delicata operazione consente di allineare correttamente l'immagine del Torrente Gesso scattata nell'anno 2017 al modello realizzato per la configurazione del 2003. I punti di riferimento sono stati scelti alla base dei pali della linea elettrica per garantire l'immutabilità del riferimento.



Figura 13.1: Immagine aerea e principali linee di rottura del terreno (breaklines) utilizzate per la creazione del modello relativo al 2017

Visualizzando le due immagini sovrapposte si nota subito la grande diversità tra le due situazioni temporali, attribuibile in parte all'intervento antropico nel letto finalizzato alla riduzione delle erosioni localizzate, ma soprattutto alla violenza del torrente che in più eventi si è scatenata.

Dopo aver geo-riferito l'immagine relativa alla situazione attuale del tronco di torrente si interviene sulle linee caratteristiche del modello spostandole per individuare i canali principali e le isole. La suddivisione in regioni sulla base delle differenti strutture morfologiche (isole, canali principali, canali secondari e aree golenali) permette di creare un layer di punti a differente densità. In particolare si intende realizzare un modello di punti che verrà utilizzato con il plugin BASEmesh, come già fatto in precedenza. La logica di individuare aree a differente densità di punti consente di ottenere un modello del terreno con una risoluzione maggiore solo dove richiesto (canali del torrente) e di ridurre all'essenziale la sua complessità.

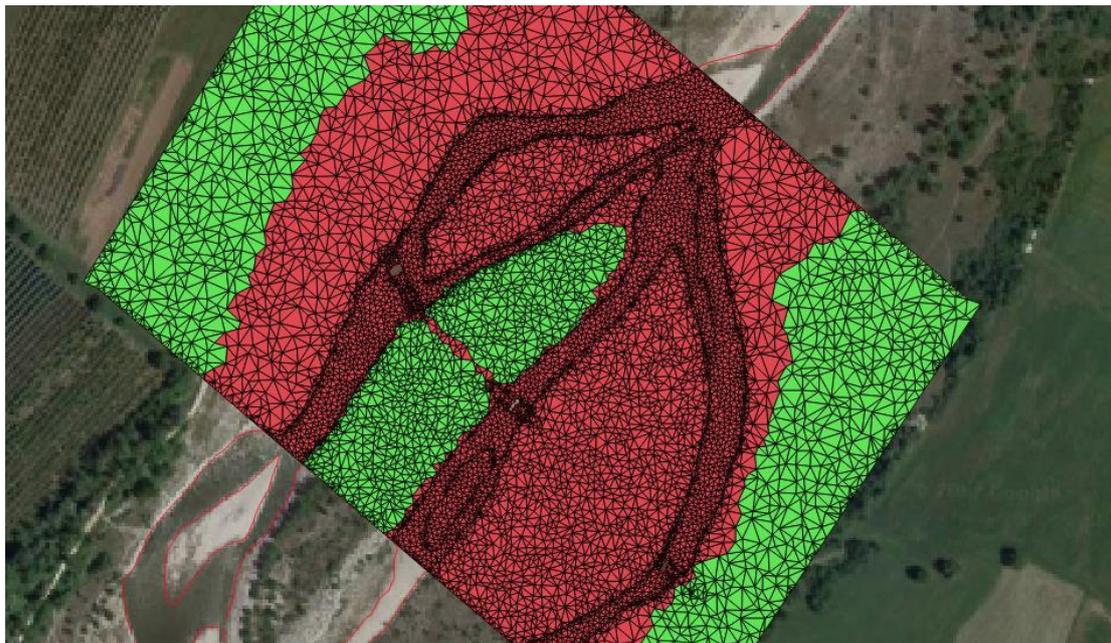


Figura 13.2: Triangolazione dei punti di zone a diversa densità (QGIS)

Ottenuto il modello geometrico occorre inserire la struttura di attraversamento nel letto del torrente. Anche in questo caso HEC-RAS si conferma più prestante in quanto nella finestra relativa alla geometria del file è presente un comando apposito capace di inserire uno sbarramento (inlet) con aperture circolari (culvert).

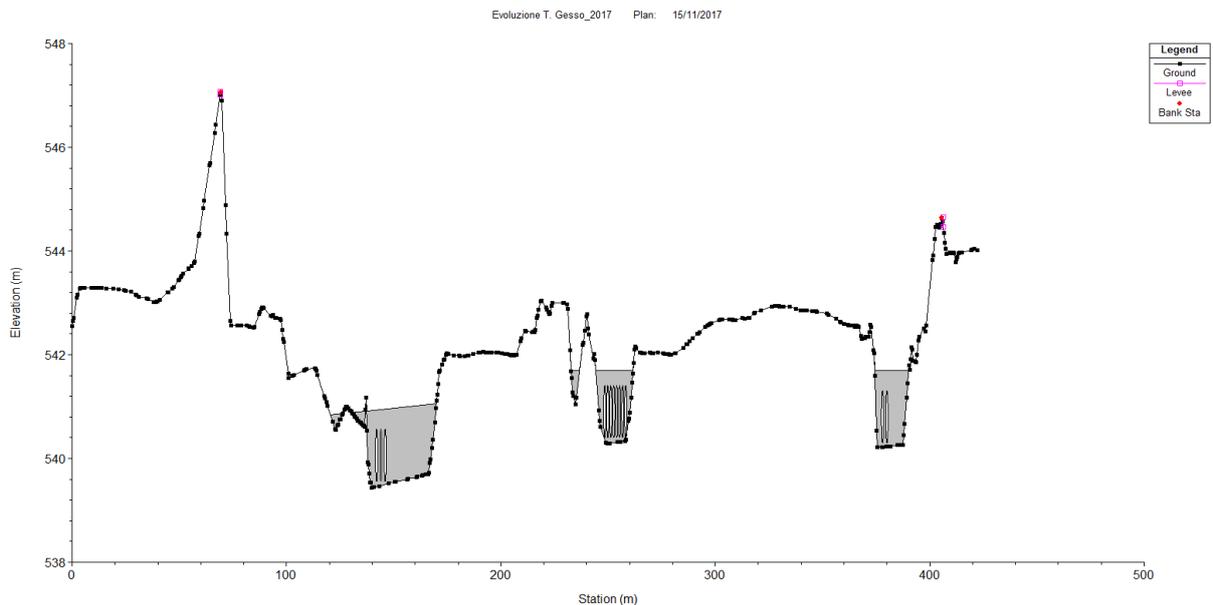


Figura 13.3: Sezione con guado e aperture in HEC-RAS (la scala delle quote è 20 volte più grande di quella delle distanze orizzontali)

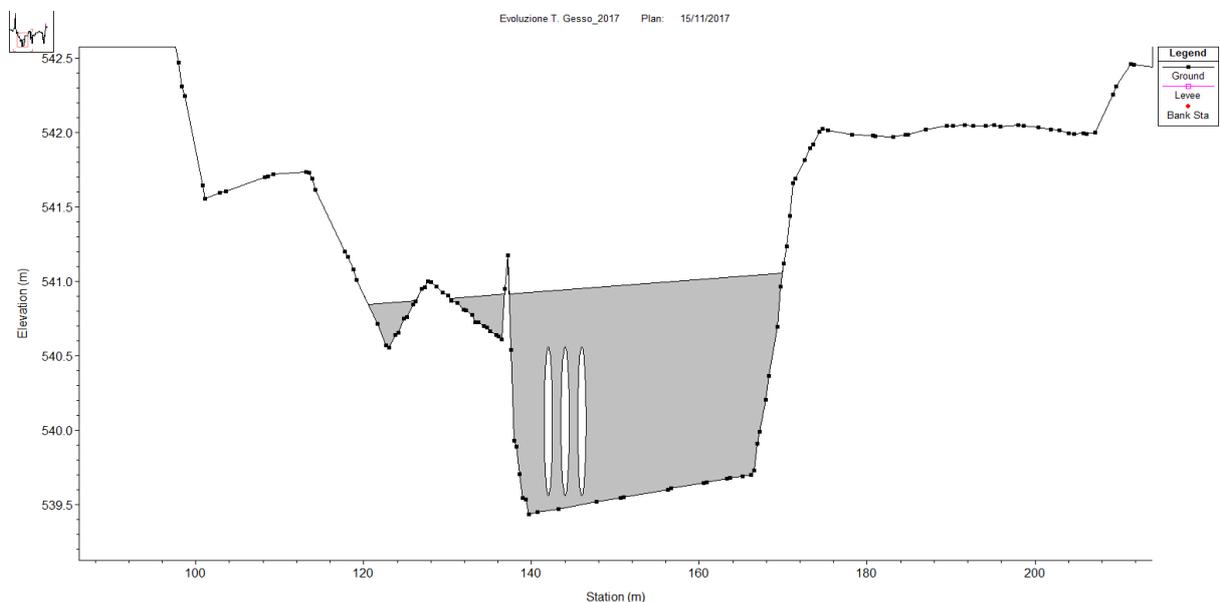


Figura 13.4: Particolare dei culvert nel canale in sinistra orografica

L'inserimento di condizioni di vincolo interne in BASEMENT avviene definendo una area all'interno della mesh. Compilando il file si andrà ad inserire una inner boundary sotto la tipologia "hQ relation" e si dovrà definire una legge che regola la portata in uscita a valle dell'apertura con il tirante idrico che si riscontra a monte della stessa. La definizione della curva di valori può essere ottenuta in diversi modi che vanno dall'applicazione di codici di calcolo alla combinazione delle formule matematiche che descrivono le diverse configurazioni dell'apertura. L'interpretazione del fenomeno non è immediata in quanto, oltre a prevedere le varie fasi di luce a pelo libero, in pressione e il caso di luce in pressione con sfioro superiore per portate rilevanti occorre tenere in conto l'interferenza dovuta alla

presenza di più aperture ravvicinate. Per superare queste complicazioni si decide di utilizzare il modello HEC-RAS per ottenere nella sezione di monte dell'attraversamento la curva di valori desiderata come output di una simulazione idraulica.

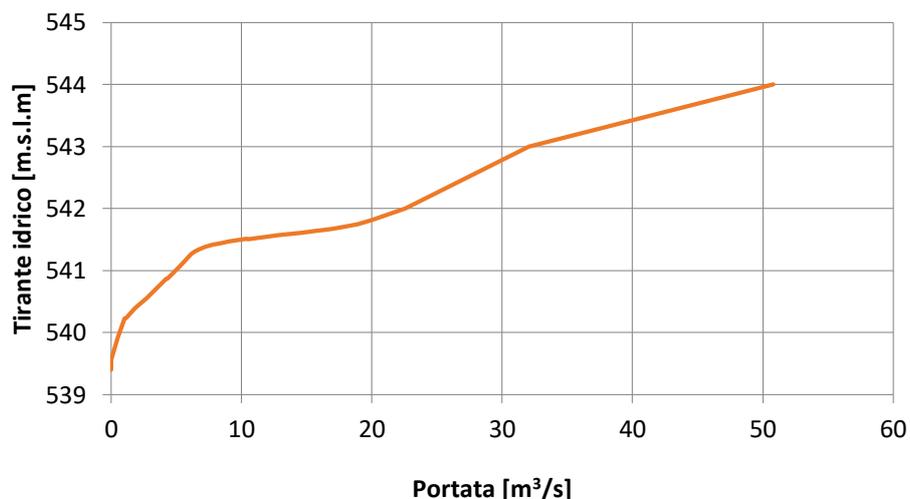


Figura 13.5: Curva di variazione tirante portata per il canale di sinistra

Tabella 13.1: Rating curve h-Q per i tre canali

Canale di sinistra		Canale centrale		Canale di destra	
W.s.e. [m.s.l.m]	Q [m³/s]	W.s.e. [m.s.l.m]	Q [m³/s]	W.s.e. [m.s.l.m]	Q [m³/s]
539.35	0.00	539.50	0.00	540.00	0.00
539.56	0.00	540.00	0.00	540.30	0.00
539.91	0.50	540.59	0.50	540.70	0.50
540.23	1.04	540.68	1.00	540.88	1.02
540.24	1.15	540.74	1.50	541.21	2.15
540.40	1.86	540.89	3.00	541.30	2.66
540.87	4.32	541.05	5.00	541.35	3.20
541.26	6.15	541.19	7.00	541.34	3.33
541.34	6.73	541.27	8.00	541.40	4.40
541.38	7.24	541.41	10.00	541.47	6.41
541.44	8.32	541.50	11.00	541.53	9.15
541.51	10.40	541.58	12.00	541.52	9.23
541.50	10.48	541.66	13.00	541.60	12.90
541.57	12.90	541.71	14.00	541.68	17.07
541.68	17.32	541.72	15.00	541.71	17.99
541.75	18.90	541.76	17.00	541.75	18.82
541.81	20.00	541.77	18.00	541.81	19.98
542.00	22.57	541.79	19.00	542.00	21.69
543.00	32.03	541.80	20.00	543.00	28.36
544.00	50.79	541.90	30.00	544.00	37.80

13.1 Simulazione lunga con HEC-RAS

Il nuovo modello ricostruito per la configurazione del 2017 è stato introdotto in HEC-RAS per essere sottoposto a una simulazione di lunga durata al fine di valutare l'evoluzione del profilo dell'asta, naturalmente a seguito di una necessaria operazione di taratura della componente morfologica.

Come per la situazione relativa al 2003, le sezioni sono state estratte dal modello topografico realizzato in QGIS con i comandi del plugin BASEmesh. In seguito sono state condotte successive simulazioni con svariate combinazioni dei parametri morfologici. Il processo iterativo ha consentito l'ottenimento di una legge di trasporto adeguata al modello in analisi, i cui parametri sono riportati in Tabella 13.2.

Tabella 13.2: Valori per la calibrazione del modello morfologico del 2017

Parametri di calibrazione			
α	θ_{cr}	C	P
0.0058	0.047	2.1	1.28

In Figura 13.6 è possibile osservare l'evoluzione del profilo del fondo del torrente dopo una lunga simulazione con portate contenute; il profilo subisce piccole deviazioni dalla condizione di partenza.

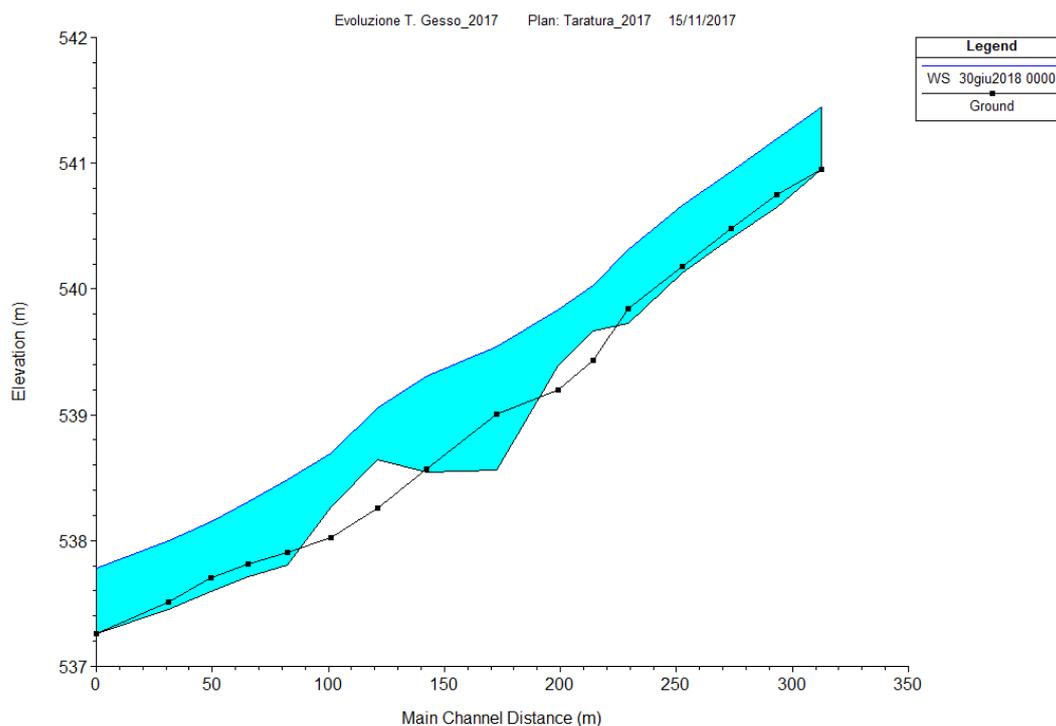


Figura 13.6: Evoluzione del fondo per la configurazione del 2017 prima della realizzazione del guado

In seguito si modifica la geometria inserendo un “inlet” e le aperture come da progetto. Quello che ne deriva è un parziale arresto del flusso di sedimenti che si accumulano a valle dell’opera. Per soddisfare la capacità di trasporto del flusso idrico, a valle dell’opera si genera un fenomeno di erosione localizzata. Lo scopo dell’analisi morfodinamica consiste nel valutare le principali dimensioni della buca e il raggiungimento di una configurazione stabile.

La Figura 13.7 mette in evidenza la configurazione al termine di una simulazione con l’idrogramma descritto dalla Figura 12.6 in cui a 5 anni di misure si fa seguire un evento con tempo di ritorno di 200 anni e nuovamente una serie di 5 anni di portate contenute.

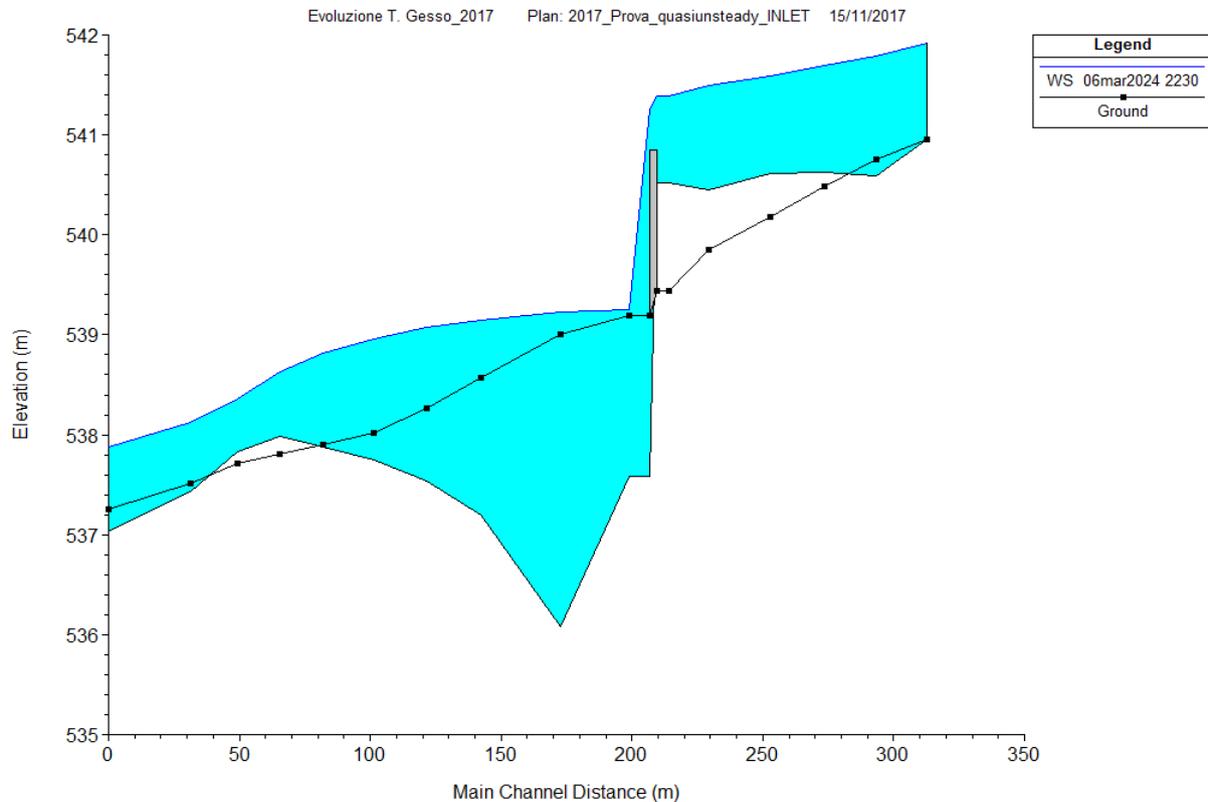


Figura 13.7: Configurazione del profilo dell’asta a fine simulazione

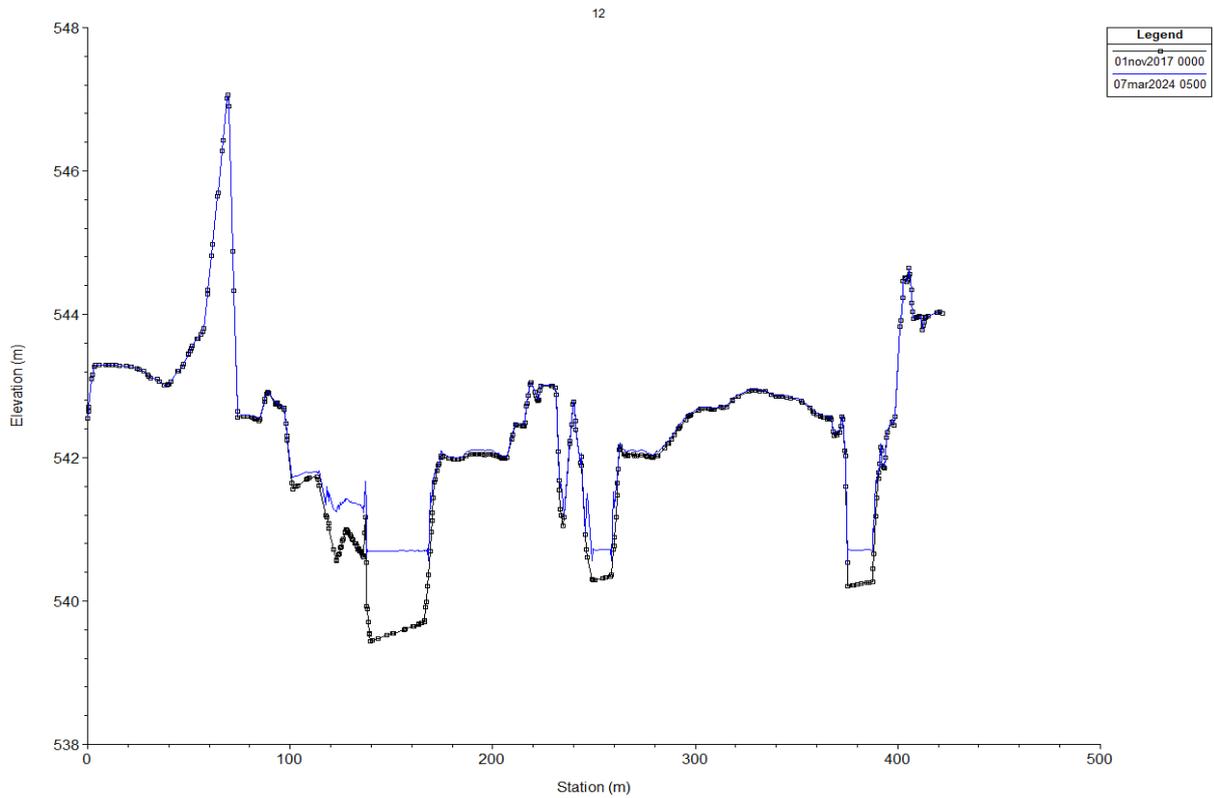


Figura 13.8: Sezione a monte del guado a fine simulazione

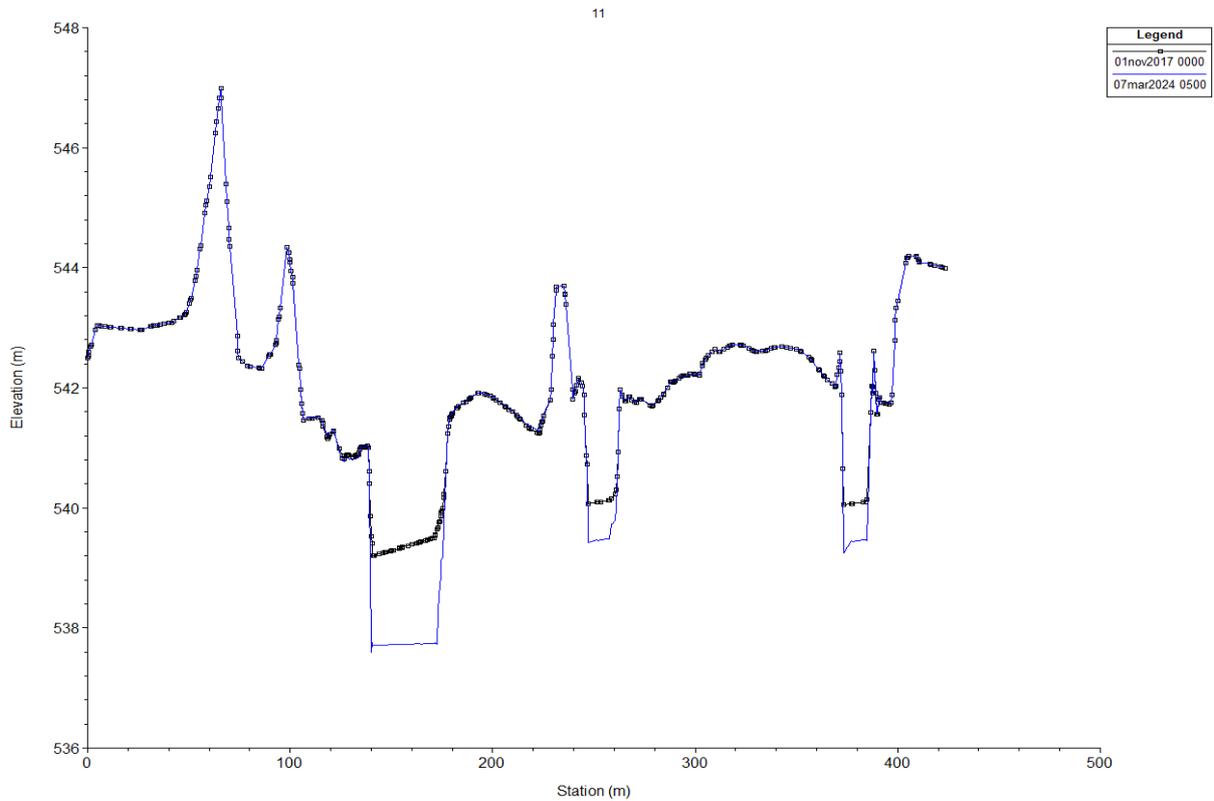


Figura 13.9: Sezione a valle del guado a fine simulazione

Quello che si osserva è che un valore stabile per la profondità della buca di erosione viene raggiunto prima dell'evento di piena, in seguito, al manifestarsi della portata di picco, l'erosione aumenta ma entro valori contenuti per poi tornare alla configurazione pre-evento. La buca di erosione raggiunge una profondità massima di circa 2.5 m dal fondo del torrente presso la sezione numero 10 del modello.

13.2 Simulazione evento piena con HEC-RAS

Una simulazione condotta come al punto 13.1 non rappresenta in modo completo il comportamento dell'opera a fronte dell'evento di piena, in particolare non viene tenuto conto della labilità dell'opera che, essendo realizzata in materiale sciolto, subisce processi di asportazione e erosione quando il tirante idrico supera l'altezza di soglia della struttura.

Torna utile far notare che in tempi passati, a seguito di alluvioni i tubi in calcestruzzo che costituivano parte delle vecchie strutture venivano ritrovati centinaia di metri a valle del luogo di posa.

L'utilizzo di uno sbarramento modellato come "inlet" consiste nella imposizione di una parete fissa e non interessata dalle meccaniche di trasporto solido. Di conseguenza se si vuole valutare la labilità della struttura occorre modificare le sezioni a valle e a monte del guado per modellare la presenza di un rilevato che ha le medesime caratteristiche del fondo alveo.

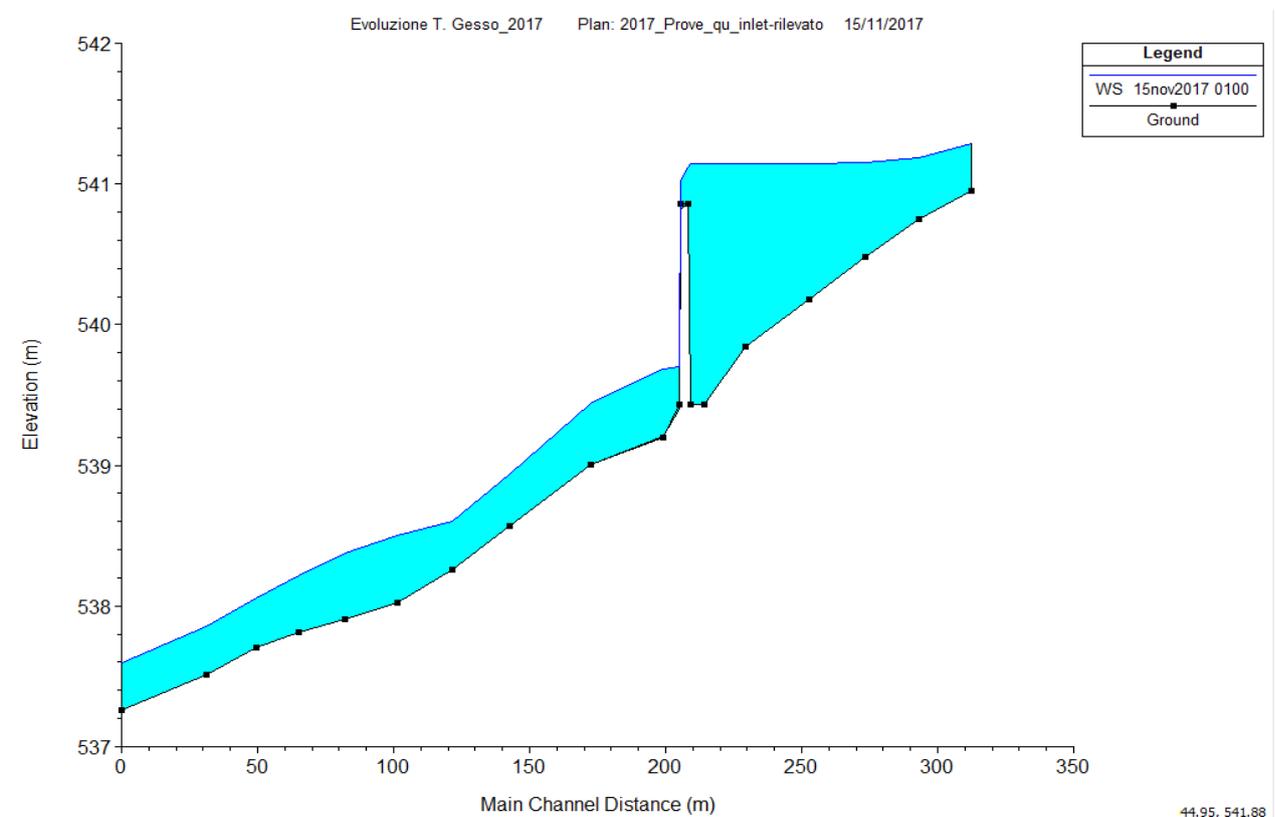


Figura 13.10: Profilo dell'asta a inizio simulazione

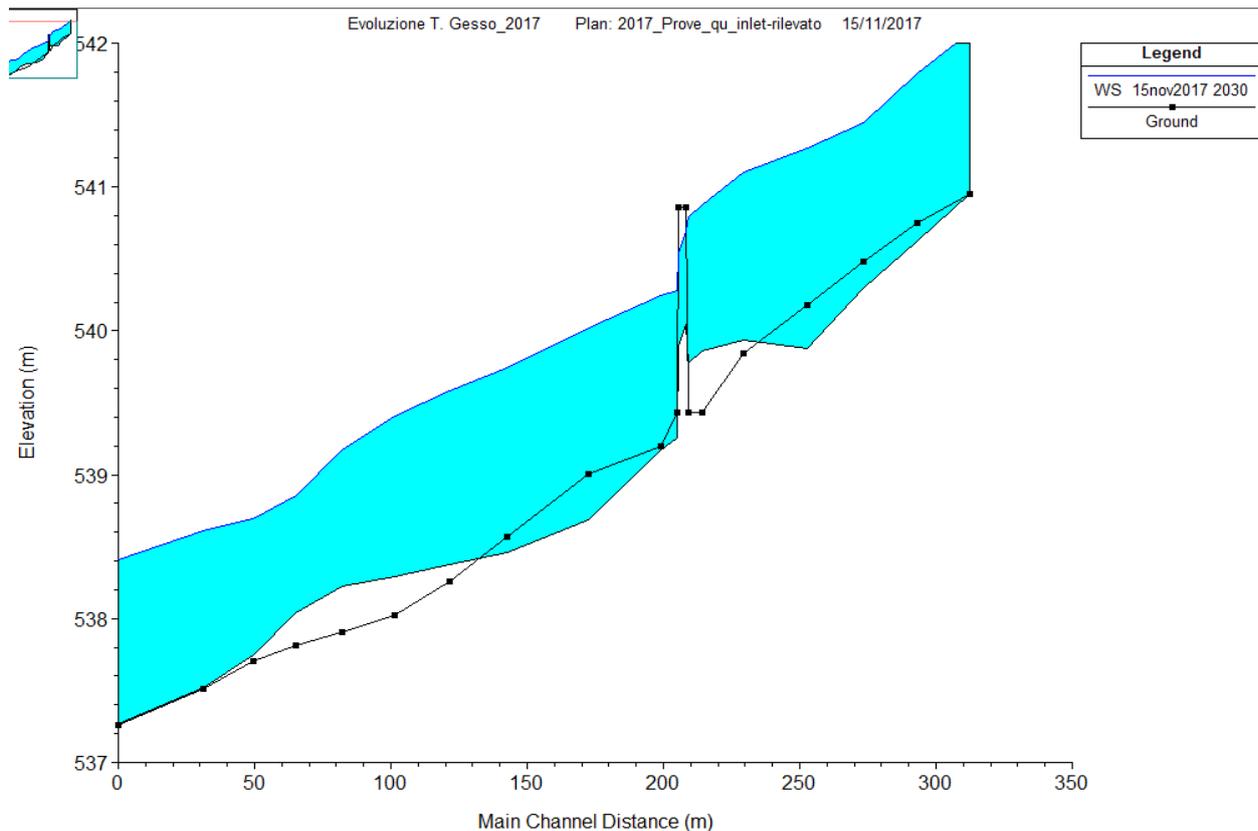


Figura 13.11: Profilo dell'asta al termine dell'evento di piena

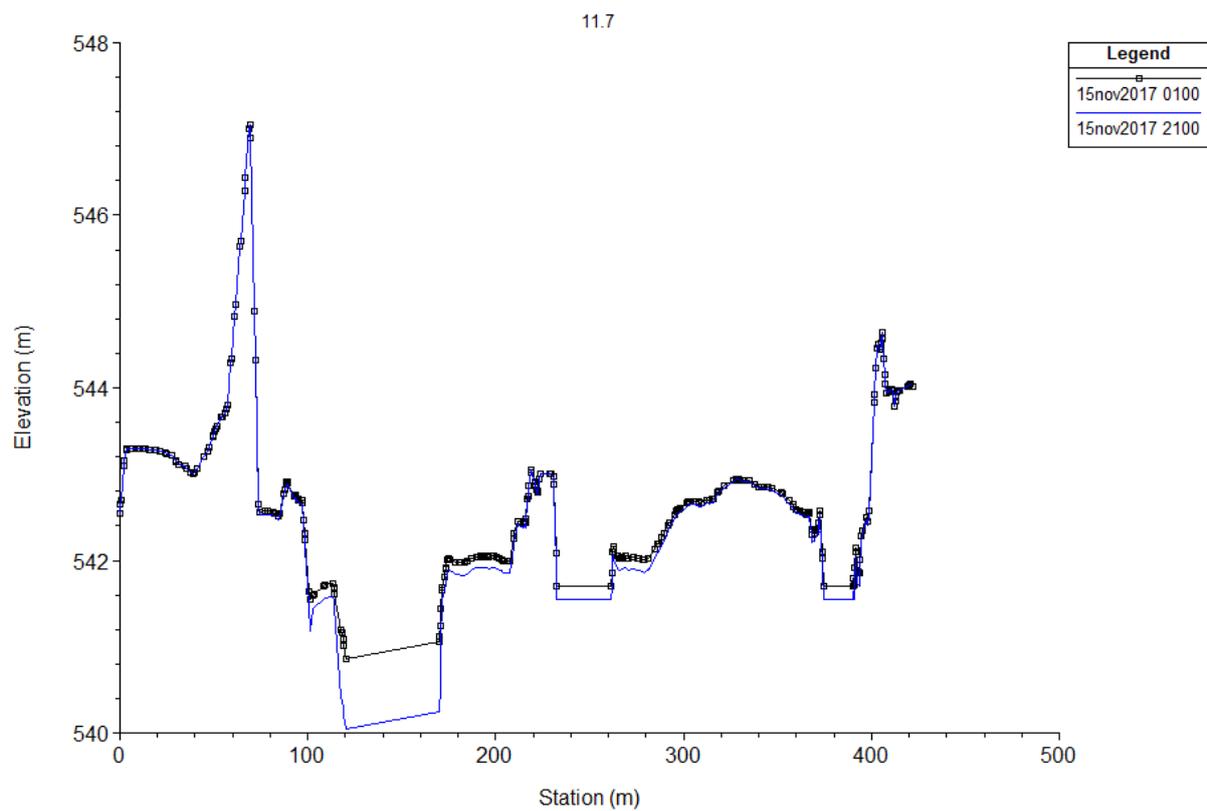


Figura 13.12: Evoluzione della sezione contenente il rilevato

Anche in questo caso si commette un errore di valutazione in quanto non è possibile modellare l'effetto delle aperture, imprecisione che diventa trascurabile se si considera che durante un evento di piena i tubi possono risultare, nel caso più sfavorevole, intasati da sedimento e materiale organico.

La simulazione mostra un progressivo deterioramento della struttura, che in seguito all'evento dovrà essere interessata da lavori di manutenzione per il ripristino del servizio.

13.3 Simulazione lunga con BASEMENT

Il modello 2D è stato utilizzato per una simulazione di lunga durata con portate contenute. Le Figure 13.13 e 13.14 mostrano i valori di tirante e la misura della deviazione dalla configurazione iniziale del fondo al termine della simulazione.

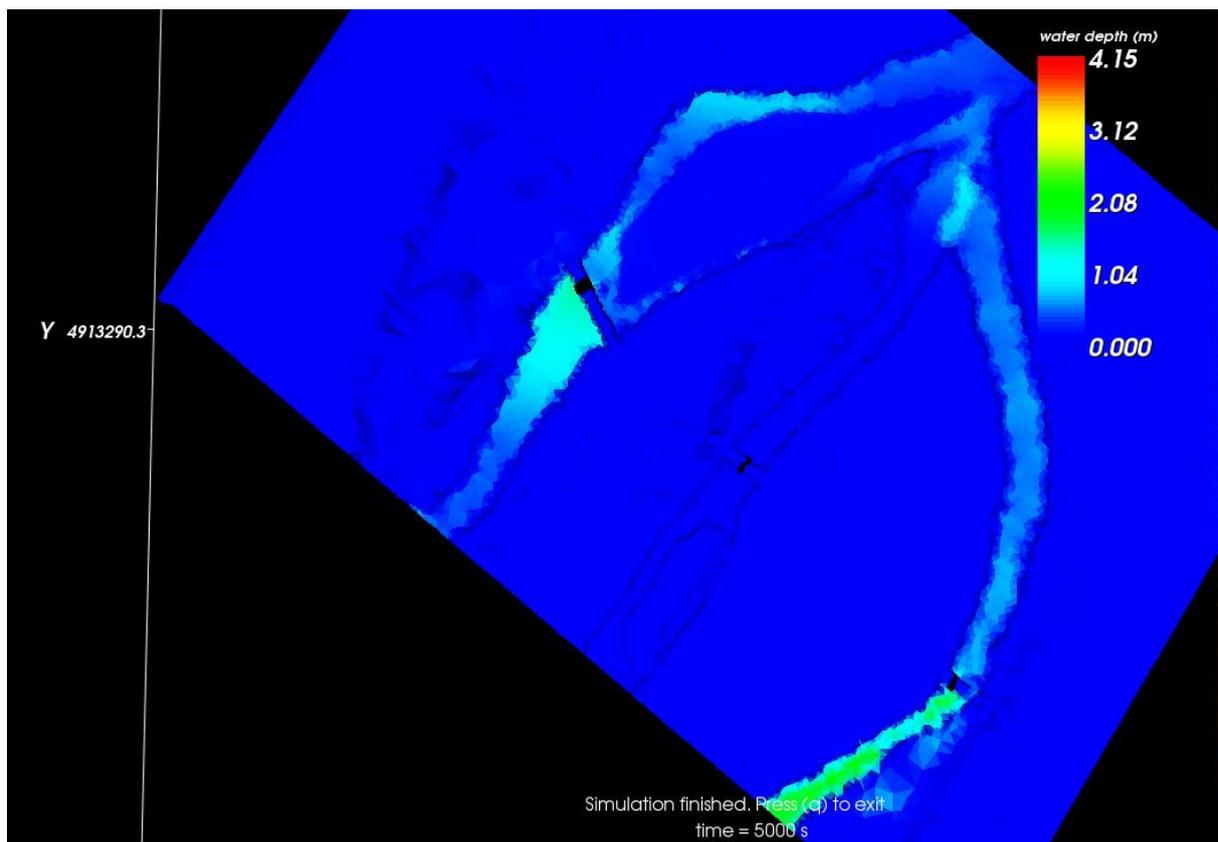


Figura 13.13: Valori del tirante per ogni elemento della mesh

Dalla Figura 13.13 si nota che il canale centrale del torrente rimane asciutto, questo è conseguente al modesto valore delle portate utilizzate e al fatto che il canale ha una quota di fondo superiore a quella dei laterali.

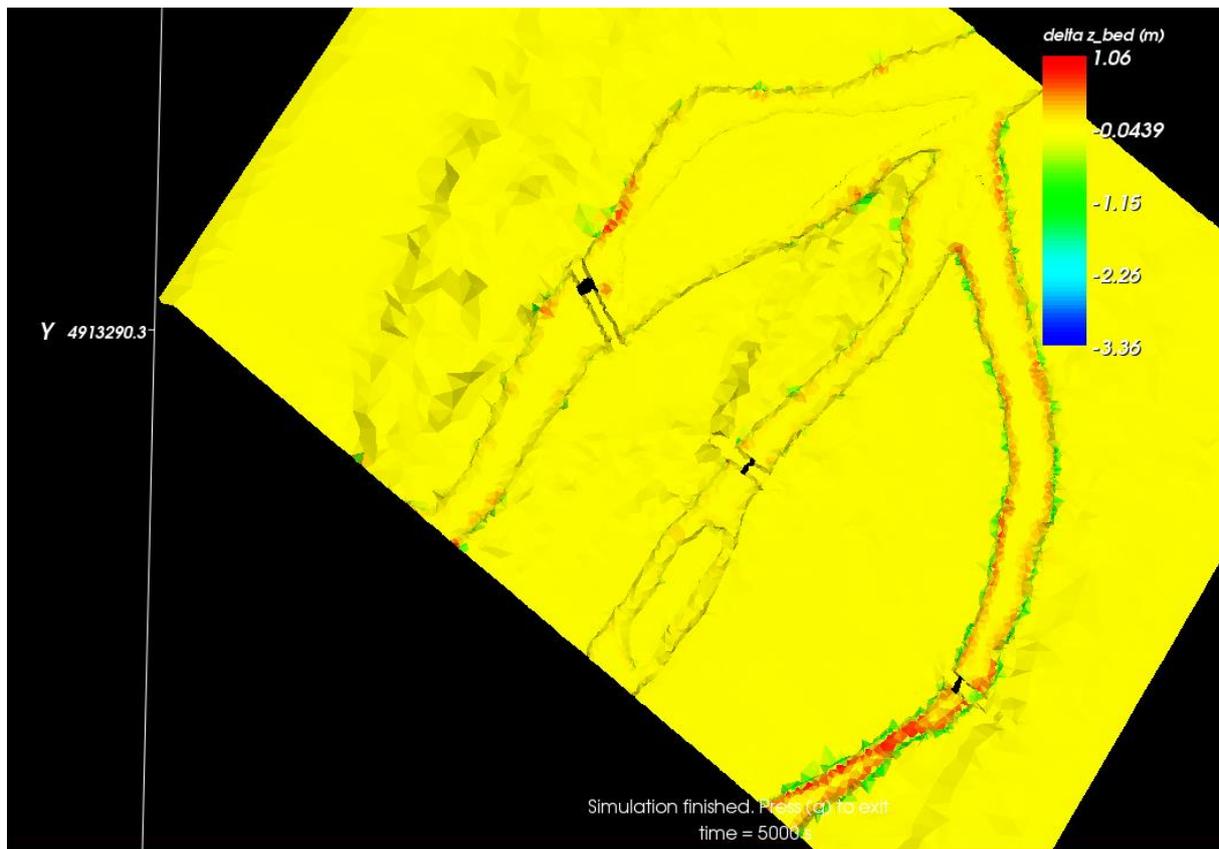


Figura 13.14: Variazione della quota del fondo per ogni elemento della mesh

La Figura 13.14 mette in evidenza le zone in cui avvengono meccanismi di erosione e deposito nell'alveo del torrente. Si nota che il valore di picco relativo allo sterzo è di 3.36 m. Gli elementi della mesh cui viene assegnato il valore di picco si trovano sulla scarpata del rilevato che costituisce l'attraversamento; per questa ragione, per definire l'abbassamento rispetto al piano medio del fondo occorre scorporare la quota dell'elemento. Se si ragiona in questi termini si ottiene una dimensione dell'erosione comparabile con il risultato della simulazione eseguita con HEC-RAS al punto 13.1.

I fenomeni morfologici che si osservano in corrispondenza delle scarpate dei canali, principalmente in quello di destra, sono dovuti al collasso spondale per meccanismi gravitazionali.

14 Conclusioni

I due programmi utilizzati si differenziano profondamente per molti aspetti. Già dal primo utilizzo il software HEC-RAS appare più trasparente dato che la geometria, le successive modifiche della stessa e l'inserimento di strutture idrauliche sono direttamente visualizzabili nel piano della singola sezione o nello spazio dell'intero modello o di una sua porzione. Più complesso e meno chiaro si presenta invece il programma del Politecnico di Zurigo, il quale per ogni modifica della geometria del modello richiede il ricorso a un software esterno (ad es. QGIS). Anche il processo di inserimento di una struttura all'interno del modello comporta la modifica di una porzione di geometria e non è operabile direttamente dalla finestra principale di BASEMENT.

Un fattore importante per BASEMENT è la possibilità di eseguire simulazioni con un modello spaziale con il calcolo del trasporto dei sedimenti, possibilità che il software della U.S. Army offre solo per il modello discretizzato in sezioni e a flusso monodimensionale, essendo la modellazione spaziale limitata a scopi idraulici e non ancora morfologici (HEC-RAS: 2D Modelling User Manual).

Per quanto riguarda i tempi di calcolo occorre operare un confronto tra modelli spaziali della stessa dimensione, dato che lo studio bidimensionale utilizzato con BASEMENT risulta naturalmente più complesso dei sistemi descritti con sezioni. Si rammenta che il modello bidimensionale in HEC-RAS è previsto strettamente per la modellazione delle aree golenali finalizzata alla mappatura delle aree di pericolosità; attualmente la modellazione bidimensionale non consente difatti le valutazioni di trasporto solido.

La costruzione del modello spaziale con BASEmesh rappresenta una fase cruciale del processo di simulazione; da dimensione e qualità della mesh dipenderanno la presenza di instabilità, i tempi di calcolo, la precisione e l'affidabilità dell'output. Dalla dimensione della mesh e dalla sua morfologia dipenderà fortemente il tempo di calcolo della simulazione. Per il caso in studio, caratterizzato da canali incisi nell'alveo che si saturano per portate contenute si verifica un rapido allagamento di una regione estesa con un basso tirante. Questo fattore, unito alla presenza di più canali induce un effetto negativo sulla simulazione il cui tempo di calcolo diventa proibitivo per lunghi tempi di studio. Proprio per questa ragione non è stato possibile condurre uno studio con BASEMENT per la valutazione della piana allagata con un evento avente tempo di ritorno di 200 anni.

Il software BASEMENT consente di tenere in conto l'effetto della presenza di forme di fondo e della curvatura dell'alveo nonché i fenomeni di circolazione secondaria in direzione trasversale al canale che possono indurre un carattere meandriforme al fiume. Il modulo numerico prevede il ricorso a un sistema di risoluzione di tipo implicito che viene indicato in particolare per analisi lunghe e morfodinamiche; di fatto tale implementazione non è ancora disponibile nella versione attuale e quindi l'unica opzione possibile ricade sul metodo esplicito.

Una utile opzione consentita dal software del Politecnico Federale di Zurigo è quella che consente all'utilizzatore di modificare una variabile chiamata predeterminata durante la fase di compilazione, ad esempio la portata fluida in ingresso per controllare il comportamento del modello o mirare a ottenere una desiderata configurazione in una sezione o in un punto.

Anche la consultazione dell'output delle simulazione è differente per i due software: HEC-RAS consente di ottenere il profilo con il tirante idrico o l'evoluzione del fondo in forma di profilo o sezione per sezione. E' inoltre possibile ottenere delle leggi in forma di curva di valori che legano due variabili di deflusso ("rating curve").

I principali output di BASEMENT sono invece forniti come file di testo per quanto concerne l'analisi monodimensionale e mappe di valori non direttamente consultabili senza specifico programma per la parte studiata con modello 2D. La stessa consultazione dell'evoluzione delle singole sezioni per il modello 1D è resa complessa dalla necessità di scaricare il software Tecplot (non open source) o in alternativa dal post-trattamento dei dati per poi affidare la visualizzazione a un plot gestito in Excel o con Matlab.

La realizzazione del guado ciclo-pedonale ha evidenziato in una simulazione eseguita con HEC-RAS che l'effetto di rigurgito provocato dalla parziale ostruzione al flusso, a monte risulta contenuto in termini di elevazione e di distanza per portate basse e elevate.

La Figura 14.1 mostra i profili della corrente prima della realizzazione dell'opera e a costruzione avvenuta, per $15 \text{ m}^3/\text{s}$ (PF1), $40 \text{ m}^3/\text{s}$ (PF2) e $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ (PF3).

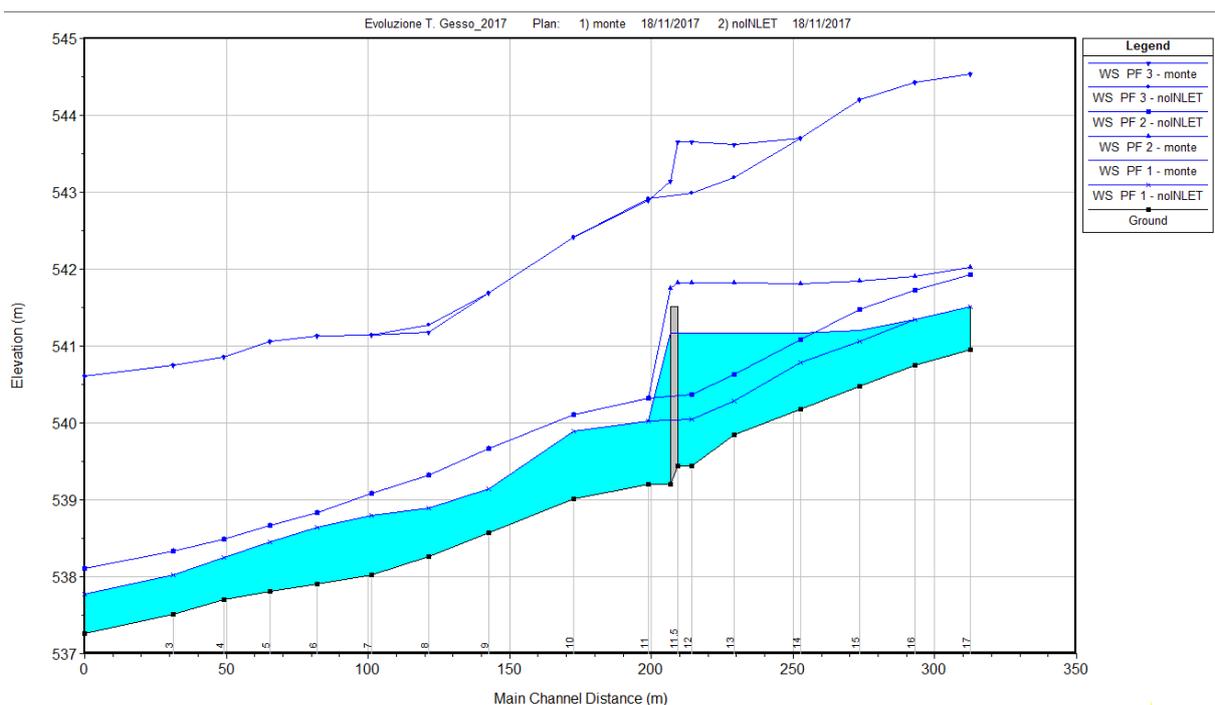


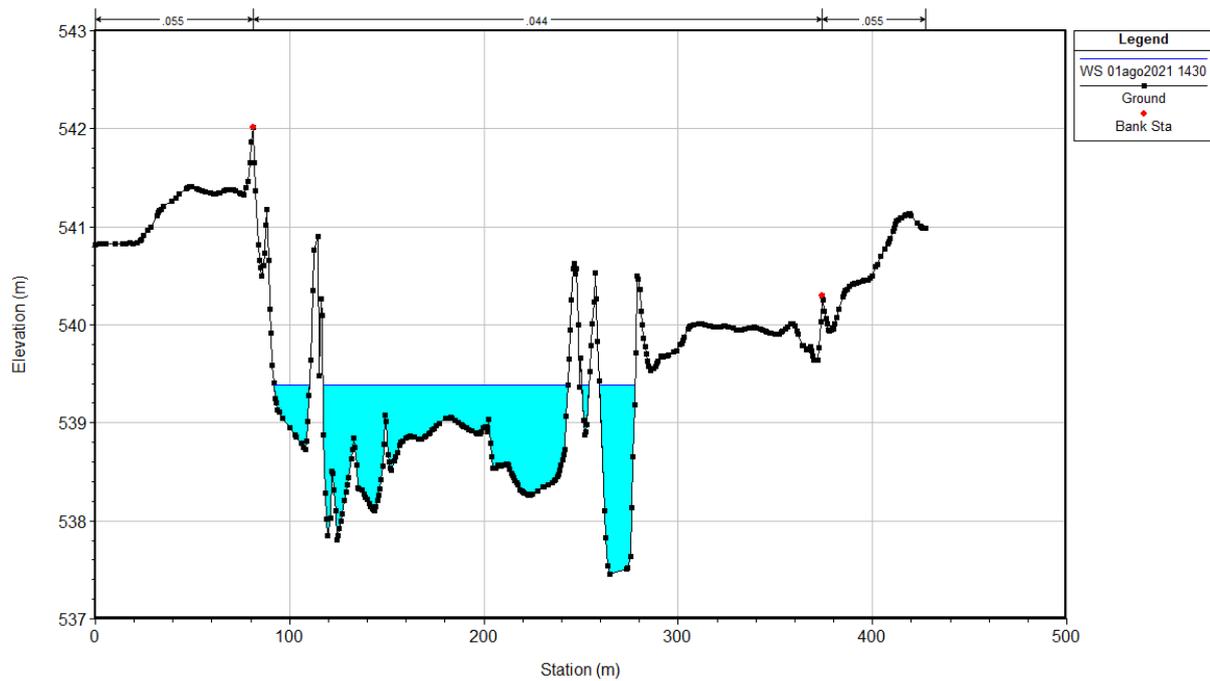
Figura 14.1: Rigurgito a monte della struttura per diversi valori di portata di deflusso

Dalla simulazione eseguita al punto 13.2 si evidenzia la labilità dell'opera che diventa trasparente per deflussi elevati e subisce fenomeni di asportazione del materiale costituente. Nel periodo successivo a un evento di piena il guado dovrà essere oggetto di lavori di manutenzione.

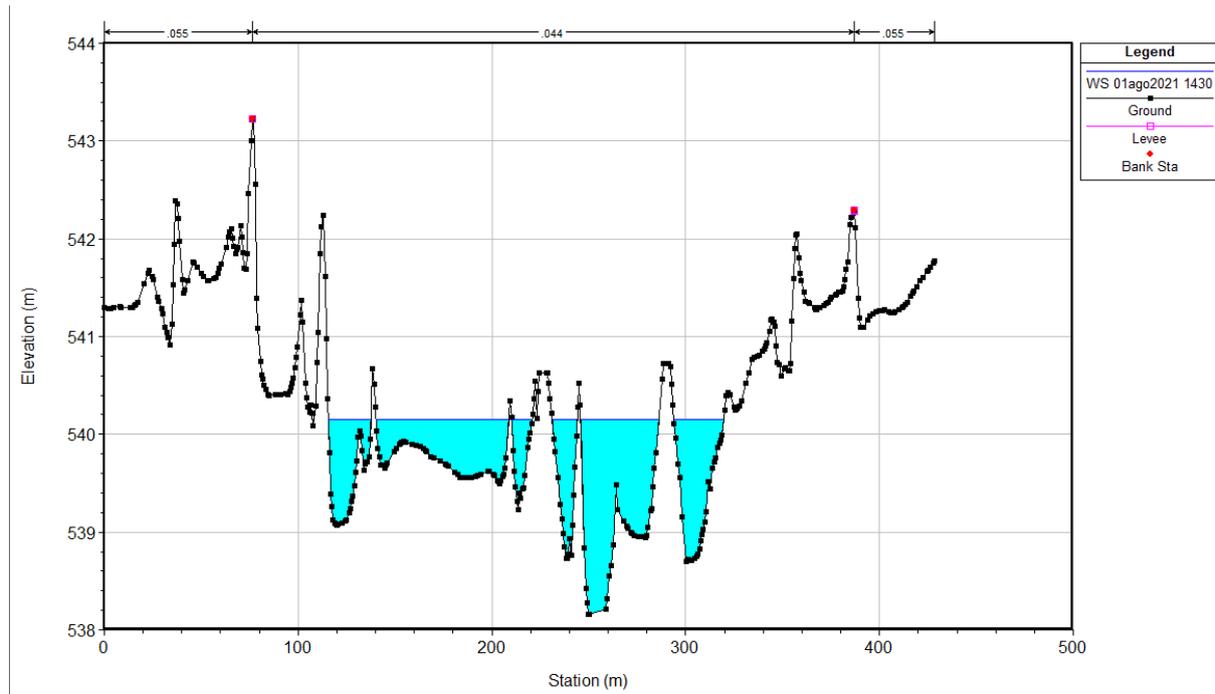
Il programma HEC-RAS ha consentito lo svolgimento di una simulazione morfodinamica di lunga durata comprendente un evento corrispondente a un tempo di ritorno di 200 anni; tale studio ha consentito la stima della profondità di equilibrio della buca di erosione che si genera a valle del guado in 2.5 m circa. BASEMENT prevede durate di simulazione più contenute per un modello bidimensionale, in quanto i tempi computazionali crescono drasticamente con l'orizzonte temporale dell'analisi; per il tempo simulato, il software conferma i risultati ottenuti con il programma dell'U.S. Army.

Allegati

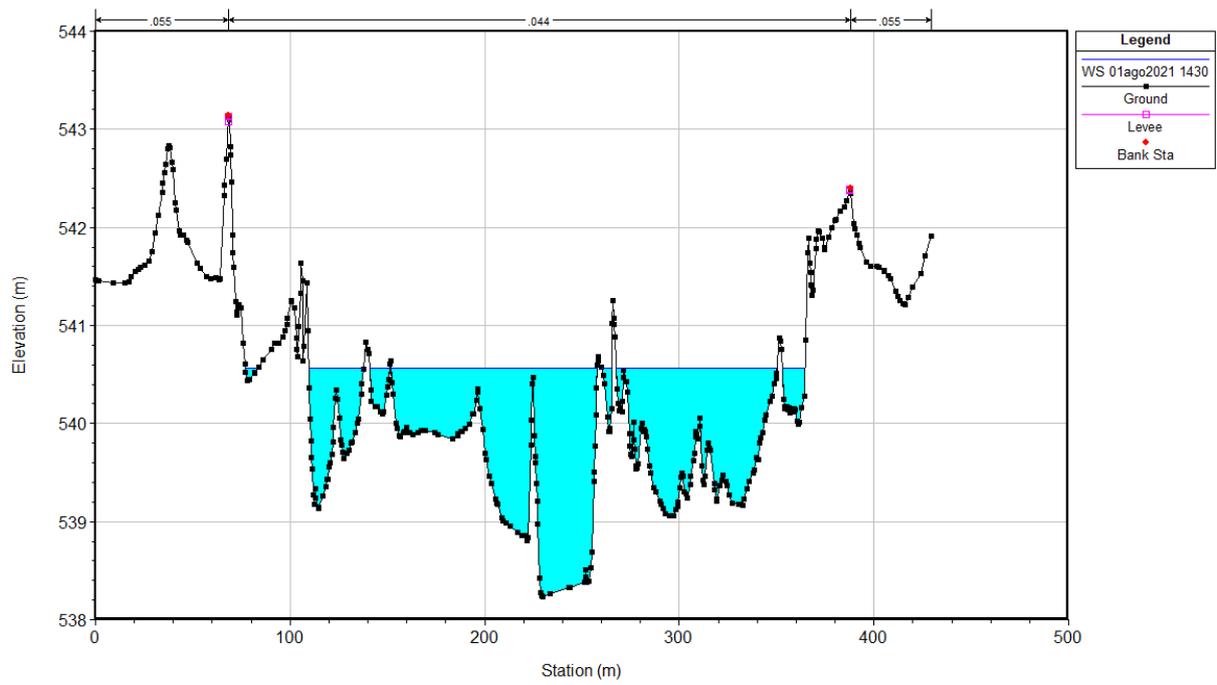
- Sezioni del modello 1D BASEMENT- HEC-RAS per la configurazione del 2003



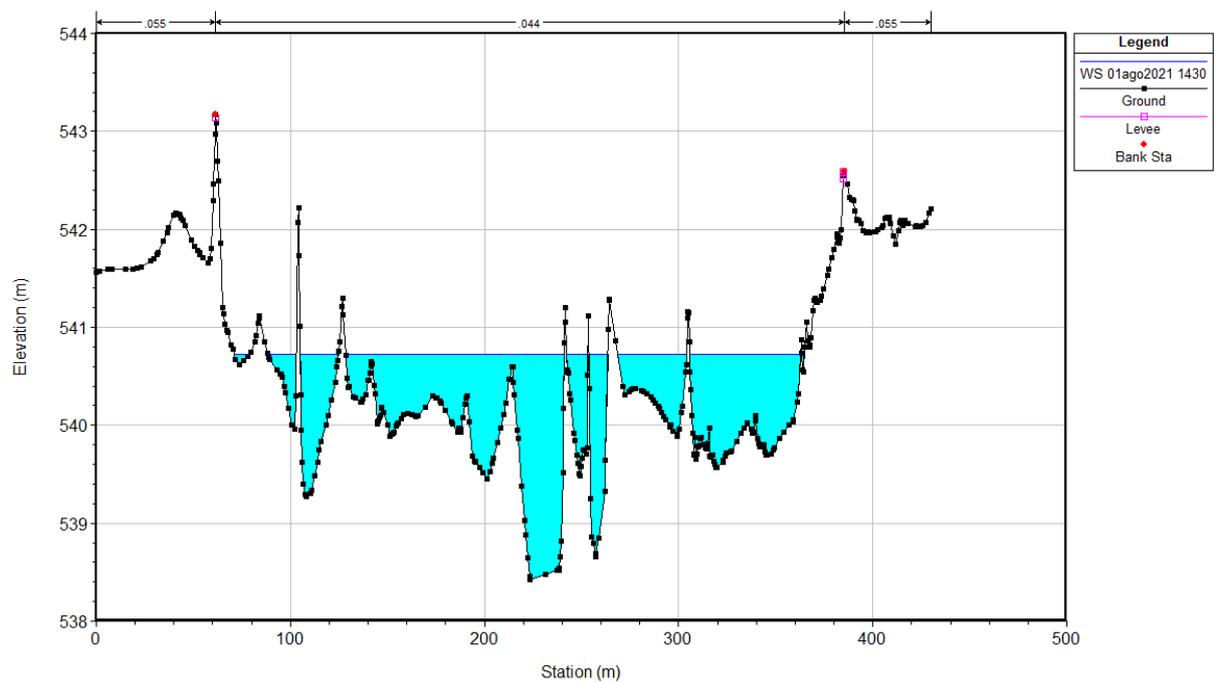
Sezione 2



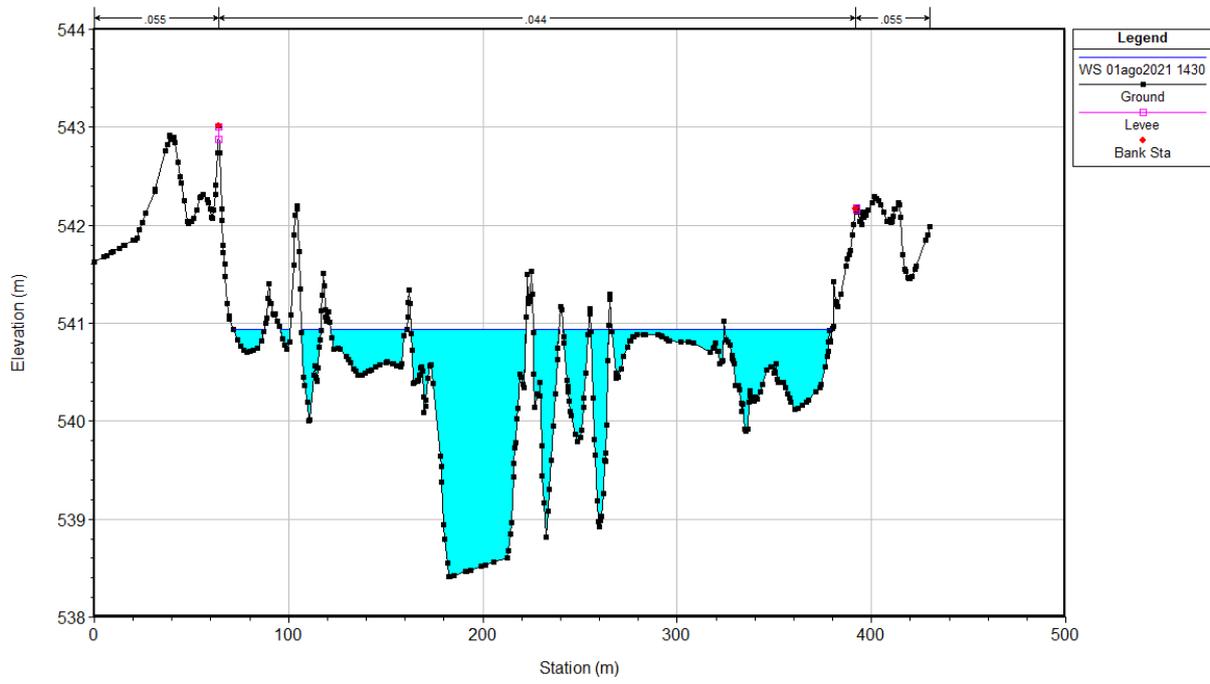
Sezione 4



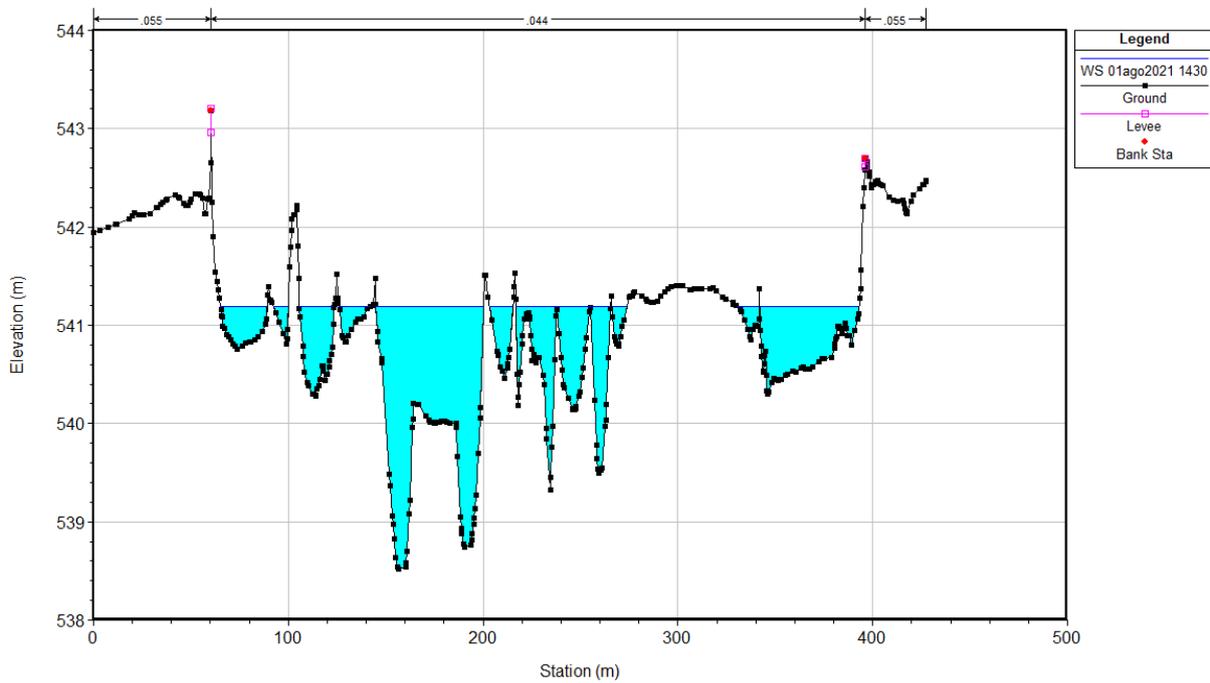
Sezione 5



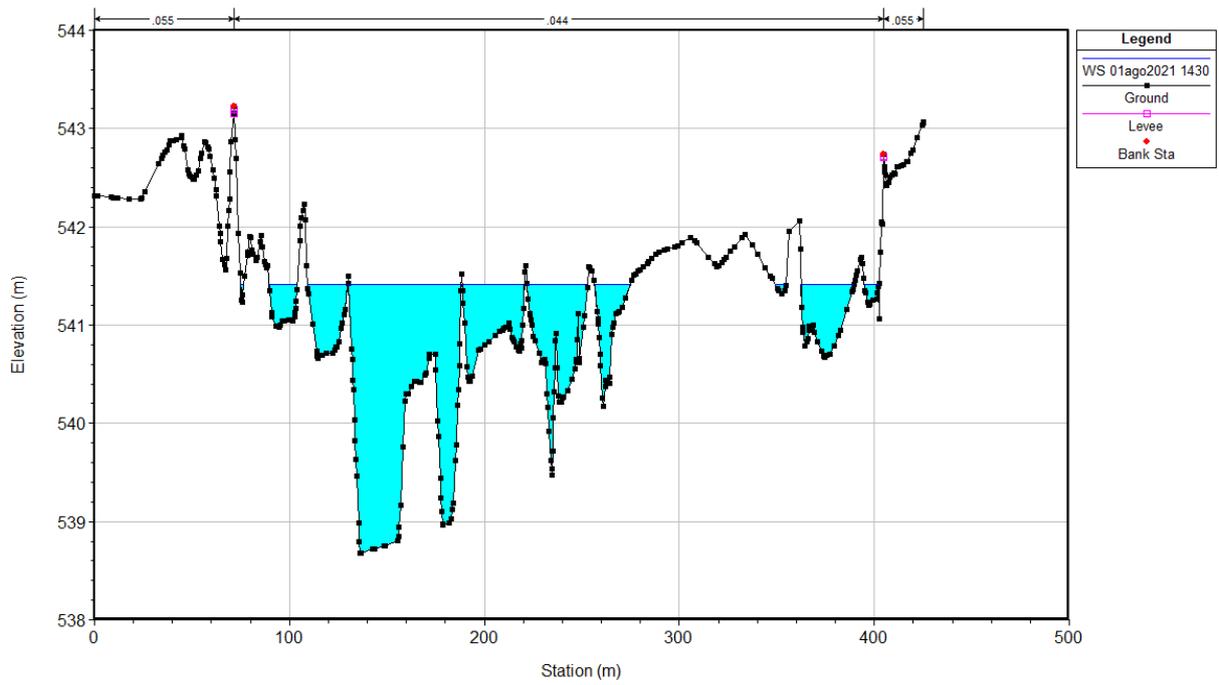
Sezione 6



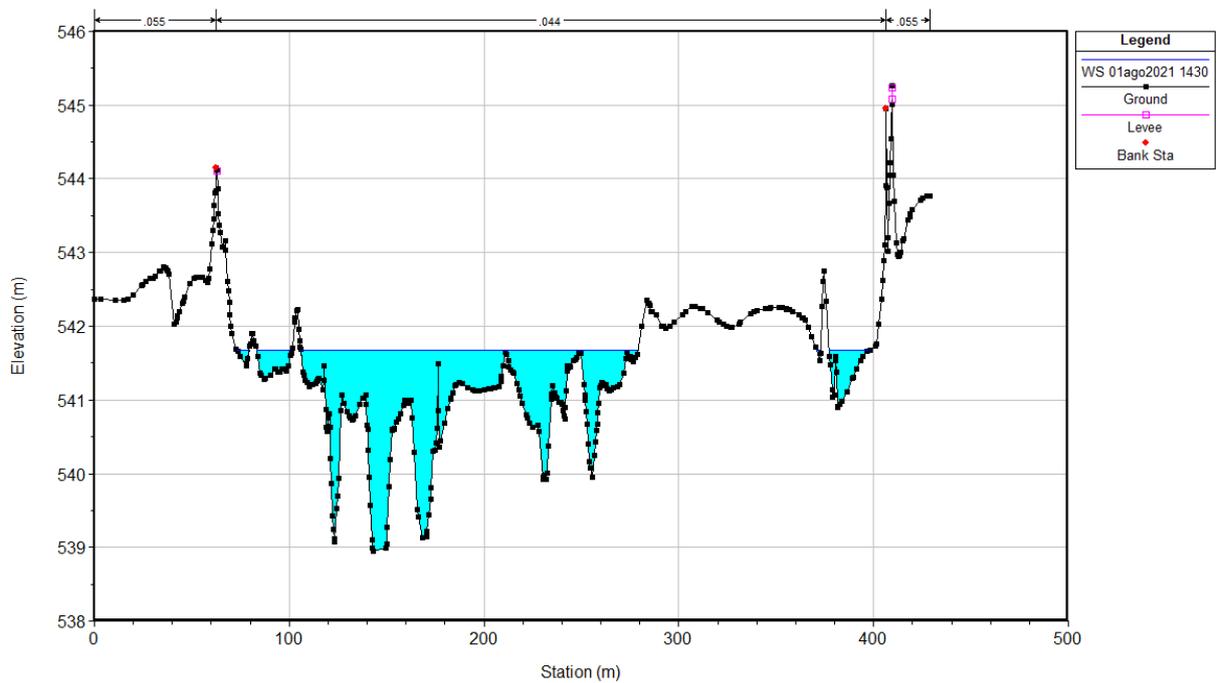
Sezione 7



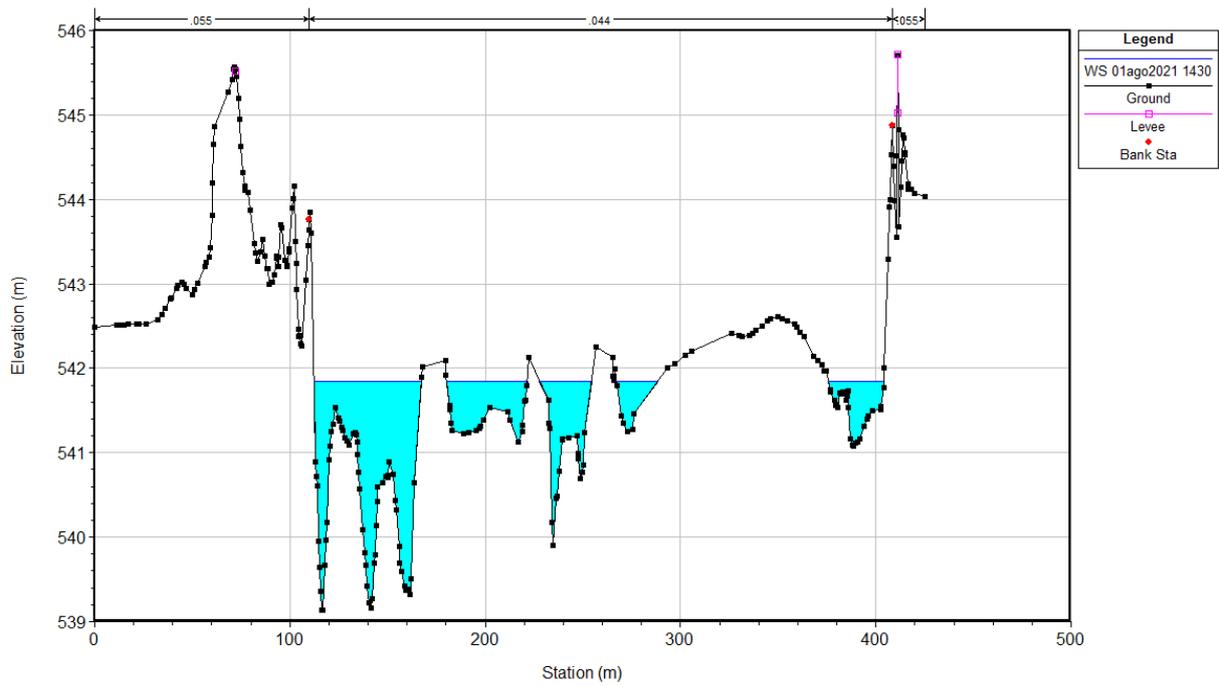
Sezione 8



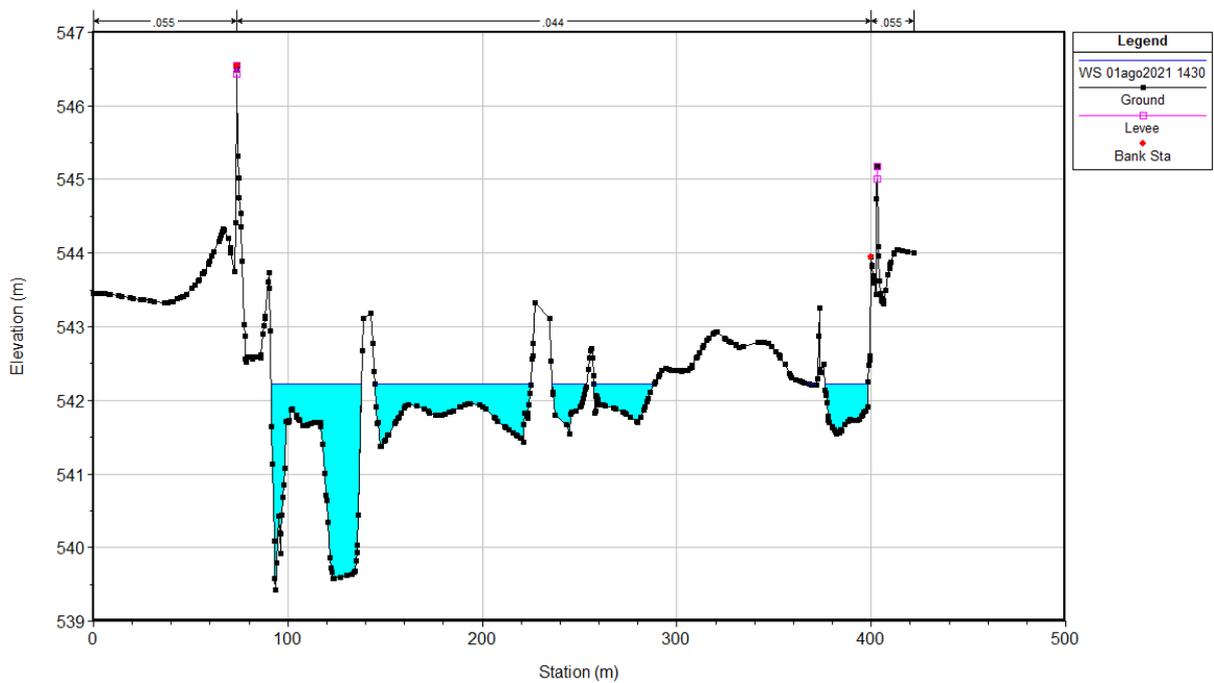
Sezione 9



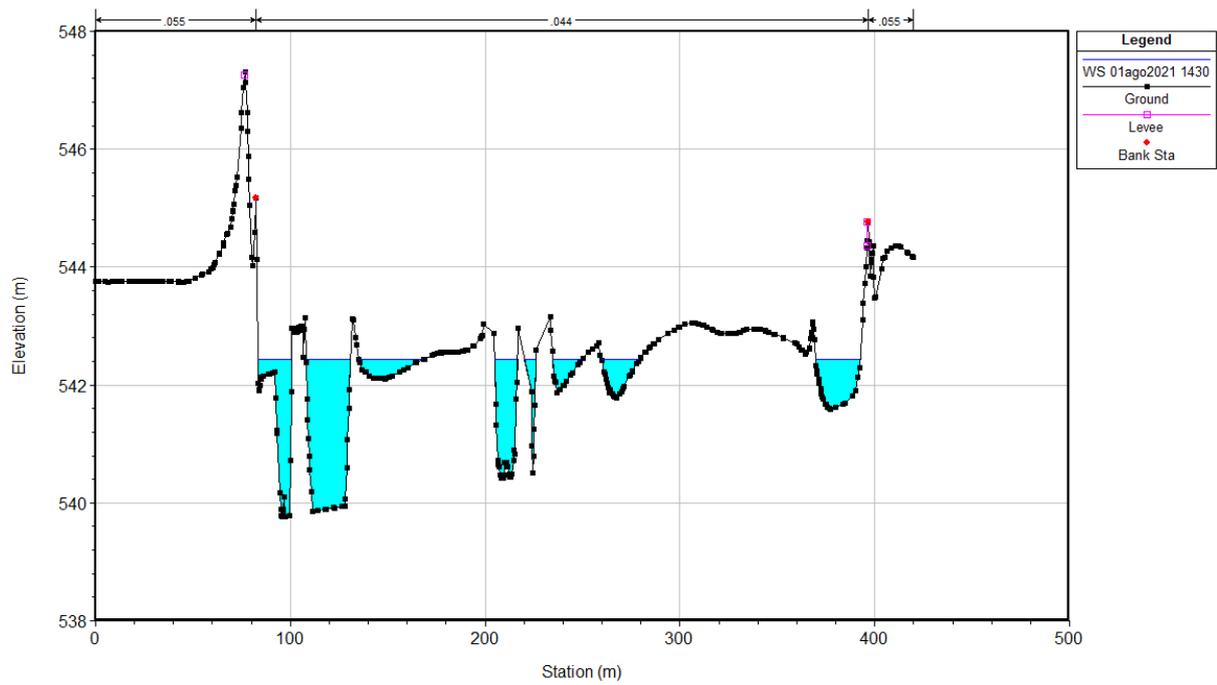
Sezione 10



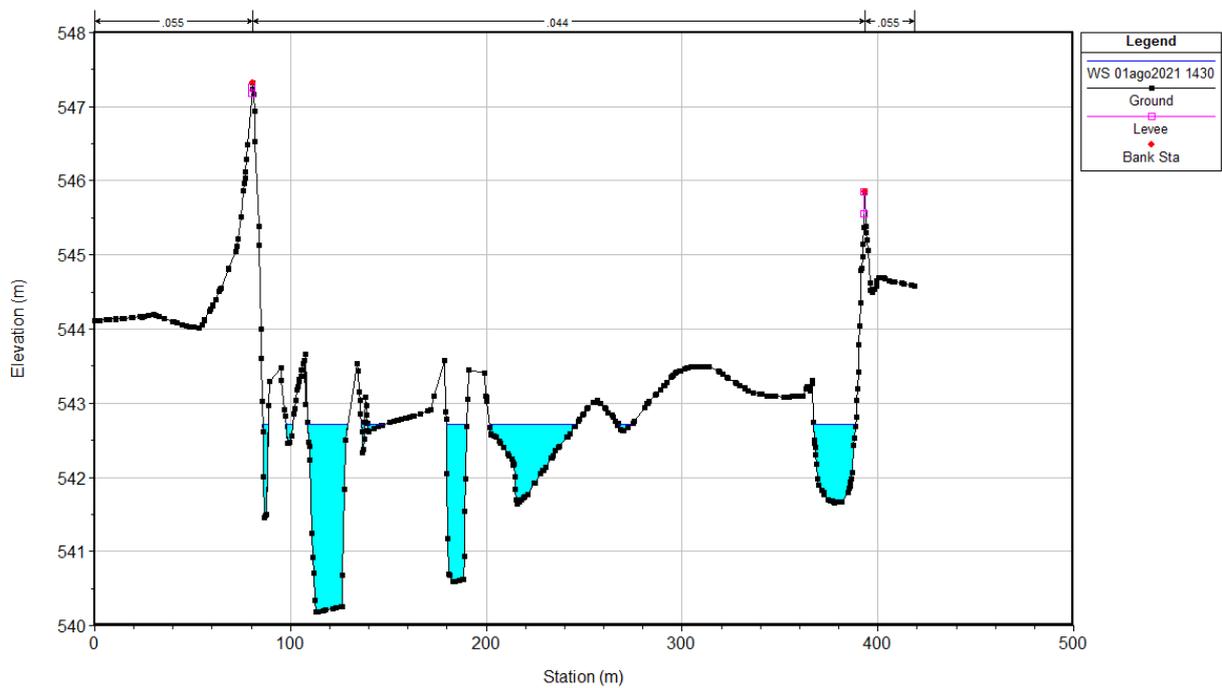
Sezione 12



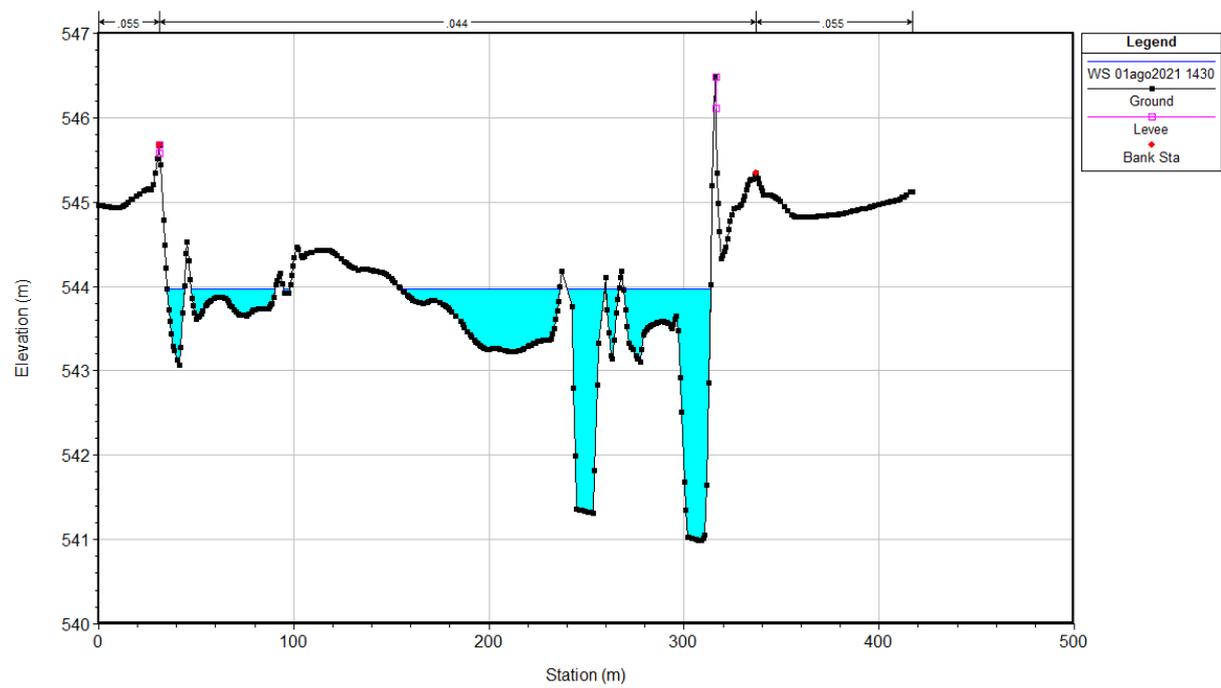
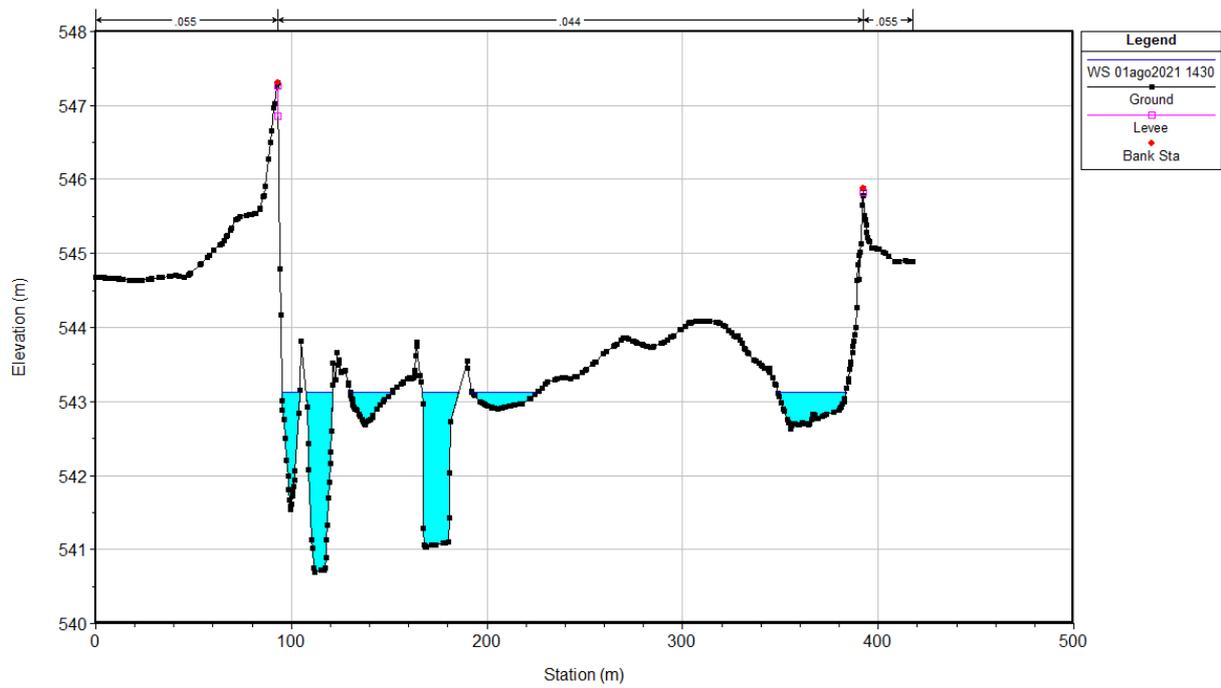
Sezione 13

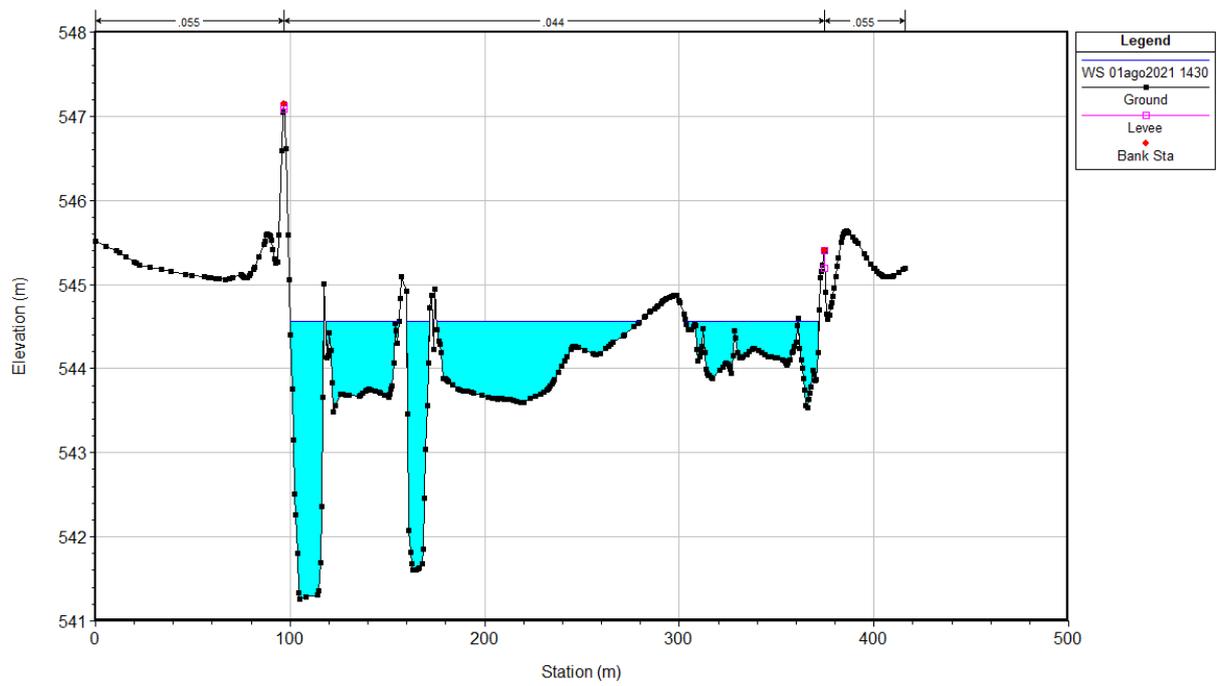


Sezione 14

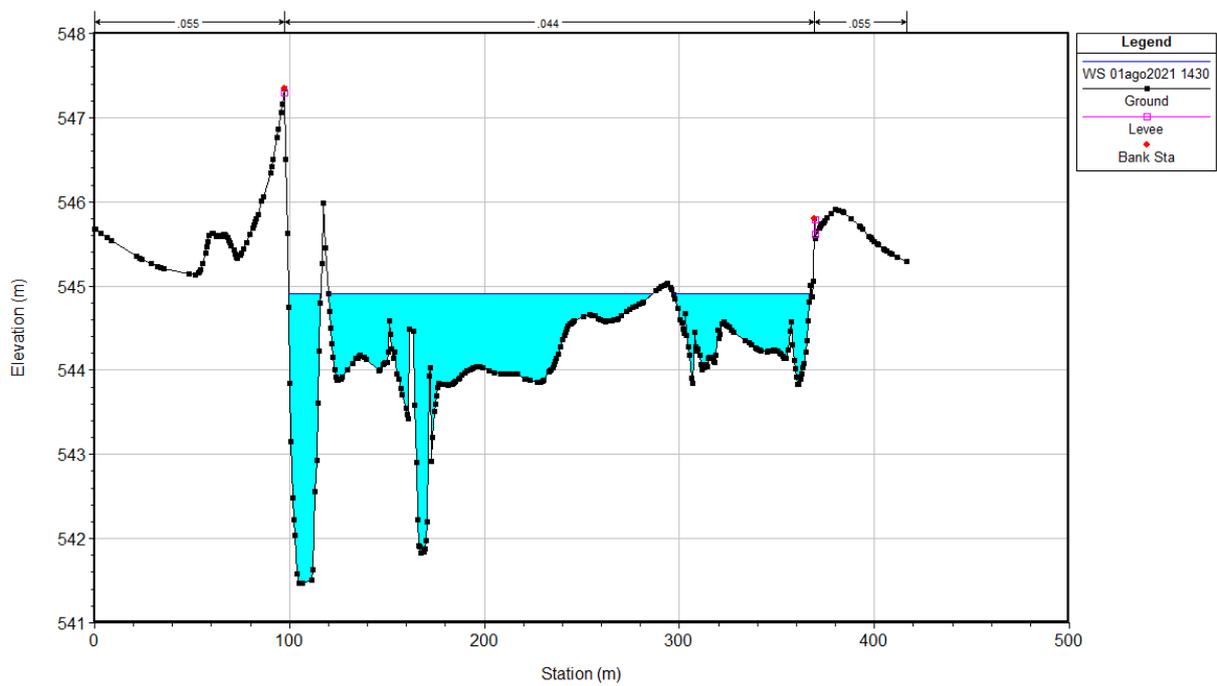


Sezione 15

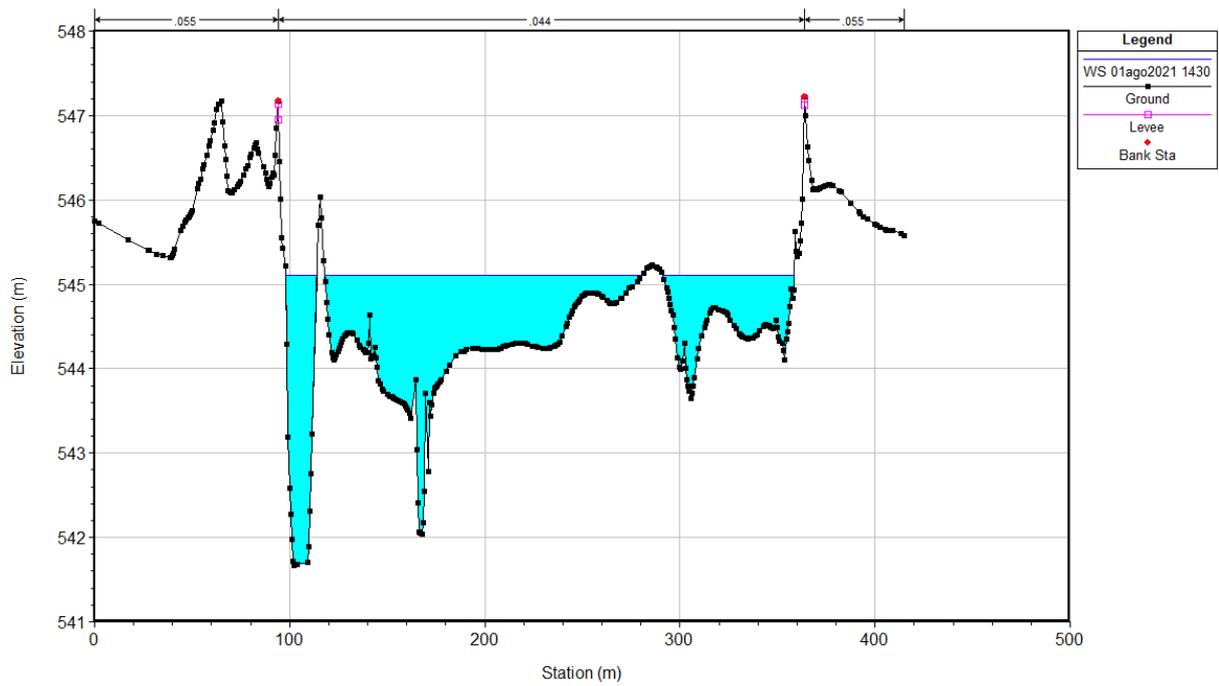




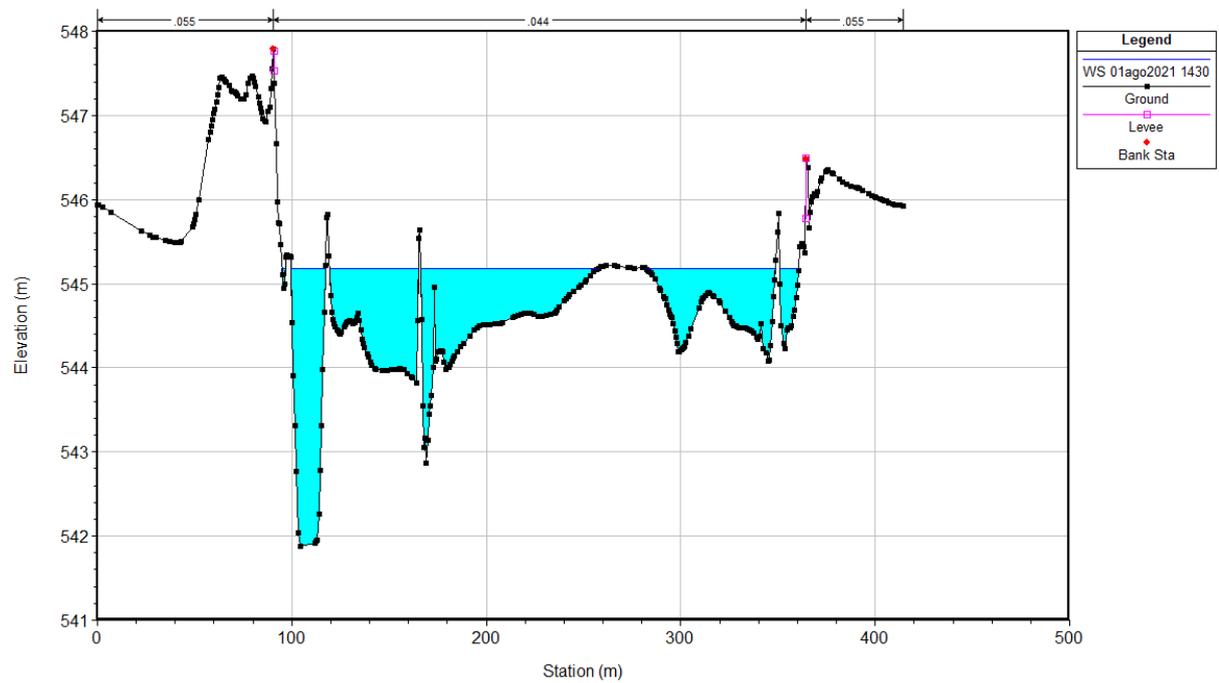
Sezione 19



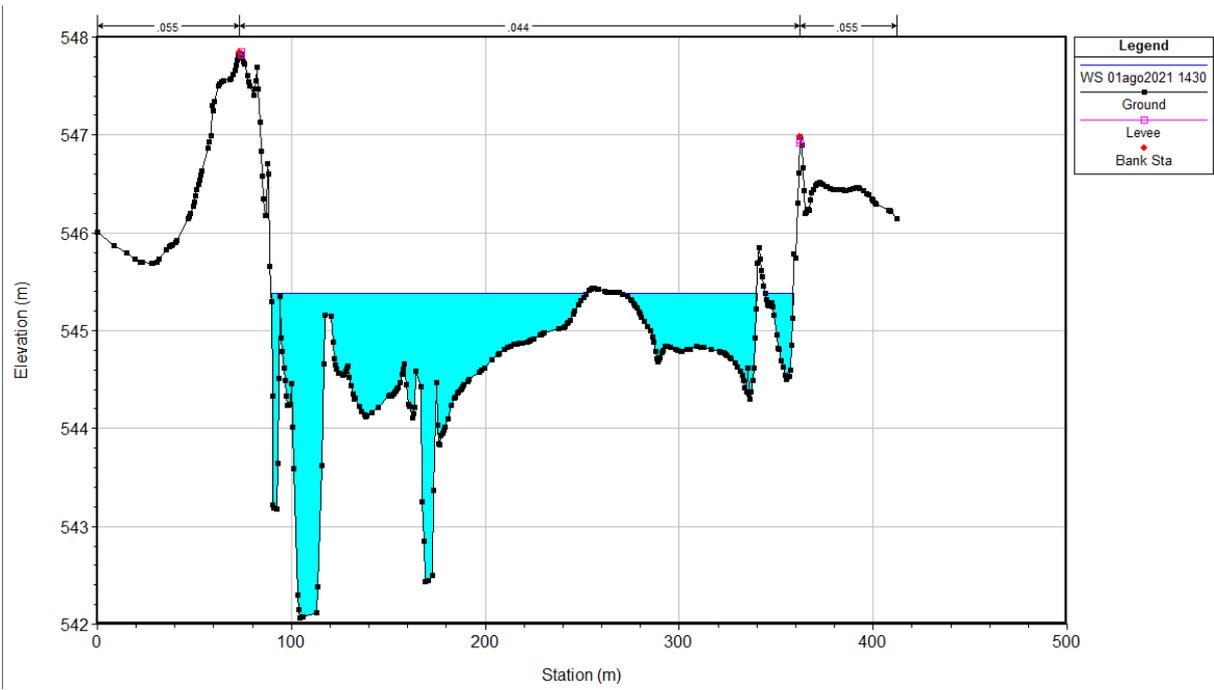
Sezione 20



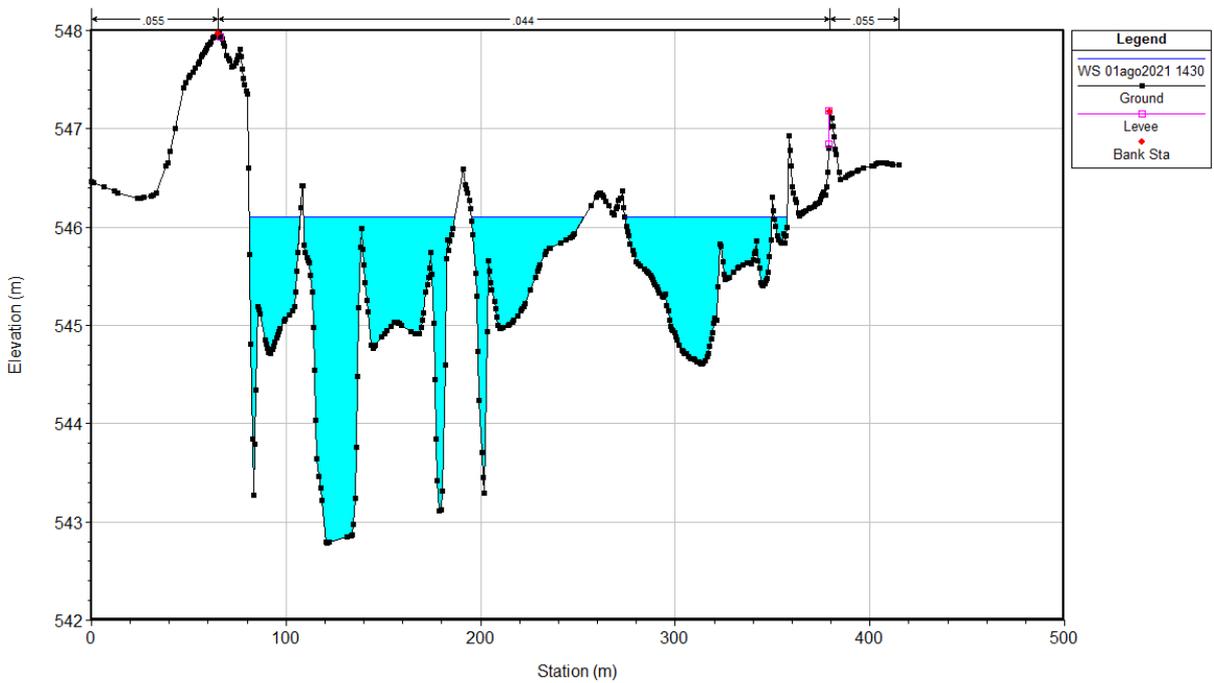
Sezione 21



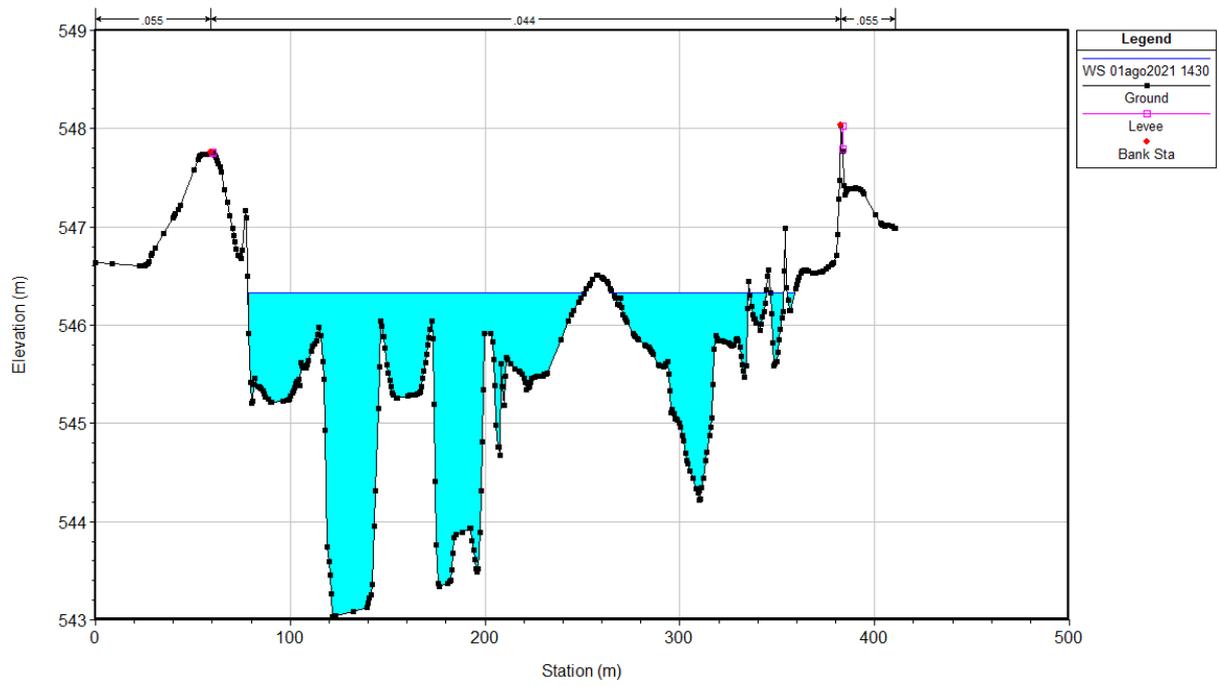
Sezione 22



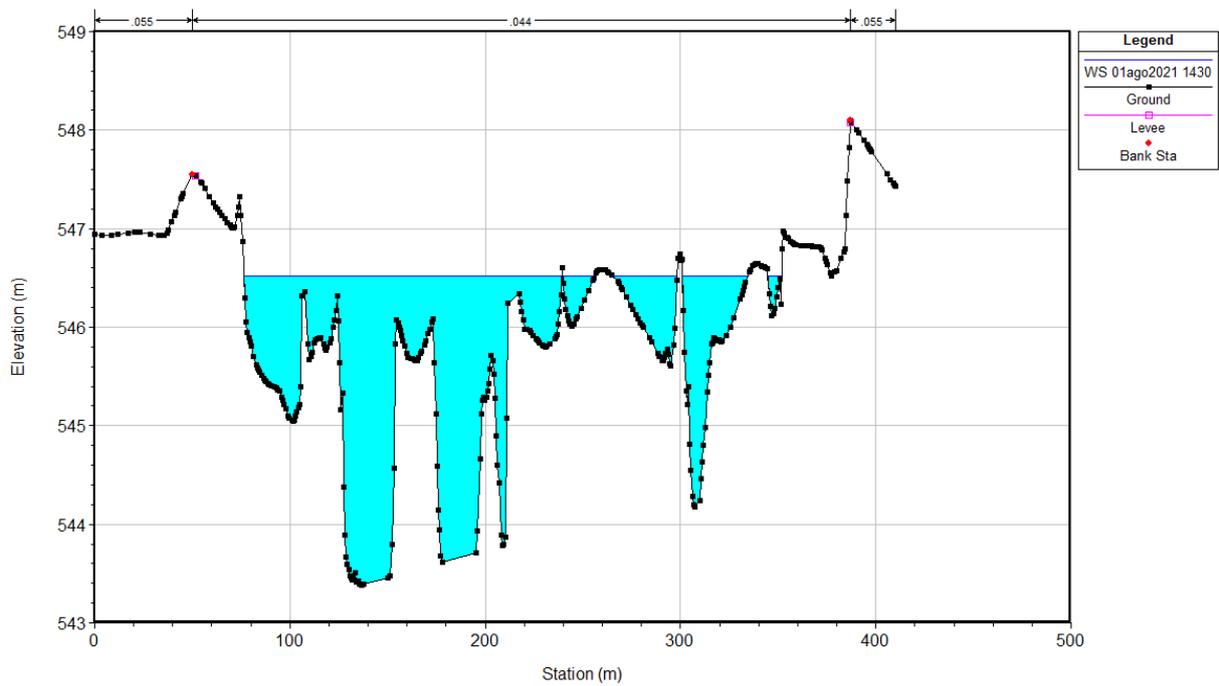
Sezione 23



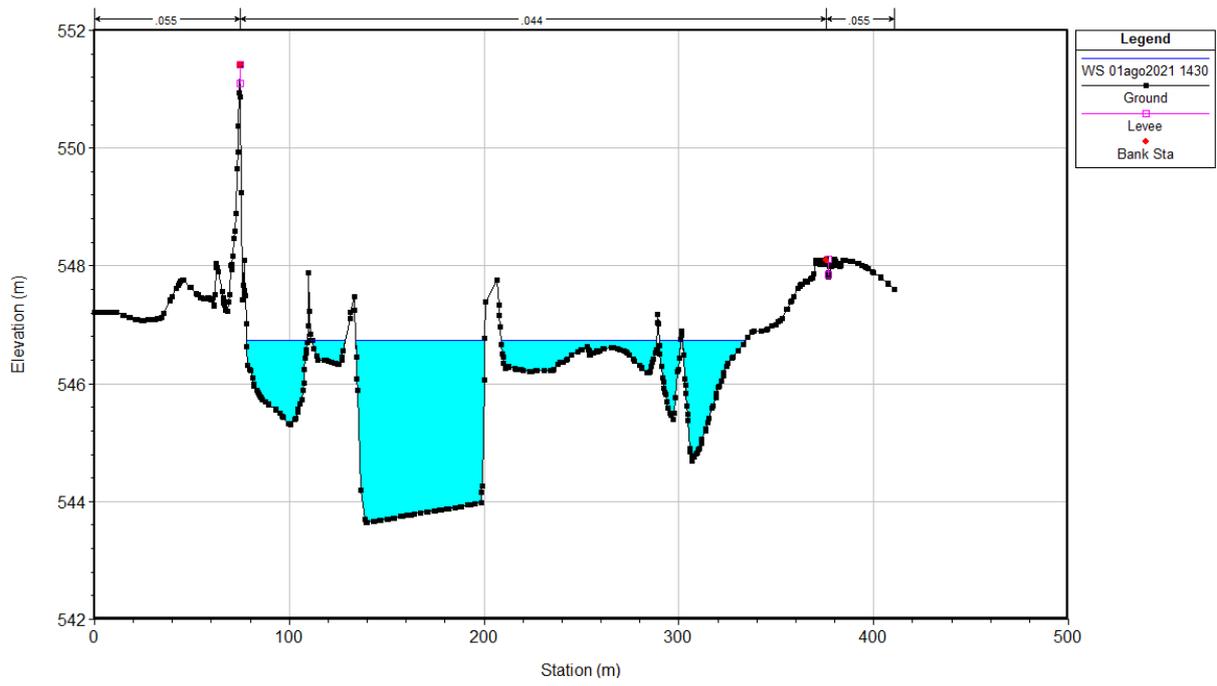
Sezione 26



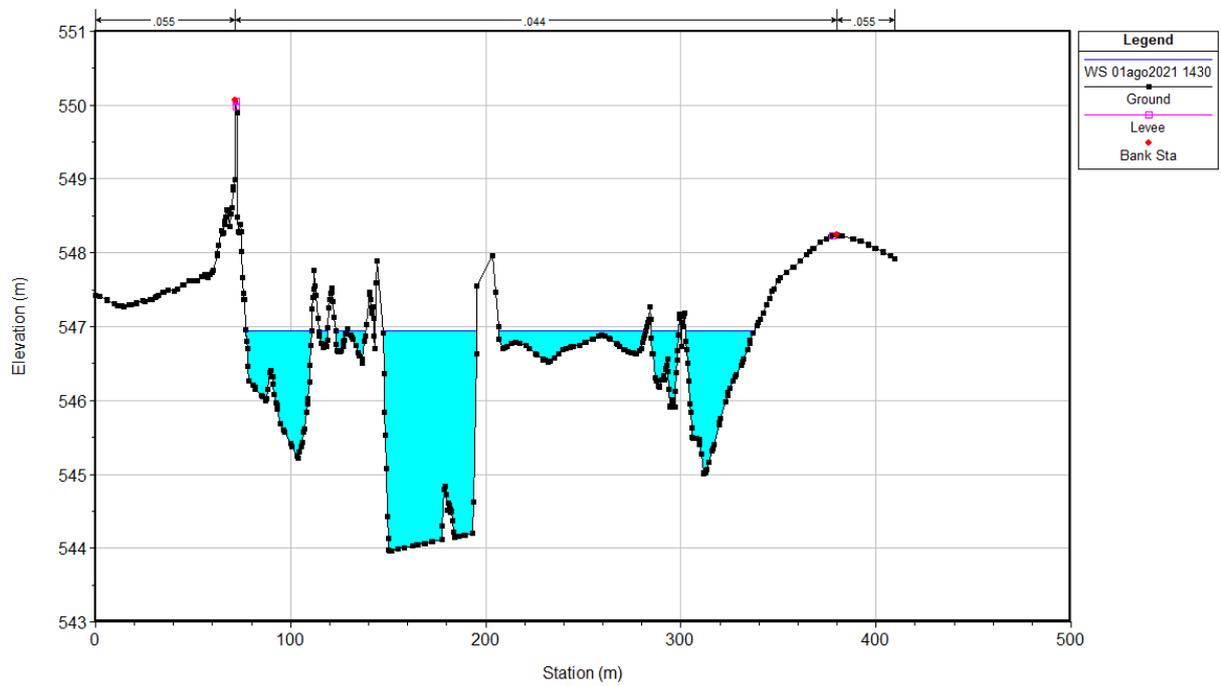
Sezione 27



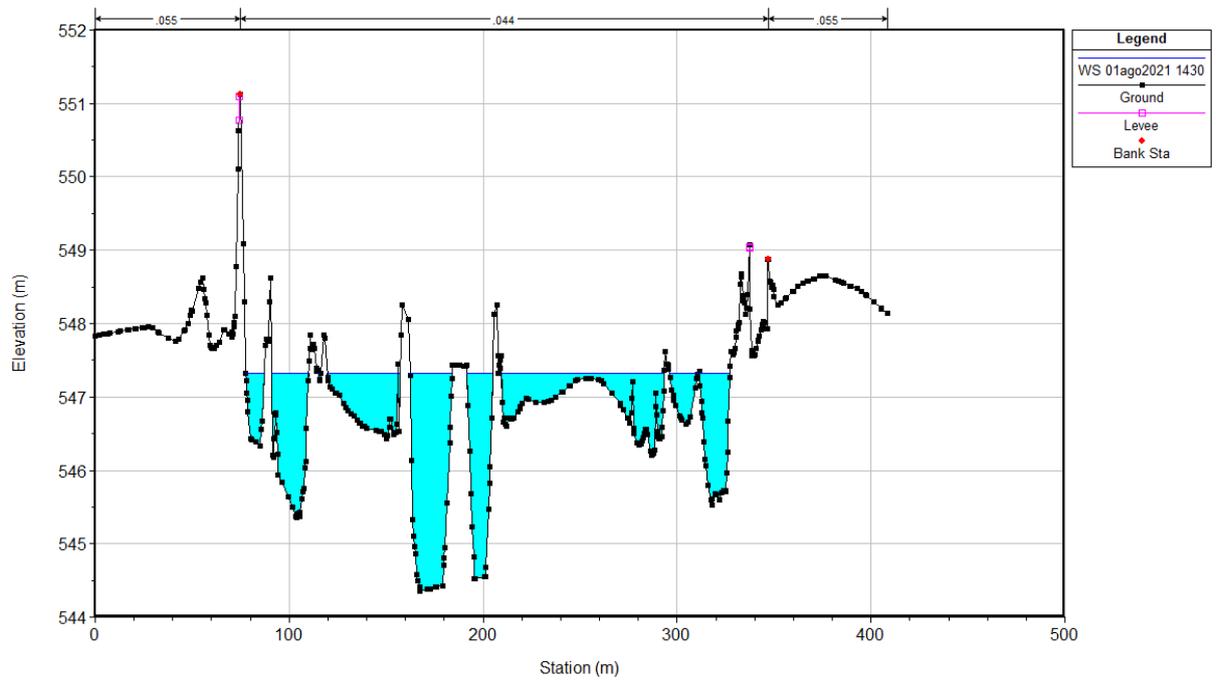
Sezione 28



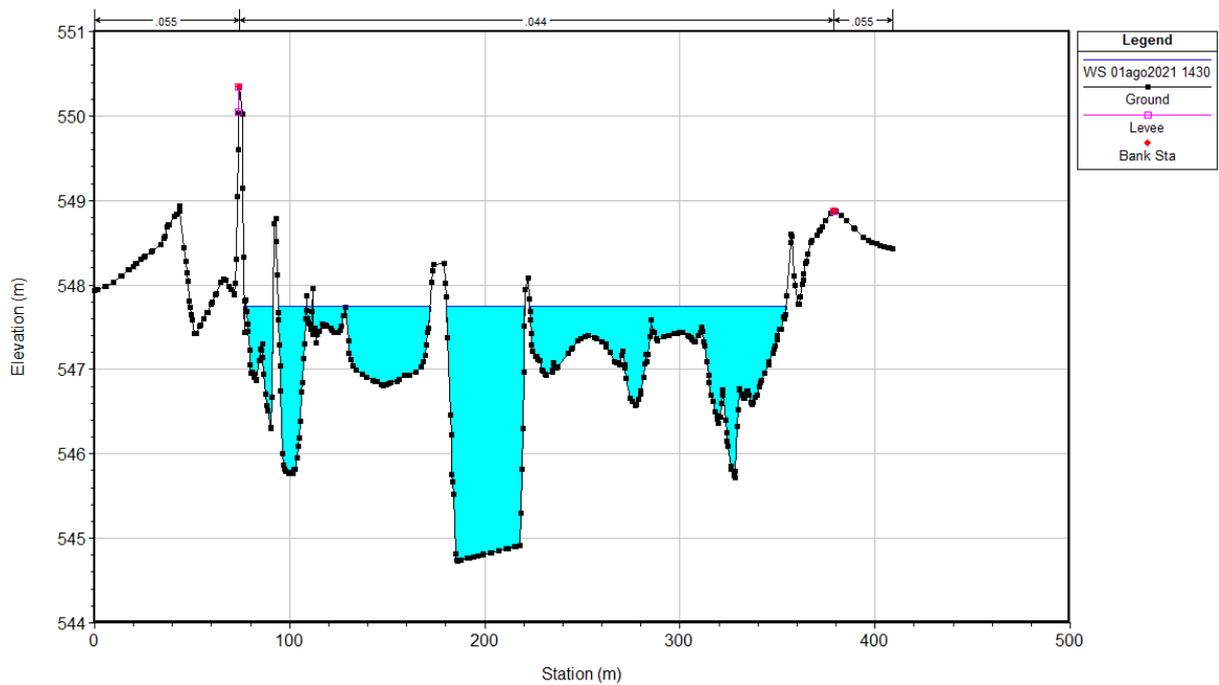
Sezione 29



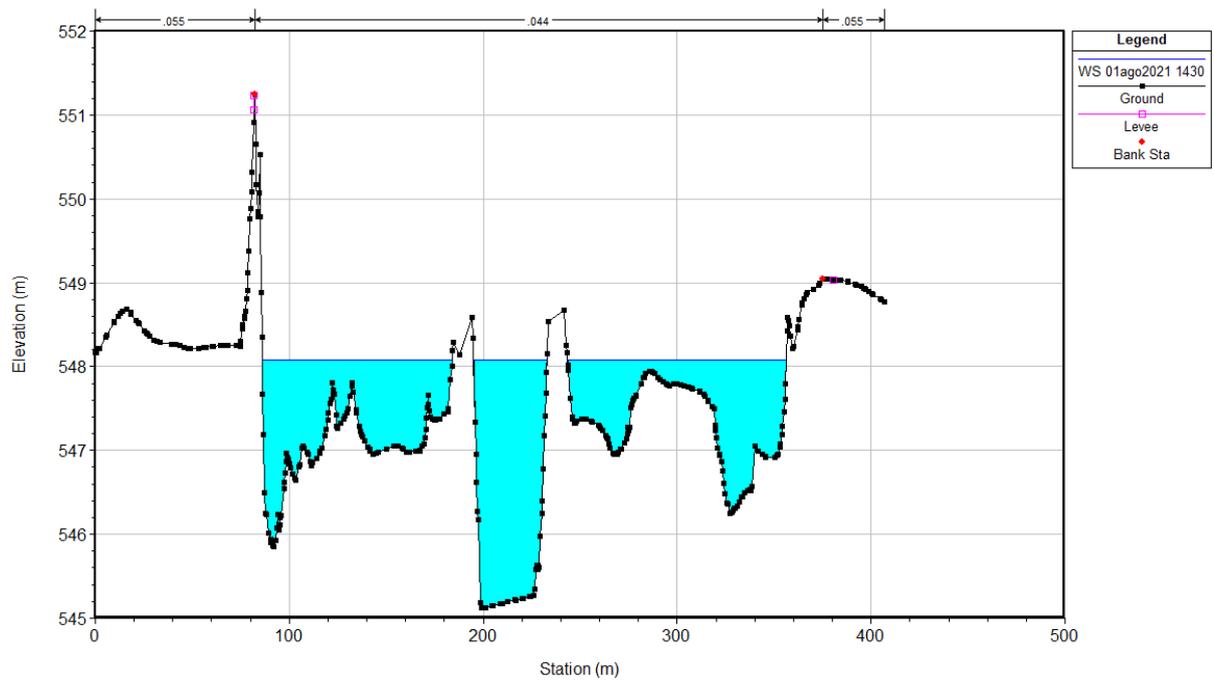
Sezione 30



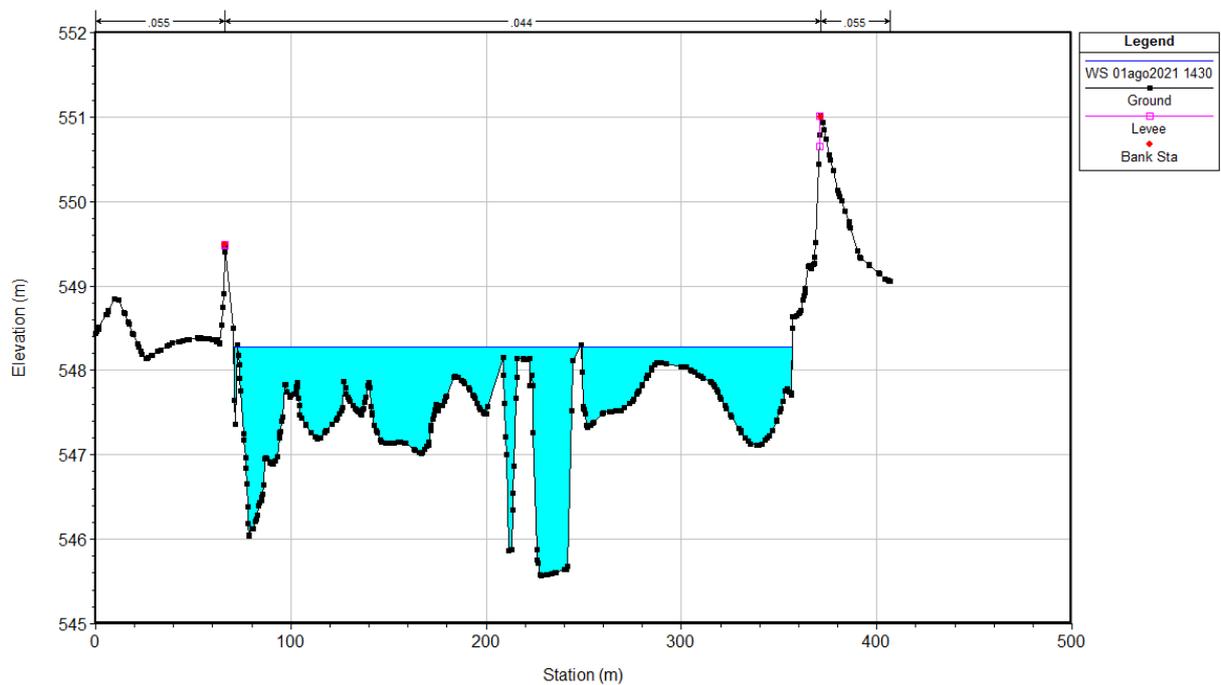
Sezione 31



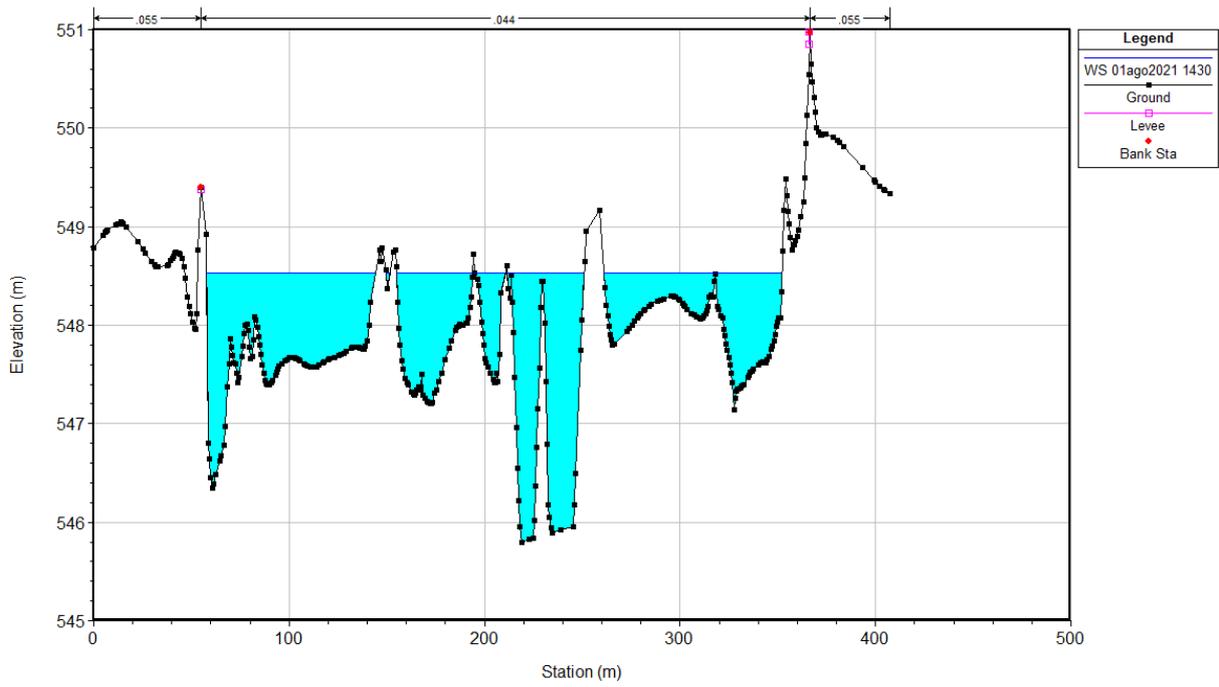
Sezione 32



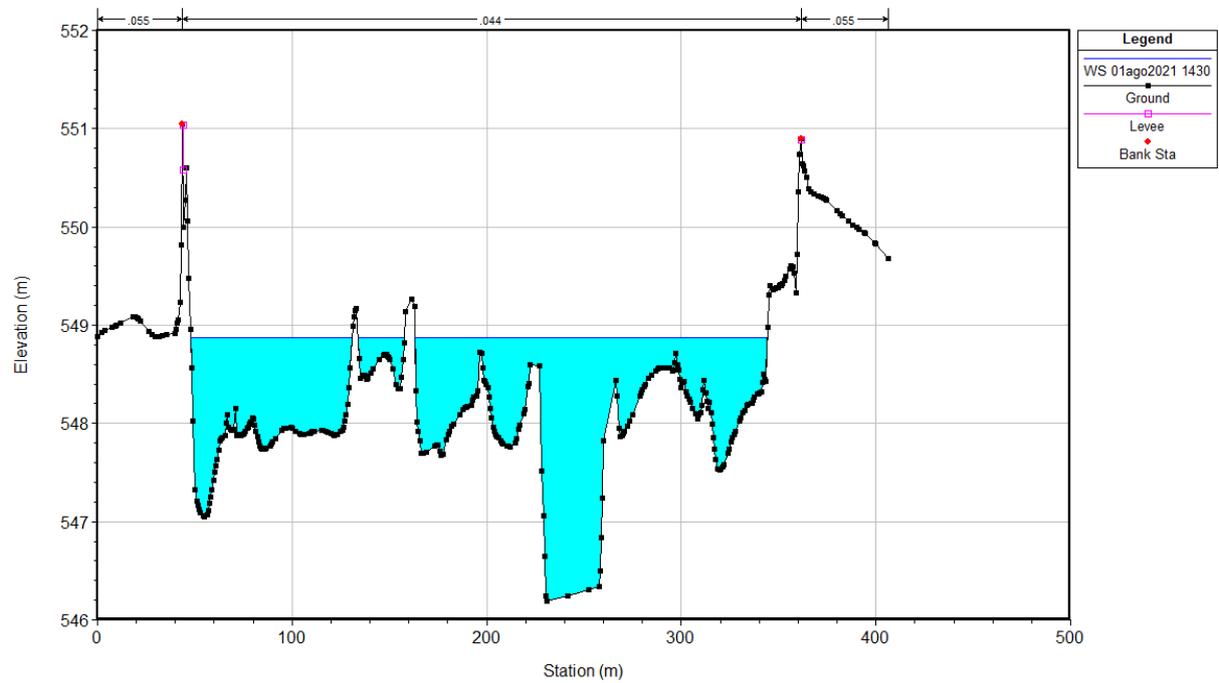
Sezione 33



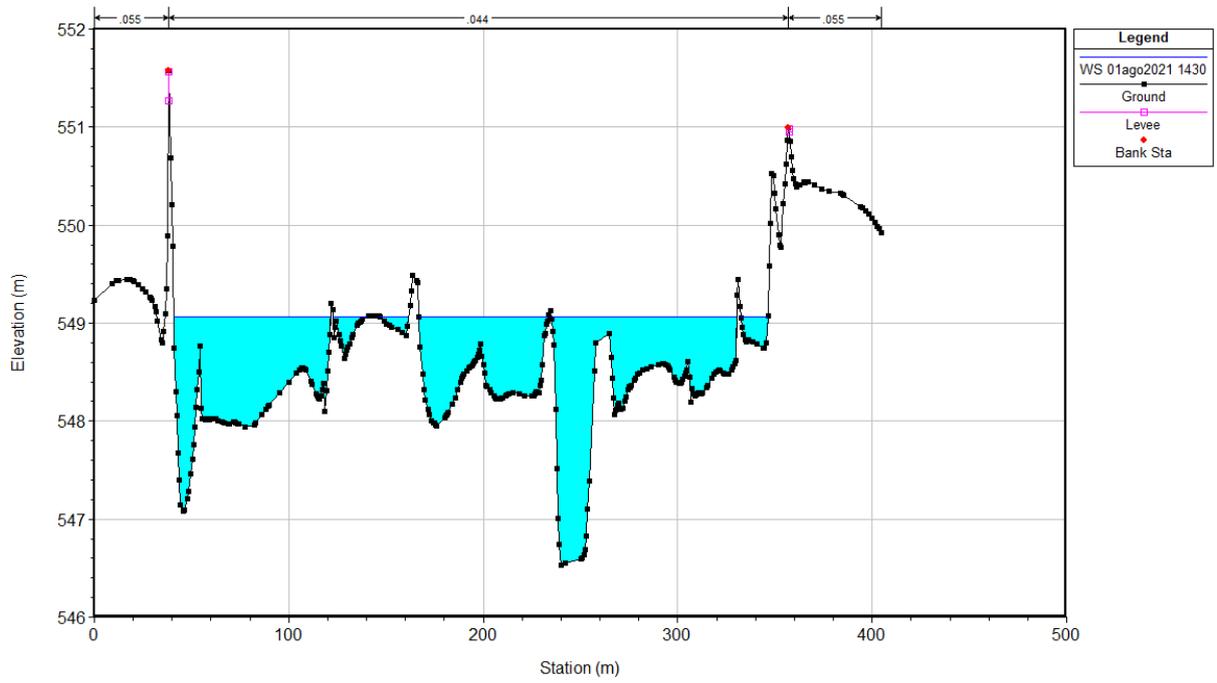
Sezione 34



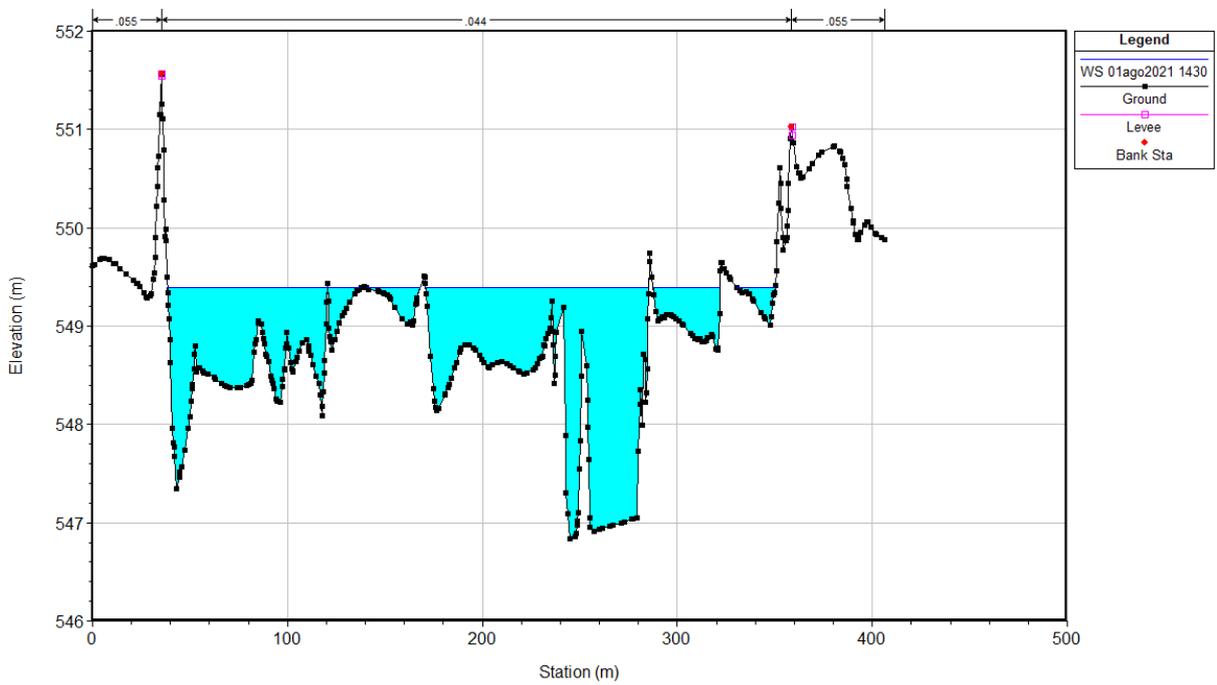
Sezione 35



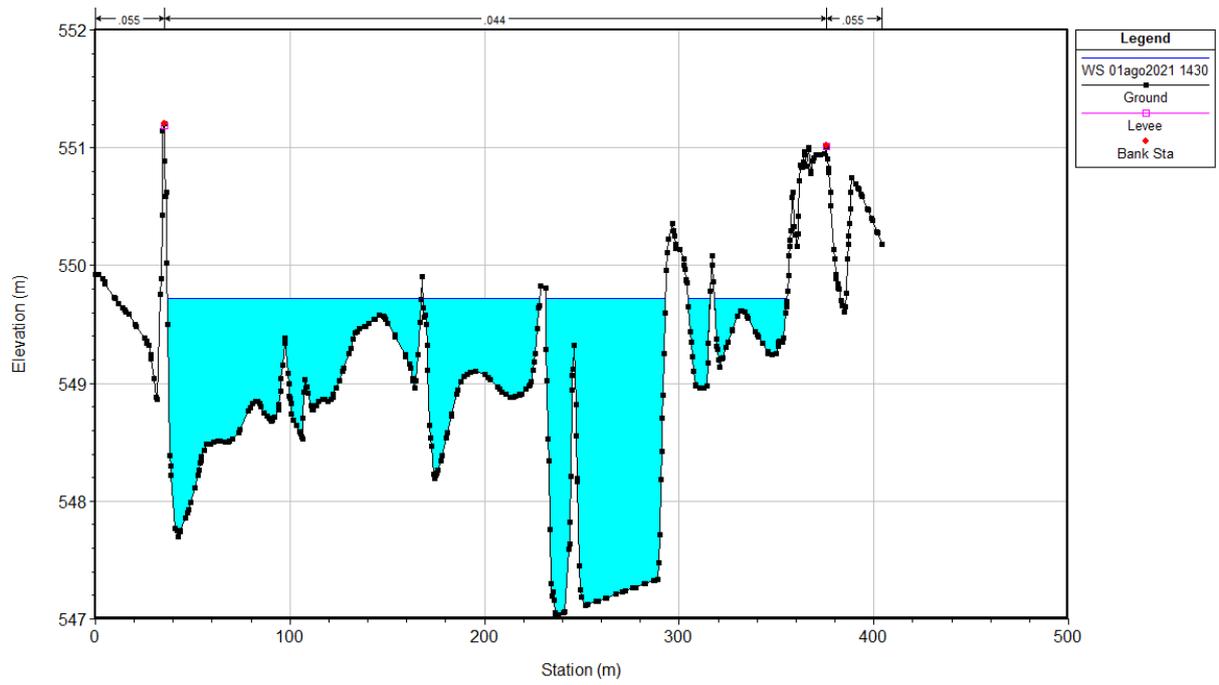
Sezione 36



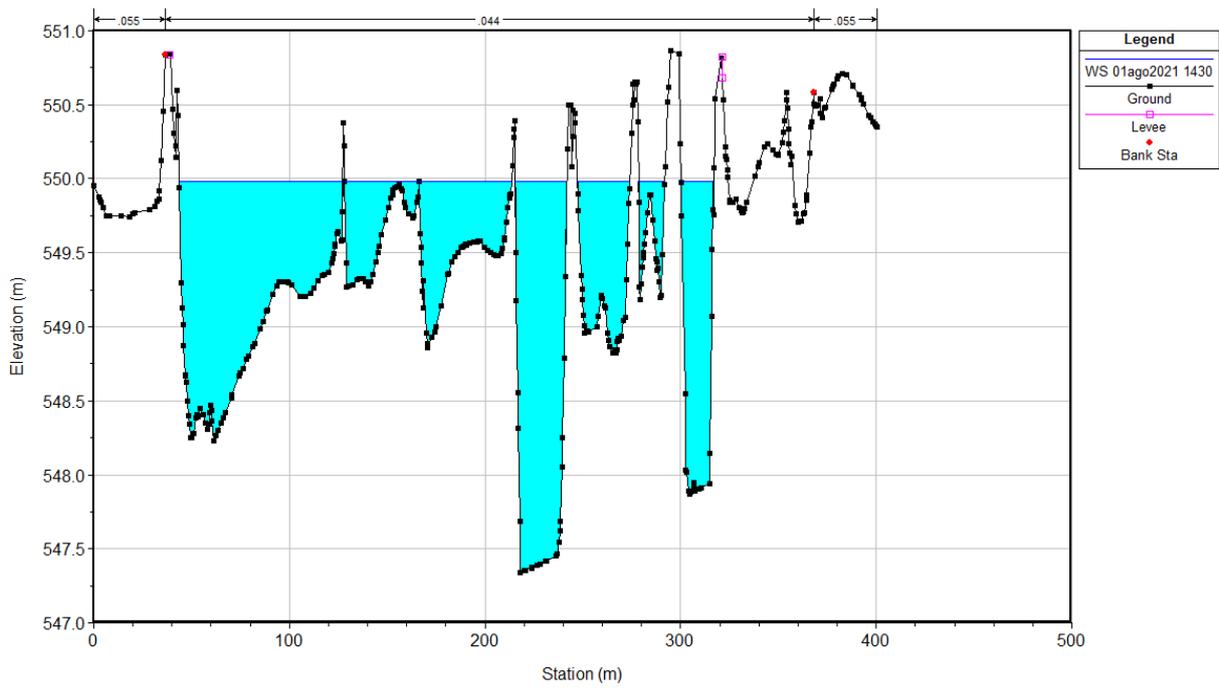
Sezione 37



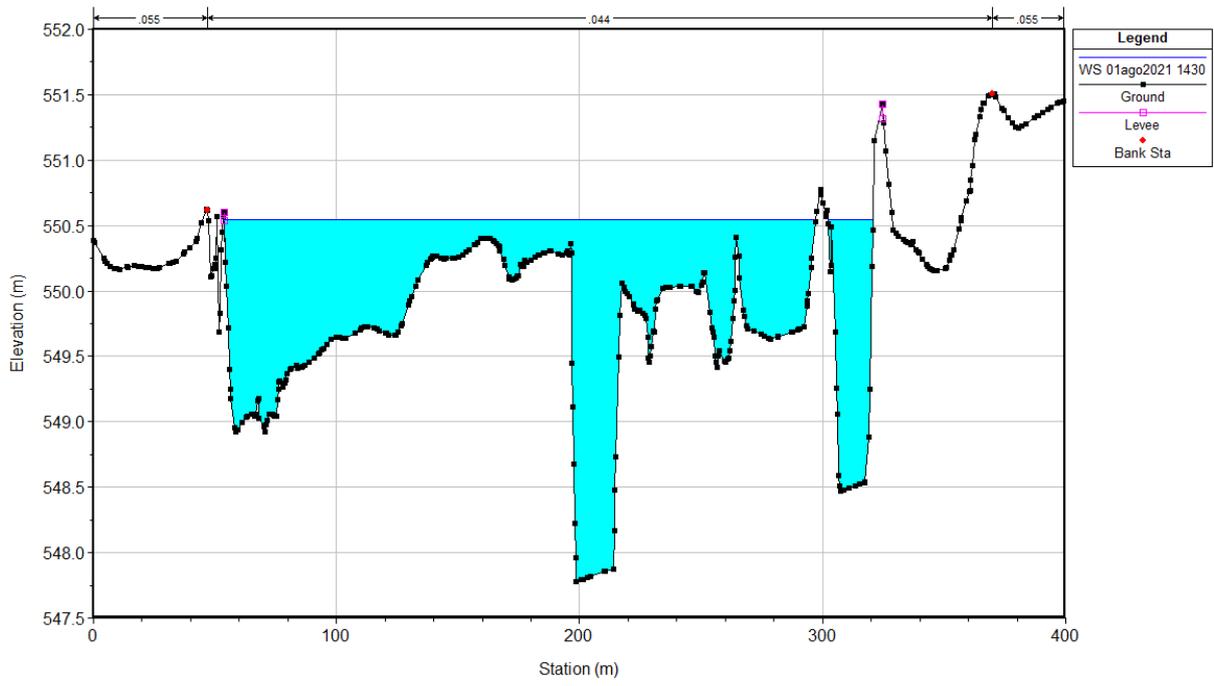
Sezione 38



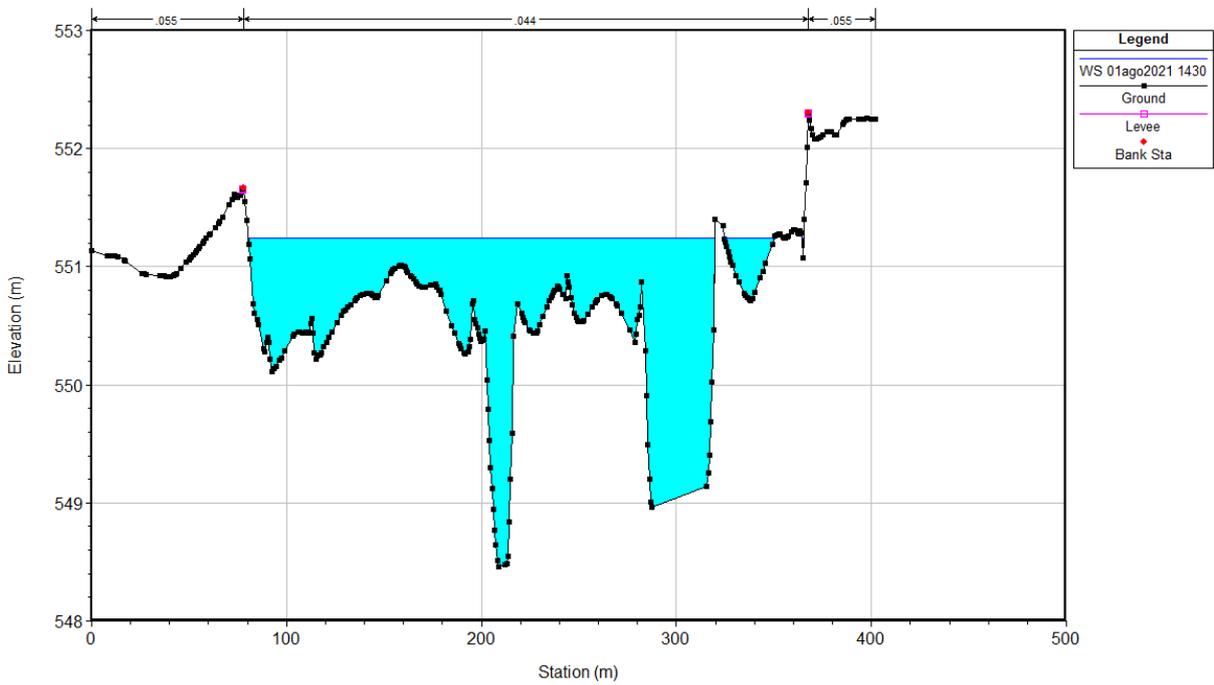
Sezione 39



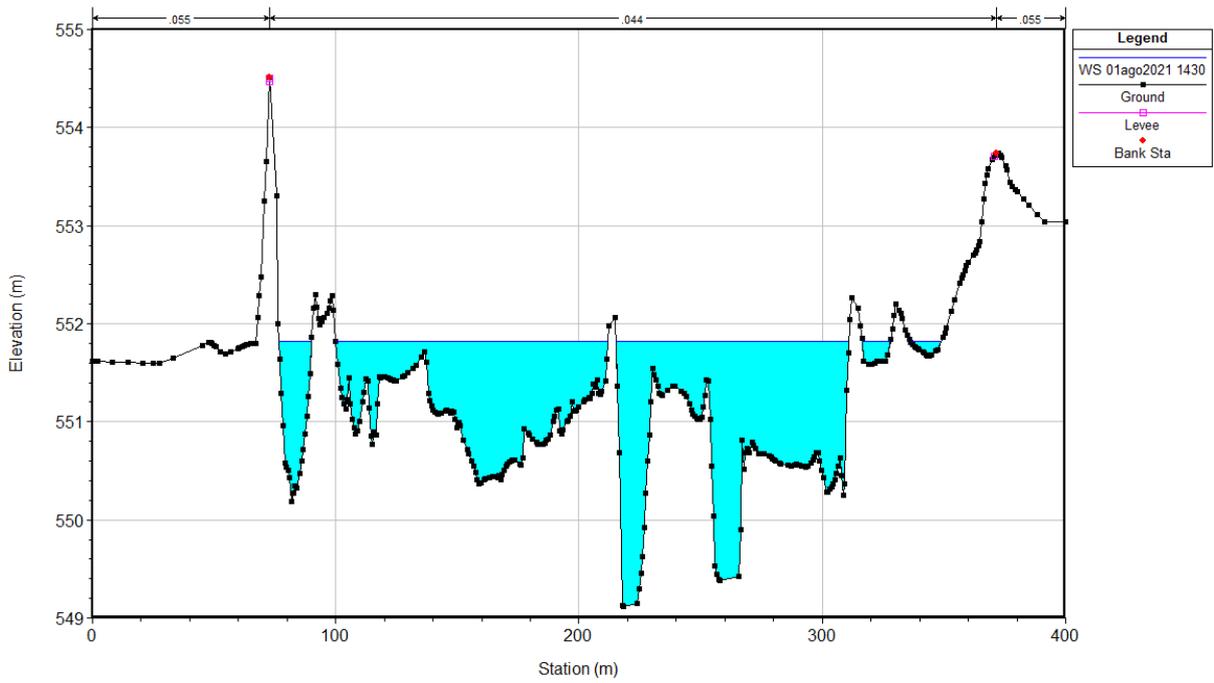
Sezione 40



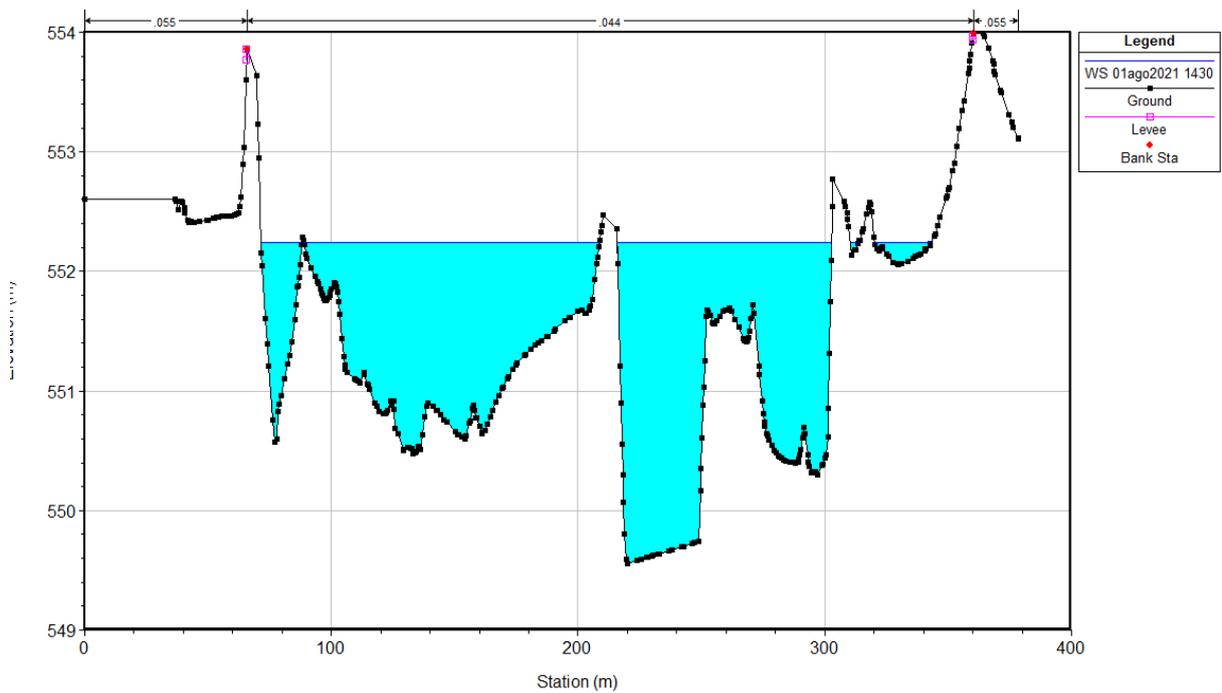
Sezione 41



Sezione 42

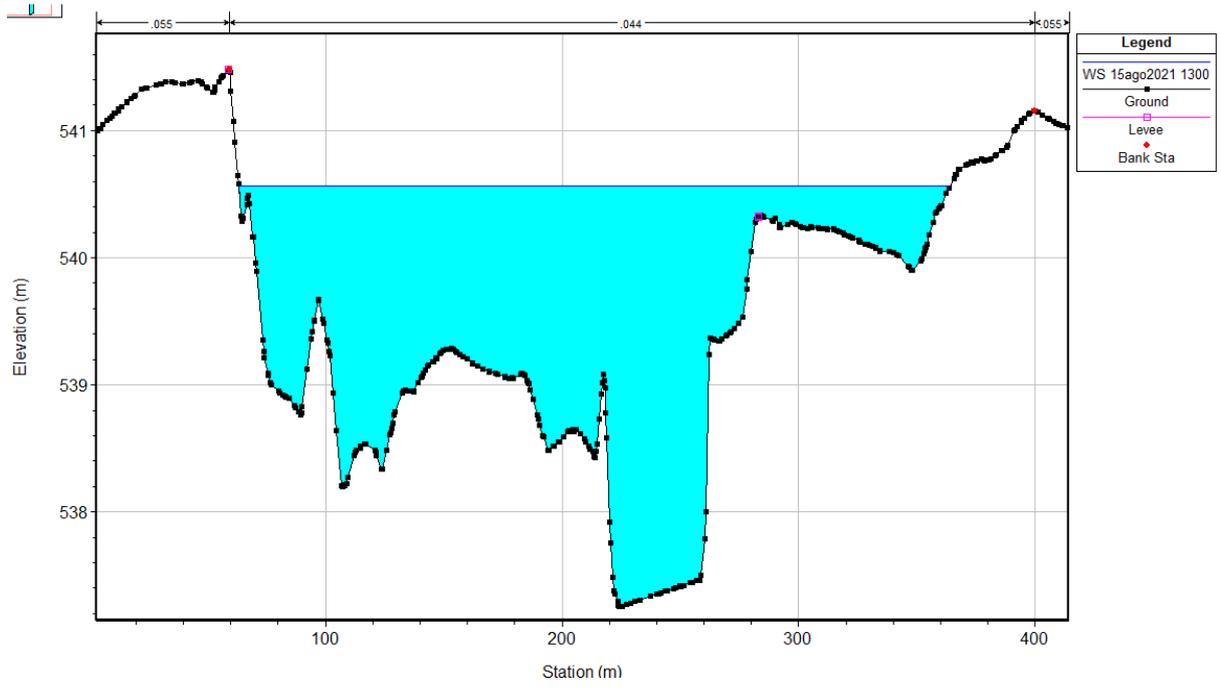


Sezione 43

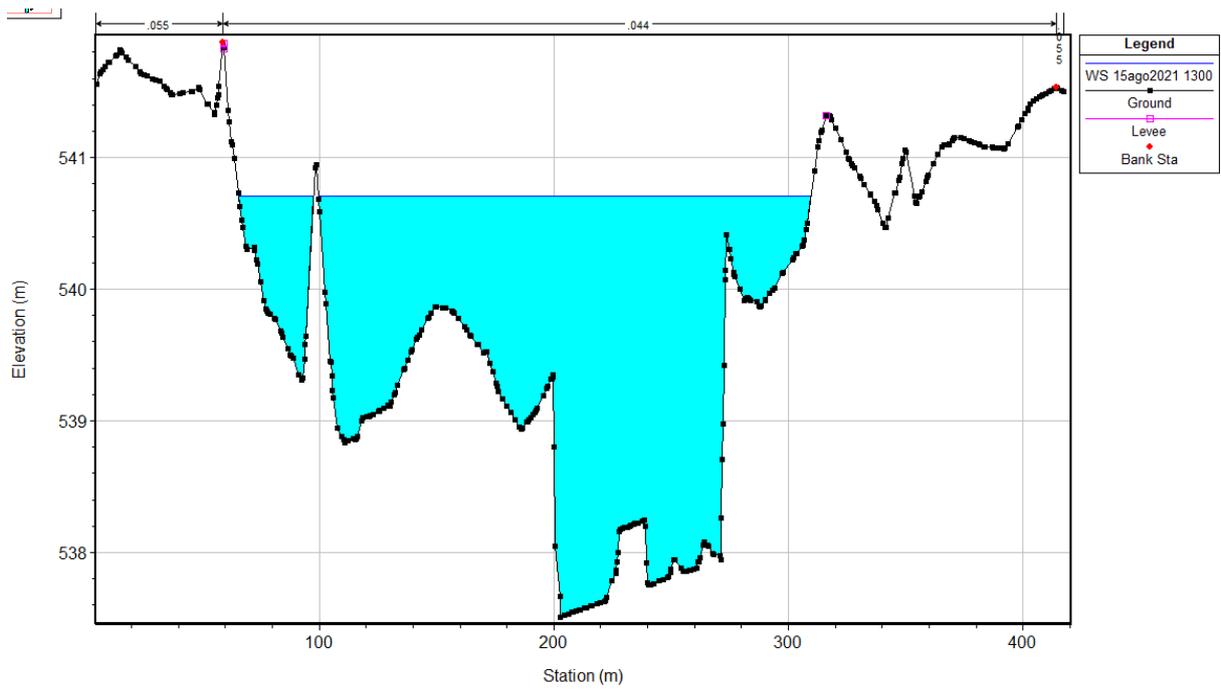


Sezione 44

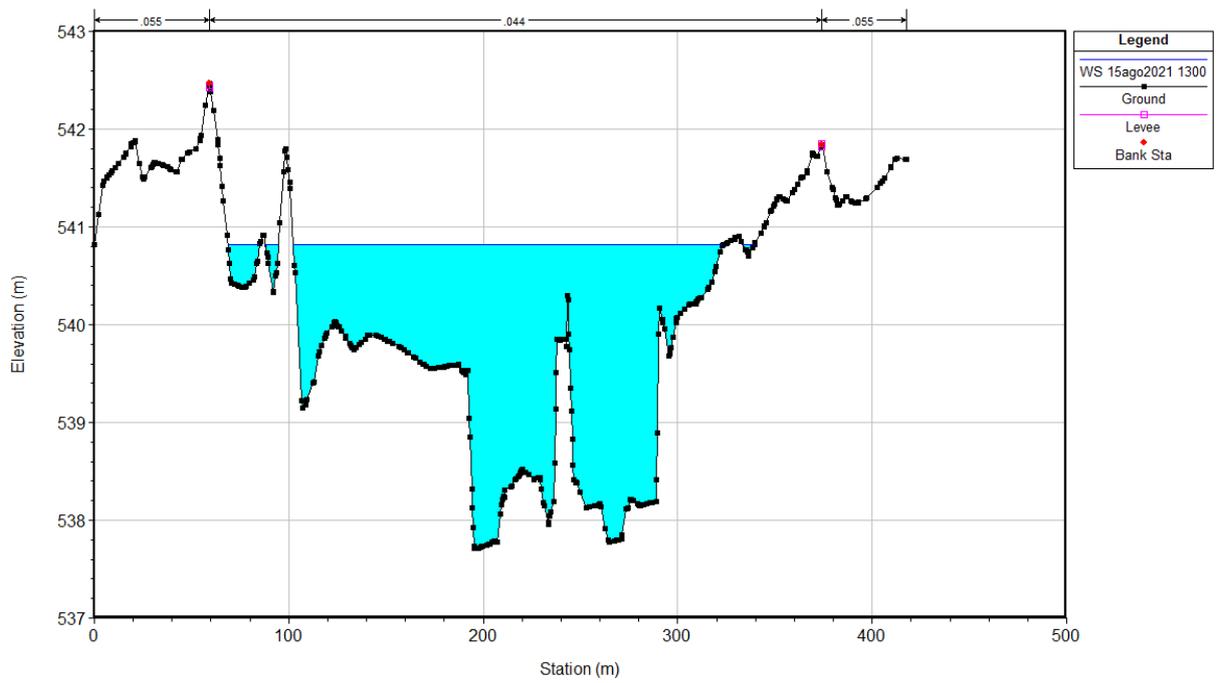
- Sezioni del modello HEC-RAS per la configurazione del 2017



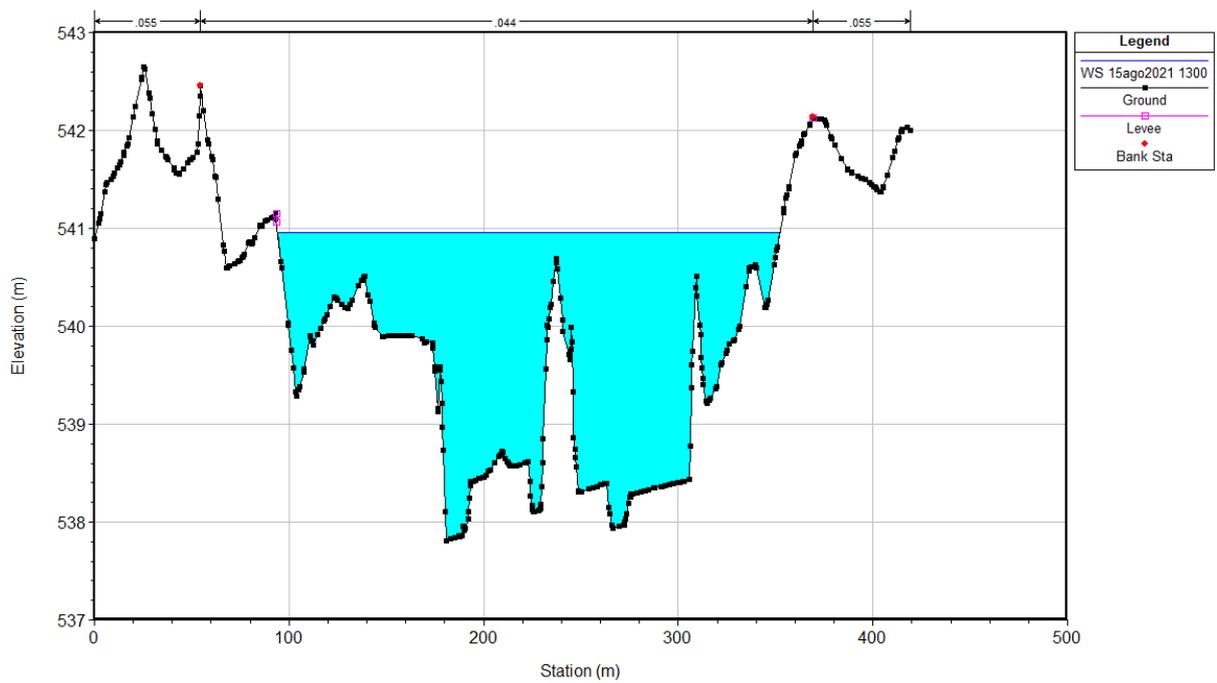
Sezione 2_2017



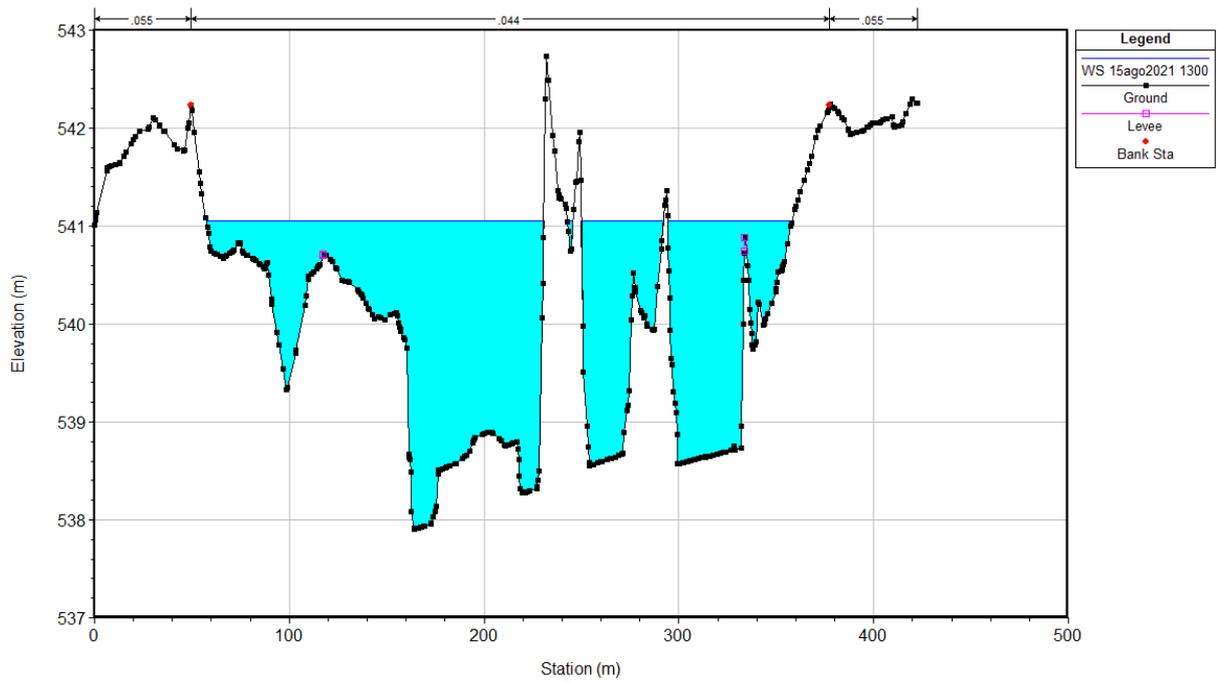
Sezione 3_2017



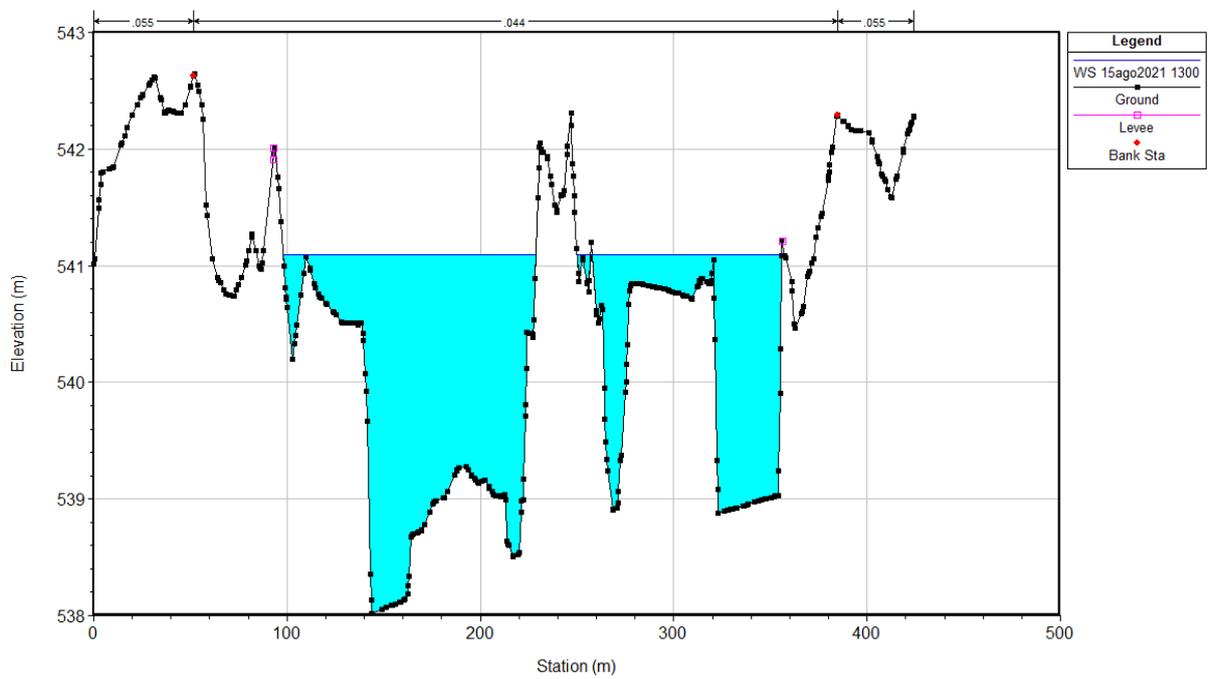
Sezione 4_2017



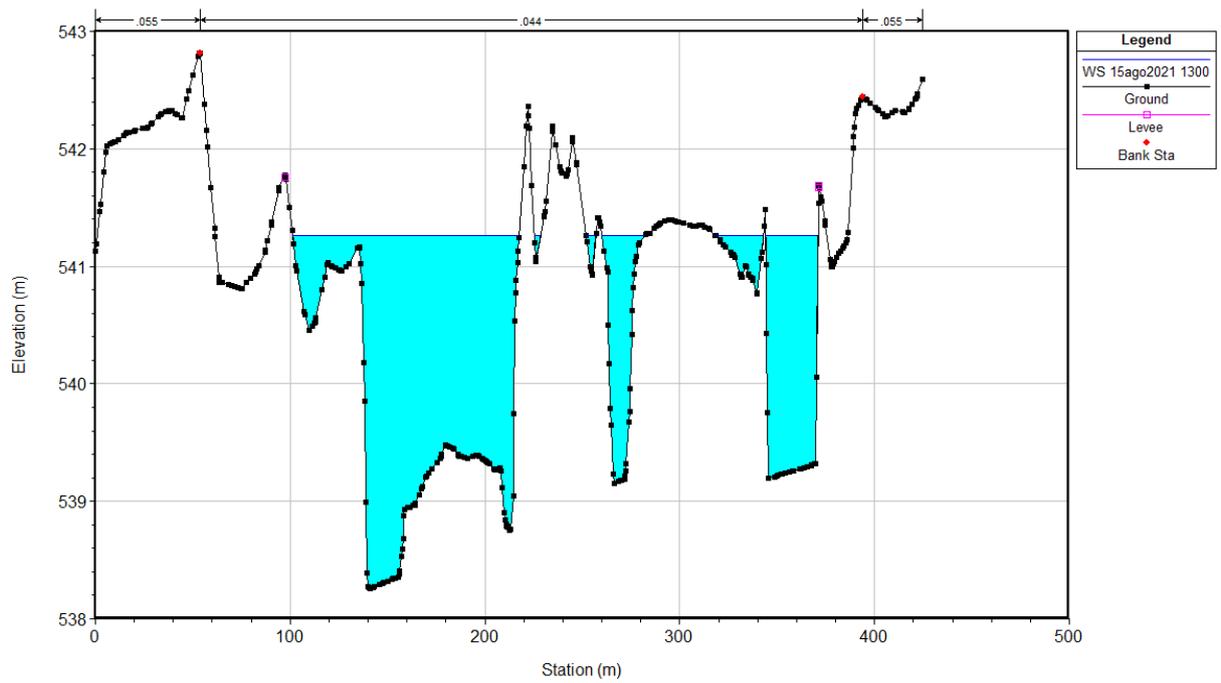
Sezione 5_2017



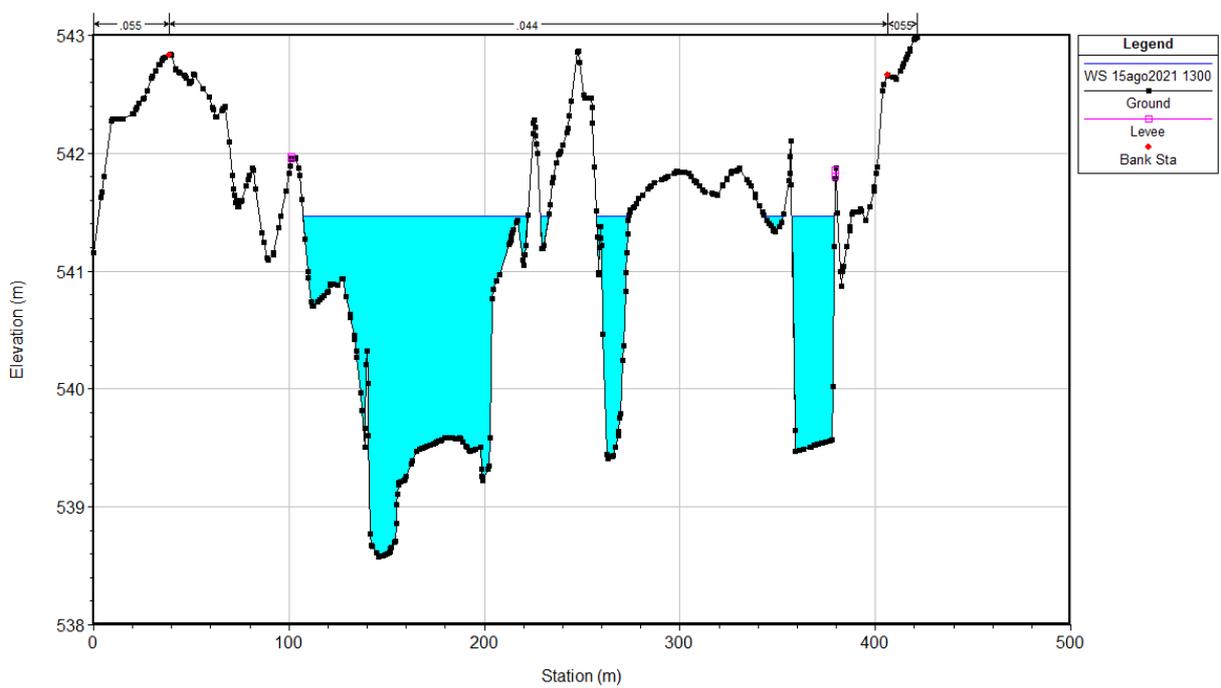
Sezione 6_2017



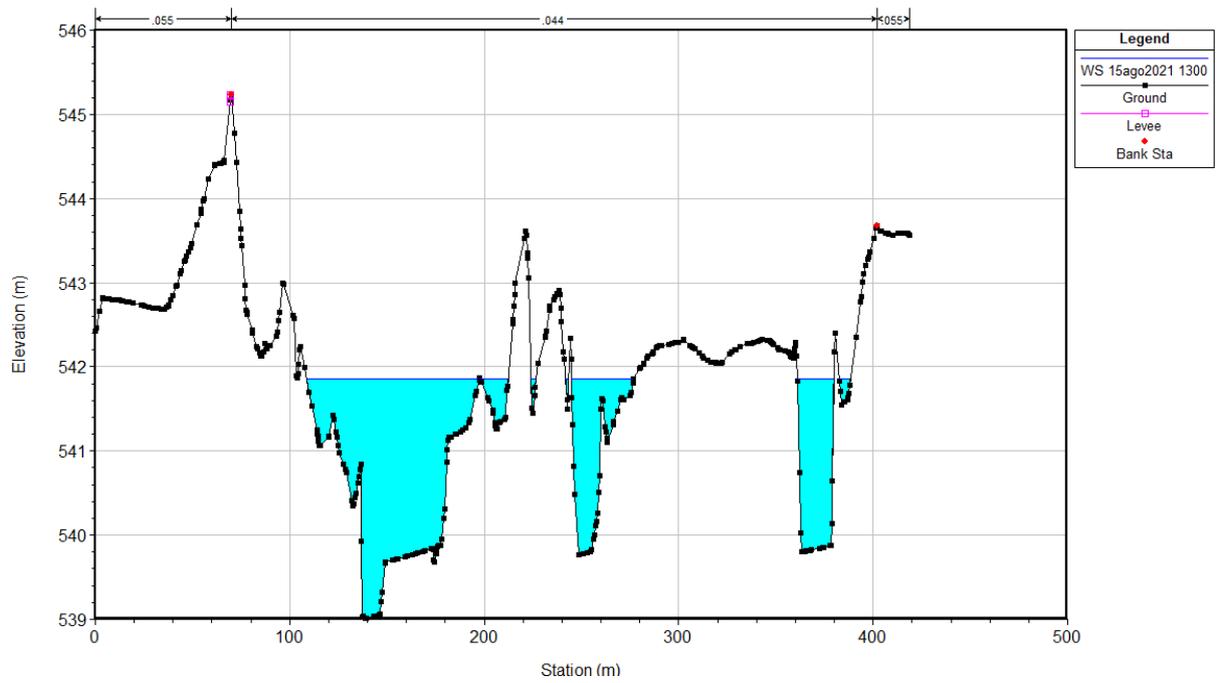
Sezione 7_2017



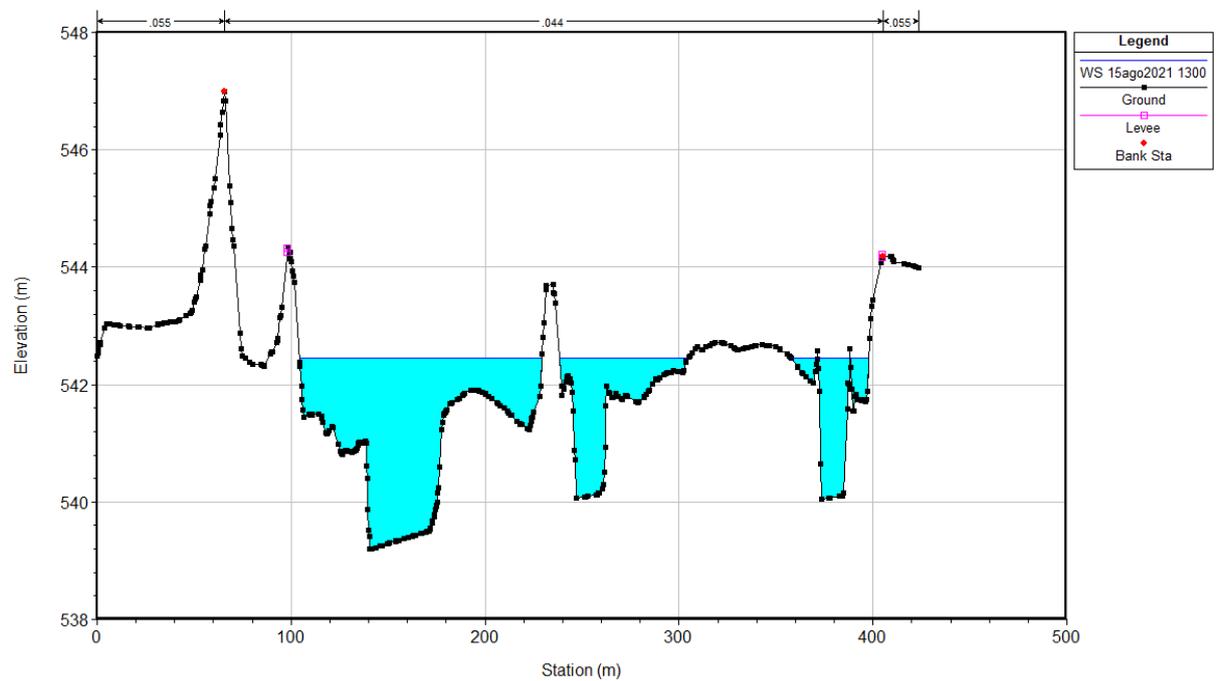
Sezione 8_2017



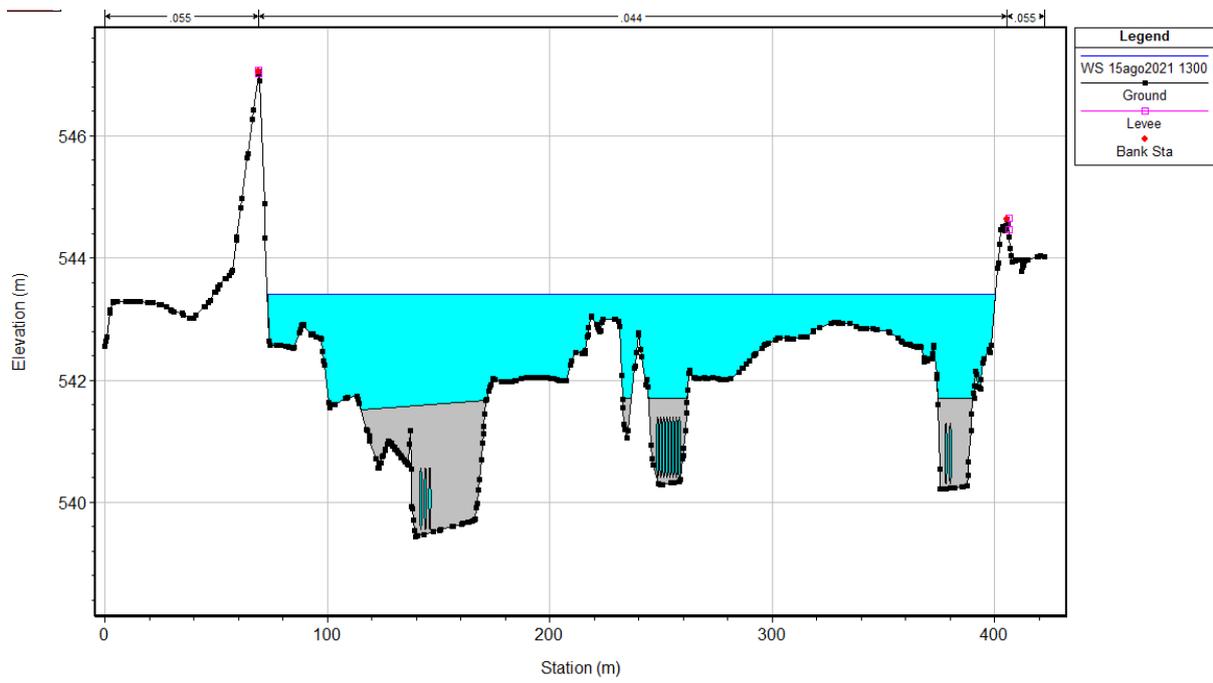
Sezione 9_2017



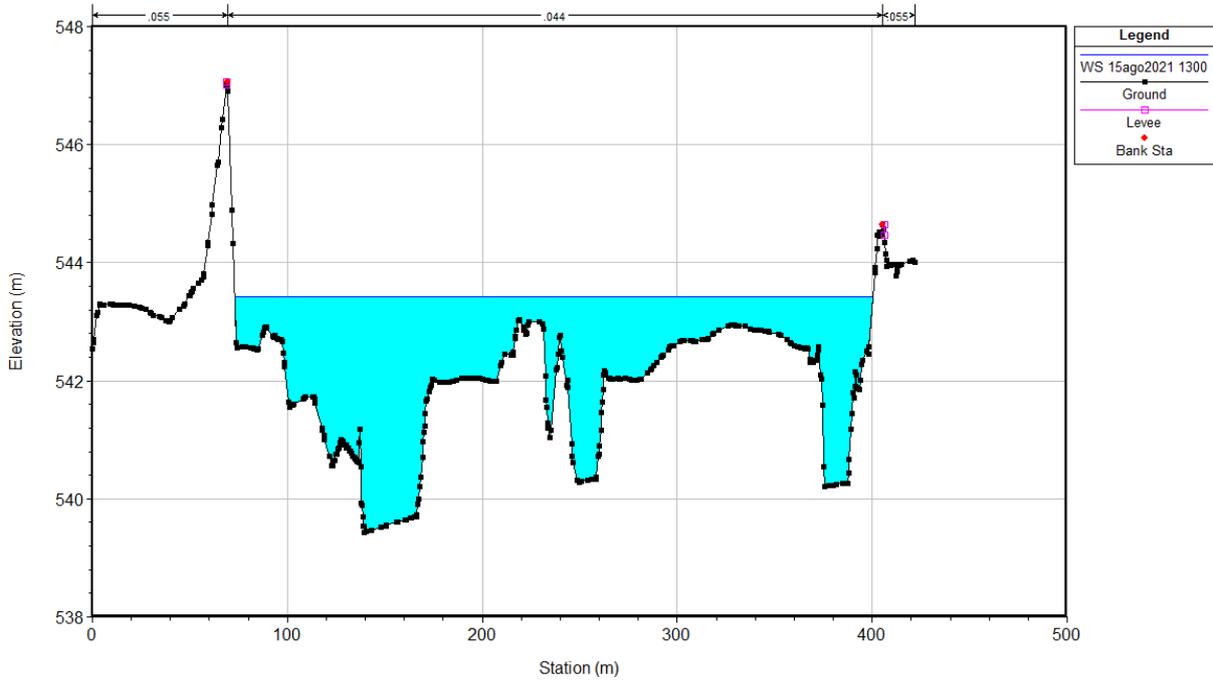
Sezione 10_2017



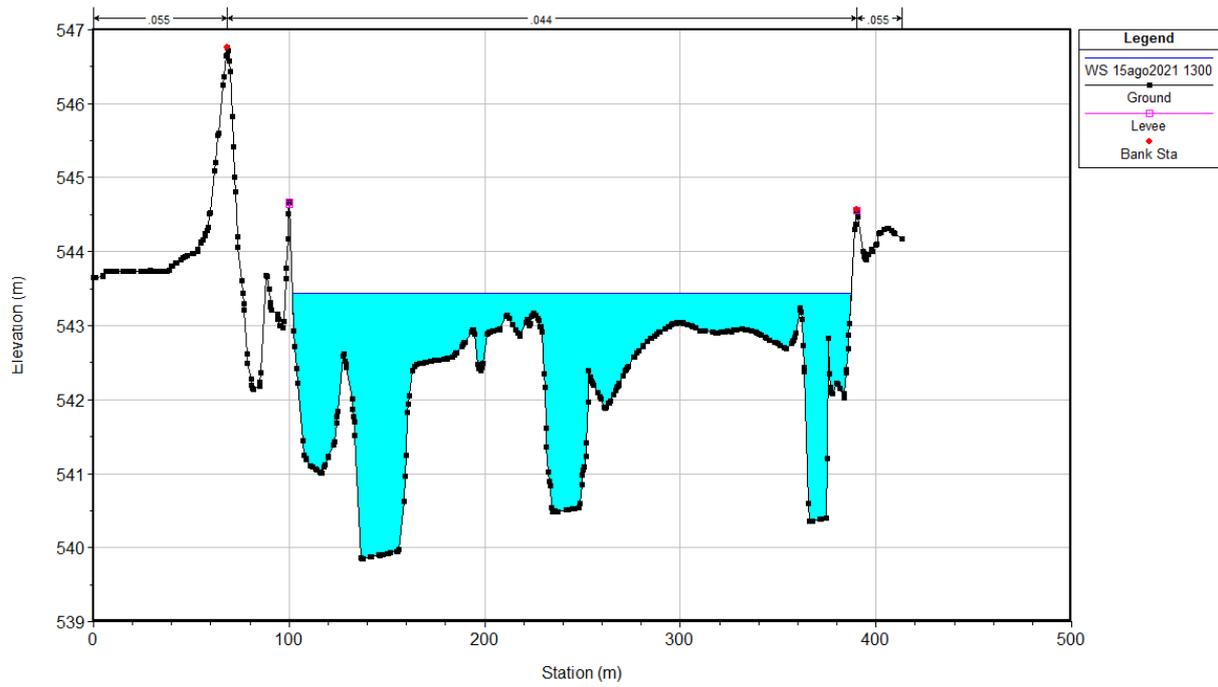
Sezione 11_2017



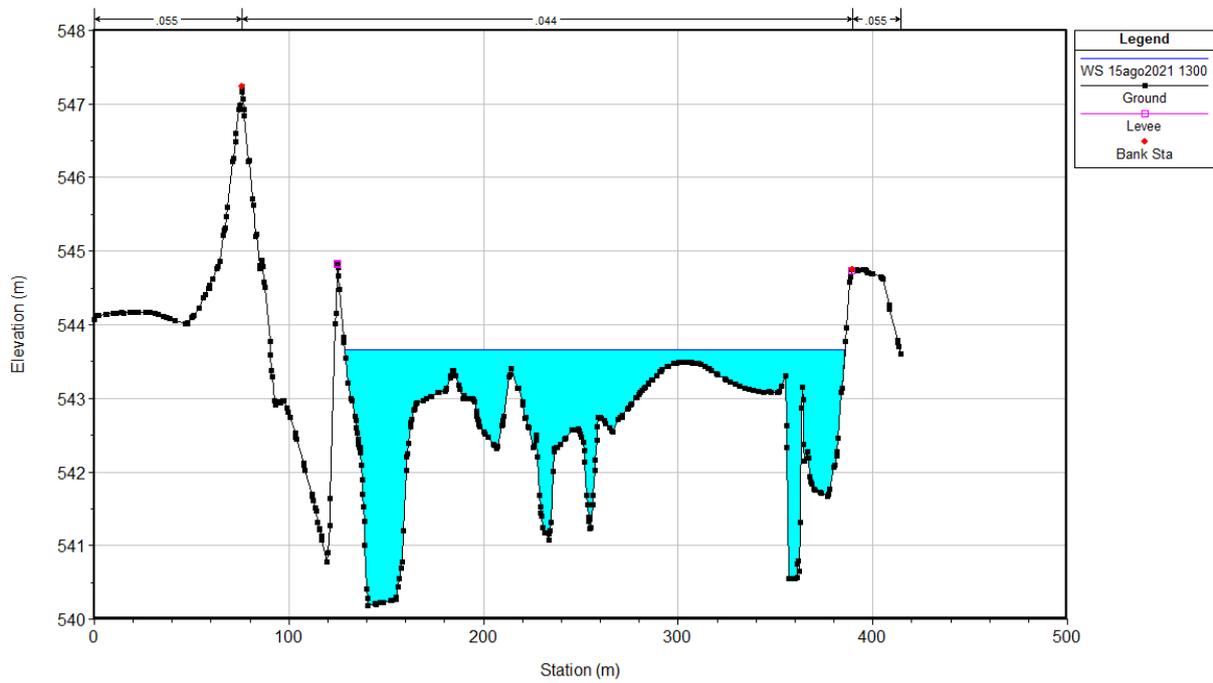
Sezione 11.5_2017



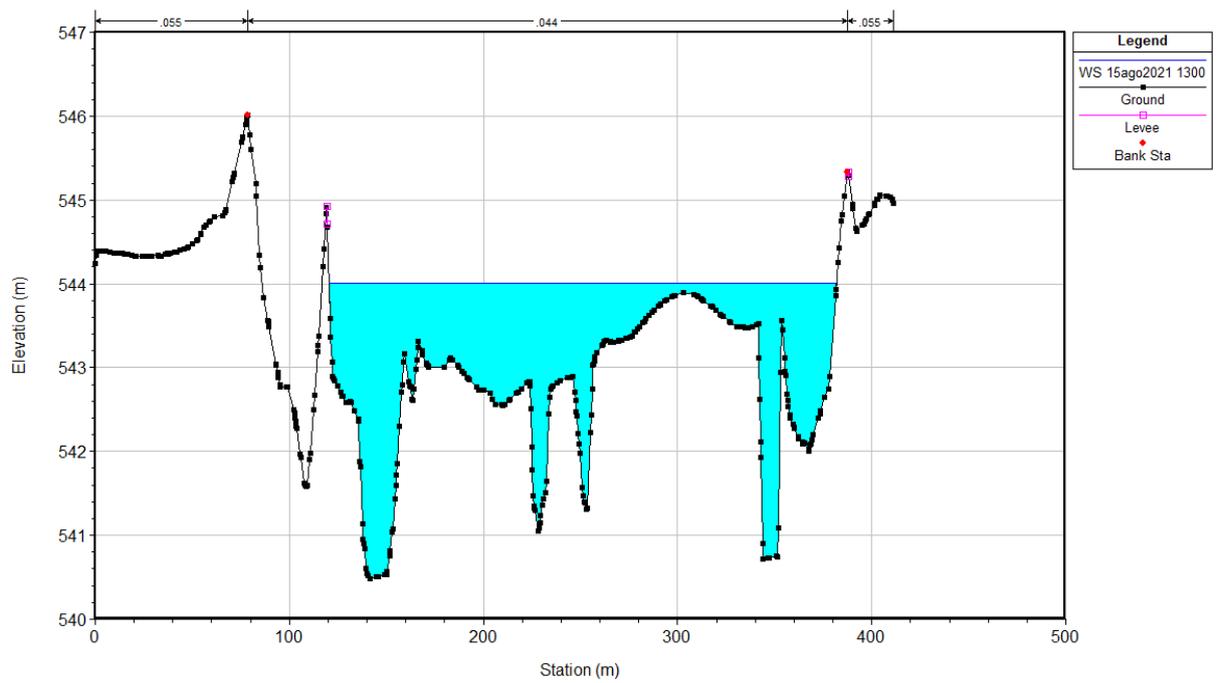
Sezione 12_2017



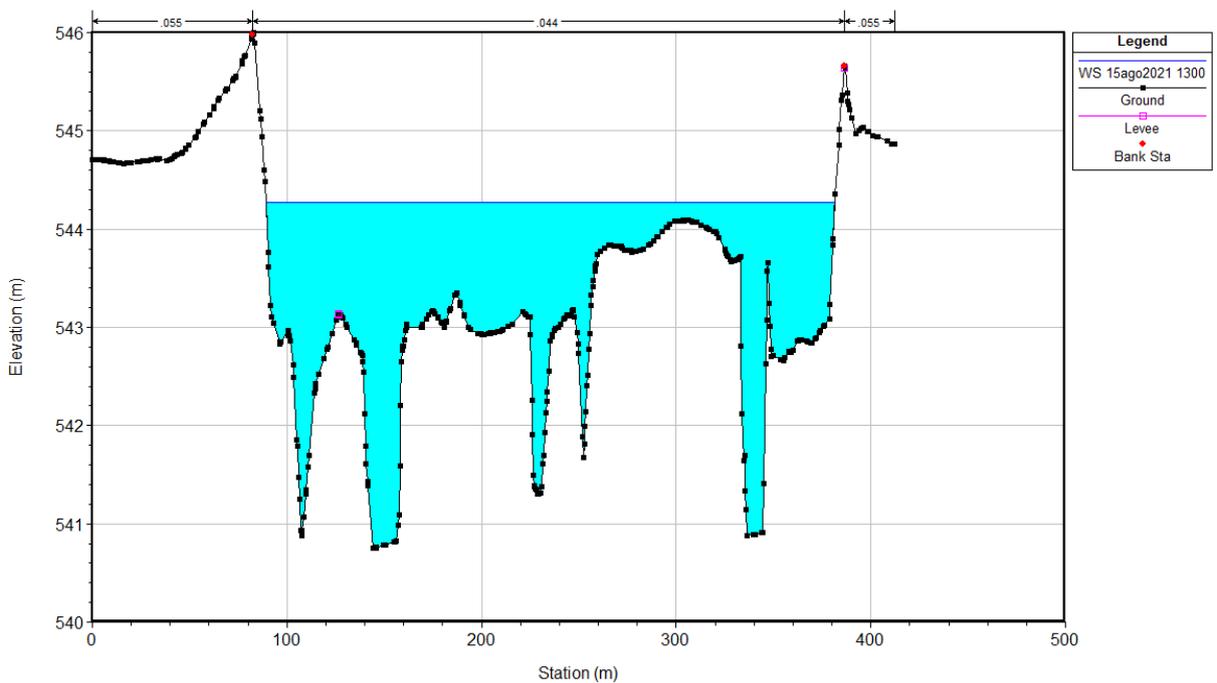
Sezione 13_2017



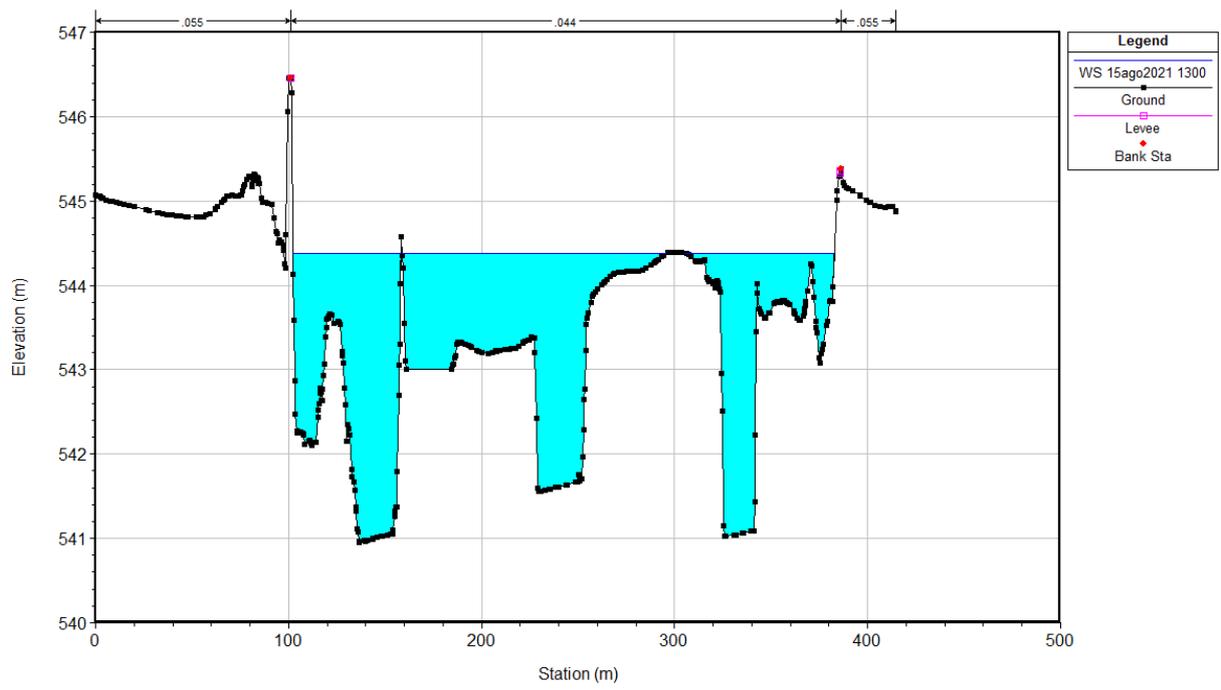
Sezione 14_2017



Sezione 15_2017



Sezione 16_2017



Sezione 17_2017

- Script di BASEMENT per la simulazione morfo-dinamica del modello relativo al 2003

```

PROJECT {
    title = Torrente_Gesso
    author = Mario
    date = 26.10.2017
}
DOMAIN {
    multiregion = unnamed_multiregion
    BASECHAIN_1D {
        region_name = Torrente_gesso01_SED
        GEOMETRY {
            type = basement
            file = T.Gesso_coupling_parte1D-NEW.bmg
            cross_section_order = (44 43 42 41 40 39 38 37 36 35 34 33 32 31 30 29 28 27 26 23
20 19 18)
            dump_crosssections = no
        }
        HYDRAULICS {
            PARAMETER {
                minimum_water_depth = 0.001
                riemann_solver = roe
                simulation_scheme = explicit
                stretch_boundary_elem = yes
            }
            SECTION_COMPUTATION {
                type = table
                min_interval = 0.005
                max_interval = 0.01
                internal levees = off
            }
        }
        FRICTION {
            default_friction = 18
            type = strickler
            grain_size_friction = no
        }
    }
}

```

```

BOUNDARY {
    name          = Inflow_1D_hyd
    string        = upstream
    type          = hydrograph
    file          = Idrogramma_TR200.txt
    slope         = 14
    precision     = 0.0001
    number_of_iterations = 250
}

BOUNDARY {
    name = Outflow_1D_hyd
    string = downstream
    type = coupling_zero_gradient
}

INITIAL {
    type = continue
    file = Torrente_Gesso01_hyd_restart_300.dat
}

}

MORPHOLOGY {
    PARAMETER {
        porosity          = 30
        density           = 2650
        control_volume_type = constant
        control_volume_thickness = 0.7
        max_dz_table      = 0.05
        min_theta_critic  = 0.03
        wetting_fraction  = 0.1
        control_volume_factor = 3.0
        create_new_layers = off
    }

    BEDMATERIAL {
        GRAIN_CLASS {
            diameters = (11.2 21.2 56.3 80.0 121.2 154.0 190.0 261.8 400)
        }

        MIXTURE {

```

```

        name      = Standard_1D
        volume_fraction = (5 11 9 25 25 9 6 5 5)
    }
    SOIL_DEF {
        name      = Mobile
        tau_erosion_start = -1.0
        LAYER {
            mixture      = Standard_1D
            bottom_elevation = -10
        }
    }
    SOIL_ASSIGNMENT {
        index = (0 1)
        soil = (Mobile Mobile)
        type = index_table
    }
}
INITIAL {
    type = initial_mesh
}
BEDLOAD {
    PARAMETER {
        upwind      = 0.5
        velocity_area = main
        abrasion     = off
    }
    FORMULA {
        bedload_formula      = mpm_multi
        theta_critical        = -1.0
        bedload_factor        = 0.7
        bedload_exponent      = 1.5
        theta_critical_approach = theta_critical_vanriijn
        theta_critical_hiding  = mean
        critical_shear_stress_calibration = 1.0
        angle_of_repose        = 30.0
        bed_forms              = 1.0
    }
}

```

```

        local_slope      = on
    }
    BOUNDARY {
        name  = Inflow_1D_sed
        type  = transport_capacity
        string = upstream
        mixture = Standard_1D
        factor = 0.9
    }
    BOUNDARY {
        name  = Outflow_1D_sed
        type  = coupling_IODown
        string = downstream
    }
}
}
TIMESTEP {
    CFL      = 1
    maximum_time_step = 100.0
    total_run_time   = 32500
    start_time      = 22500
    initial_time_step = 100.0
}
OUTPUT {
    output_time_step = 100
    restart_time_step = 1E32
    SPECIAL_OUTPUT {
        output_time_step = 100
        type              = BASEviz
        variable          = depth
        show_gridlines    = no
        write_jpeg_image_time = -1.0
    }
}
}
BASEPLANE_2D {

```

```

region_name = Torrente_gesso02_SED
GEOMETRY {
    type = 2dm
    file = Project38.2dm
    STRINGDEF {
        name = Inflow_2D
        node_ids = (198 199 200 201 202 203 204 205 206 207 208 209 210
211 212 213 214 215 216 217 218 219 220 221 222 223 224 225 226 227 228 229 230 231 232 233 234 235 236
237 238 239 240 241 242 243 244 245 246 247 248 10198 10230 249 250 251 252 253 254 255 256 10233 257
10193 258 259 260 261 262 263 264 10195 10175 265 266 267 268 269 10190 270 10174 271 272 273 274 275
10228 276 277 278 279 280 281 282 10219 283 284 285 286 287 288 289 290 291 292 293 294 295 296 297
298 299 300 301 302 303 304 305 306 307 308 309 310 311 312 313 314 315 316 317 318 319 320 321 322 323
324 325 326 327 328 329 330 331 332 333 334 335 336 337 338 339 340 341 342 343 344 345 346 347 348 349
350 351 352 353 354 355 356 357 358 359 360 361 362 363 364 365 366 367 368 369 370 371 10166 372
10168 373 374 375 376 10170 377 10171 378 379 380 381 382 383 384 385 386 387 388 389 390)

        upstream_direction = right
    }
    STRINGDEF {
        name = Outflow_2D
        node_ids = (109 110 111 10224 112 113 114 115 116 117 118 119 120
121 10226)

        upstream_direction = right
    }
    STRINGDEF {
        name = Inflow_2D_sed
        node_ids = (198 199 200 201 202 203 204 205 206 207 208 209 210
211 212 213 214 215 216 217 218 219 220 221 222 223 224 225 226 227 228 229 230 231 232 233 234 235 236
237 238 239 240 241 242 243 244 245 246 247 248 11922 11925 249 250 251 252 253 254 255 256 11926 257
11920 258 259 260 261 262 263 264 11921 11918 265 266 267 268 269 11919 270 11917 271 272 273 274 275
11924 276 277 278 279 280 281 282 11923 283 284 285 286 287 288 289 290 291 292 293 294 295 296 297
298 299 300 301 302 303 304 305 306 307 308 309 310 311 312 313 314 315 316 317 318 319 320 321 322 323
324 325 326 327 328 329 330 331 332 333 334 335 336 337 338 339 340 341 342 343 344 345 346 347 348 349
350 351 352 353 354 355 356 357 358 359 360 361 362 363 364 365 366 367 368 369 370 371 11913 372
11914 373 374 375 376 11915 377 11916 378 379 380 381 382 383 384 385 386 387 388 389 390)

        upstream_direction = right
    }
}
HYDRAULICS {
    PARAMETER {
        simulation_scheme = exp
        riemann_solver = hllc
        minimum_water_depth = 0.04
        velocity_update_partial = volume_area
    }
}

```

```

dynamic_depth_solver      = on
dynamic_depth_solver_precision = 0.005
geo_min_area_ratio        = 0.05
geo_max_angle_quadrilateral = 45
geo_min_aspect_ratio      = 0.06
}
TURBULENCE_MODEL {
    kinematic_viscosity = 0.000001307
    const_eddy_viscosity = -1
    turbulence_factor    = 1
    boundary_gradient    = zerogradient
    type                 = algebraic
}
BOUNDARY {
    name          = Inflow_2D_hyd
    type          = coupling_hydrograph
    string_name   = Inflow_2D
    slope        = 14
    weighting_type = area
    wse_calc_method = local
    precision     = 0.002
    max_interval  = 20
    number_of_iterations = 5000
}
BOUNDARY {
    string_name = Outflow_2D
    type        = hqrelation
    slope       = 14
    weighting_type = conveyance
    wall_flux   = no
    wse_calc_method = average
    conveyance_type = tables
}
INITIAL {
    type          = continue
    file          = Torrente_gesso02_hyd_restart.cgns
}

```

```

        restart_solution_time = 350
    }
    FRICTION {
        input_type      = index_table
        type            = strickler
        default_friction = 23
        wall_friction   = off
        index           = (2)
        friction        = (18)
        grain_size_friction = no
    }
}
MORPHOLOGY {
    PARAMETER {
        density          = 2650
        control_volume_thickness = 0.7
        control_volume_type = constant
        porosity         = 30
        create_new_layers = off
        min_theta_critic = 0.02
        local_slope_angle_repose = 30.0
        strong_coupling  = off
        distortion_offset = 0
        distortion_time_interval = -1
    }
    BEDMATERIAL {
        GRAIN_CLASS {
            diameters = (11.2 21.2 56.3 80.0 121.2 154.0 190.0 261.8 400)
        }
        MIXTURE {
            name          = Standard
            volume_fraction = (5 11 9 25 25 9 6 5 5)
        }
        SOIL_DEF {
            name          = Fixed
            tau_erosion_start = -1.0
        }
    }
}

```

```

}
SOIL_DEF {
    name      = Mobile
    tau_erosion_start = -1.0
    LAYER {
        mixture      = Standard
        bottom_elevation = -10
    }
}
SOIL_ASSIGNMENT {
    index = (0 1 2)
    soil = (Mobile Mobile Mobile)
    type = index_table
}
}
INITIAL {
    type = initial_mesh
}
BEDLOAD {
    BOUNDARY {
        name      = Inflow_2D_sed
        type      = coupling_sediment_discharge
        string_name = Inflow_2D
    }
    BOUNDARY {
        name      = Outflow_2D_sed
        type      = IODown
        string_name = Outflow_2D
        fraction_boundary = 1.0
    }
}
PARAMETER {
    limit_bedload_wetted      = off
    use_cell_averaged_bedload_flux = off
    bedload_routing_start    = 0.0
    use_real_edge_lengths    = off
}
}

```

```

FORMULA {
    bedload_formula      = mpm_multi
    bedload_factor       = 1.0
    bedload_exponent     = 1.5
    theta_critical_approach = theta_critical_vanriijn
    theta_critical_hiding = mean
    local_slope_correction = local_slope_vanriijn
    critical_shear_stress_calibration = 1.0
    bedforms_type        = no_bedforms
}

DIRECTION {
    lateral_transport_type = lateral_bed_slope
    lateral_index          = (0 1)
    lateral_transport_factor = 2.05
    lateral_transport_exponent = 0.5
    scale_lateral_transport = yes
}

}

TIMESTEP {
    total_run_time      = 32500
    CFL                 = 1.8
    minimum_time_step   = 0.001
    start_time          = 25000
    ignore_wave_celerity = off
    maximum_time_step   = 100.0
    initial_time_step   = 1.0
    morph_cycle         = off
}

OUTPUT {
    console_time_step = 100
    restart_time_step = 1E32
    SPECIAL_OUTPUT {
        type          = BASEviz
        output_time_step = 1000
        variable       = depth
    }
}

```

```

        wse3D          = off
        vectors        = off
        gridlines      = off
        vectors_scaling_factor = 1.0
        write_jpeg_image_time = -1.0
        threshold_wse  = -1000000
    }
}
}
PARALLEL {
    number_threads = 2
}
PHYSICAL_PROPERTIES {
    gravity = 9.81
    viscosity = 1e-006
    rho_fluid = 1000
}
COUPLINGS {
    PARAMETER {
        max_time_level      = 1
        factor_time_step_reduction = 1.0
        server               = yes
        ip_address           = localhost
        port                 = 5000
        max_buffer           = 2000
        packet_size         = 1000
        log_network          = off
    }
    COUPLING {
        type                = sequential
        upstream_subdomain = Torrente_gesso01_SED
        downstream_subdomain = Torrente_gesso02_SED
        two_way_coupling   = no
        average_steps      = 1
        print_series        = no
        epsilon             = 1E-6
    }
}

```

```
HYDRAULICS {  
    upstream_interface = Outflow_1D_hyd  
    downstream_interface = Inflow_2D_hyd  
}  
BEDLOAD {  
    upstream_interface = Outflow_1D_sed  
    downstream_interface = Inflow_2D_sed  
}  
}  
}
```

- Script di BASEMENT per la simulazione morfo-dinamica del modello relativo al 2017

```

PROJECT {
    title = Torrente_Gesso
    author = Mario
    date = 26.10.2017
}

DOMAIN {
    multiregion = unnamed_multiregion
    BASEPLANE_2D {
        region_name = Torrente_gesso02_SED
        GEOMETRY {
            type = 2dm
            file = Project39.2dm
            STRINGDEF {
                name = Inflow_2D
                node_ids = (1182 1183 1184 1185 1186 1187 1188 1189 1190 1191
1192 1193 1194 1195 1196 1197 1198 1199 1200 1201 1202 1203 1204 1205 1206 1207 1208 1209 1210 1211
1212 1213 1214 1215 1216 1217 1218 1219 1220 1221 1222 1223 1224 1225 1226 1227 1228 1229 1230 1231
1232 1233 1234 1235 1236 1237 1238 1239 1240 10289 1241 10416 10290 1242 1243 1244 10742 1245 8177
1246 1247 1248 1249 1250 1251 1252 1253 1254 1255 1256 1257 1258 8178 1259 1260 11702 1261 1262 1263
1264 1265 1266 1267 1268 8501 10498 1269 1270 1271 1272 1273 1274 1275 11212 1276 1277 1278 1279
1280 1281 1282 10626 1283 1284 1285 1286 1287 1288 1289 1290 8179 1291 1292 1293 1294 1295 1296 1297
8502 9763 8937 8756 1298 1299 11216 1300 1301 1302 9926 9934 9968 1303 8180 10412 9933 1304 1305
10274 10248 10146 1306 1307 1308 1309 1310 11008 1311 1312 1313 1314 1315 1316 1317 1318 1319 1320
1321 8503 1322 1323 1324 1325 11219 1326 1327 11218 1328 1329 1330 1331 1332 1333 1334 8181 1335
1336 1337 11899 1338 1339 1340 1341 1342 8504 8758 8182 1343 8505 10481 1344 1345 1346 1347 1348
1349 1350 1351 1352 1353 1354 1355 1356 1357 1358 1359 1360 1361 1362 1363 1364 1365 1366 1367 1368
1369 1370 1371 1372 1373 1374)
                upstream_direction = right
            }
            STRINGDEF {
                name = Outflow_2D
                node_ids = (8163 140 141 142 11526 143 11279 144 145 146 10756
10663 147 148 149 150 11282 151 152 153 154 155 156 157 10284 8203 158 159 160 8142)
                upstream_direction = right
            }
            STRINGDEF {
                name = Inflow_2D_sed

```

```
node_ids = (1182 1183 1184 1185 1186 1187 1188 1189 1190 1191
1192 1193 1194 1195 1196 1197 1198 1199 1200 1201 1202 1203 1204 1205 1206 1207 1208 1209 1210 1211
1212 1213 1214 1215 1216 1217 1218 1219 1220 1221 1222 1223 1224 1225 1226 1227 1228 1229 1230 1231
1232 1233 1234 1235 1236 1237 1238 1239 1240 10289 1241 10416 10290 1242 1243 1244 10742 1245 8177
1246 1247 1248 1249 1250 1251 1252 1253 1254 1255 1256 1257 1258 8178 1259 1260 11702 1261 1262 1263
1264 1265 1266 1267 1268 8501 10498 1269 1270 1271 1272 1273 1274 1275 11212 1276 1277 1278 1279
1280 1281 1282 10626 1283 1284 1285 1286 1287 1288 1289 1290 8179 1291 1292 1293 1294 1295 1296 1297
8502 9763 8937 8756 1298 1299 11216 1300 1301 1302 9926 9934 9968 1303 8180 10412 9933 1304 1305
10274 10248 10146 1306 1307 1308 1309 1310 11008 1311 1312 1313 1314 1315 1316 1317 1318 1319 1320
1321 8503 1322 1323 1324 1325 11219 1326 1327 11218 1328 1329 1330 1331 1332 1333 1334 8181 1335
1336 1337 11899 1338 1339 1340 1341 1342 8504 8758 8182 1343 8505 10481 1344 1345 1346 1347 1348
1349 1350 1351 1352 1353 1354 1355 1356 1357 1358 1359 1360 1361 1362 1363 1364 1365 1366 1367 1368
1369 1370 1371 1372 1373 1374)
```

```
upstream_direction = right
```

```
}
```

```
STRINGDEF {
```

```
name = Culvert_1_String_1
```

```
node_ids = (373 8268 10722 10696)
```

```
upstream_direction = right
```

```
}
```

```
STRINGDEF {
```

```
name = Culvert_1_String_2
```

```
node_ids = (383 8274 384 4072)
```

```
upstream_direction = right
```

```
}
```

```
STRINGDEF {
```

```
name = Culvert_2_String_1
```

```
node_ids = (10036 9977 1146)
```

```
upstream_direction = right
```

```
}
```

```
STRINGDEF {
```

```
name = Culvert_2_String_2
```

```
node_ids = (1156 8490 8745)
```

```
upstream_direction = right
```

```
}
```

```
STRINGDEF {
```

```
name = Culvert_3_String_1
```

```
node_ids = (1125 1126 1127)
```

```
upstream_direction = right
```

```
}
```

```
STRINGDEF {
```

```

        name          = Culvert_3_String_2
        node_ids      = (1134 1135 10306)
        upstream_direction = right
    }
}
HYDRAULICS {
    PARAMETER {
        simulation_scheme      = exp
        riemann_solver         = hllc
        minimum_water_depth    = 0.05
        velocity_update_partial = volume_area
        dynamic_depth_solver   = on
        dynamic_depth_solver_precision = 0.005
        geo_min_area_ratio     = 0.05
        geo_max_angle_quadrilateral = 45
        geo_min_aspect_ratio   = 0.06
    }
    TURBULENCE_MODEL {
        kinematic_viscosity = 0.000001307
        const_eddy_viscosity = -1
        turbulence_factor    = 1
        boundary_gradient    = zerogradient
        type                 = algebraic
    }
    BOUNDARY {
        name          = Inflow_2D_hyd
        type          = hydrograph
        string_name   = Inflow_2D
        slope        = 14
        weighting_type = area
        file         = Idrogramma_magra.txt
        max_interval = 20
        number_of_iterations = 5000
        dynamic_slope = no
        precision     = -1.0
        wse_calc_method = average
    }
}

```

```

}
BOUNDARY {
    string_name = Outflow_2D
    type        = hqrelation
    slope       = 12
    weighting_type = conveyance
    wall_flux    = no
    wse_calc_method = average
    conveyance_type = tables
}
INITIAL {
    type        = continue
    file        = Torrente_gesso02_hyd_restart500.cgns
    restart_solution_time = 500
}
FRICTION {
    input_type    = index_table
    type          = strickler
    default_friction = 23
    wall_friction = on
    index         = (2)
    friction      = (18)
    grain_size_friction = no
}
INNER_BOUNDARY {
    type        = hqrelation
    string_name1 = Culvert_1_String_1
    string_name2 = Culvert_1_String_2
    file        = Culvert_1.txt
    momentum_factor = 1.0
}
INNER_BOUNDARY {
    type        = hqrelation
    string_name1 = Culvert_2_String_1
    string_name2 = Culvert_2_String_2
    file        = Culvert_2.txt
}

```

```

        momentum_factor = 1.0
    }
    INNER_BOUNDARY {
        type      = hqrelation
        string_name1 = Culvert_3_String_1
        string_name2 = Culvert_3_String_2
        file      = Culvert_3.txt
        momentum_factor = 1.0
    }
}
MORPHOLOGY {
    PARAMETER {
        density      = 2650
        control_volume_thickness = 0.6
        control_volume_type = constant
        porosity     = 30
        create_new_layers = off
        min_theta_crit = 0.02
        local_slope_angle_repose = 30.0
        strong_coupling = off
        distortion_offset = 0
        distortion_time_interval = -1
    }
    BEDMATERIAL {
        GRAIN_CLASS {
            diameters = (11.2 21.2 56.3 80.0 121.2 154.0 190.0 261.8 400)
        }
        MIXTURE {
            name = Standard
            volume_fraction = (5 11 9 25 25 9 6 5 5)
        }
        SOIL_DEF {
            name = Fixed
            tau_erosion_start = -1.0
        }
        SOIL_DEF {

```

```

        name      = Mobile
        tau_erosion_start = -1.0
        LAYER {
            mixture      = Standard
            bottom_elevation = -10
        }
    }
    SOIL_ASSIGNMENT {
        index = (0 1 2 3)
        soil = (Mobile Mobile Mobile Mobile)
        type = index_table
    }
}
INITIAL {
    type = initial_mesh
}
BEDLOAD {
    BOUNDARY {
        name      = Inflow_2D_sed
        type      = transport_capacity
        string_name = Inflow_2D
        mixture   = Standard
        factor    = 1.0
    }
    BOUNDARY {
        name      = Outflow_2D_sed
        type      = IODown
        string_name = Outflow_2D
        fraction_boundary = 1.0
    }
}
PARAMETER {
    limit_bedload_wetted      = off
    use_cell_averaged_bedload_flux = off
    upwind                    = (0.5 0.5 0.5 0.5)
    upwind_index              = (0 1 2 3)
    bedload_routing_start     = 0.0
}

```

```

        use_real_edge_lengths      = off
    }
    FORMULA {
        bedload_formula             = mpm_multi
        bedload_factor              = 0.7
        bedload_exponent            = 1.5
        theta_critical_approach     = theta_critical_vanrijn
        theta_critical_hiding       = mean
        local_slope_correction      = local_slope_vanrijn
        critical_shear_stress_calibration = 1.0
        bedforms_type               = no_bedforms
    }
    DIRECTION {
        lateral_transport_type      = lateral_bed_slope
        lateral_index               = (0 1 3)
        lateral_transport_factor    = 2.05
        lateral_transport_exponent  = 0.5
        scale_lateral_transport     = yes
    }
}
GRAVITATIONAL_TRANSPORT {
    index                          = (0 1 2 3)
    angle_failure_dry              = (50 50 50 100)
    angle_failure_wetted          = (40 40 40 80)
    angle_failure_deposited       = (20 20 20 20)
    gravity_transport_on_cells     = all
    max_delta_z                   = 0.001
    cycle_step                     = 5
    min_changed_volume            = 0.01
    max_iterations                 = 10
    angle_wetted_criterion        = fully_wetted
    only_subsurface_angle         = no
    check_hydrostatic_stabilization = no
    stabilization_height          = 0.00
}
}

```

```

TIMESTEP {
    total_run_time    = 5000
    CFL               = 1.80
    minimum_time_step = 0.001
    start_time        = 0.0
    maximum_time_step = 100.0
    initial_time_step = 1.0
    ignore_wave_celerity = off
    morph_cycle       = off
}

OUTPUT {
    console_time_step = 300
    restart_time_step = 1E32
    SPECIAL_OUTPUT {
        type           = BASEviz
        output_time_step = 100
        variable       = depth
        wse3D          = off
        vectors        = off
        gridlines      = off
        vectors_scaling_factor = 1.0
        write_jpeg_image_time = -1.0
        threshold_wse   = -1000000
    }
}

}

PARALLEL {
    number_threads = 3
}

PHYSICAL_PROPERTIES {
    gravity = 9.81
    viscosity = 1e-006
    rho_fluid = 1000
}

}

```


Bibliografia

Vetsch D., 2017, System Manuals of BASEMENT, Version 2.7. Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW). ETH Zurich: Available from <http://www.basement.ethz.ch>.

CEIWR-HEC,2015, HEC-RAS USDA-ARS Bank Stability & Toe Erosion Model (BSTEM), Version 5.0.3. US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center (HEC): Available from <http://www.hec.usace.army.mil>.

CEIWR-HEC,2015, HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual, Version 5.0.3. US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center (HEC): Available from <http://www.hec.usace.army.mil>.

CEIWR-HEC,2015, HEC-RAS Analysis System Applications Guide, Version 5.0.3. US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center (HEC): Available from <http://www.hec.usace.army.mil>.

CEIWR-HEC,2015, HEC-RAS River Analysis System User's Manual, Version 5.0.3. US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center (HEC): Available from <http://www.hec.usace.army.mil>.

Autorità di Bacino del fiume Po, 2006, Parma, Specifica tecnica delle attività

Jessica Giordano, 2011, Analisi idrauliche del torrente Gesso nel tratto di attraversamento del comune di Cuneo

Regione Piemonte - Direzione Pianificazione Risorse Idriche, Marzo 2007, Piano di Tutela delle Acque

Nardini A., 2005, Centro Italiano per la Riqualificazione Fluviale, Studio propedeutico ad un piano partecipato di gestione e di intervento sostenibile per la zona fluviale del Torrente Gesso tra Roccavione, Borgo San Dalmazzo, Boves e Cuneo

Sitografia

ARPA Piemonte Banca dati idrologica,

<http://www.regione.piemonte.it/ambiente/aria/rilev/ariaday/annali/idrologici>