

[Handwritten signature]



Studio di Ingegneria
Ing. Alessio Gabrielli

Via Donizetti, 52 - 50018 Scandicci (FI)
Tel. 055/7373454 - Fax. 055/7373453
E-mail: gabrielli@ocmail.it

Studio idraulico del fiume Elsa

*contestuale alla proposta
di Piano di Recupero di iniziativa privata
di un edificio di abitazione,
loc. I Casotti, Certaldo (FI)*

Progettista:

Ing. Alessio Gabrielli

Proprietà - Committente:

Tinti Anna
Morelli Rita

Allegato 20/26 alla deliberazione
n. 98/CC del 26/00/06

DATA:

Aprile 2006

Relazione idraulica



INDICE

1. Premesse	1
2. Inquadramento territoriale	3
3. Articolazione dello studio	5
4. Metodologia operativa	7
4.1 Introduzione	7
4.2 Modellistica idraulica	7
4.2.1 <i>Il modello in moto vario</i>	9
4.2.2 <i>Caratterizzazione geometrica</i>	11
4.3 Modellistica idrologica	12
5. Modello di sintesi	14
5.1 Rilievo plano-altimetrico e curve di invaso	14
5.2 Idrogrammi di piena	15
5.3 Simulazione idraulica in moto vario	17
5.4 Risultati della simulazione e considerazioni	18
6. Modello di dettaglio	22
6.1 Rilievo plano-altimetrico e curve di invaso	22
6.2 Idrogrammi di piena	28
6.3 Simulazione idraulica in moto vario e risultati	29
7. Conclusioni	31
Allegato A – Sezioni idrauliche	32
Allegato B – Curve di invaso	44
Allegato C – Sezioni idrauliche	49
Bibliografia	53

1. Premesse

Il presente studio è stato commissionato per supportare gli elaborati e le relazioni progettuali relative alla proposta di Piano di Recupero di iniziativa privata dell'edificio di abitazione di proprietà delle Sig.re Morelli Rita e Tinti Anna ubicato in Via Pian di Sotto, 58 – Loc. I Casotti, nel territorio del Comune di Certaldo.

In data 22/11/2005 la Commissione Urbanistica del Comune di Certaldo esprime, relativamente a suddetta proposta, parere favorevole, richiedendo una serie di integrazioni, tra le quali, al punto 8., una “contestualizzazione della verifica sul rischio idraulico in relazione al Piano per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) recentemente approvato”.

Il territorio circostante l'edificio oggetto dell'intervento è individuato, ai sensi del P.A.I., entrato in vigore col D.P.C.M. 6 maggio 2005, nell'elaborato “Perimetrazione delle aree con pericolosità idraulica – Livello di sintesi in scala 1:25.000”, stralcio n. 108, e classificato come area a pericolosità idraulica molto elevata (P.I.4); l'art. 6 delle Norme di Attuazione del P.A.I. definisce gli interventi consentiti all'interno delle aree P.I.4, e specificatamente, alla lettera “k”, indica che sono consentiti “interventi di ristrutturazione urbanistica, a condizione che venga garantita la preventiva o contestuale realizzazione delle opere di messa in sicurezza idraulica per eventi con tempo di ritorno di 200 anni, sulla base di studi idrologici ed idraulici, previo parere favorevole dell'autorità idraulica competente e dell'Autorità di Bacino sulla coerenza degli interventi di messa in sicurezza anche per ciò che concerne le aree adiacenti”. L'intervento di recupero dell'edificio in questione è assimilabile ad una ristrutturazione urbanistica, e pertanto soggetto alle limitazioni individuate nel suddetto articolo.

Il Piano di Indirizzo Territoriale, approvato con D.C.R. n. 12 del 25 gennaio 2000, definisce gli ambiti fluviali sottoposti a misure di salvaguardia per la difesa dai fenomeni alluvionali; il Fiume Elsa è classificato in ambito AB (allegato n. 4 e n. 5), e, in particolare, l'edificio è situato in ambito B, a cui l'art. 77, punto 1, fa corrispondere le “aree a quote altimetriche inferiori rispetto alla quota posta a due metri sopra il piede esterno d'argine o, in mancanza, sopra il ciglio di sponda”; il punto 2 di medesimo articolo indica, inoltre, che “il limite esterno di tale ambito è determinato dai punti di incontro delle perpendicolari all'asse del corso d'acqua con il terreno alla quota altimetrica come sopra individuata e non potrà comunque superare la distanza di metri lineari 300 dal piede esterno dell'argine o dal ciglio di sponda”. Tra gli interventi soggetti a salvaguardia all'interno dell'ambito B, sono esclusi “i nuovi piani attuativi e le varianti ai piani attuativi vigenti che non comportano trasformazioni morfologiche e che non prevedono incrementi di superficie coperta superiori a mq. 200”, (art. 77, punto 10), pertanto, la ristrutturazione urbanistica in oggetto, la quale non prevede incrementi di superficie coperta, beneficia di questa esclusione.

La consultazione delle cartografie allegate al Piano stralcio “Rischio Idraulico” e al Piano Straordinario, ai sensi del D.L. 180/98, mostra come non vi siano vincoli né salvaguardie ulteriori per la porzione di territorio in esame.

Questo studio si propone, dunque, di valutare l'entità del rischio idraulico nell'area in questione mediante individuazione del battente idrico statico determinato da un evento alluvionale del fiume Elsa con tempo di ritorno duecentennale e perimetrazione delle aree soggette ad allagamento.

Esso si sviluppa attraverso la preliminare acquisizione delle informazioni topografiche relative alla porzione di interesse del bacino del fiume Elsa, sia attingendo dalla cartografia ufficiale che predisponendo opportuni rilievi topografici di dettaglio, e, attraverso un'elaborazione idrologica volta a stimare le portate di piena per il tempo di ritorno stabilito e una successiva modellazione idraulica in moto vario del fiume Elsa per un tratto significativo, perviene alla valutazione di suddetto rischio idraulico con relativa perimetrazione delle aree inondabili.

2. Inquadramento territoriale

Il fiume Elsa, oggetto principale di questo studio, è uno dei maggiori affluenti del fiume Arno in termini di lunghezza, di superficie drenata e di portata; è individuato dagli Allegati del Piano di Indirizzo Territoriale, approvato con D.C.R. n.12 del 25 gennaio 2000, con il codice 718 e il suo bacino imbrifero sottende una superficie di 867 km², interessando i territori di tre Province (Firenze, Pisa e Siena), e presenta un'asta principale di lunghezza pari a 78,91 km. I principali centri abitati che l'Elsa attraversa sono Poggibonsi, Certaldo e Castelfiorentino, e proprio in corrispondenza di ciascuno di essi il fiume riceve le acque dei maggiori affluenti, rispettivamente Staggia e Foci, Casciani ed Agliena, Rio Petroso e Pesciola.

L'edificio oggetto di intervento è situato in località I Casotti, a NO di Certaldo e dista circa 250 m dall'argine destro del fiume Elsa; la zona circostante risulta compresa tra un ampio meandro del fiume, il rilevato della linea ferroviaria Empoli-Chiusi che corre in destra idraulica in direzione NO-SE e il Borro del Vicariato che corre in direzione NE-SO e si immette in Elsa circa 400 m a Ovest dell'edificio stesso.

Tale porzione di territorio, localmente detta Piano d'Elsa, mostra un andamento essenzialmente pianeggiante, ed è caratterizzata da scarsa densità abitativa e da prevalente uso agricolo.

La Tav. 1 mostra una corografia della porzione di bacino presa in esame e un dettaglio dell'area in cui è ubicato l'edificio oggetto di intervento.

Come detto, la carta "Perimetrazione delle aree con pericolosità idraulica – Livello di sintesi in scala 1:25.000", stralcio n. 108, di cui è mostrato di seguito un particolare, individua questa zona come area a pericolosità idraulica molto elevata (colore giallo); tale perimetrazione è stata effettuata su base storico-inventariale e ad essa viene convenzionalmente assegnato un tempo di ritorno pari a 500 anni.

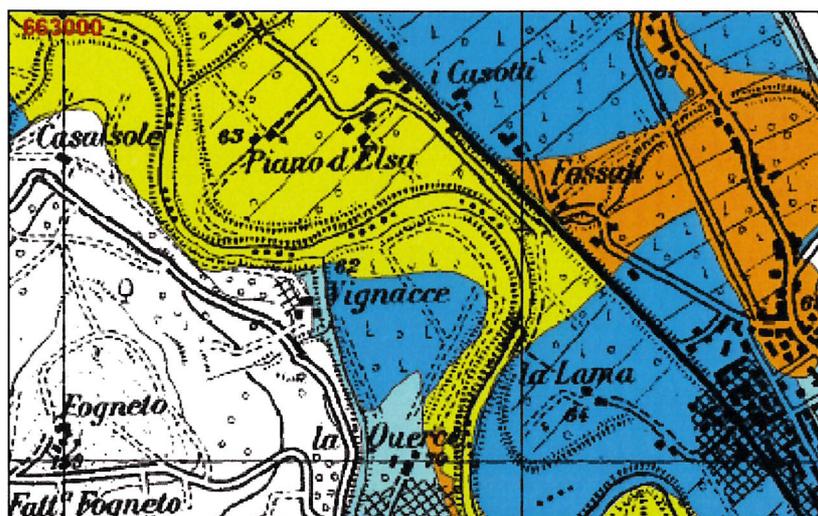


Fig. 1: Particolare della carta "Perimetrazione delle aree con pericolosità idraulica – Livello di sintesi in scala 1:25.000", stralcio n. 108

Il presente lavoro, per quanto concerne la rappresentazione del territorio esaminato, è stato supportato dall'acquisizione della cartografia C.T.R. 1:10.000, in particolare dei fogli D285040, D286010 e D286050, dei rilievi ordinati nel 2003 da R.F.I. nell'ambito del progetto di raddoppio della linea ferroviaria Empoli-Chiusi, riguardanti una serie di sezioni del fiume Elsa nell'ampio tratto fluviale compreso tra Poggibonsi e Castelfiorentino e delle quali sono state acquisite quelle ricadenti nel tratto di interesse, e di un rilievo opportunamente predisposto nella zona circostante l'edificio oggetto di intervento.

Non si è reso possibile utilizzare le informazioni della cartografia numerica in scala 1:2.000 in quanto non ricopre integralmente il territorio preso in esame.

Questi supporti cartografici e topografici sono stati impiegati per la riproduzione dell'andamento plano-altimetrico del territorio nelle modellazioni effettuate, secondo i criteri espressi nei successivi capitoli.

L'analisi del territorio è stata, poi, completata attraverso una serie di sopralluoghi in situ, volti ad individuare quelle caratteristiche puntuali che una cartografia non è in grado compiutamente di descrivere.

3. Articolazione dello studio

La simulazione dei processi di propagazione dell'onda di piena in alveo, la tracimazione nei tratti in cui la capacità di smaltimento risulta inadeguata e la conseguente trasformazione in battenti di esondazione sul territorio necessitano, anche laddove l'interesse fosse limitato all'approfondimento di questi fenomeni in un'area ristretta e ben definita, di un'analisi del comportamento del corso d'acqua in un'ottica più ampia, che tenga conto dell'evoluzione dell'evento di piena e delle sue ripercussioni sul territorio a partire da monte; solo mediante questo approccio è possibile andare ad indagare con maggiore dettaglio quali possano essere gli effetti indotti dal corso d'acqua su un'area specifica.

Il presente lavoro si sviluppa in due fasi successive: dapprima è stato approntato un modello idrologico-idraulico di sintesi, tale da descrivere, mediante una completa caratterizzazione spaziale e un'attenta stima degli idrogrammi di piena, compresi i contributi laterali dei numerosi affluenti, le dinamiche in alveo e nelle aree contigue eventualmente inondate.

In seguito è stato realizzato, sulla base delle indicazioni e dei risultati del modello generale, un modello di dettaglio volto a valutare accuratamente la situazione specifica della porzione di territorio circostante l'edificio in questione, e costruito con la medesima metodologia del primo.

Suddetta metodologia è descritta ampiamente nel Cap. 4.

Il modello di sintesi è stato sviluppato a partire dallo studio effettuato sul fiume Elsa nell'ambito del progetto definitivo della variante alla S.R. 429 di Val d'Elsa per il collegamento dei centri abitati di Poggibonsi e Certaldo, al quale chi scrive ha collaborato; la progettazione definitiva di tale opera ha visto coinvolti la Provincia di Siena, quale ente attuatore, e la Regione Toscana, e si è conclusa con l'approvazione del progetto in Conferenza dei Servizi nel mese di agosto 2005.

Tale progetto di variante, la cui progettazione esecutiva e realizzazione sono state recentemente appaltate integralmente, ha richiesto uno studio approfondito dei fenomeni esondativi nelle aree adiacenti il fiume Elsa tra Poggibonsi e Certaldo, pertanto è stata realizzata una modellazione idraulica del fiume nel tratto compreso tra i due centri abitati, con sezione di chiusura posta a valle della traversa che si trova poco più a monte della confluenza del torrente Agliena con l'Elsa.

A questo modello, e con i medesimi criteri operativi, è stato fatto riferimento nel presente lavoro; è stato esaminato il tratto fluviale immediatamente successivo a quello studiato per il progetto della S.R. 429 per una lunghezza sufficiente da includere, con margine a valle, la zona di interesse, ubicata, rispetto al fiume Elsa, in destra idraulica, leggermente a valle del centro abitato di Certaldo.

L'analisi in moto vario di questa asta fluviale ha permesso la descrizione della propagazione dei deflussi di piena e la valutazione degli idrogrammi in transito, sezione per sezione, unitamente alla quantificazione dei volumi esondati sul territorio, opportunamente modellato sulla base dei dati contenuti nella cartografia ufficiale C.T.R. 1:10.000.

Dall'osservazione dei risultati di questa preliminare modellazione è stato possibile allestire un modello di dettaglio che tenesse conto, in ingresso, dell'effetto di laminazione a monte, e che, sulla base di una descrizione del territorio tramite rilievi topografici opportunamente predisposti, permettesse di determinare con un buon grado di accuratezza i volumi ed i

battenti di esondazione nelle strette adiacenze dell'edificio per la cui progettazione il presente studio è stato richiesto.

La necessità di operare in due distinte fasi è stata indotta dall'impossibilità di disporre di rilievi topografici che potessero abbracciare una più vasta porzione di territorio; pertanto, la sola modellazione del tratto fluviale adiacente l'intorno dell'edificio di interesse non avrebbe garantito risultati attendibili se non fosse stata preceduta da un'analisi delle dinamiche di propagazione dell'onda di piena e di esondazione nel tratto fluviale a monte, grazie alla quale fosse possibile individuare il corretto input al modello di dettaglio. E', dunque, quest'ultimo, basato su informazioni topografiche più affidabili di quelle contenute nella cartografia ufficiale, a produrre i risultati definitivi.

L'approccio metodologico e teorico sul quale si fonda questo studio, sia nella fase di sintesi, sia in quella di dettaglio, è descritto nel Cap.4, ed entrambe le fasi, con relativi risultati e considerazioni, sono trattate rispettivamente nel Cap. 5 e nel Cap. 6.

4. Metodologia operativa

4.1 Introduzione

Il presente lavoro si basa su un approccio metodologico di diffuso impiego, largamente adottato anche negli studi effettuati dall'Autorità di Bacino del fiume Arno per la perimetrazione delle aree soggette a rischio idraulico.

Esso si esprime attraverso l'utilizzo di modelli indipendenti nella descrizione della dinamica d'alveo e delle aree contigue inondate, opportunamente connessi da un sistema analitico in grado di descrivere lo spostamento dei volumi straripati; questo schema permette di rappresentare in ambito spazio-temporale la dinamica di propagazione e laminazione delle onde di piena quantificando gli effettivi scambi di massa tra alveo ed aree inondate.

La risoluzione del sistema che descrive il fenomeno è ottenuta per via numerica, discretizzando le classiche equazioni del moto e di continuità per una corrente monodimensionale nel dominio spazio-temporale, ed associandovi un'equazione per la stima delle dissipazioni energetiche concentrate e distribuite, attraverso opportuni schemi numerici.

Le sollecitazioni idrologiche al sistema, intese come gli eventi meteorici di intensità e durata variabili che intervengono sul bacino, vengono rappresentate attraverso ietogrammi sintetici sulla base delle curve di possibilità pluviometrica, e attraverso la modellistica idrologica vengono calcolati gli idrogrammi di piena nelle sezioni fluviali di interesse.

La valutazione delle dinamiche di propagazione dei deflussi e delle eventuali esondazioni è affidata ad un modello idraulico in moto vario, grazie al quale, è possibile quantificare quali siano le condizioni più gravose lungo l'asta fluviale e quindi mappare le aree inondabili per il tempo di ritorno richiesto.

4.2 Modellistica idraulica

La modellistica idraulica applicata a questo studio è rappresentata da una schematizzazione del moto alveato di tipo monodimensionale vario e una schematizzazione delle aree laterali non direttamente connesse al corso d'acqua con un classico sistema a celle; le celle laterali definite in funzione della morfologia del territorio e caratterizzate ciascuna da una propria legge di invaso, vengono connesse tra loro e con l'alveo mediante elementi idraulici, quali luci a stramazzo.

L'applicazione di questo modello è stata effettuata mediante il supporto del codice di calcolo Hec-Ras, versione 3.1.1.

La soluzione delle equazioni che governano il moto monodimensionale vario è ottenuta attraverso un metodo numerico alle differenze finite per la discretizzazione spaziale ed un metodo implicito per l'avanzamento temporale tramite successive iterazioni di calcolo (discretizzazione temporale).

La descrizione spaziale del modello è rappresentata dalle sezioni geometriche rilevate e dalla densità e ampiezza delle celle laterali introdotte, mentre la scansione temporale è quella scelta

nella descrizione dei fenomeni tempo-varianti, come gli idrogrammi, e dal passo temporale adottato nelle simulazioni.

Il grado di accuratezza ottenuto dipende dal livello di dettaglio nella riproduzione geometrica (densità delle sezioni fluviali rilevate e delle celle), e dalla scansione temporale utilizzata.

La modellazione delle aree adiacenti al corso d'acqua potenzialmente allagabili, e la descrizione delle dinamiche che all'interno di esse si sviluppano, rappresenta il punto nodale di una modellazione idraulica indirizzata a valutare l'entità del fenomeno esondativo in termini di battenti idrici e la sua estensione.

La schematizzazione a celle interconnesse, che in seguito verranno chiamate "aree di potenziale esondazione" e individuate con l'acronimo APE, proposta in questo lavoro, è comunemente definita come "quasi-bidimensionale" perché consente di studiare il deflusso in alveo mediante la risoluzione delle equazioni del moto e di continuità e la propagazione dei livelli idrici nelle celle utilizzando la sola equazione di continuità; pertanto l'allagamento di ciascuna cella, ogni qualvolta venga superata la capacità di contenimento degli argini fluviali, avviene in modo istantaneo, e l'aumento del battente sul territorio segue la legge di invaso caratteristica della cella stessa.

Anche il trasferimento dei volumi di esondazione tra cella e cella avviene in modo sincrono, regolato da appositi sfioratori, disposti in base alla morfologia del territorio.

L'approssimazione che ha portato a trascurare gli effetti della non stazionarietà e bidimensionalità connessi al fenomeno di propagazione dei volumi d'acqua esondati, principalmente legati all'irregolarità e all'intensa antropizzazione del territorio, può essere ridotta attraverso la realizzazione di un modello fortemente discretizzato, con un alto numero di celle laterali di ridotte dimensioni.

Di seguito vengono analizzate nel dettaglio le leggi che regolano i processi di trasferimento ed accumulo dei volumi in gioco durante l'evento di piena, e descritte ampiamente le caratteristiche geometriche dell'asta fluviale, del territorio e degli elementi idraulici coinvolti nella simulazione.

4.2.1 Il modello in moto vario

Le leggi fisiche che governano il moto di una corrente in un canale in condizioni non stazionarie sono rappresentate dal principio di conservazione della massa (legge di continuità) e dal principio di conservazione del momento della quantità di moto.

Il codice di calcolo Hec-Ras risolve le due equazioni così espresse:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(VQ)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f + S_h \right) = 0$$

in cui:

t = tempo, [s]

x = distanza lungo il canale, [m]

Q = portata, [m³/s]

A = superficie della sezione che contribuisce al deflusso, [m²]

q_l = portata uscente lateralmente, per unità di lunghezza, [m²/s]

V = velocità, [m/s].

g = accelerazione di gravità, [m/s²]

z = carico totale della corrente [m]

S_f = tasso di perdita di carico per attrito

S_h = tasso di perdita di carico per contrazione/espansione tra sezioni idrauliche successive.

Si osserva come le perdite di carico vengano conteggiate all'interno dell'equazione del moto nei termini che includono S_f e S_h .

Il primo è definito secondo l'equazione di Manning, come:

$$S_f = \left(\frac{Q}{K} \right)^2$$

$$\text{con } K = \frac{1,486}{n} AR^{\frac{2}{3}}, \text{ [m}^3/\text{s]},$$

in cui n = coefficiente di attrito di Manning, [s/m^{1/3}]

A = superficie bagnata, [m²]

R = raggio idraulico, [m],

e il secondo come:

$$S_h = \frac{\partial \left(\frac{CV^2}{2g} \right)}{\partial x}$$

in cui C rappresenta il coefficiente di contrazione/espansione, al quale sono assegnati i valori di 0,1 e 0,3, rispettivamente.

Le equazioni appena mostrate vengono risolte attraverso un metodo numerico alle differenze finite, e, in quanto non lineari, per la loro soluzione viene adottata una tecnica di linearizzazione.

Nell'ottica della descrizione mediante differenze finite, ad ogni passo temporale è risolto un sistema di equazioni lineari del tipo $Ax = b$, che necessita dell'assegnazione delle opportune condizioni al contorno.

La scelta delle condizioni al contorno costituisce un elemento determinante nella realizzazione di un modello in moto vario; generalmente come condizione di monte è utilizzato l'input idrologico ricavato mediante la modellistica idrologica descritta nel Par. 4.3, ovvero un'idrogramma di piena.

À valle, tra le varie opportunità, si predilige adottare un idrogramma dei livelli, *Stage Hydrograph*, oppure una relazione livelli-portata, detta scala di deflusso o *Rating Curve*.

È importante che la scelta della condizione di valle, e il relativo effetto, non si ripercuotano a monte attraverso fenomeni di rigurgito; se l'imposizione di determinate condizioni a valle forza in qualche modo la propagazione del deflusso in alveo nel tratto terminale, è consigliabile, nel caso specifico di uno studio come questo, il cui obiettivo è inquadrare il fenomeno esondativo in un'area ben precisa e piuttosto ristretta, ampliare verso valle il tratto fluviale modellato in modo da garantire una buona indipendenza dei risultati dalla condizione di valle prescelta.

Lo scambio di massa tra il fiume e le aree adiacenti è conteggiato aggiungendo un termine all'equazione di continuità per un canale in condizioni di moto monodimensionale vario, precedentemente riportata.

Adesso l'equazione di continuità si scrive come:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0$$

in cui S [m^2] rappresenta la superficie della sezione che contribuisce all'accumulo nelle aree inondabili adiacenti.

Grazie a questa relazione è possibile quantificare la portata in uscita verso le aree laterali.

L'accumulo di volume all'interno di ciascuna APE è governato dalla sola legge di invaso, che lega il livello idrico con il volume contenuto, in relazione agli scambi di portata con il fiume o con le celle contigue.

Tali scambi sono regolati da elementi idraulici come gli sfioratori, i quali funzionano secondo la legge di stramazzo in parete grossa e simulano la tracimazione al di sopra di argini, rilevati etc.

Lo stramazzo in parete grossa è espresso secondo la seguente relazione:

$$Q = C_d L H^{\frac{3}{2}}$$

dove con L [m] è indicata la larghezza della soglia, con H [m] l'altezza della vena stramazzone e con C_d il coefficiente dimensionale di stramazzone [$m^{1/2}/s$] che corrisponde al termine $\mu\sqrt{2g}$ [$m^{1/2}/s$] di uso comune.

4.2.2 Caratterizzazione geometrica

La ricostruzione geometrica dell'asta fluviale e delle aree di potenziale esondazione modellate è effettuata avvalendosi dei rilievi a disposizione e delle informazioni contenute nella cartografia ufficiale.

Lo sviluppo longitudinale del corso d'acqua è riprodotto attraverso opportune sezioni fluviali rilevate, poste a distanza variabile l'una dall'altra, comunque sufficientemente vicine da poter rappresentare compiutamente il percorso fluviale; laddove si riscontrasse un'eccessiva distanza tra due sezioni, è consigliabile provvedere ad un infittimento mediante un criterio di interpolazione.

Ciascuna sezione è caratterizzata, nel modello, da una propria scabrezza, individuata sulla base dell'osservazione delle reali condizioni della stessa e dello stato di manutenzione del corso d'acqua.

Nel presente studio è stata operata la scelta, in favore di sicurezza, di assegnare al coefficiente di scabrezza di Manning un valore di 0.04 [$s/m^{1/3}$], costante su letto e sponde del fiume.

Le sezioni idrauliche utilizzate in questo lavoro, sia nella realizzazione del modello di sintesi che nel modello di dettaglio, sono riportate nell'Allegato A, e descritte nei relativi capitoli di questa relazione.

Lungo il corso d'acqua possono essere presenti manufatti quali ponti, viadotti e tombini; la schematizzazione adottata è funzionale agli obiettivi della simulazione, ovvero si incentra su una riproduzione sommaria dei manufatti che definisca principalmente la quota dell'intradosso, la larghezza delle pile e la larghezza dell'intera opera d'arte. In pratica viene rappresentata l'ampiezza delle luci e la loro profondità.

Analoga schematizzazione può essere adottata per la rappresentazione delle opere trasversali come le traverse, sempre sulla base dei rilievi effettuati in corrispondenza delle relative sezioni fluviali.

Le aree di potenziale esondazione sono definite come quelle porzioni di territorio adiacenti al corso d'acqua interessate, eventualmente, dal fenomeno esondativo, e il cui comportamento prevalente è quello di invadere volumi d'acqua piuttosto che essere interessate dal trasporto dei volumi stessi.

Il fenomeno del trasferimento di volumi all'interno di queste aree e soprattutto verso le aree contigue è simulato soltanto attraverso l'individuazione dei tratti di confine che, per proprie caratteristiche morfologiche, contribuiscono a suddetto trasferimento, in entrambi i sensi.

Queste connessioni tra APE e, ovviamente, le connessioni tra esse ed il corso d'acqua, sono, come detto, modellate mediante sfioratori di superficie, ricostruiti in base al reale andamento plano-altimetrico di rilevati, argini e di ogni altro elemento urbanistico e morfologico, ivi compresi archi viari e ferroviari, che, pur non essendo propriamente barriere idrauliche, consentono il contenimento e la delimitazione di ciascuna cella e della fascia fluviale.

E' dunque comprensibile l'esigenza di conoscere attentamente le caratteristiche geometriche del territorio in esame, anche al fine operare una corretta suddivisione in celle elementari.

Per ciascuna APE, una volta compiuta la perimetrazione, è stato costruito un modello digitale del terreno sulla base dei dati acquisiti tramite cartografia o dai rilievi eseguiti; il DTM così realizzato, costituito da maglie di 5×5 metri, ha permesso di calcolare la curva di invaso di ciascuna APE, valutata per incrementi di battente di 15 o 30 centimetri.

Nelle Tavv. 2 e 3 sono riportati i modelli idraulici realizzati, rispettivamente, nel caso di sintesi e nel caso di dettaglio; vi sono mostrate sia le informazioni plano-altimetriche a partire dalle quali sono state riprodotte le aree di potenziale esondazione, sia la perimetrazione di tali aree.

4.3 Modellistica idrologica

La modellistica idrologica ha lo scopo di generare, per tutte le sezioni di interesse del reticolo idrografico considerato, gli idrogrammi di piena per assegnati tempi di ritorno.

La determinazione degli idrogrammi di piena è stata effettuata adottando lo schema convenzionalmente condiviso della procedura di regionalizzazione delle portate di piena, (AITo), recepita dall'Autorità di Bacino nei suoi studi e sulla quale si fonda la perimetrazione delle aree a pericolosità idraulica, livello di sintesi, all'interno del P.A.I.

Il presente lavoro, come detto, parte dall'acquisizione dei risultati delle indagini idrauliche a corredo del progetto definitivo della variante alla S.R. 429 di Val d'Elsa per il collegamento dei centri abitati di Poggibonsi e Certaldo, e utilizza, come idrogramma in ingresso del modello di sintesi, l'idrogramma in uscita dalla sezione di chiusura del tratto di Elsa modellato all'interno di suddetto progetto.

La modellistica idrologica su cui esso si è stato basato risulta conforme agli obiettivi che questo lavoro si pone, perciò viene di seguito illustrata, e adottata, a meno di correzioni opportunamente riportate, anche per la stima degli idrogrammi relativi ai principali affluenti del fiume Elsa che intervengono sul tratto fluviale esaminato in questo lavoro.

Tale approccio si basa sulla trasformazione afflussi-deflussi ottenuta tramite la teoria dell'Idrogramma Istantaneo Unitario o IUH, i cui parametri vengono determinati sulla base delle caratteristiche geomorfologiche del bacino attraverso una procedura di regionalizzazione ottenendo il cosiddetto Idrogramma Unitario Geomorfologico o GIUH. L'input meteorico è schematizzato mediante uno "ietogramma sintetico" la cui frequenza viene stimata a partire dalle curve di possibilità pluviometrica ricavate con l'adattamento della distribuzione TCEV (Two Components Extreme Value).

Il modello di trasferimento adottato è quello dell'idrogramma unitario di Nash del tipo $\Gamma(n,k)$, dove n e k rappresentano rispettivamente i parametri di forma e di scala, e che ha la seguente espressione:

$$U(t) = \frac{1}{k\Gamma(n)} \left(\frac{t}{k}\right)^{(n-1)} e^{-\left(\frac{t}{k}\right)}$$

in cui i parametri n e k , i quali hanno le seguenti formulazioni:

$$n = 3.29 \left(\frac{R_b}{R_a} \right)^{0.78} R_l^{0.07}$$

$$k = 0.7 \left[\frac{R_a}{R_b R_l} \right]^{0.48} \frac{L_c}{v}$$

dependono a loro volta da R_b , rapporto di biforcazione, R_a , rapporto di area, R_l , rapporto di lunghezza, L_c , lunghezza del canale principale, e v , fattore cinematico legato alla velocità della piena; questi ultimi parametri geomorfologici possono essere calcolati sulla base della gerarchizzazione del reticolo idrografico proposta da Strahler.

La valutazione del contributo netto di pioggia alla formazione del deflusso sul reticolo necessita della stima di ulteriori due parametri che tengano conto delle perdite di infiltrazione; si tratta dell'assorbimento completo della precipitazione durante le prime fasi dell'evento meteorico, I_a [mm], e dell'infiltrazione costante a saturazione, K_s [mm/h].

Il legame tra questi due parametri è il seguente:

$$I_a(t) = I_a(0) + \int_0^{t_a} (P(\tau) - K_s) d\tau$$

dove, per $t < t_a$, $P_n(t) = 0$ e $I_a(t) = I_a$, e, per $t \geq t_a$, $P_n(t) = P(t) - K_s$.

Questa procedura è stata adottata, come detto, per stimare l'idrogramma in ingresso nel modello realizzato nel progetto della variante alla S.R. 429; l'area del sottobacino dell'Elsa che insiste sulla sezione di monte del tratto modellato, a Poggibonsi, era stata, a suo tempo, rivista e corretta, sulla base dell'elaborazione di un D.T.M. con risoluzione 10×10 m, a partire da una base cartografica in scala 1:10.000, dall'Autorità di Bacino del fiume Arno (Lanini V., 2003).

In virtù di questa correzione l'area del sottobacino di monte è risultata più ampia di quella offerta dalla regionalizzazione, e, conseguentemente l'idrogramma in ingresso ha presentato valori di picco leggermente superiori.

La stima degli idrogrammi degli affluenti principali è stata effettuata con il medesimo criterio, ma, dal momento che la durata critica delle precipitazioni che massimizzano la portata di piena per ciascun affluente risulta sensibilmente inferiore a quella, 9 ore, per la quale è stata modellata l'asta principale, è stato fatto ricorso al modulo idrologico Idrarno, grazie al quale è consentito valutare la risposta di ciascun sottobacino ad eventi meteorici di durata variabile.

I parametri di input di Idrarno (area del bacino, perdita iniziale media sul bacino, infiltrazione a saturazione media sul bacino, parametri n e k dell'idrogramma di Nash) sono quelli della regionalizzazione, opportunamente corretti mediante il coefficiente di riduzione kr , e impostando il coefficiente di ragguaglio areale ka come "globale".

In questo modo il picco di portata degli affluenti diminuisce ma si "sincronizza" con l'evento principale.

5. Modello di sintesi

La prima fase di questo studio consiste nella realizzazione di un modello ampio, che descriva una vasta porzione di territorio e prenda in esame un lungo tratto fluviale, in modo da offrire una visione estesa di quelle che sono le dinamiche del passaggio e della propagazione dell'onda di piena duecentennale. A partire da questo modello, ed in virtù dei suoi risultati, è stato successivamente possibile indagare più nel dettaglio la risposta all'evento nell'intorno dell'edificio oggetto di intervento.

E' stata operata una modellazione del fiume Elsa, e delle aree ad esso adiacenti, nel tratto del corso d'acqua delimitato in ingresso dalla sezione posta in corrispondenza della traversa appena a monte di Certaldo, ed in uscita da una sezione posta a valle della confluenza tra Elsa e Borro di Casanuova, a metà strada tra Certaldo e Castelfiorentino.

Il tratto fluviale esaminato è di lunghezza pari a 4.760 m, e i principali affluenti che si immettono in Elsa in questo tratto sono, da monte verso valle, il Torrente Agliena e il Torrente Casciani, rispettivamente in destra e sinistra idraulica, che confluiscono in Elsa presso Certaldo, e il Borro del Vicariato e il Borro di Casanuova, entrambi in destra, che si sviluppano più a valle.

Le aree adiacenti al corso d'acqua sono state rappresentate attraverso la suddivisione in 12 celle, 4 in sinistra e 8 in destra nel rispetto della morfologia del territorio.

5.1 Rilievo plano-altimetrico e curve di invaso

La presente modellazione è basata sull'acquisizione, per la rappresentazione del corso d'acqua, delle sezioni rilevate nel 2003 da R.F.I. (Rete Ferroviaria Italiana S.p.A., Gruppo Ferrovie dello Stato) nell'ambito del progetto di raddoppio della linea ferroviaria Empoli-Chiusi, attualmente in fase esecutiva.

Sono state acquisite 34 sezioni, e la numerazione decrescente ad esse assegnata è la medesima utilizzata nel progetto definitivo della S.R. 429, ampiamente citato, anch'esso fondato su queste sezioni, e pertanto ripresa per continuità; quindi la sezione di monte è individuata dal n. 287 e quella di chiusura dal n. 254.

Tali sezioni sono mostrate in Allegato A.

In questo modello le 12 APE adiacenti sono caratterizzate da curve di invaso ricostruite sulla base delle informazioni contenute nella C.T.R. 1:10.000; si è fatto riferimento, in particolare, ai fogli D285040, D286010 e D286050.

E' stato ricostruito, per ciascuna area di potenziale esondazione, un modello digitale del terreno (DTM), a maglie di 5x5 m, derivandolo dalla cartografia ufficiale mediante un modello TIN (*Triangulated Irregular Network*) e utilizzando i seguenti codici: arco viario (131), arco ferroviario (132), scarpate (601), (602), argine (603, 604), curve di livello (801, 802), punti quotati (804).

Le leggi di invaso, volume-altezze d'acqua, delle APE sono riportate in Allegato B.

Come per le sezioni fluviali, la numerazione adottata per le aree di potenziale esondazione è stata ripresa da quella già utilizzata all'interno dello studio idraulico per la S.R. 429, dove "S" e "D" distinguono l'ubicazione in sinistra o destra idraulica e i numeri vengono assegnati in ordine decrescente da monte verso valle.

La Tav. 2 mostra la geometria complessiva del modello "generale".

5.2 Idrogrammi di piena

L'idrogramma di piena adottato come input del modello è, come detto, quello estrapolato dai risultati della modellazione connessa al progetto definitivo della S.R. 429.

L'evento studiato in suddetta modellazione è lo stesso sul quale si è inteso operare nel presente lavoro, ovvero un evento di piena con tempo di ritorno duecentennale basato su una precipitazione di durata pari a 9 ore.

Una precipitazione di 9 ore rappresenta l'evento critico in corrispondenza del centro abitato di Certaldo, cioè quello che massimizza le portate in Elsa in questo tratto; lo studio della S.R. 429 ha adottato questa come durata di pioggia di riferimento, e lo stesso viene fatto anche nel caso del presente studio, trovandosi l'edificio oggetto di intervento appena più valle.

Si è scelto, pertanto, di massimizzare l'evento sulla porzione di interesse del tratto fluviale studiato, probabilmente la durata critica per la sezione di chiusura sarebbe risultata superiore, ma meno conforme agli obiettivi del presente lavoro.

L'idrogramma in ingresso, mostrato di seguito in Fig.2, tiene dunque conto dell'effetto di laminazione determinato, a monte di Certaldo, dalla trascinazione di ingenti volumi d'acqua sul territorio; nel caso fosse stato trascurato questo aspetto, la valutazione del fenomeno esondativo nella zona di interesse avrebbe fornito risultati alquanto meno realistici.

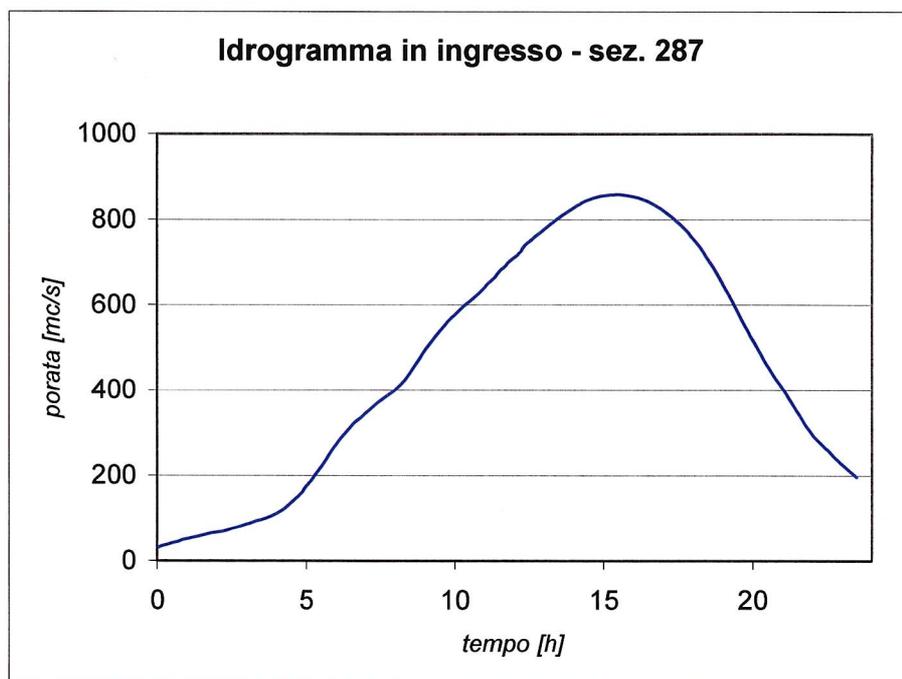


Fig. 2 : Idrogramma in ingresso – Sezione n. 287

I contributi dei principali affluenti sono stati stimati secondo la procedura descritta nel Cap.4, anch'essi valutati per un evento meteorico di durata 9 ore e quindi non critico per i relativi sottobacini, che hanno durate critiche molto inferiori, ma massimizzati per l'asta principale.

Non è stato reputato rilevante il contributo a valle del Borro di Casanuova, perché di modeste proporzioni e apportato in un punto troppo distante dalla zona di approfondimento da poter influenzare in essa le modalità o le quantità del fenomeno esondativo, quindi sono stati

ricostruiti gli idrogrammi laterali dei restanti tre affluenti, e vengono riportati nelle seguenti figure.

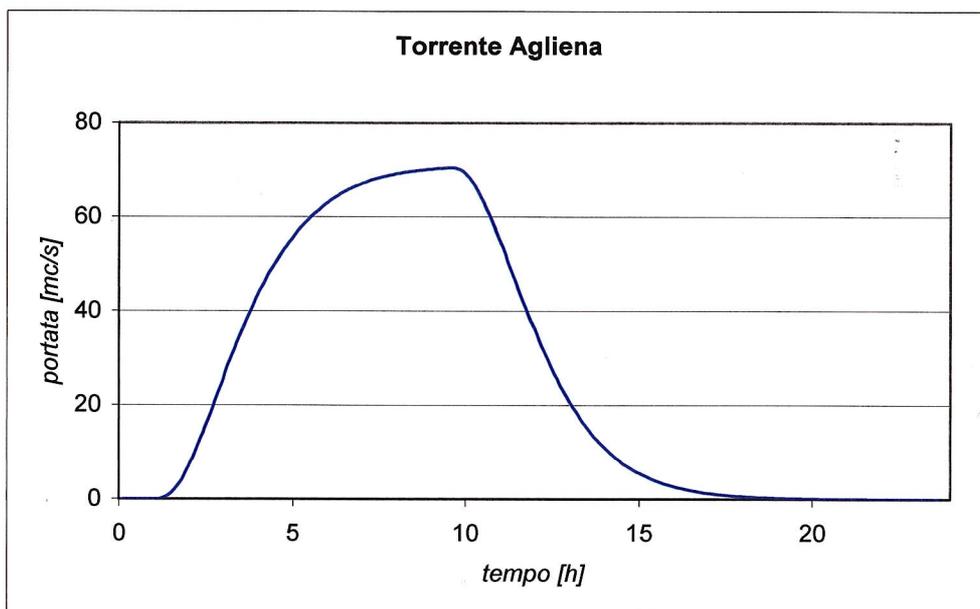


Fig. 3 : Idrogramma di piena – Torrente Agliena

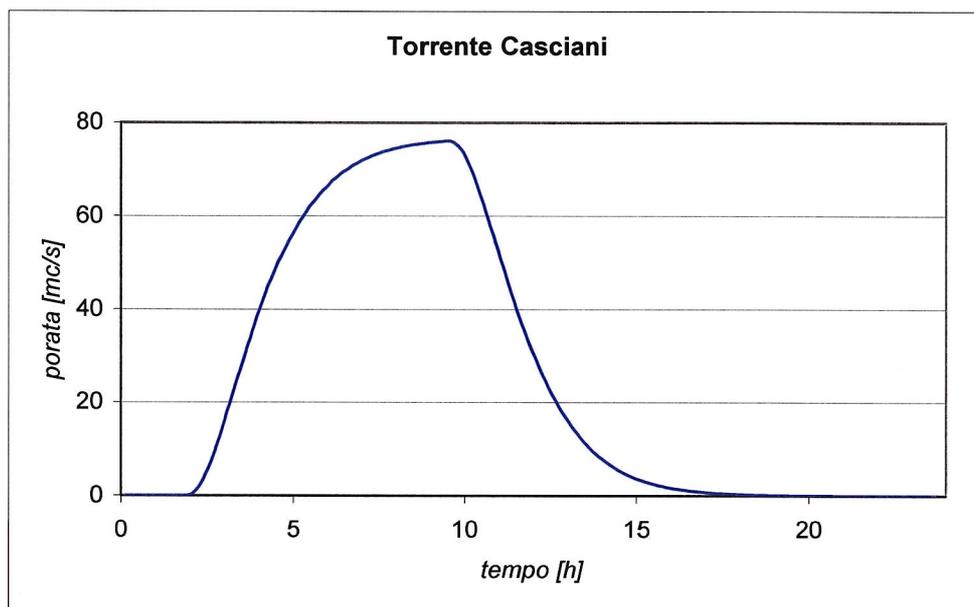


Fig. 4 : Idrogramma di piena – Torrente Casciani

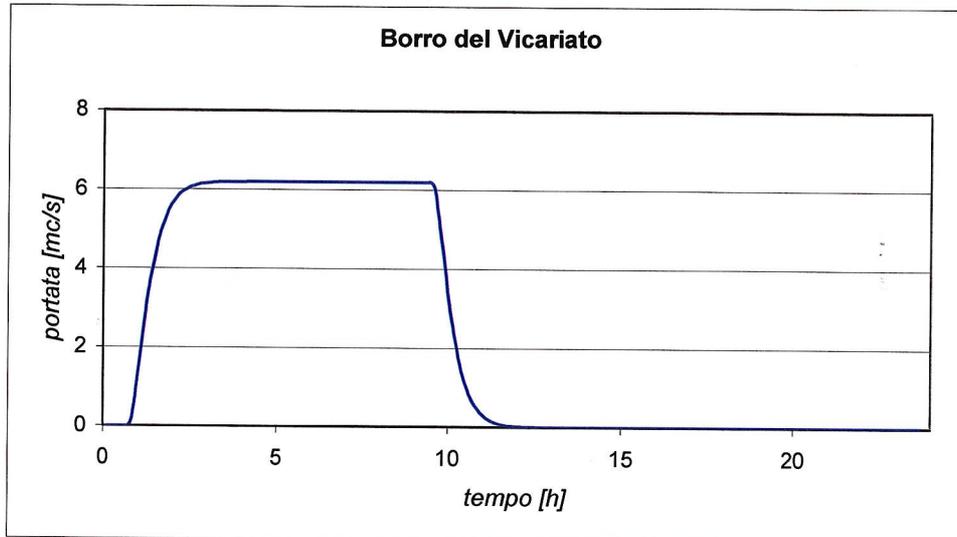


Fig. 5 : Idrogramma di piena – Borro del Vicariato

5.3 Simulazione idraulica in moto vario

L'elaborazione idraulica del modello predisposto necessita della preliminare assegnazione delle opportune condizioni al contorno e della definizione di tutti i parametri geometrici e computazionali richiesti.

Innanzitutto è stata definita la condizione al contorno di valle, la cui scelta risulta spesso determinante.

Avendo posto sufficientemente a valle la sezione di chiusura rispetto alla zona di interesse specifico, è stata adottata come condizione una scala di deflusso per la sezione di valle, n. 254, ricostruita a partire da preliminari simulazioni in moto permanente.

Tale condizione è mostrata in Fig. 6.

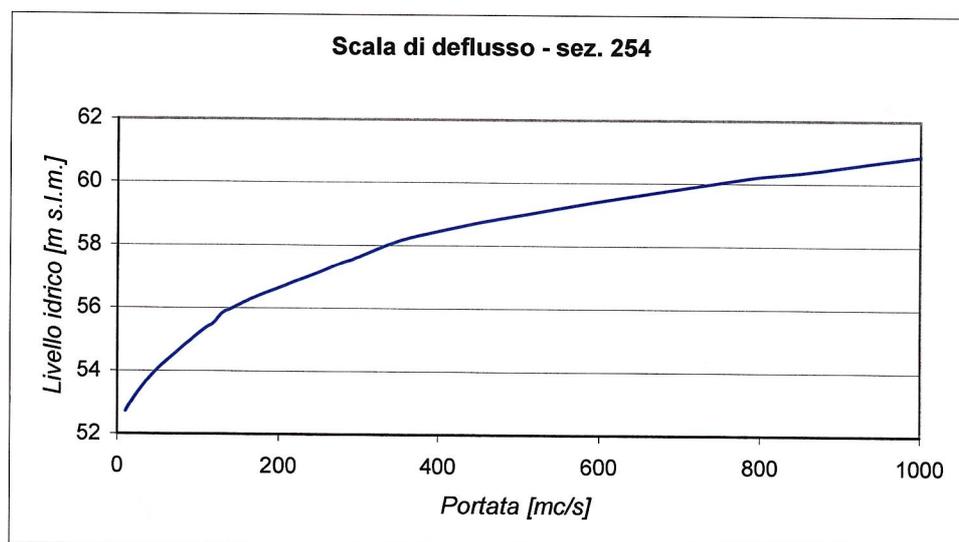


Fig. 6 : Condizione di valle – Scala di deflusso

Il coefficiente n di scabrezza di Manning utilizzato nel modello è pari a $0.04 [s/m^{1/3}]$, indice di uno stato medio di semi-abbandono delle sponde del corso d'acqua, confermato anche dai sopralluoghi effettuati.

Dal momento che tutti i passaggi di volumi idrici tra alveo e APE e tra APE stesse avvengono attraverso sfioratori di superficie, un altro parametro geometrico di rilevante influenza è rappresentato dal coefficiente di stramazzo μ che, nella formulazione del codice di calcolo Hec-Ras, è inglobato nel termine Cd .

In questo lavoro Cd assume il valore di 1.11 per le connessioni fiume-APE e di 1.66 per le connessioni fra APE contigue; la differenziazione tra i due valori è dettata dal fatto che la corrente, in alveo, possiede una componente di velocità prevalente in direzione longitudinale e quindi il superamento delle arginature avrà una dinamica differente da quella del trasferimento di volume tra celle adiacenti.

Nel Cap. 4 è stato indicato come la discretizzazione temporale incida sul livello di accuratezza complessivo di un modello di questo tipo.

Le simulazioni idrauliche in moto vario sono state effettuate con una scansione temporale di 5 secondi, e la restituzione dei risultati con scansione di 10 minuti.

Tra le altre opzioni di calcolo, è stato deciso di assegnare a θ , *implicit weighting factor*, parametro che determina la modalità di avanzamento temporale della procedura alle differenze finite, il valore di 1; le tolleranze ammesse sui livelli idrici risultanti sul corso d'acqua e nelle aree adiacenti sono state, rispettivamente, pari a 0.006 m e 0.015 m; infine il numero massimo di iterazioni oltre il quale il sistema sarebbe divenuto instabile è stato fissato a 20.

5.4 Risultati della simulazione e considerazioni

La verifica idraulica effettuata sul fiume Elsa, nel tratto precedentemente descritto, ha confermato, come già il P.A.I. e la stessa memoria storica riferiscono, che questa porzione di territorio viene ampiamente coinvolta, per un evento con questo tempo di ritorno, dalle inondazioni causate dallo straripamento del fiume Elsa lungo tratti arginali molto estesi.

Principalmente le esondazioni più cospicue tendono a verificarsi una volta superato il centro abitato di Certaldo, peraltro non sufficientemente protetto per eventi di questo tipo, andando ad interessare soprattutto la campagna pianeggiante in destra idraulica; il rilevato ferroviario che corre in destra risulta superato dal livello idrico raggiunto sul piano campagna in alcuni punti più bassi, perciò, insieme ai vari sottopassi posti lungo la ferrovia, costituisce la via di trasferimento di parte dei volumi esondati anche verso le aree più esterne, al di là della ferrovia stessa.

La porzione di territorio in cui si trova l'edificio oggetto del presente studio, individuata dall'area di potenziale esondazione D22bis, è anch'essa interessata dal fenomeno esondativo.

La Tav. 4 mostra su carta la perimetrazione delle aree allagate, da Certaldo fino alla sezione di chiusura del modello, per solo effetto di esondazione del fiume Elsa a seguito di un evento di piena con tempo di ritorno duecentennale; i contributi degli affluenti sono conteggiati come

contributi netti in Elsa, non è stato quindi tenuto conto delle aree eventualmente allagate per esondazione di questi affluenti perché non richiesto ai fini del presente lavoro.

La situazione così descritta rappresenta il caso peggiorativo.

La tabella che segue individua la quota idrometrica massima raggiunta e il volume massimo immagazzinato in ciascuna APE.

APE	Livello idrico [m s.l.m.]	Volume invasato [1000m³]
D21	67.12	270.89
D22	61.69	66.01
D22bis	61.65	415.05
D23	61.69	32.55
D24	61.69	685.87
D25	61.69	375.19
D26	60.93	2022.84
D27	60.93	1393.24
S12	67.17	79.36
S13	63.32	1318.22
S14	61.69	730.44
S15	60.93	480.35

Tab. 1 : Modello di sintesi - Risultati

Per quanto riguarda le indicazioni circa i massimi volumi invasati, è da segnalare che i valori risultanti per le aree di potenziale esondazione più a valle, quindi D26, D27 e S15, sono probabilmente sovrastimati, in quanto tali aree non presentano alcun collegamento a valle con aree contigue; data la distanza dalla zona che il presente lavoro intende approfondire, sono stati ritenuti trascurabili gli effetti di questa sovrastima.

Una volta eseguita una verifica di questo tipo è stato possibile analizzare le dinamiche in atto e compiere appropriate valutazioni al fine di individuare l'incidenza del fenomeno esondativo nell'intorno della zona di interesse.

E' evidente come una modellazione del territorio attraverso le informazioni della cartografia 1:10.000 comporti un errore non trascurabile nella descrizione dell'andamento plano-altimetrico del terreno.

Le specifiche tecniche per la C.T.R. numerica 1:10.000 indicano che per un punto ben individuato sul terreno l'errore è contenuto in 3 metri in planimetria e 1,8 metri in quota; l'errore di precisione in planimetria è ritenuto trascurabile ma quello in quota può essere determinante.

Per questo motivo, laddove si desideri, come nel presente lavoro, raggiungere un livello di dettaglio maggiore, risulta indispensabile pervenire ad una conoscenza del territorio più approfondita sotto l'aspetto altimetrico.

Sono stati, come detto, predisposti, in tal senso, opportuni rilievi nella zona in esame, necessari peraltro anche in funzione della progettazione dell'intervento edilizio dell'edificio, dei quali è stato fatto uso nella realizzazione del modello di dettaglio (Cap.6).

L'osservazione delle dinamiche di propagazione dell'onda di piena duecentennale e di allagamento delle celle adiacenti al corso d'acqua a seguito della simulazione in moto vario ha evidenziato un comportamento particolare del fenomeno.

E' stato riscontrato che l'allagamento della porzione di territorio nella quale ricade l'edificio in questione, individuata dall'area di potenziale esondazione D22bis, avviene solo in minima parte a causa del superamento da parte della corrente degli argini delimitanti tale area, ma è dovuto principalmente al trasferimento di volumi d'acqua provenienti dalla APE, in destra idraulica, immediatamente a valle, cioè la D24; infatti, le strutture arginali di destra che separano l'Elsa da questa seconda area non sono in grado di contenere i volumi idrici in transito, comportando quindi un'esondazione "diretta" di ingenti quantità d'acqua.

I sopralluoghi *in situ*, invece, hanno confermato la presenza, per la cella D22bis, di una struttura arginale continua lungo il tratto adiacente al fiume, come mostra, in parte, anche la fotografia che segue.



Foto 1 : Particolare della struttura arginale adiacente la cella D22bis

La "risalita" di volumi d'acqua dall'area D24 all'area D22bis, e quindi l'inondazione "indiretta" della seconda, implica, al fine di individuare il battente idrico nella cella D22bis, che venga realizzato un modello di dettaglio che consideri il comportamento congiunto delle due celle, senza trascurare la loro connessione con le celle più esterne, ovvero la D23 e la D25.

Osservando i risultati della simulazione del modello di sintesi, è evidente come i livelli idrici delle 4 APE citate siano uguali; ciò sta ad indicare che è il livello raggiunto nell'area D24, per la quale si ha esondazione "diretta", a determinare i livelli nelle altre 3 aree, D22bis inclusa.

La Fig. 7 mostra, in un particolare, le dinamiche di trasferimento dei volumi d'acqua verso e tra le succitate celle.

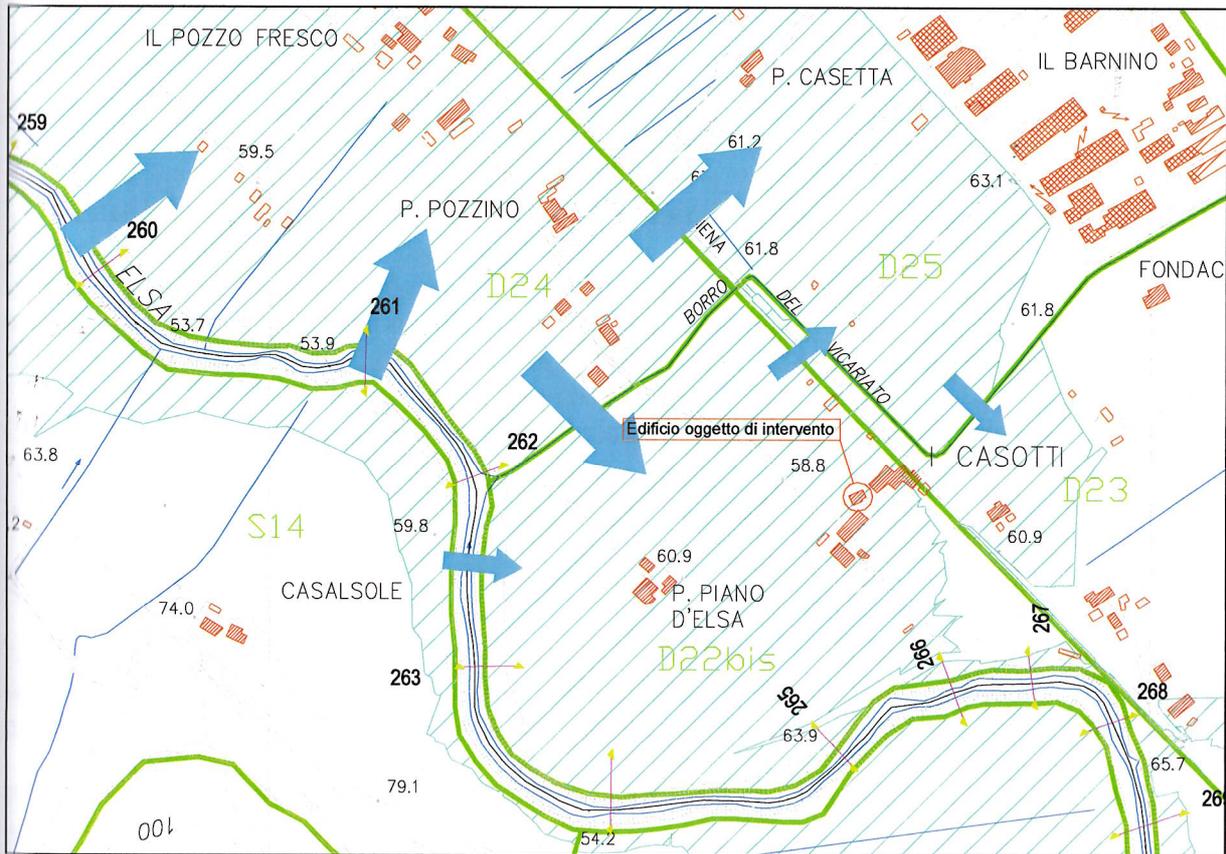


Fig. 7 : Particolare delle dinamiche di inondazione all'interno delle APE D22bis, D23, D24 e D25. Le frecce più grandi indicano notevoli trasferimenti di volumi, quelle più piccole trasferimenti più ridotti

Sulla base di queste considerazioni, vista la necessità di approfondimento nella zona di interesse, è stato realizzato il modello di dettaglio, descritto nel capitolo successivo, i cui risultati rappresentano l'obiettivo finale del presente studio.

6. Modello di dettaglio

La seconda fase del presente lavoro consiste nella predisposizione di un modello idraulico che si fonda sulle indicazioni derivanti dal modello di sintesi appena descritto e mira a raggiungere un livello di maggior affinamento, rispetto al modello precedente, nella previsione degli effetti indotti dall'eventuale esondazione del fiume Elsa sul territorio di interesse.

La modellazione in moto vario si basa sul medesimo evento di riferimento, con tempo di ritorno di 200 anni e durata di pioggia pari a 9 ore.

Il tratto fluviale modellato, adesso, è rappresentato dalla sola porzione di asta adiacente alle aree di potenziale esondazione di cui è richiesto l'approfondimento, quindi la sezione di monte risulta essere la n. 269 e quella di chiusura la n. 258, e le APE studiate risultano la D22bis, D24, D23 e D25, come anticipato nel Cap. 5.

Complessivamente, la lunghezza del tratto modellato è pari a 2.131 m, e l'unico affluente del fiume Elsa considerato è il Borro del Vicariato.

6.1 Rilievo plano-altimetrico e curve di invaso

La ricostruzione geometrica del corso d'acqua è stata effettuata mediante le medesime sezioni usate nel modello di sintesi; come detto, il tratto esaminato è delimitato a monte dalla sezione n. 269 e a valle dalla n. 258, per un totale di 12 sezioni fluviali, già individuate in Allegato A.

Per le 4 aree di potenziale esondazione sono state utilizzate fonti diverse per la descrizione dell'andamento plano-altimetrico.

In considerazione dell'esigenza di perfezionare il modello e di giungere a risultati più attendibili, è stato indicato, a conclusione del precedente capitolo, come fosse appropriato far riferimento a rilievi di maggior dettaglio ed affidabilità di quello che la cartografia C.T.R. 1:10.000 fosse in grado di garantire.

Per questo motivo è stato, da subito, ordinato un rilievo che permettesse di descrivere opportunamente l'andamento del terreno nell'intorno dell'edificio, cioè nell'area di potenziale esondazione D22bis.

Questo rilievo, realizzato dallo studio tecnico Geom. Paolo Zeroni nel Marzo 2006, consta di 3 ampie sezioni che tagliano, intersecandosi, la suddetta area, partendo dal fiume e terminando o in corrispondenza del rilevato ferroviario (sez. 1 e 2) o della sponda sinistra del Borro del Vicariato (sez. 3); unitamente ai punti di un secondo rilievo (sez. 4) già effettuato nelle strette adiacenze dell'edificio oggetto di intervento, esso ha consentito di descrivere tale area, tramite realizzazione di un nuovo DTM secondo i criteri precedentemente esposti, in modo più dettagliato di quanto prima, con le sole informazioni della C.T.R. 1:10.000, non fosse stato possibile.

La Fig. 8 mostra in planimetria i punti rilevati.

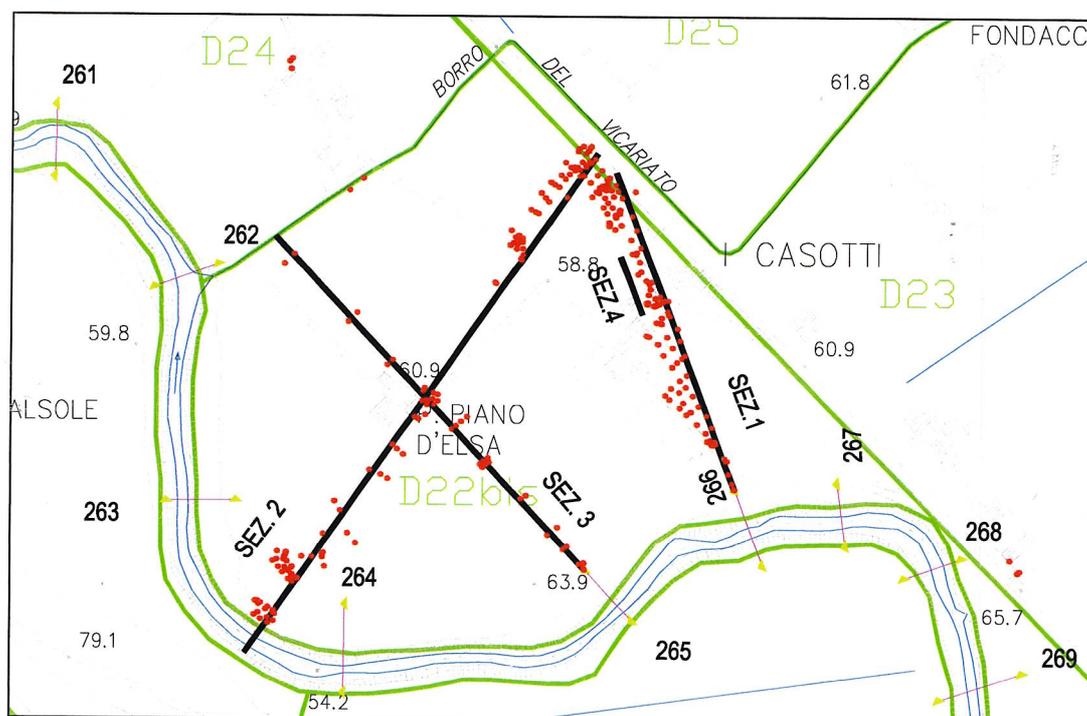


Fig. 8 : Planimetria dei punti rilevati

L'osservazione delle dinamiche di propagazione dei volumi esondati a seguito della realizzazione del modello di sintesi ha evidenziato, però, il comportamento descritto nel Cap.5, pertanto il modello di dettaglio ha dovuto interessare tutte le 4 aree a comportamento congiunto.

Alla luce di questa analisi, per la valutazione delle leggi di invaso delle 4 APE è stato effettuato un ragionamento volto a raggiungere un maggior grado di risoluzione e al contempo mantenere le dovute precauzioni e un adeguato livello di sicurezza.

Innanzitutto è stato osservato come la necessità di descrivere il comportamento congiunto di 4 APE non possa, del resto, esigere l'esecuzione di una campagna di rilievo che interessi tutta la superficie delle medesime, nell'insieme superiore a 2 km².

Allo stesso tempo è necessaria un'uniformità o una congruenza di fonti da cui attingere i dati altimetrici, per questo motivo si è proceduto come segue.

Per prima cosa è stato ricostruito il nuovo DTM per l'area D22bis e derivata la legge di invaso della medesima.

Tale curva volumi-altezze d'acqua è stata confrontata con la curva precedentemente ricostruita sulla base della C.T.R. 1:10.000, come mostra la Fig.9.

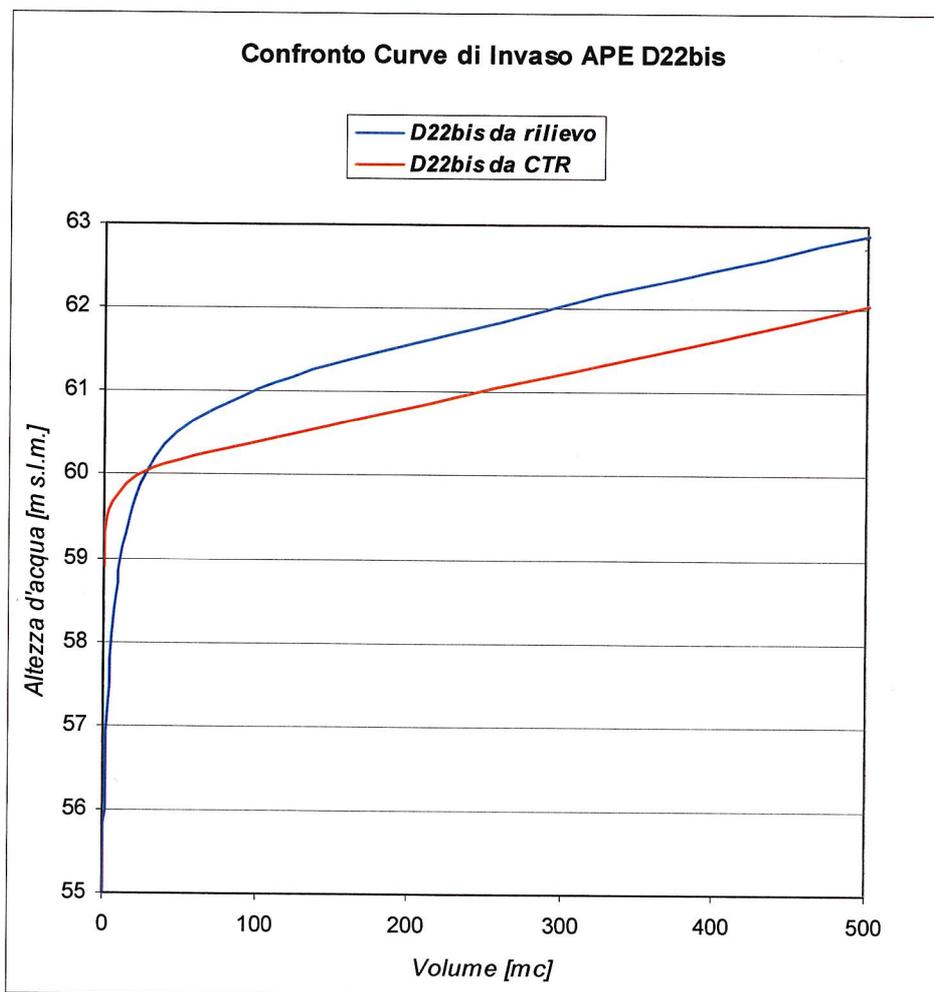


Fig. 9 : Confronto tra l'andamento della curva di invaso per l'area di potenziale esondazione D22bis nel modello di dettaglio e nel modello di sintesi.

Si evince come la nuova curva presenti, a meno del breve tratto iniziale, un andamento pressoché parallelo alla precedente, indice del fatto che già le informazioni del 10.000 sono sufficienti per descrivere adeguatamente la morfologia del territorio, a meno dell'errore altimetrico proprio della cartografia; ciò è riconducibile allo sviluppo prevalentemente pianeggiante di questa fetta di territorio, che può essere riprodotto piuttosto fedelmente anche grazie alla conoscenza di pochi punti esatti sul piano campagna.

L'informazione aggiuntiva derivante dall'effettuazione dei rilievi si esplicita soltanto in una più corretta acquisizione delle quote altimetriche del terreno, non influenzando l'andamento della curva di invaso ma contribuendo esclusivamente a traslarla alle quote esatte.

La morfologia delle APE D24, in particolare, D23 e D25, risulta la medesima, ovvero di tipo omogeneamente pianeggiante, a meno delle fasce più esterne delle aree D23 e D25, peraltro non interessate dal fenomeno esondativo.

Questo aspetto del territorio è confermato sia dalla cartografia 1:10.000 sia dalla verifica *in situ*, e ciò lascia supporre che un'esatta conoscenza delle caratteristiche altimetriche di queste aree non modifichi la curva di invaso in termini di distribuzione dei volumi.

In virtù di questa supposizione è stato ritenuto coerente operare sulla media delle differenze di quota riscontrate su un campione rappresentativo di punti tra il DTM basato sulla cartografia 1:10.000 e quello realizzato in base ai nuovi rilievi effettuati, sull'area D22bis, con lo scopo di conseguire un criterio di adattamento delle curve di invaso delle altre APE.

E' stato scelto un campione di 91 punti, equamente distribuiti sulla superficie dell'area D22bis, come mostra la Fig 10.

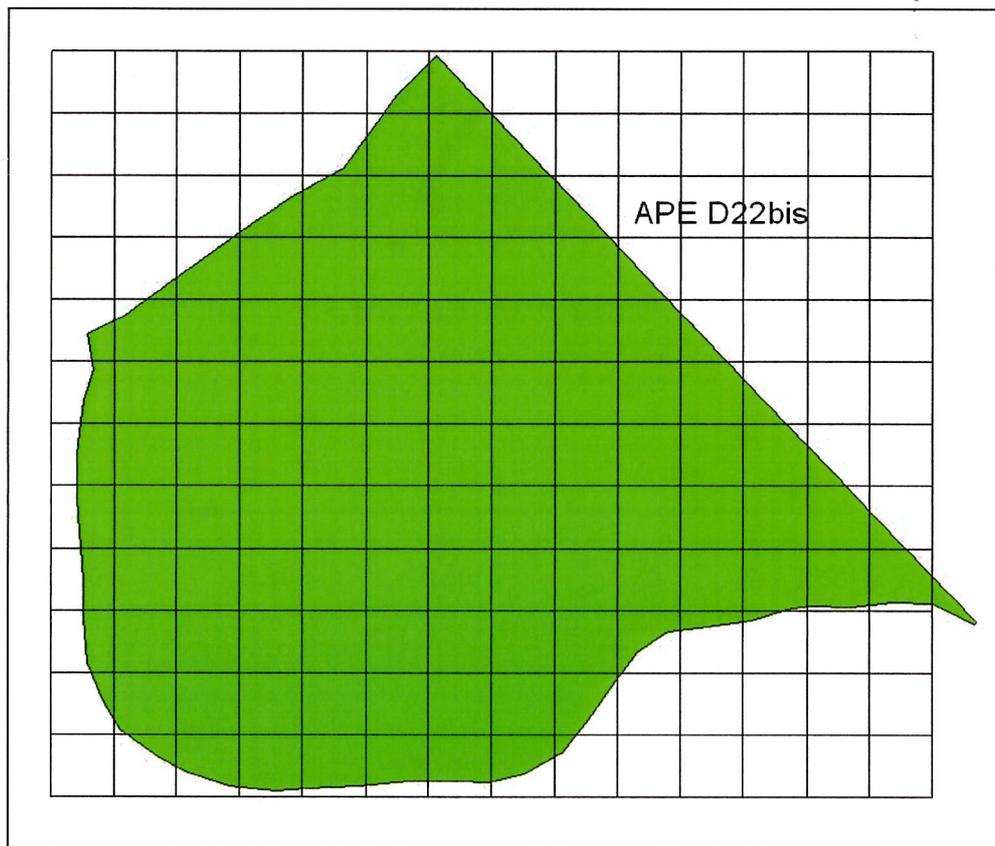


Fig. 10 : I punti campione scelti per fare il confronto sono quelli che ricadono all'interno del perimetro dell'area di potenziale esondazione D22bis.

Sono state analizzate suddette differenze attribuendo ad esse una distribuzione normale di Gauss, descritta mediante la seguente formula:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

in cui μ rappresenta la media degli scarti e σ la deviazione standard, espressa come

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}}$$

dove N è la grandezza del campione.

La media μ è risultata pari a 0.87 m, mentre la deviazione standard σ pari a 0.70 m. La distribuzione degli scarti tra le due serie di quote ha mostrato l'andamento di Fig. 11, e la media, valutata escludendo i valori superiori all'errore massimo previsto dalle specifiche tecniche della cartografia ufficiale, cioè 1.80 m, è risultata pari a 0.72 m.

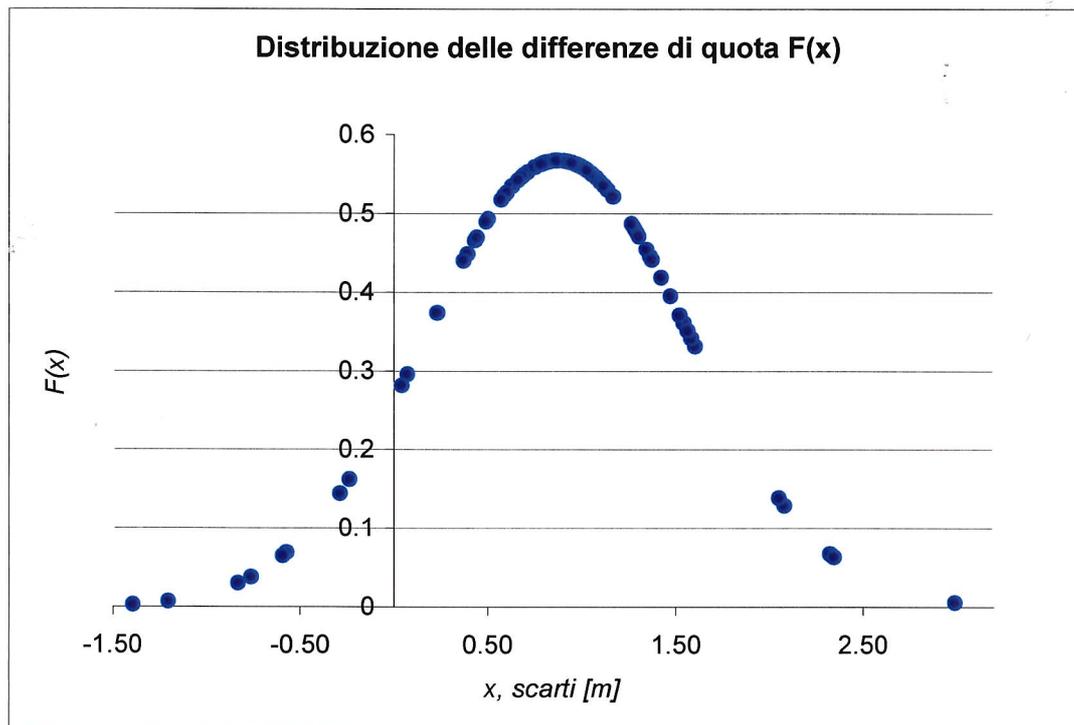


Fig. 11 : Distribuzione degli scarti tra le quote del rilievo e quelle della cartografia ufficiale, per un campione rappresentativo di punti

Dal grafico si è rilevato come il 92% degli scarti, una volta depurati da quelli superiori ad 1.80 m, appartengano all'intervallo $\pm\sigma$.

Per questo motivo è stato reputato ragionevole affermare che, mediamente, nell'area di potenziale esondazione D22bis, le quote del piano campagna ottenute dalla ricostruzione del DTM sulla base della cartografia ufficiale risultano minori di 0.72 m da quelle ottenute dalla ricostruzione di un secondo DTM basato sul rilievo compiuto *in situ*.

La figura che segue evidenzia come la nuova curva di invaso dell'area D22bis e la precedente curva di invaso traslata verso l'alto di 0.72 m, a parte nella prima fase di rapida crescita, in sostanza coincidano.

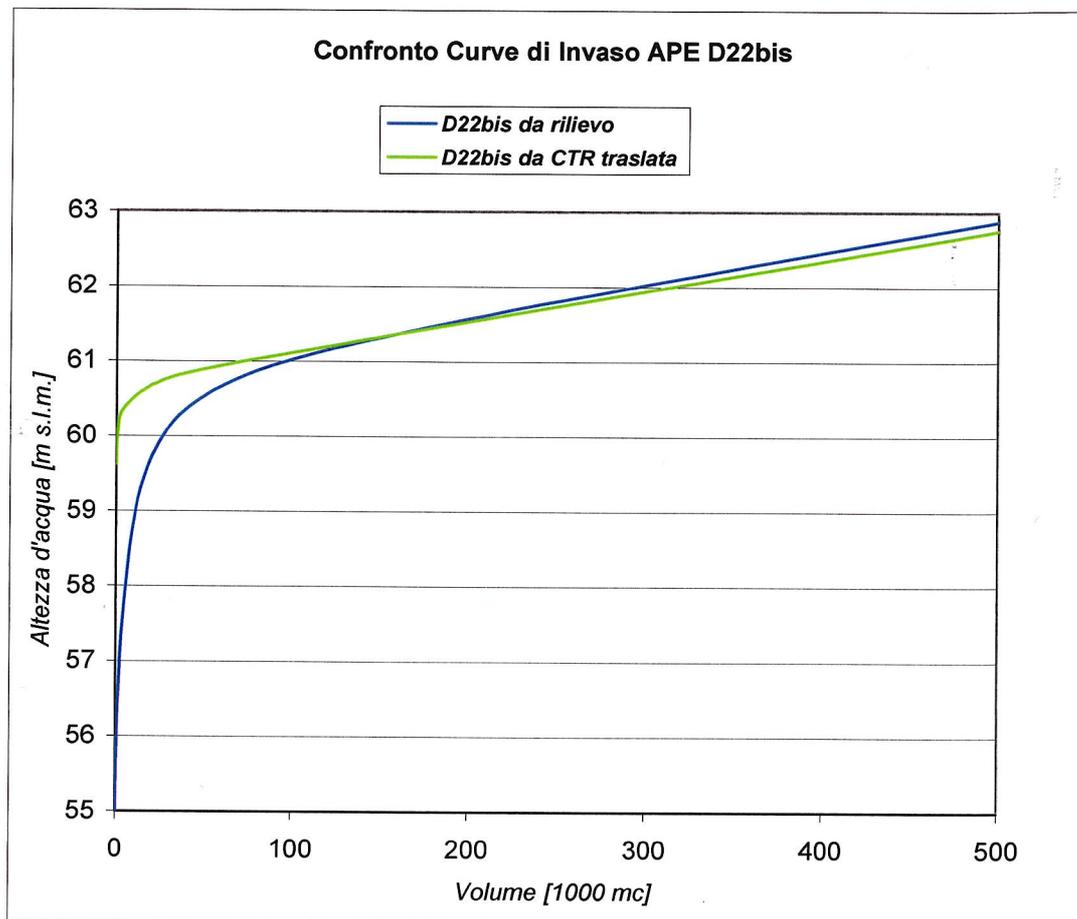


Fig. 12 : Confronto tra l'andamento della curva di invaso per l'area di potenziale esondazione D22bis nel modello di dettaglio e nel caso della traslazione suggerita di 0.72 m verso l'alto.

In virtù delle precedenti considerazioni circa l'omogeneità dello sviluppo plano-altimetrico di questa porzione di territorio e il mantenimento, da parte della curva di invaso, del medesimo andamento, è stato scelto di modificare le curve di invaso delle aree D24, D23 e D25 applicando una semplice traslazione verso l'alto delle medesime.

La conoscenza delle quote altimetriche esatte di alcuni punti all'interno di suddette aree ha confortato questa scelta operativa.

L'innalzamento riscontrato delle quote del piano campagna rispetto a quanto proposto dalla cartografia 1:10.000 porta, inevitabilmente, ad immaginare che, in confronto ai risultati del modello di sintesi, sia lecito attendersi livelli idrometrici superiori, perciò, al fine di garantire un'approssimazione per eccesso delle quote, e non per difetto, e quindi un'approssimazione per eccesso dei livelli attesi, è stato scelto di traslare verso l'alto la curva di invaso delle 3 APE di 1 m, e non degli 0.72 m di scarto medio precedentemente calcolati.

La scelta di adottare, per così dire, un "franco" di sicurezza di quasi 30 cm sull'innalzamento della curve di invaso assicura una stima massimizzata dei nuovi battenti.

Di seguito è riportata, da esempio, la nuova curva di invaso per la APE D24, confrontata con la curva di invaso adottata nel modello di sintesi.

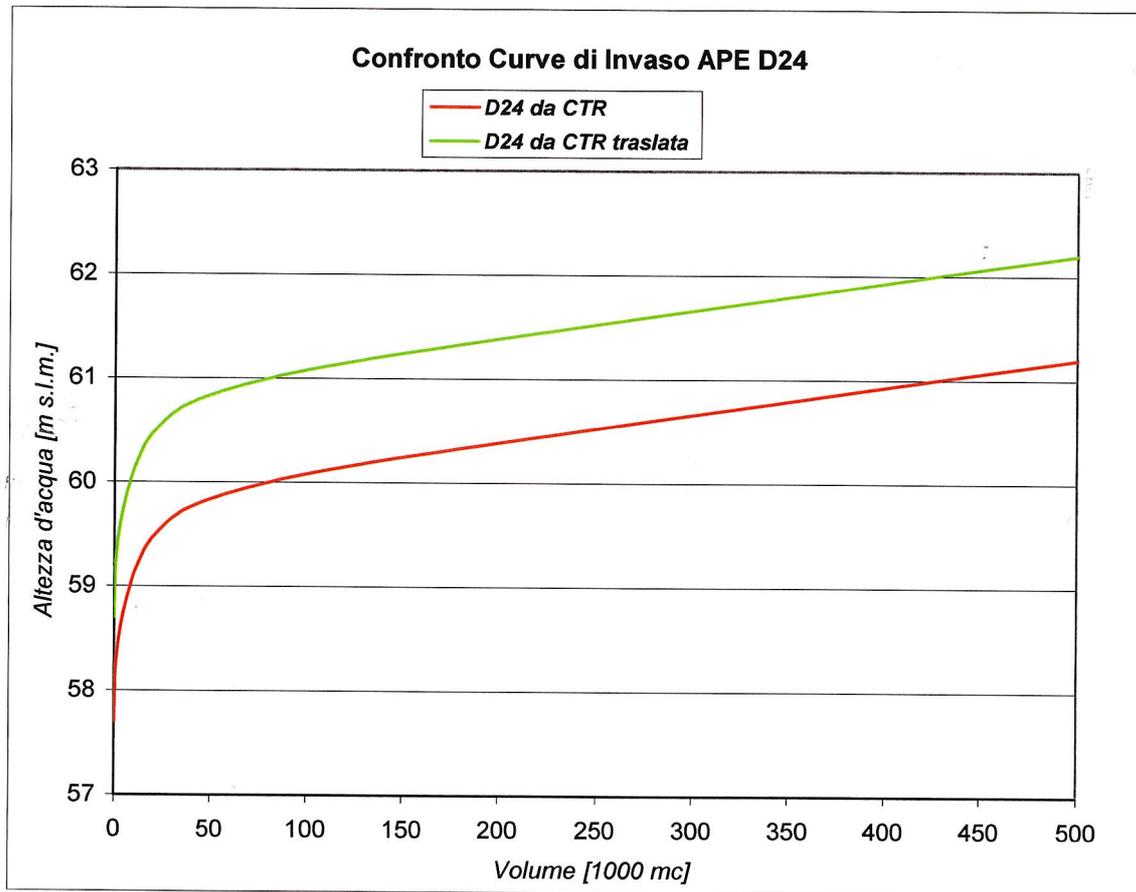


Fig. 13 : Confronto tra l'andamento della curva di invaso per l'area di potenziale esondazione D4 nel modello di sintesi e nel caso della traslazione suggerita di 1.00 m verso l'alto.

Una volta definite le leggi di riempimento delle 4 aree di potenziale esondazione modellate in questa seconda fase del lavoro, e sistemate le relative connessioni idrauliche, è stata completata la caratterizzazione geometrica del modello di dettaglio mantenendo salde le restanti caratteristiche acquisite nel modello di sintesi.

6.2 Idrogrammi di piena

La determinazione dell'idrogramma in ingresso nel modello di dettaglio è basata sulla medesima riflessione fatta per stabilire l'idrogramma in ingresso nel modello di sintesi; ovvero è stato scelto di porre come input di monte un idrogramma derivante da una precedente modellazione basata sullo stesso evento di riferimento.

La precedente realizzazione del modello di sintesi garantisce, quindi, non soltanto la preliminare verifica delle dinamiche di propagazione dell'onda di piena e di allagamento, ma anche la possibilità di prelevare, dagli output della simulazione in moto vario, l'idrogramma laminato in corrispondenza della sezione di monte, n. 269.

Tale idrogramma, infatti, racchiude in sé tutte le informazioni circa l'evoluzione dell'evento a monte della sezione n. 269, e può essere ritenuto adeguato per determinare il corretto sviluppo del fenomeno a valle di essa.

In Fig. 14 è riportato l'idrogramma in ingresso nella sezione n. 269.

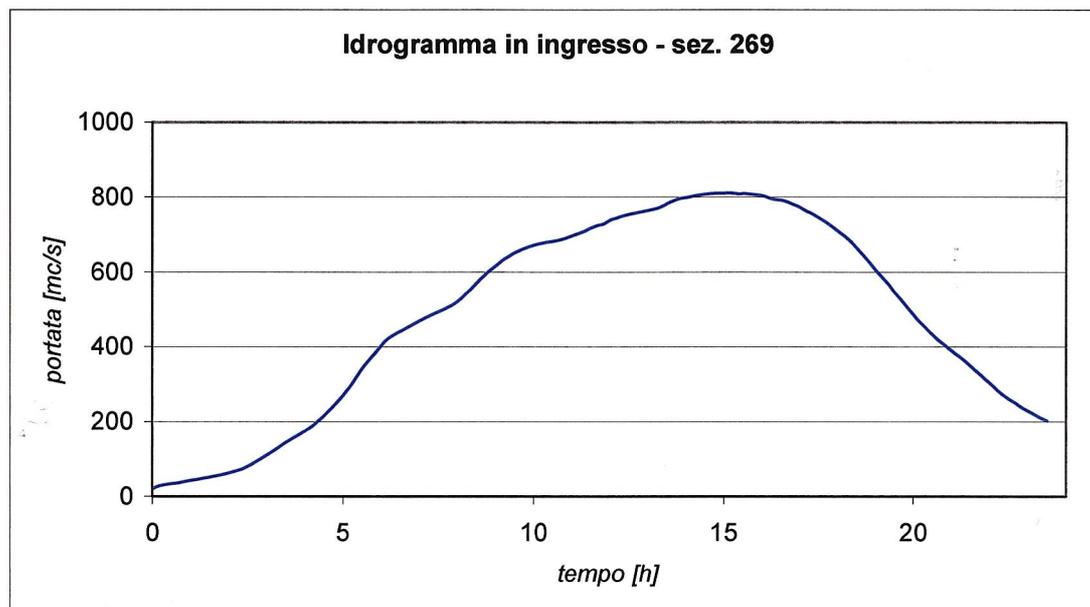


Fig. 14 : Idrogramma in ingresso – Sezione n. 269

Come detto, l'unico affluente modellato in questa seconda fase del lavoro è il Borro del Vicariato, il cui contributo resta il medesimo di quello considerato nel modello di sintesi.

6.3 Simulazione idraulica in moto vario e risultati

La simulazione in moto vario del modello di dettaglio è stata condotta adottando gli stessi parametri del precedente modello e le stesse opzioni di calcolo.

E' stata adattata soltanto la condizione al contorno di valle: è stata utilizzata, in tal caso, la pendenza in prossimità della sezione di chiusura n. 258, stimata pari a 0.00185 m/m.

I risultati di questa seconda modellazione, in termini di livelli idrometrici e volumi previsti nelle 4 aree di potenziale esondazione, sono riportati nella tabella che segue.

APE	Livello idrico [m s.l.m.]	Volume invasato [1000m ³]
D22bis	61.90	270.47
D23	61.90	1.03
D24	61.90	386.40
D25	61.90	128.99

Tab. 2 : Modello di dettaglio - Risultati

La dinamica di inondazione del territorio ha mantenuto le stesse caratteristiche riscontrate nell'analisi del modello di sintesi, e sono aumentate, come era lecito attendersi, le quote d'acqua nelle 4 celle.

Questi incrementi non sono risultati, comunque, di rilevanti proporzioni, circa 20 cm, nonostante non sia stato tenuto conto della presenza, a valle, dell'APE D26, verso la quale,

dal modello di sintesi, è stato osservato un passaggio di volumi provenienti dalla D24, con l'effetto di una riduzione del livello nella D24 stessa e nelle aree ad essa collegate.

Anche per quest'ultimo motivo è possibile affermare che la valutazione dei battenti nelle aree di potenziale esondazione studiate, ed in particolare nella D22bis, è stata condotta con ampio margine di sicurezza, probabilmente massimizzando il fenomeno e non certo sottostimandolo. Allo stesso tempo, l'osservazione di risultati che differiscono non molto da quelli ottenuti da un'analisi di minor dettaglio è da considerarsi come una conferma dell'attendibilità della modellazione e dei suoi effetti.

Pertanto, in relazione all'obiettivo finale di questo lavoro, cioè quello di verificare l'entità del fenomeno esondativo in termini di livelli idrici nell'intorno dell'edificio oggetto di intervento, i risultati di questa seconda modellazione, precedentemente mostrati in tabella, vengono assunti come definitivi.

Il livello idrico nell'intorno dell'edificio oggetto di intervento è stato, dunque, stimato pari a 61.90 m s.l.m.

La Tav. 6 offre una rappresentazione della previsione di allagamento all'interno dell'area D22bis, e consente la contestualizzazione dell'edificio sia allo stato attuale che allo stato di progetto.

7. Conclusioni

Il presente lavoro conferma come l'area studiata risulti fortemente interessata da esondazioni causate da eventi di piena con tempi di ritorno importanti.

Il piano campagna, nell'intorno dell'edificio di cui è prevista la ristrutturazione, presenta quote comprese tra i 60.60 e i 61.00 m s.l.m., pertanto i battenti idrici attesi possono superare anche ampiamente 1 metro sul piano campagna.

La superficie coperta dell'edificio non subirà ampliamenti a seguito del nuovo intervento, quindi non varieranno i volumi sottratti alla libera espansione delle acque.

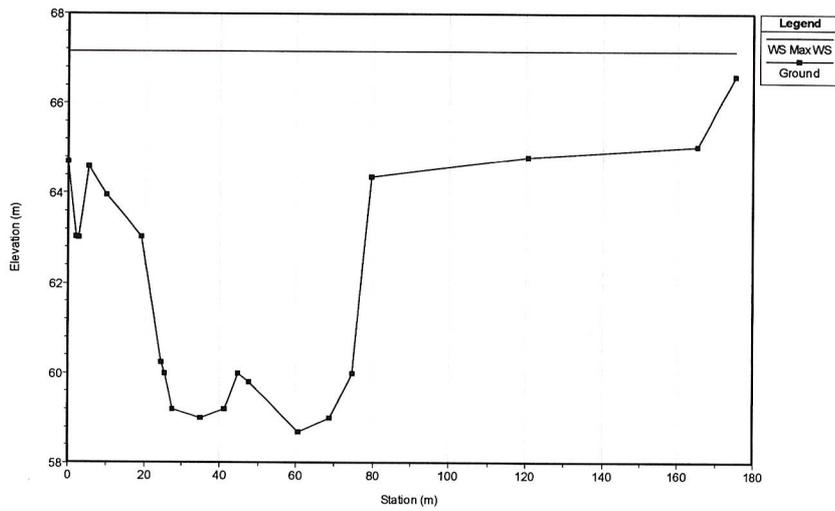
Per di più, al fine di garantire non soltanto il non aggravio della pericolosità idraulica nella zona bensì la parziale mitigazione del rischio rispetto alle attuali condizioni, la scelta progettuale è stata indirizzata verso la realizzazione di un edificio poggiato su una struttura a "piloties", o a "palafitta"; si tratta di un volume aperto che permetta alle acque eventualmente esondate di circolare liberamente.

Il piano abitato risulterà così collocato oltre 2.50 m sul piano campagna, garantendo un sufficiente franco di sicurezza nei confronti del rischio di allagamento degli interni.

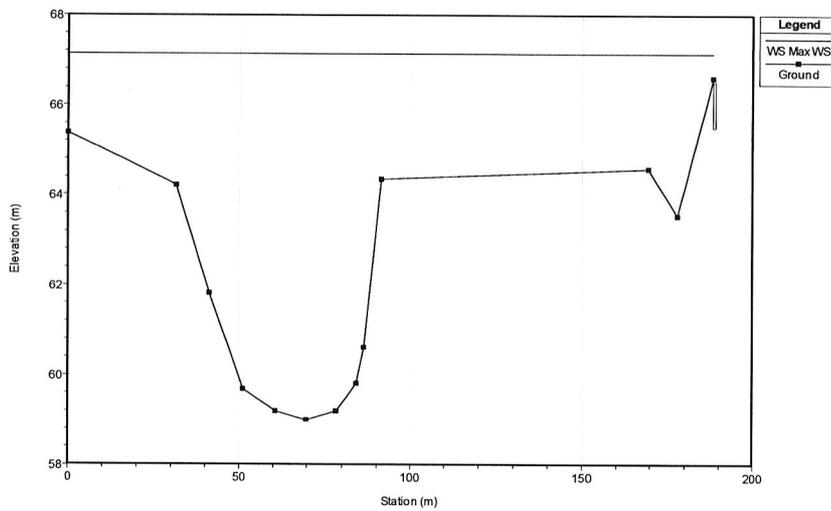
Questa soluzione rappresenta sicuramente una proposta migliorativa rispetto allo stato attuale, non comportando in pratica alcuna sottrazione di volume, ed inoltre è in grado di assicurare un migliore difesa e protezione degli stessi elementi strutturali dell'edificio, i quali, invece, in caso di realizzazione di un sottostante volume chiuso e vuoto allo scopo del solo rialzo, sarebbero stati maggiormente sottoposti a fenomeni di infiltrazione causati da allagamenti e ristagni d'acqua.

ALLEGATO A – Sezioni idrauliche

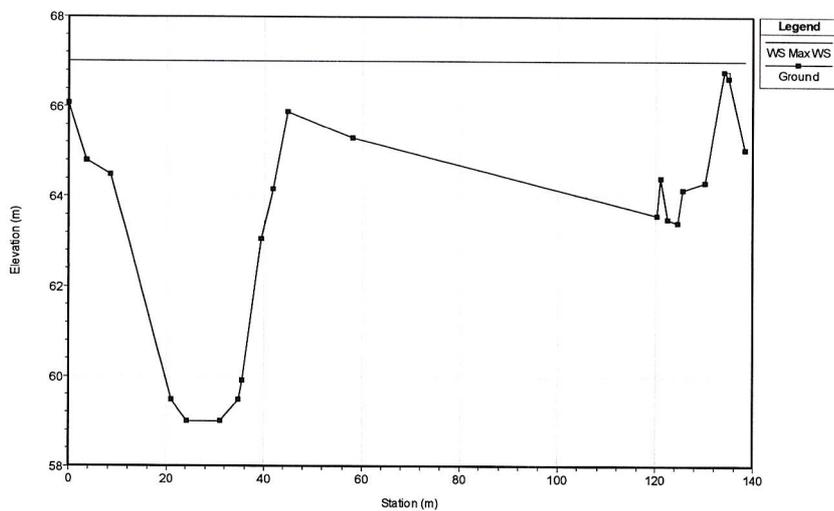
(Per ciascuna sezione è indicato il livello raggiunto nella modellazione di sintesi)



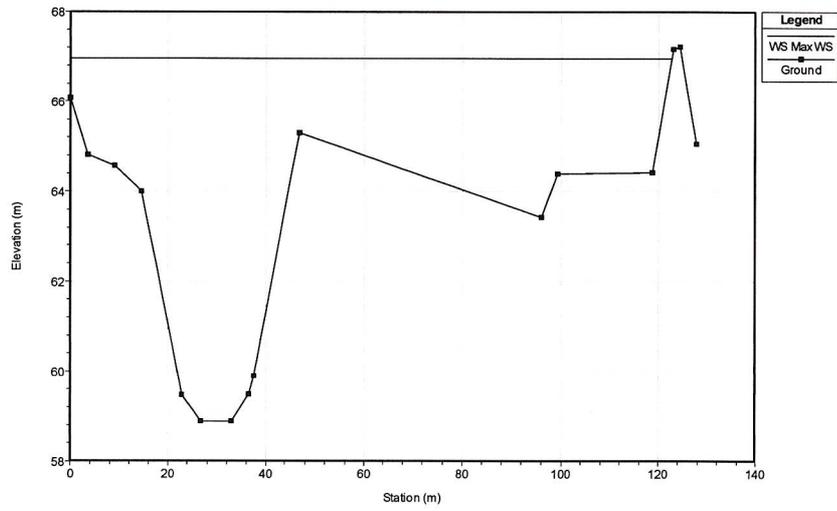
Sez. 287



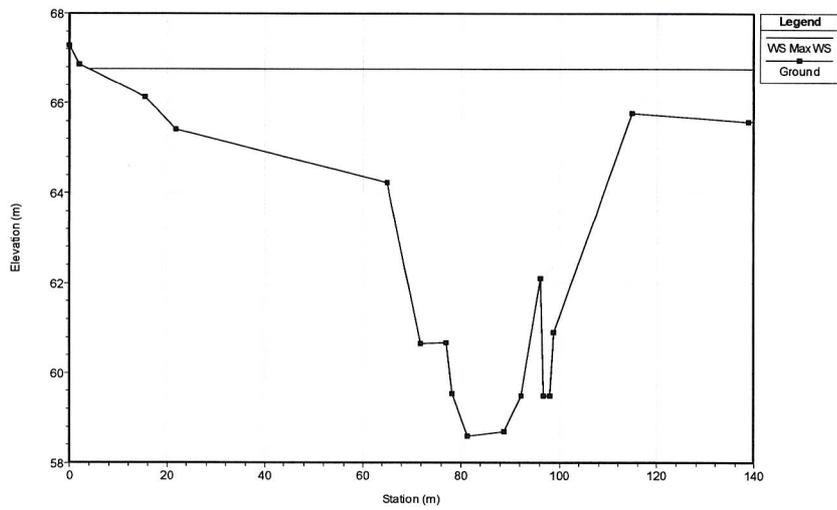
Sez. 286



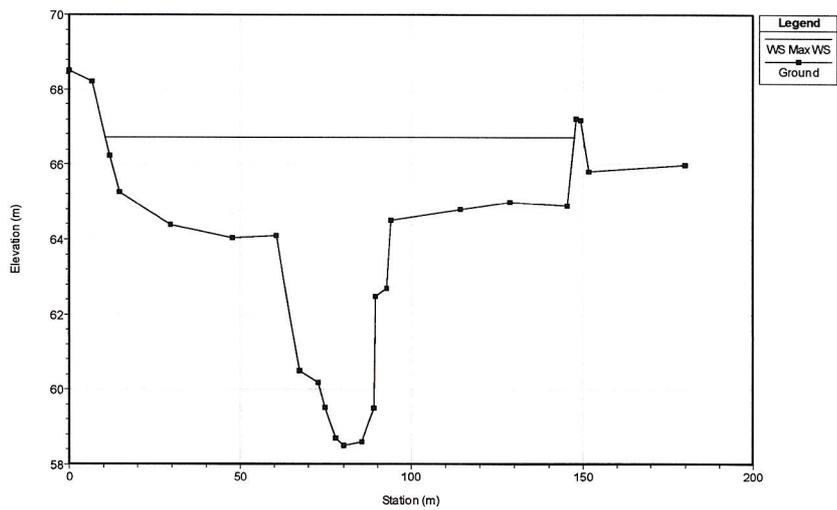
Sez. 285



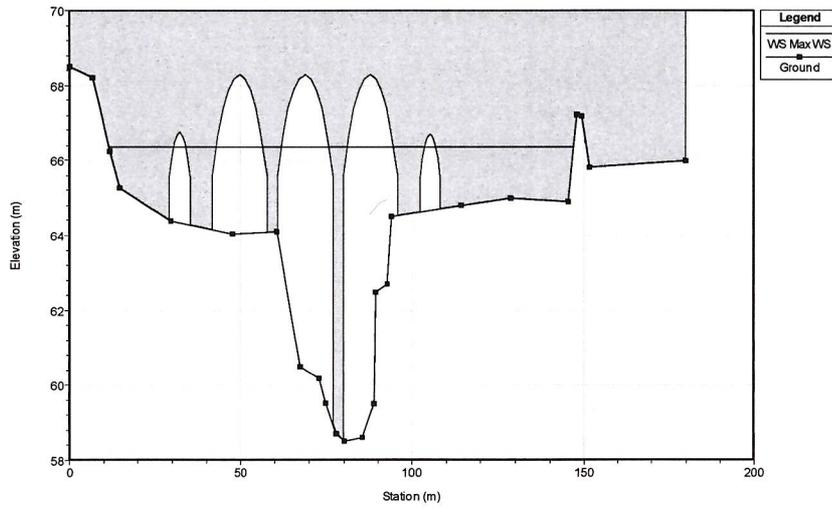
Sez. 284



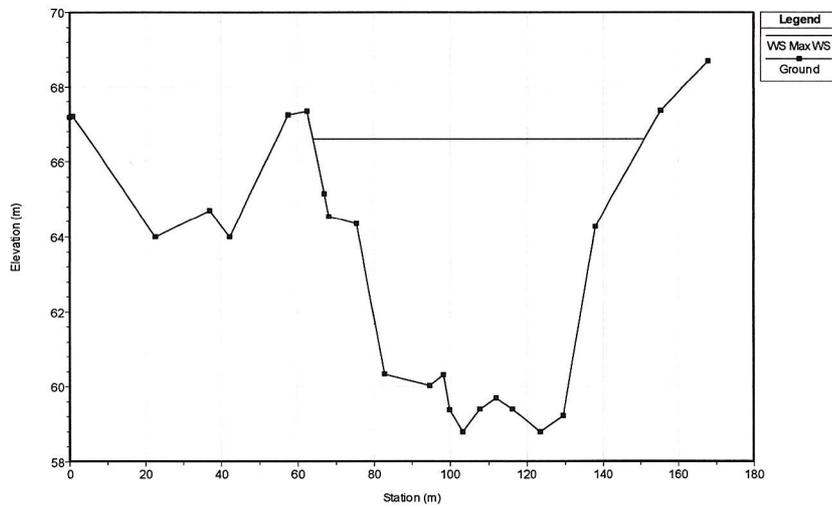
Sez. 283



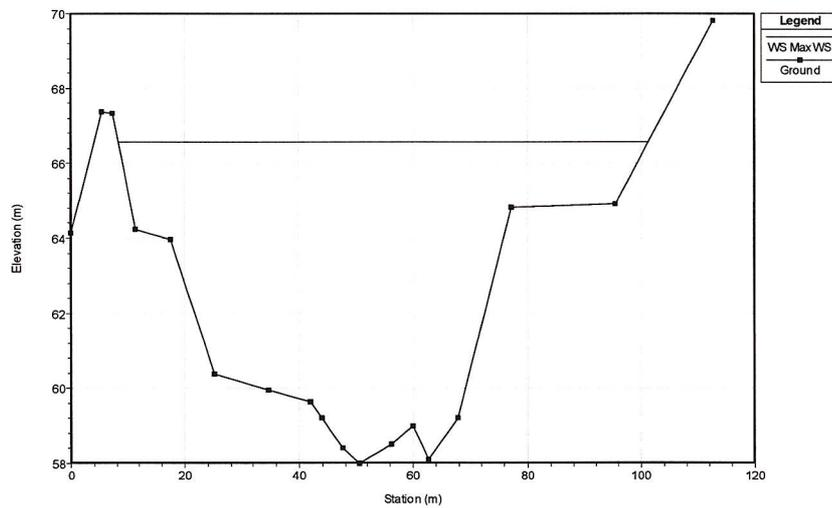
Sez. 282



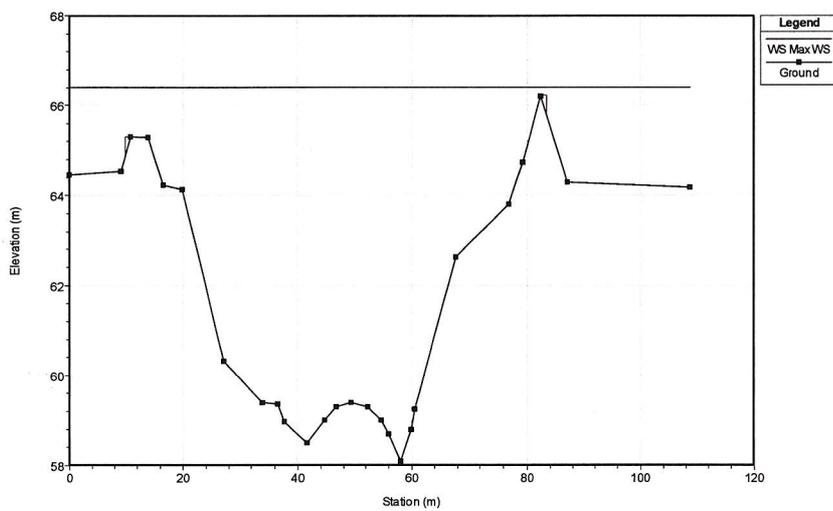
Sez. 281.5



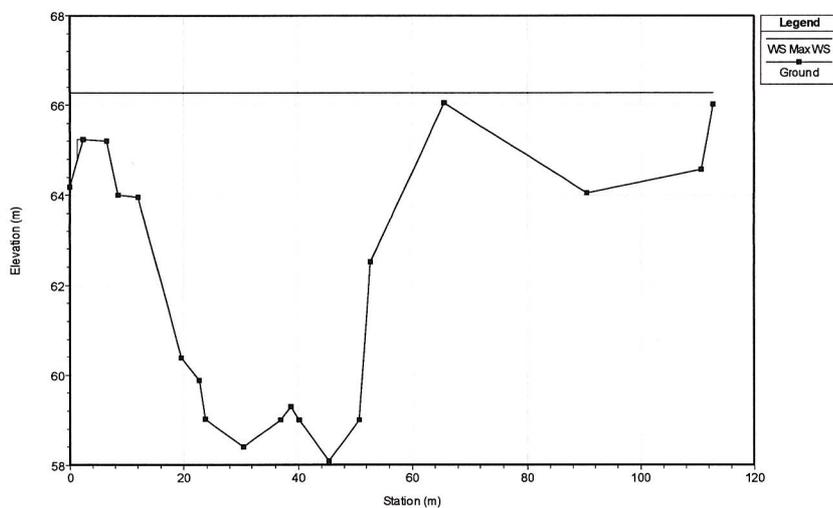
Sez. 281



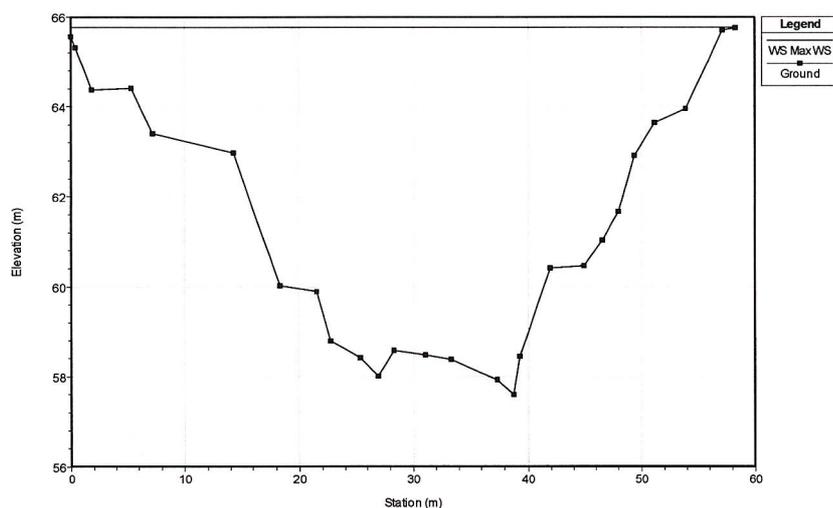
Sez. 280



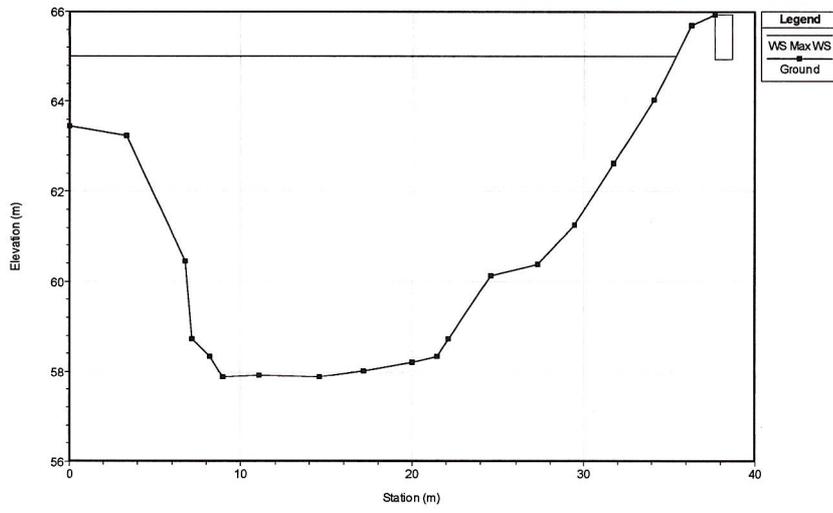
Sez. 279



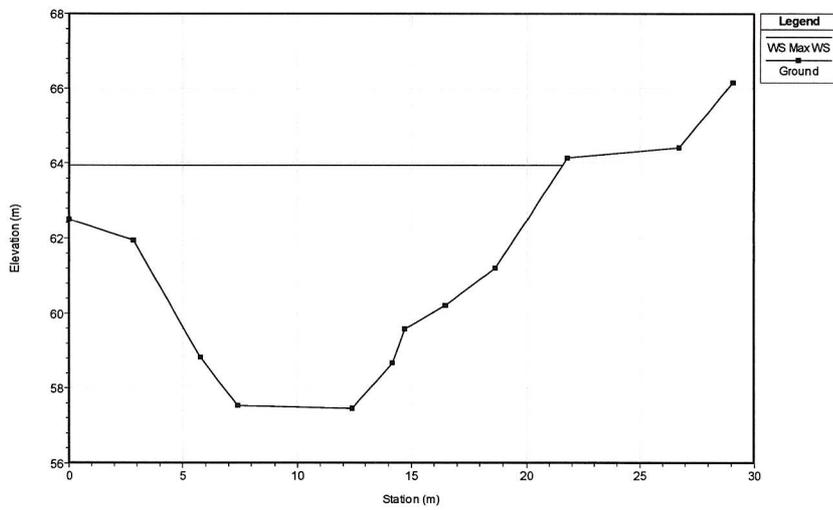
Sez. 278



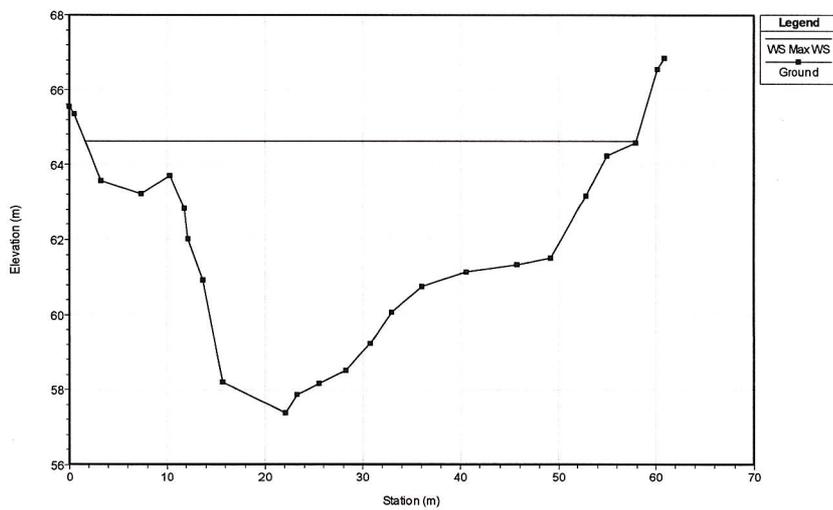
Sez. 277



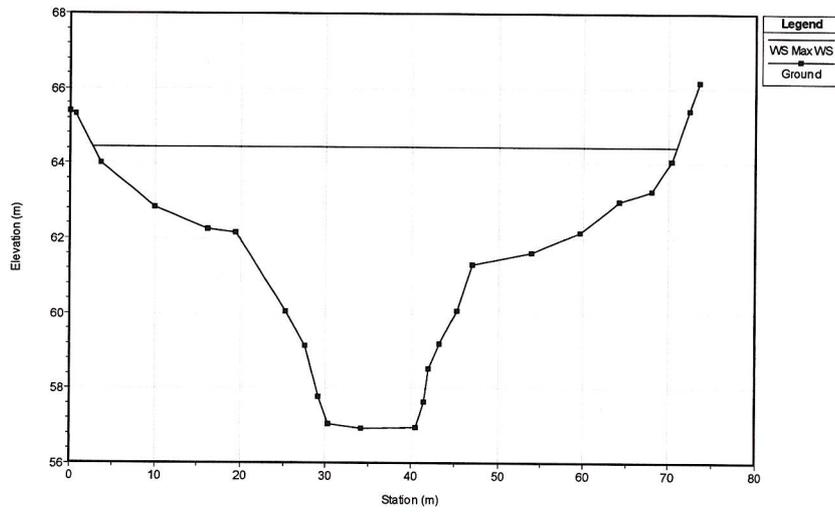
Sez. 276



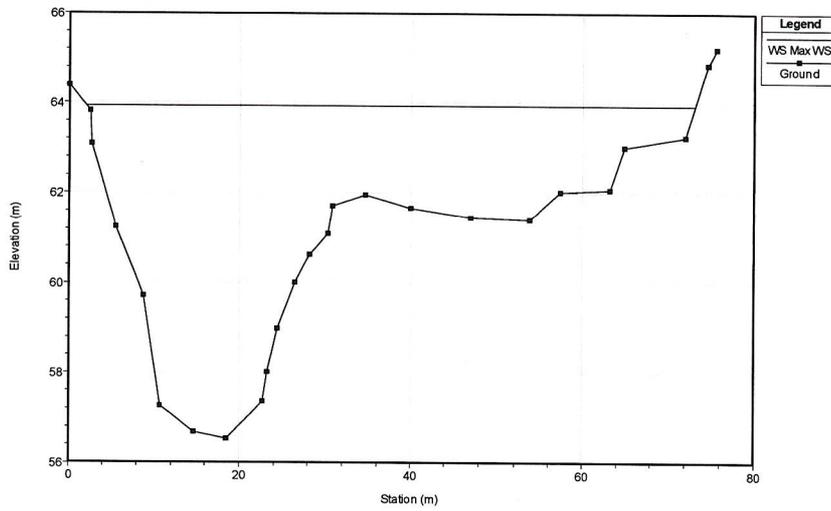
Sez. 275



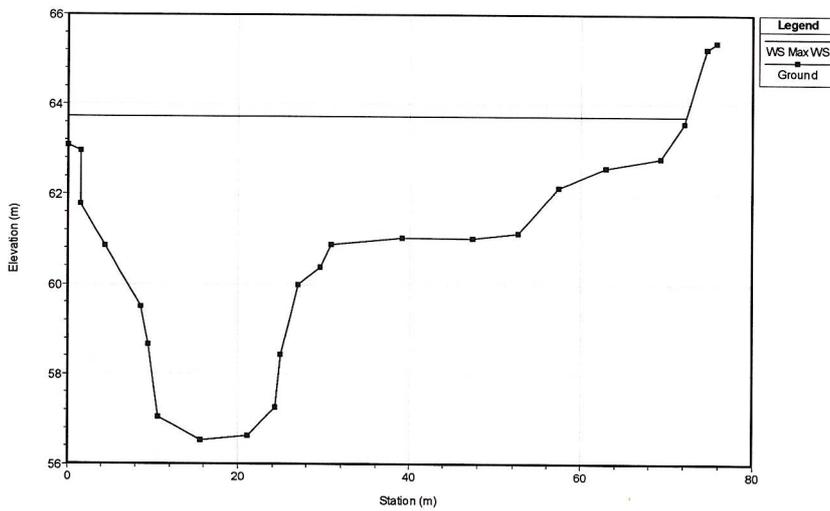
Sez. 274



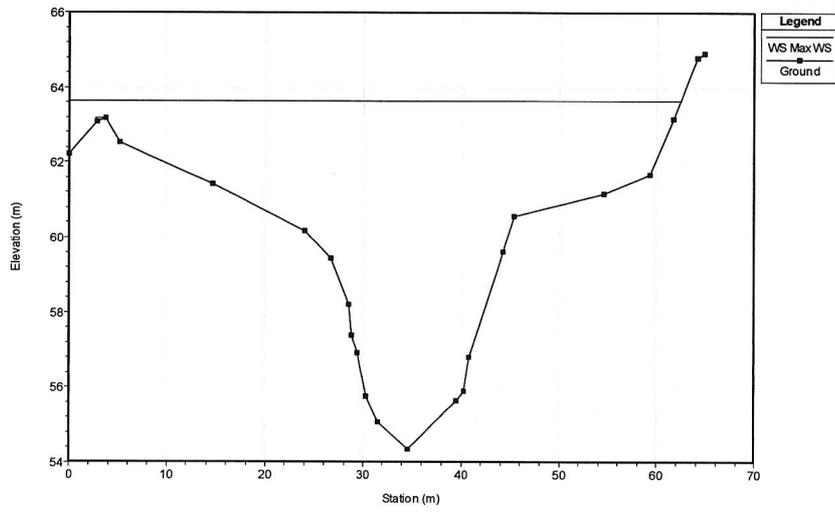
Sez. 273



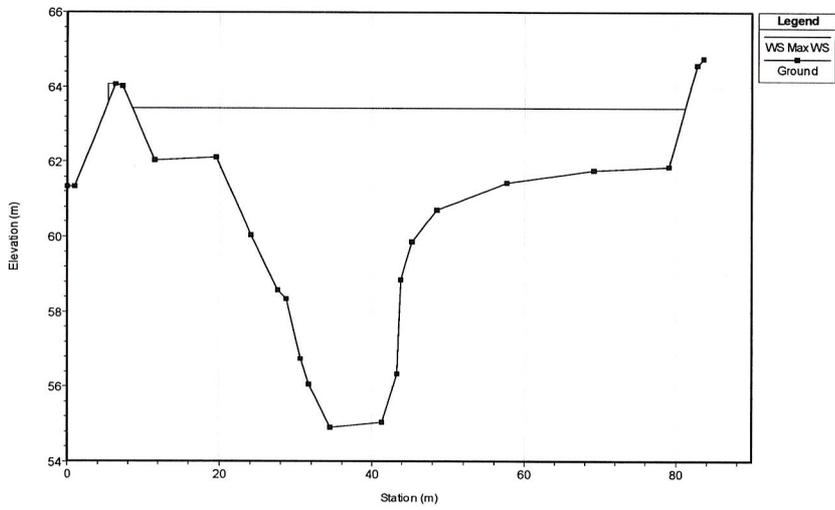
Sez. 272



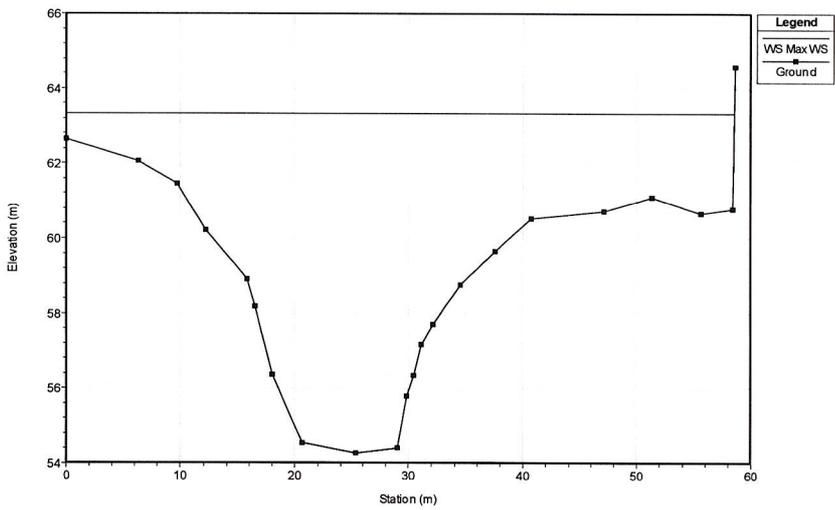
Sez. 271



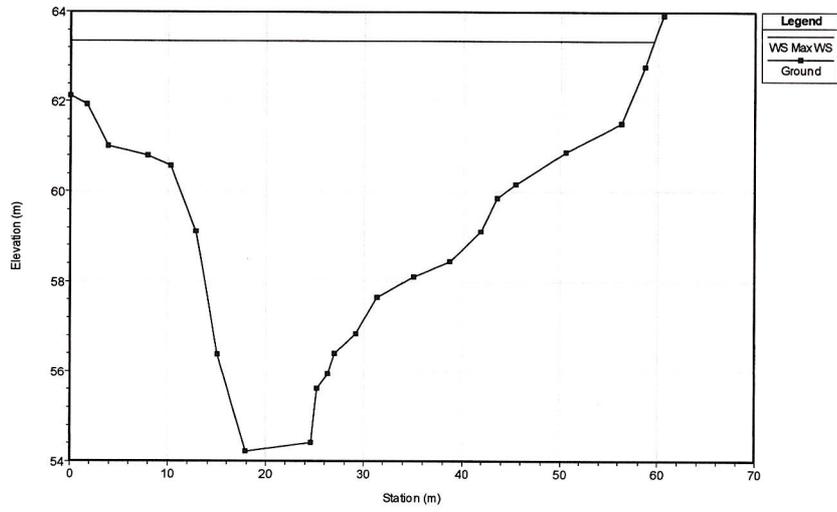
Sez. 270



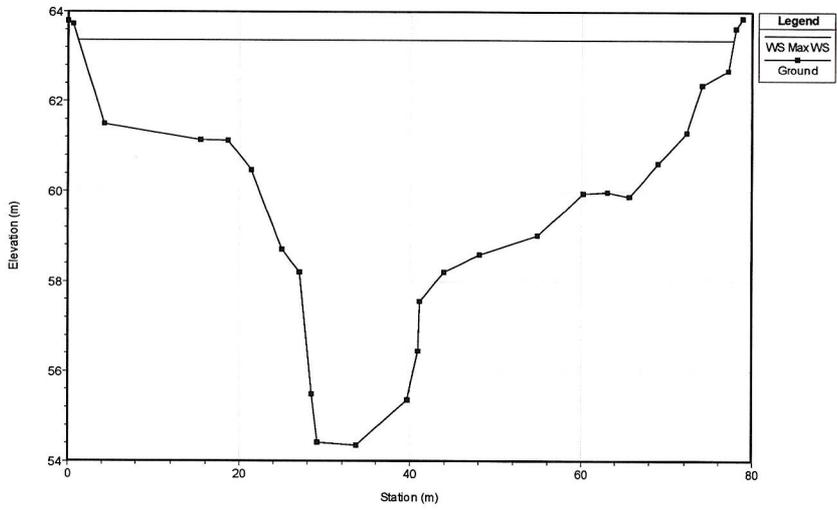
Sez. 269



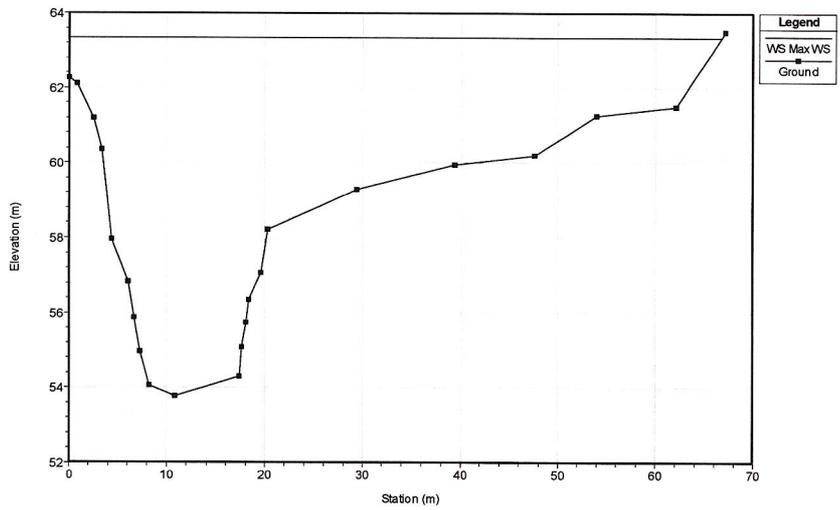
Sez. 268



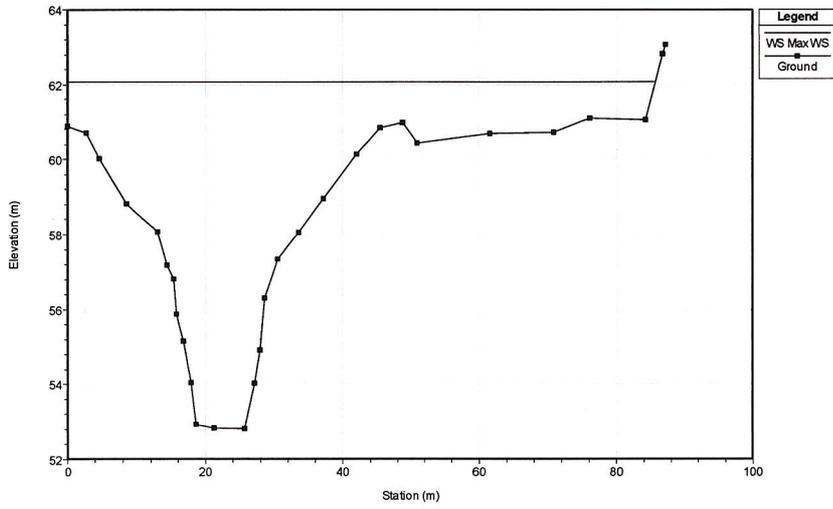
Sez. 267



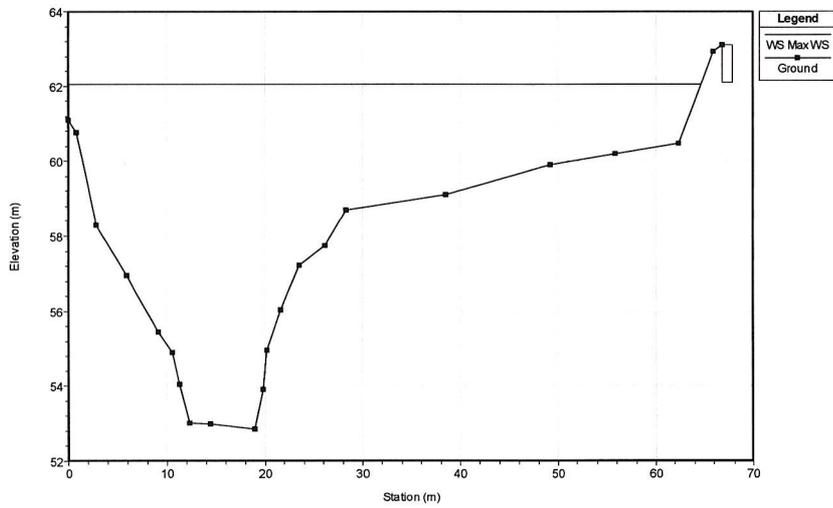
Sez. 266



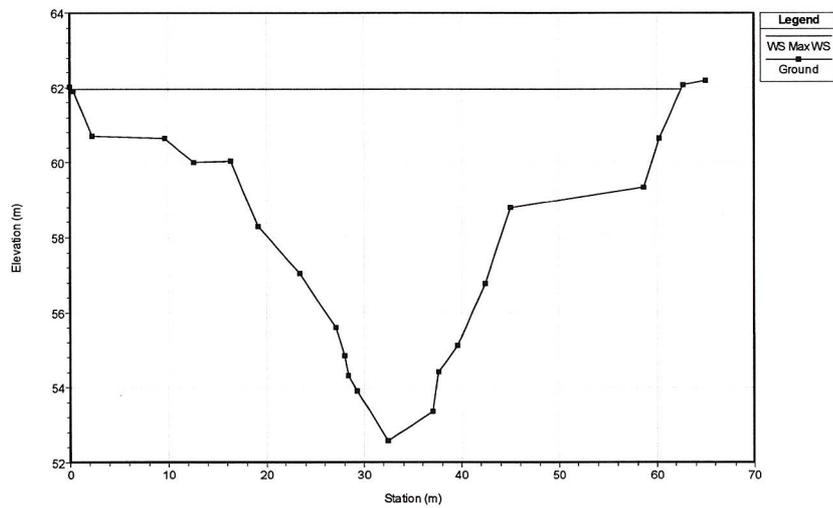
Sez. 265



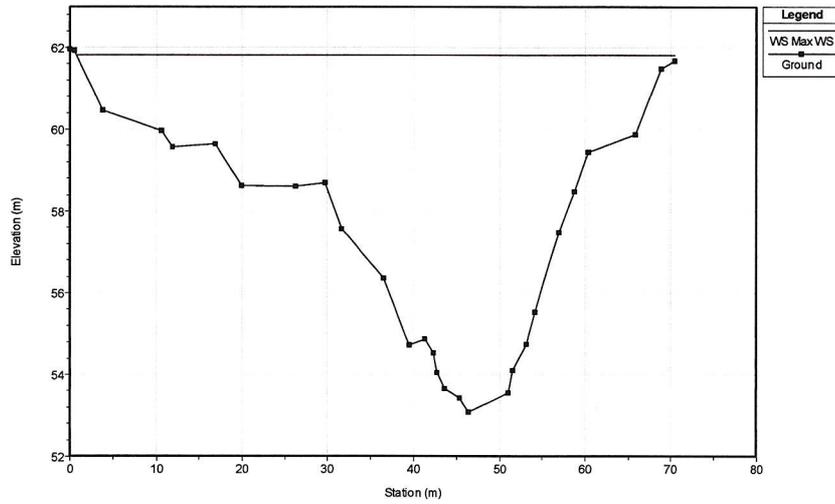
Sez. 264



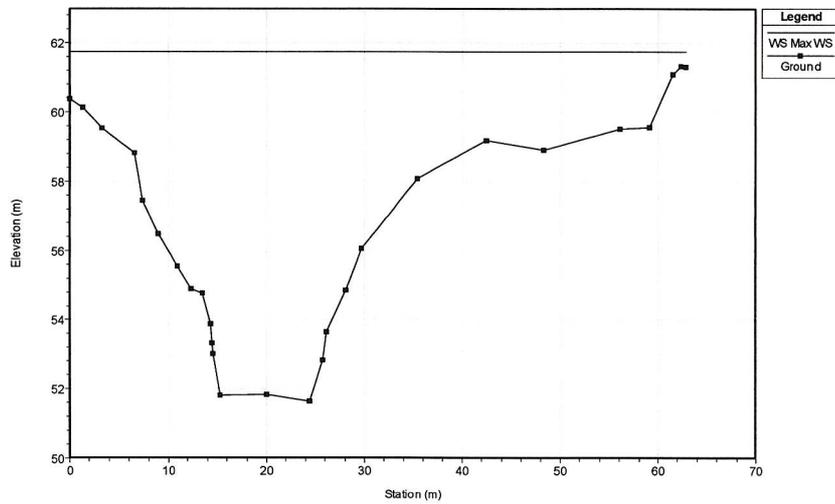
Sez. 263



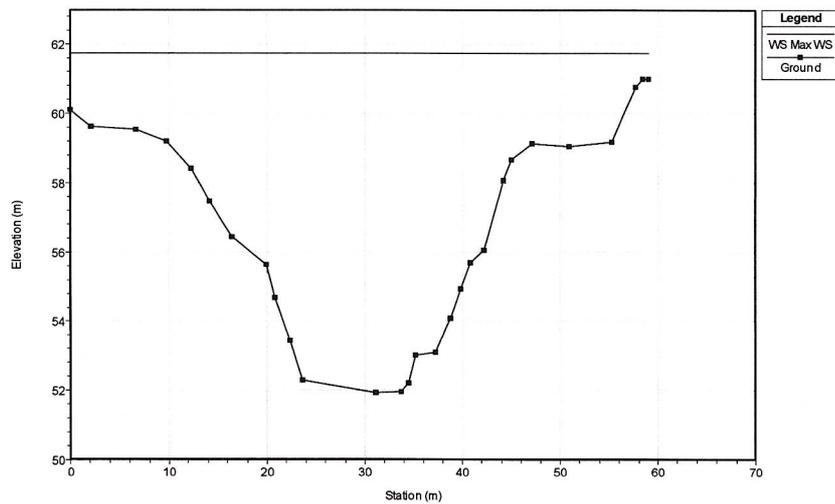
Sez. 262



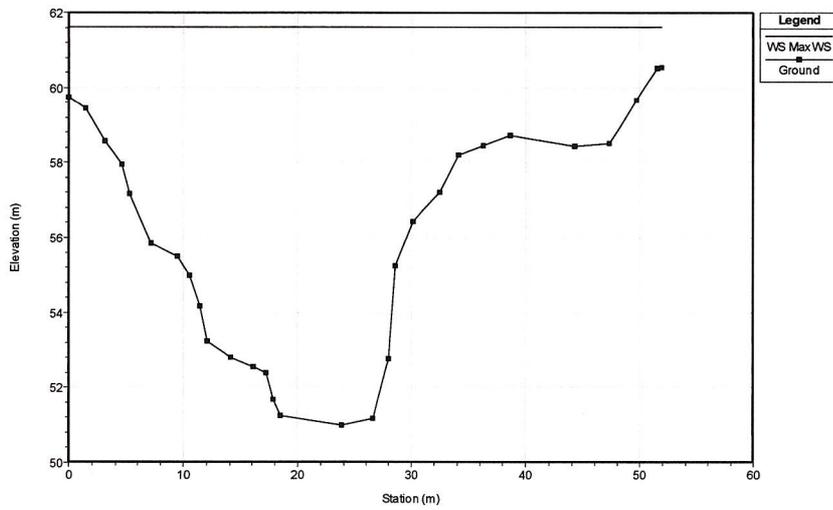
Sez. 261



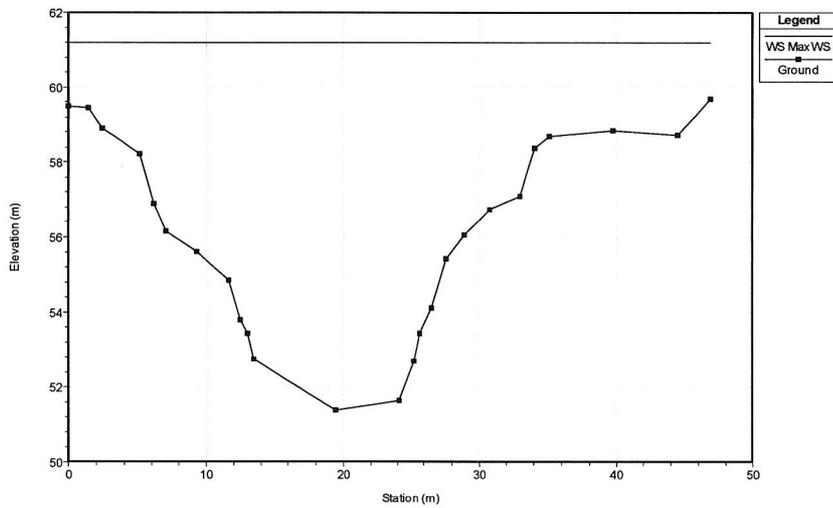
Sez. 260



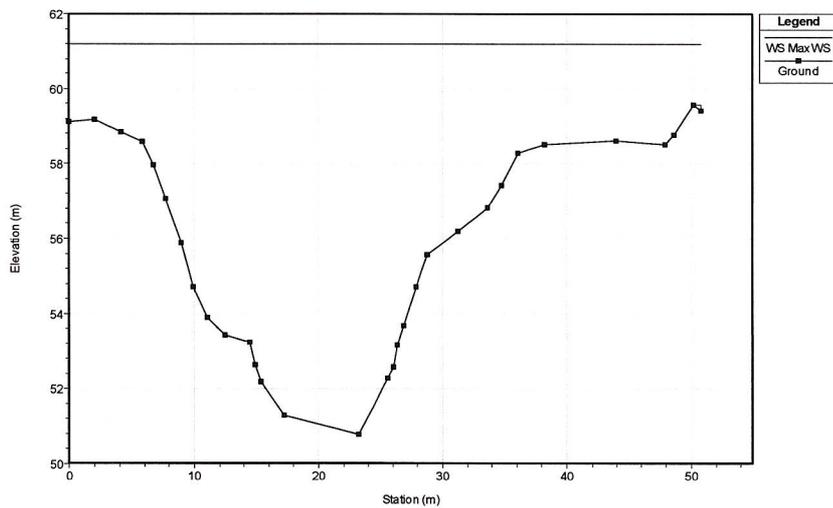
Sez. 259



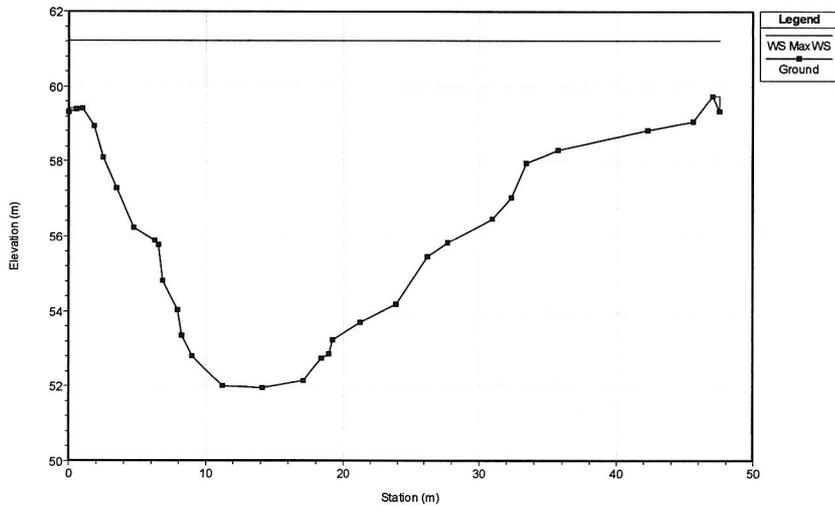
Sez. 258



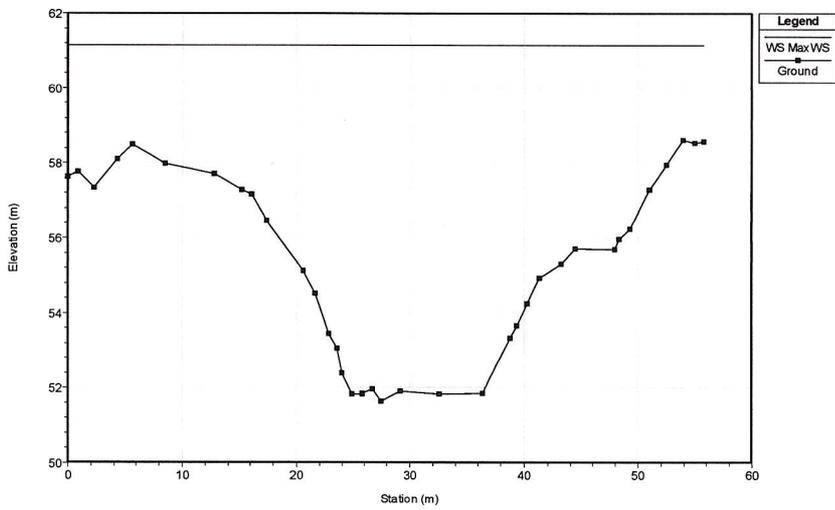
Sez. 257



Sez. 256

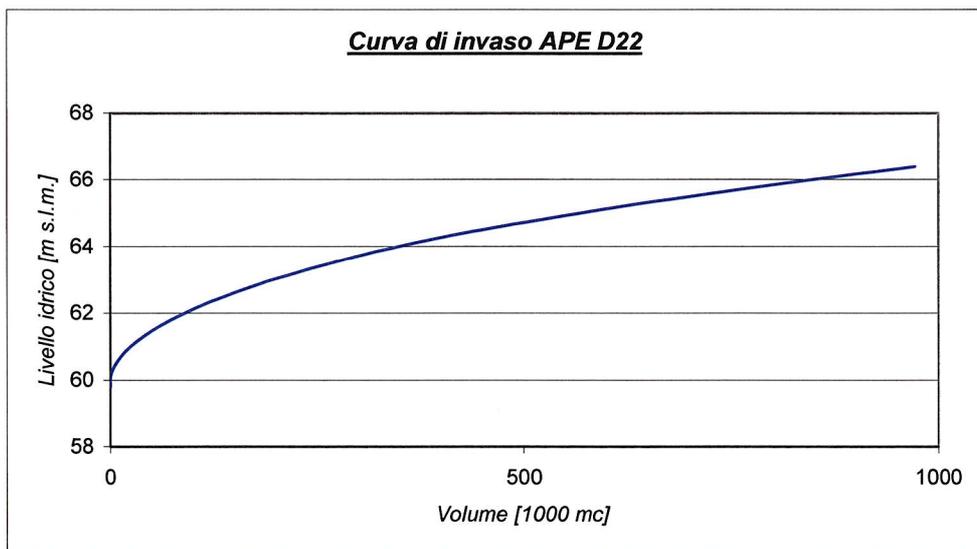
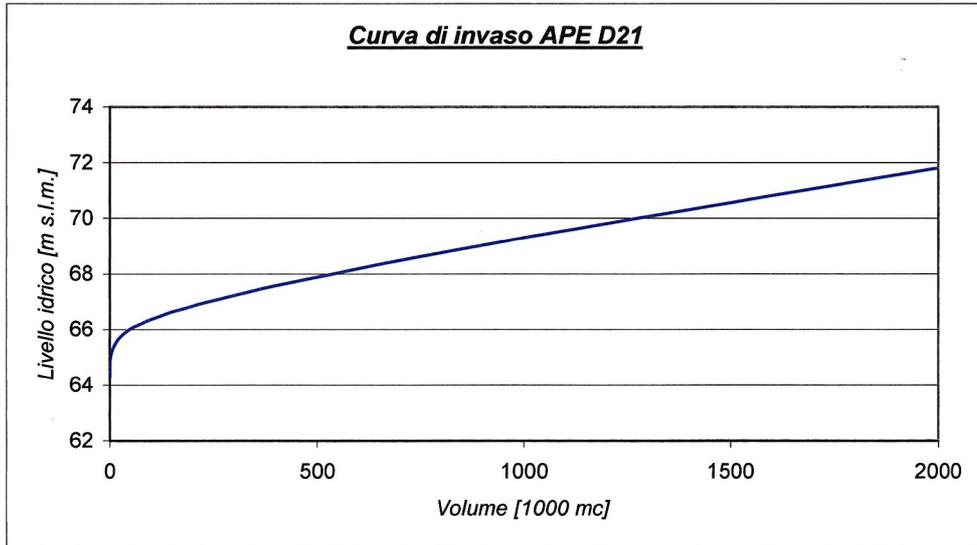


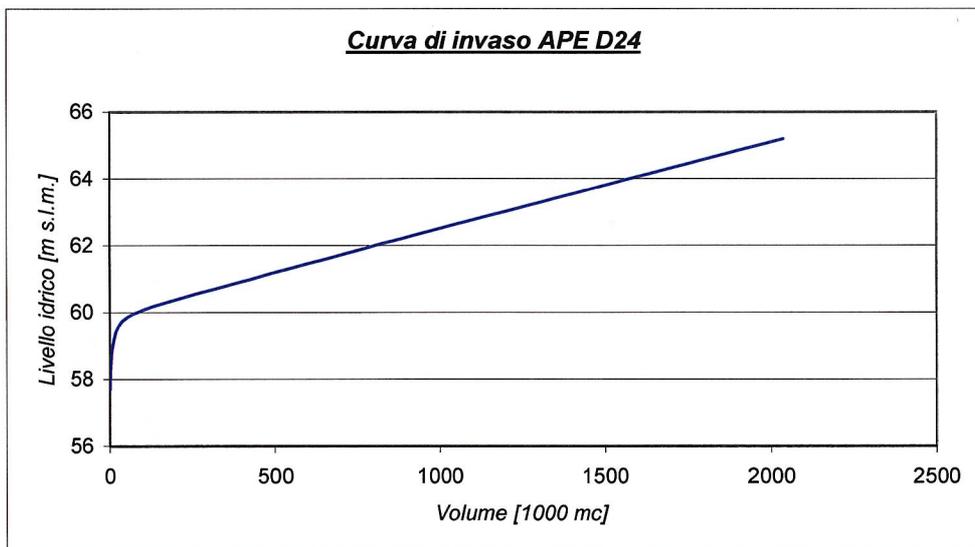
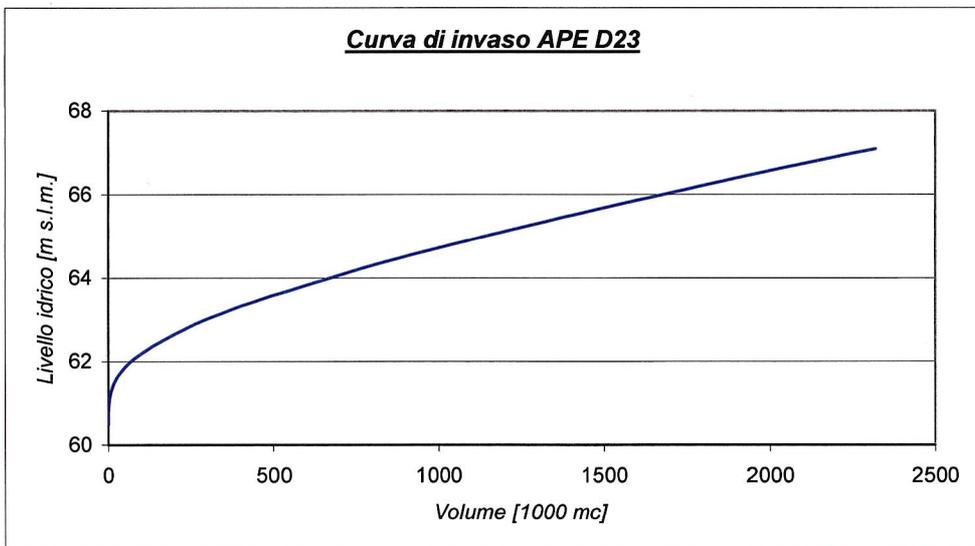
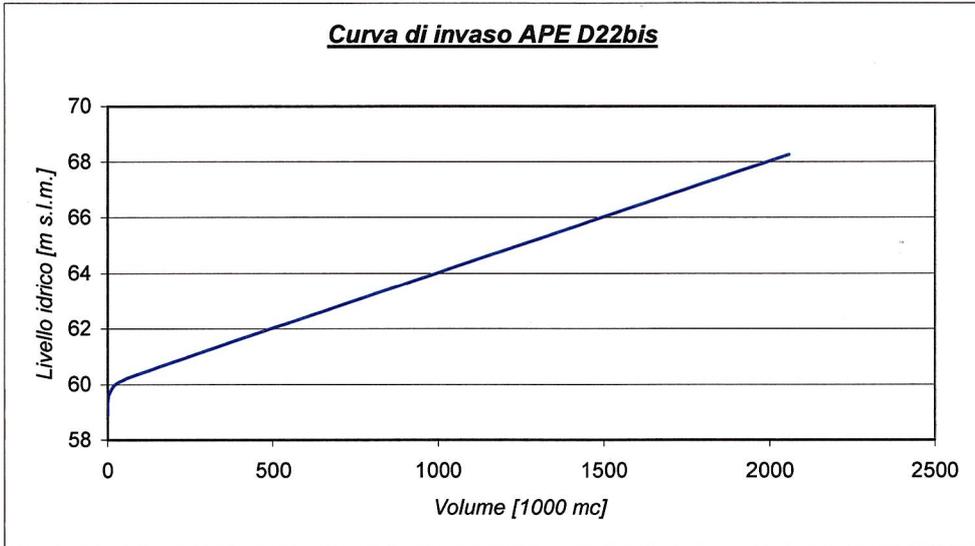
Sez. 255

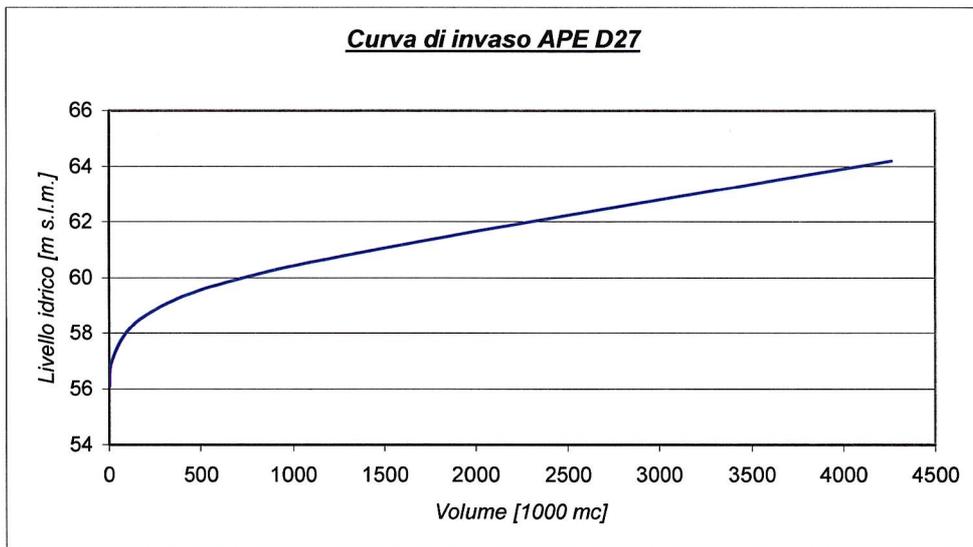
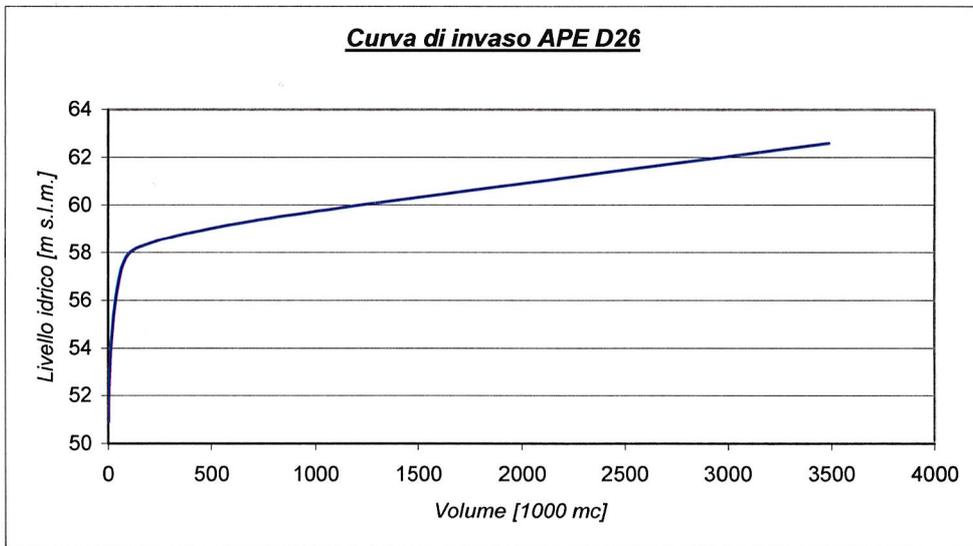
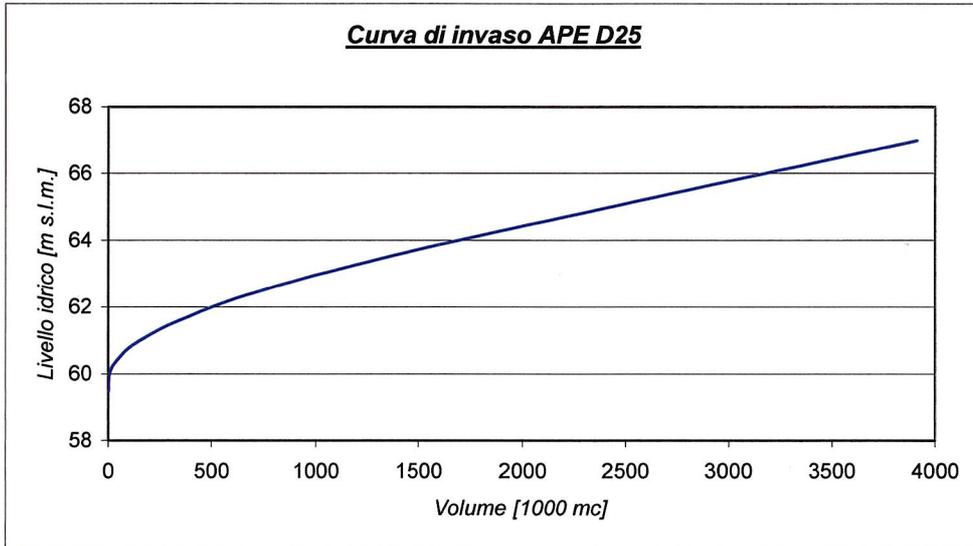


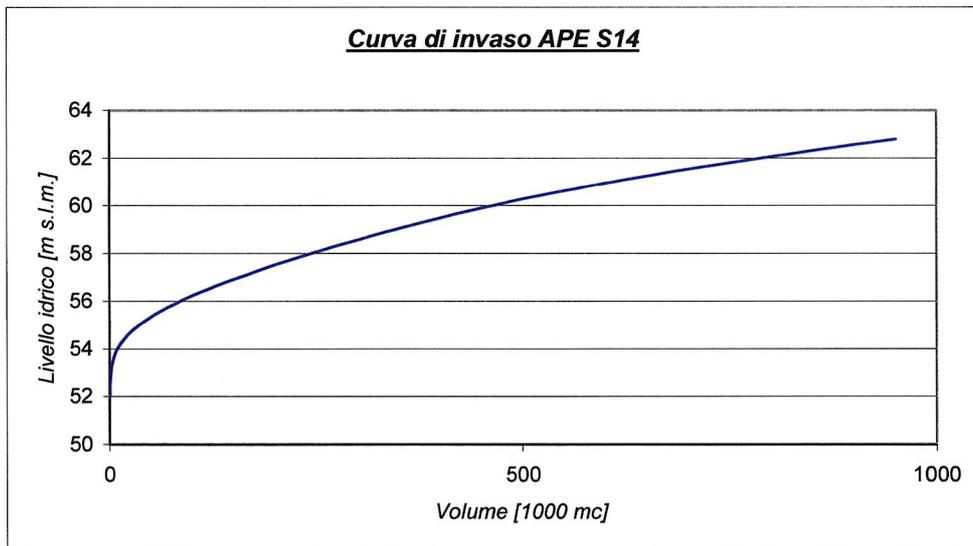
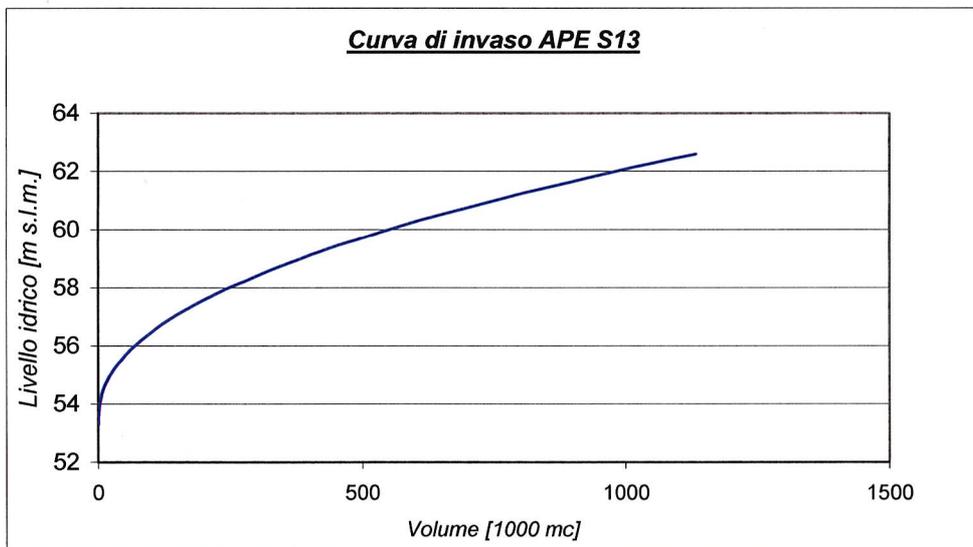
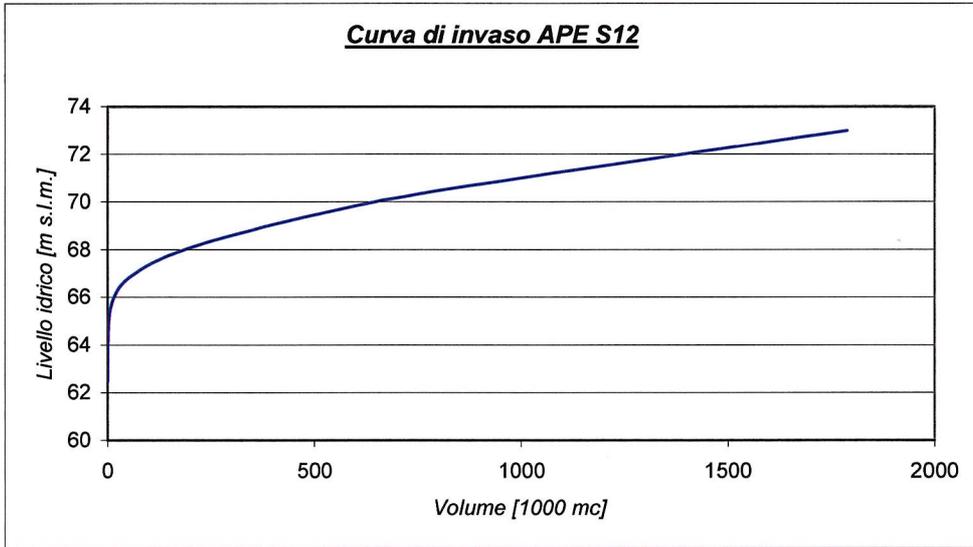
Sez. 254

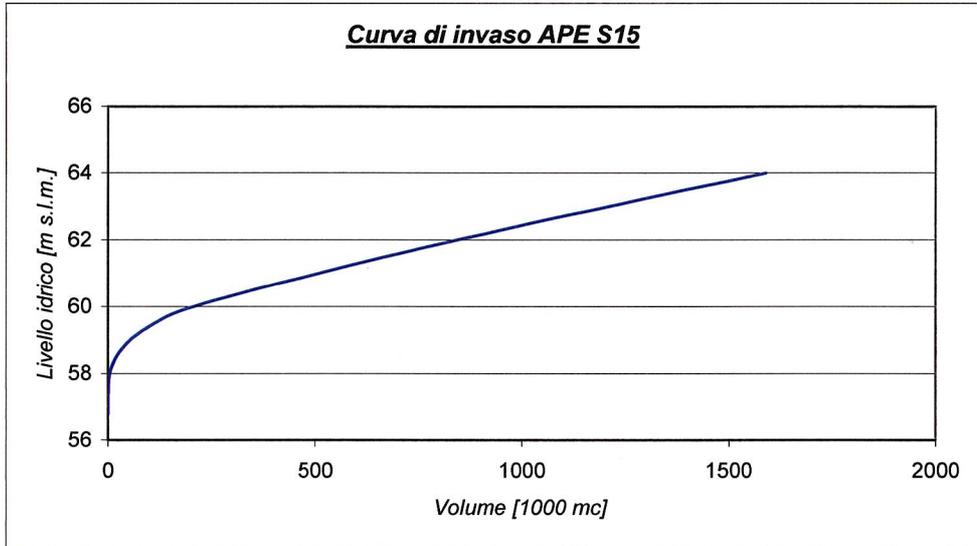
ALLEGATO B – Curve di invaso
(Relative alle aree di potenziale esondazione nella modellazione di sintesi)



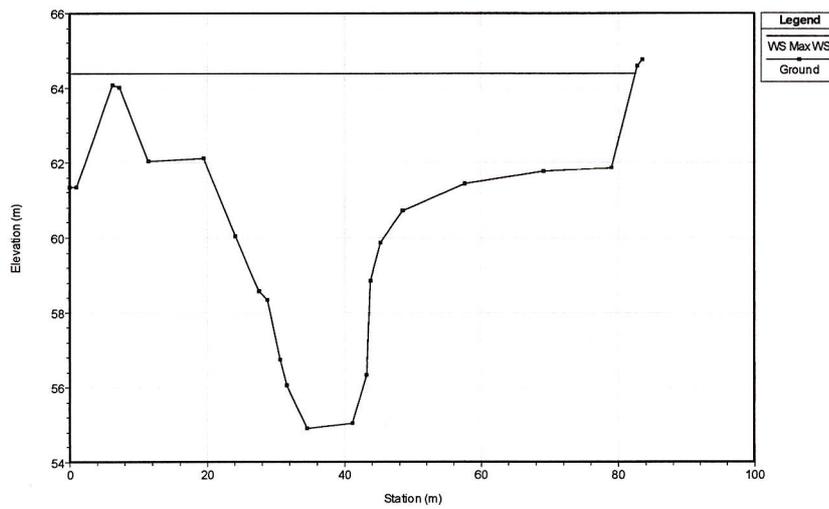




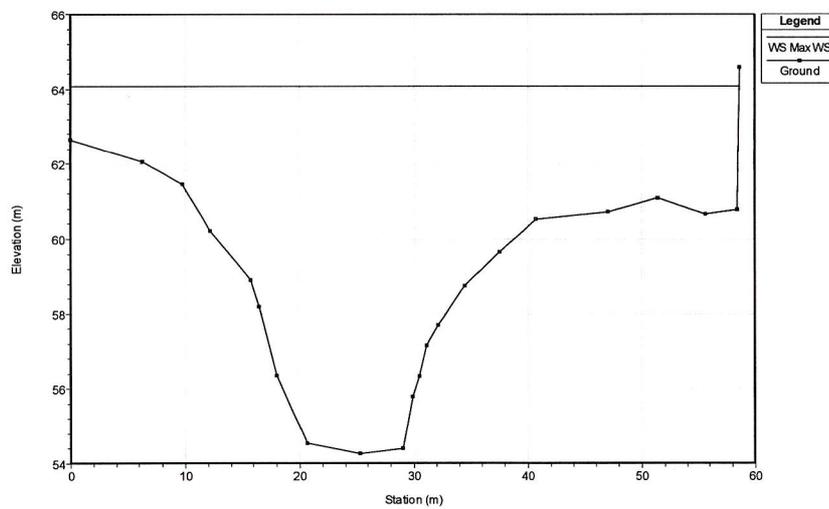




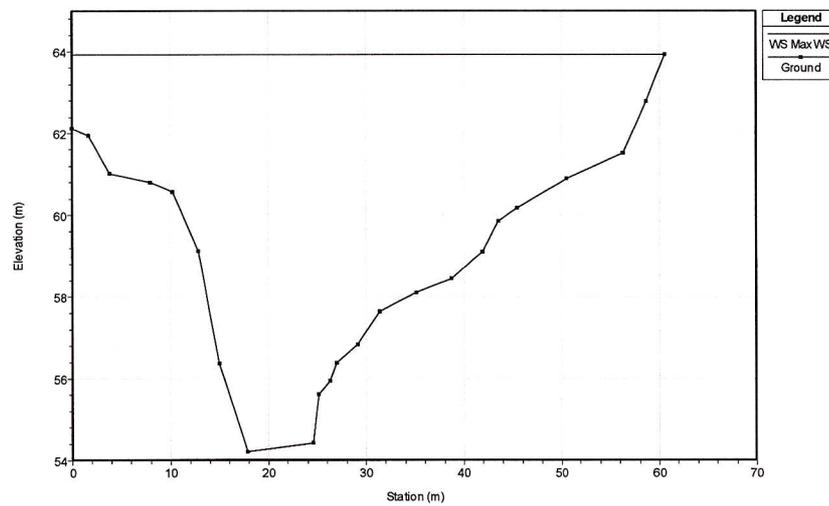
ALLEGATO C – Sezioni idrauliche
(Per ciascuna sezione è indicato il livello raggiunto nella modellazione di dettaglio)



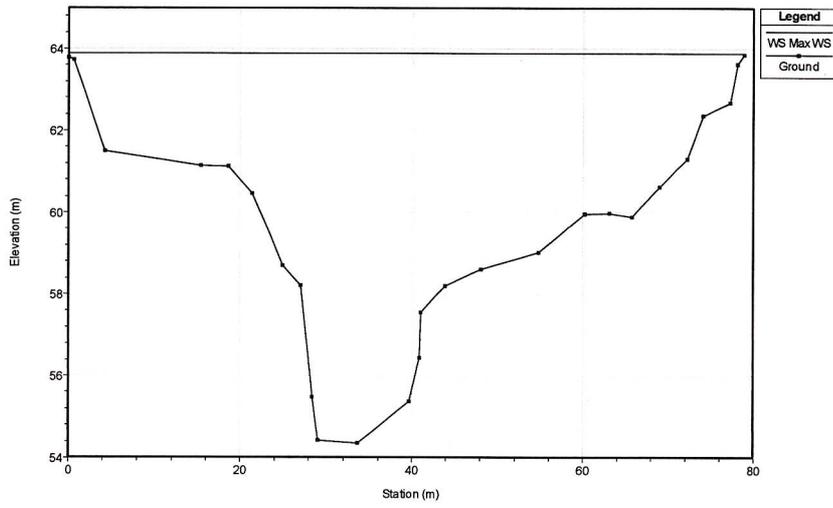
Sez. 269



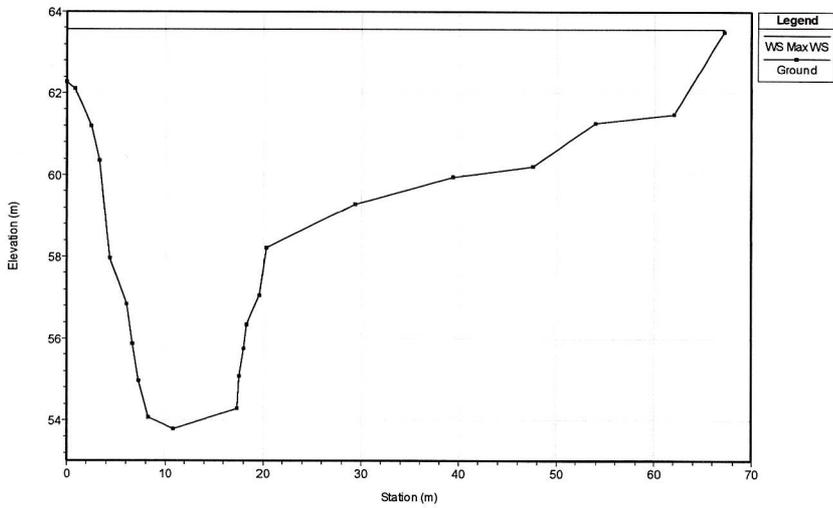
Sez. 268



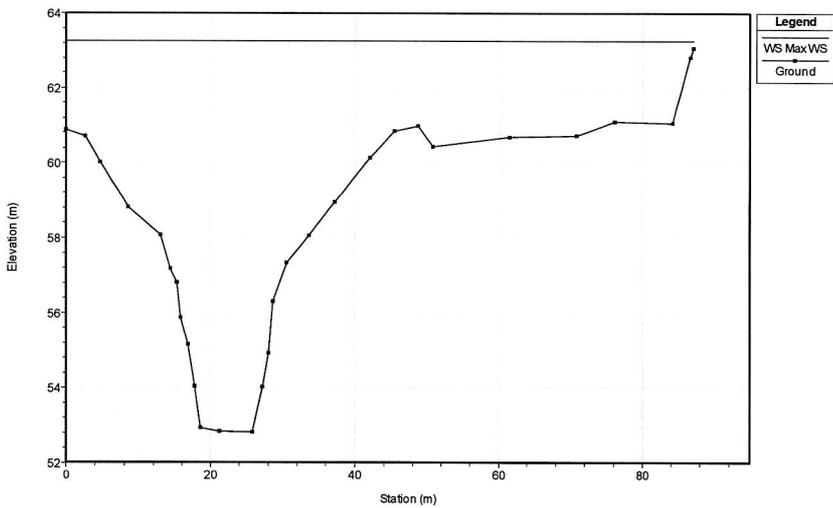
Sez. 267



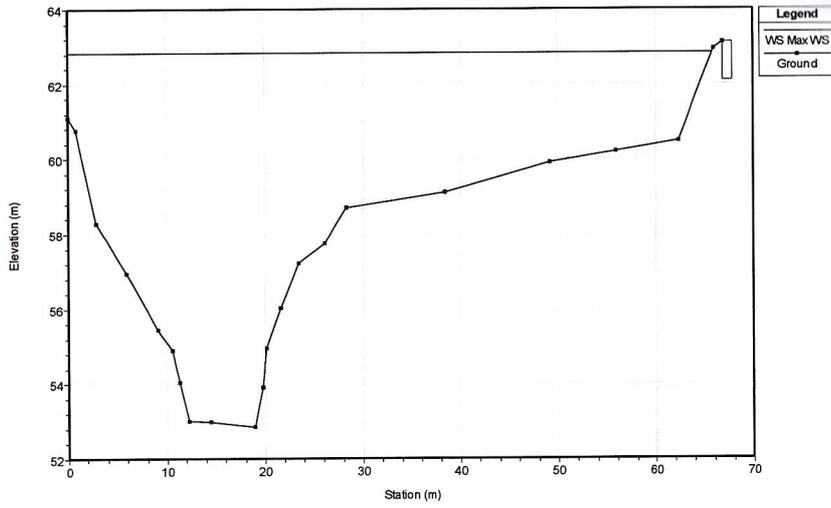
Sez. 266



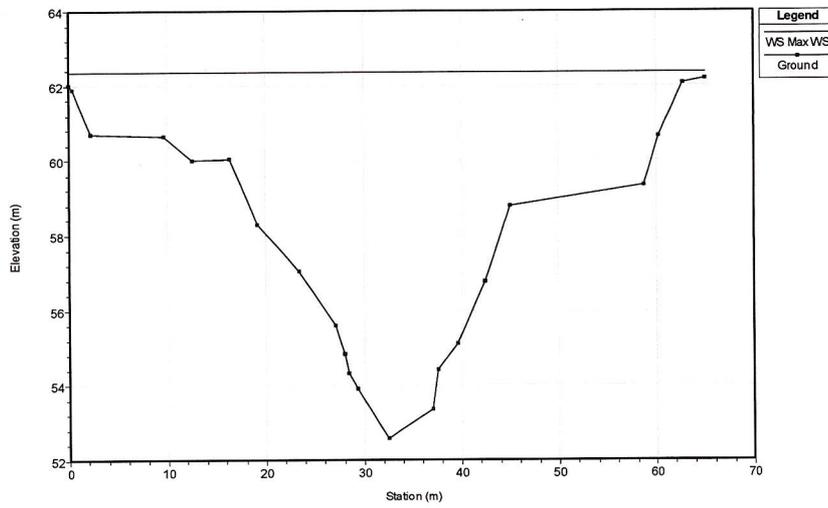
Sez. 265



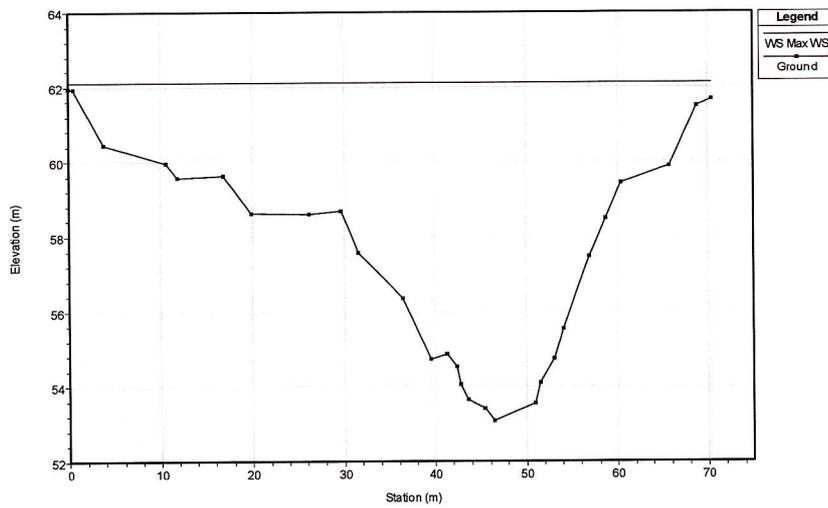
Sez. 264



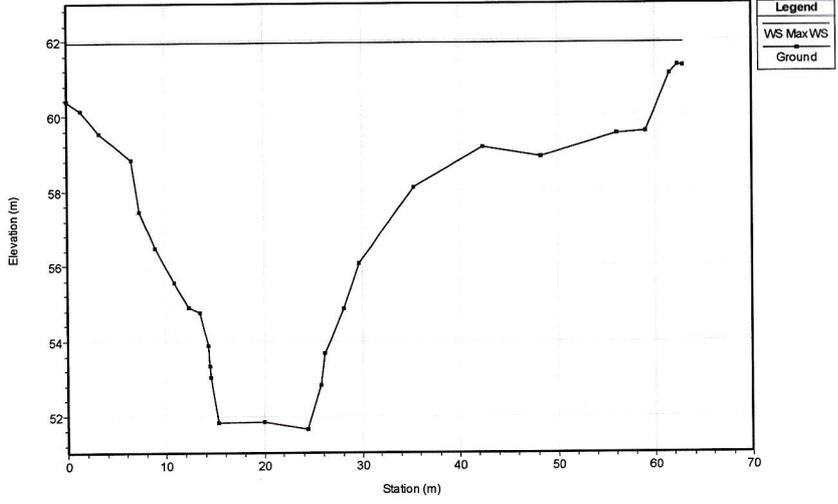
Sez. 263



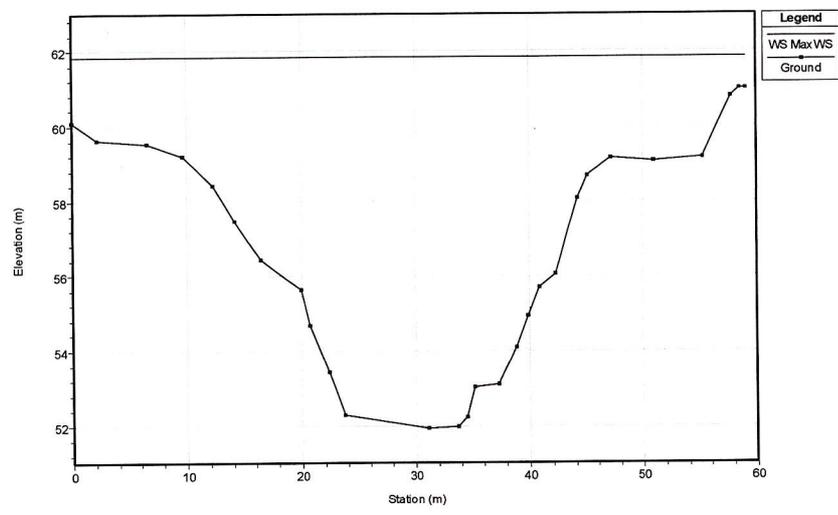
Sez. 262



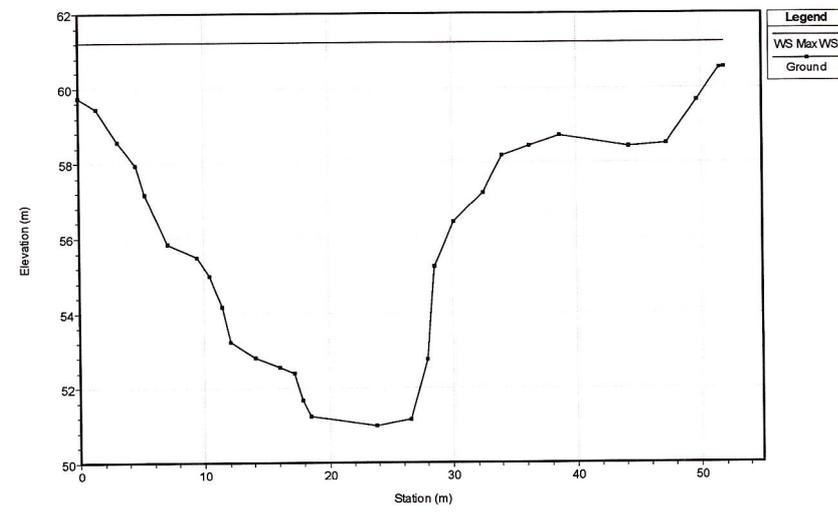
Sez. 261



Sez. 260



Sez. 259



Sez. 258

Bibliografia

- AA.VV. (2003) – *Manuale di ingegneria civile e ambientale*, Vol. I. Zanichelli, ESAC;
- Autorità di Bacino del fiume Arno (2004) – *Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico* (P.A.I.);
- Circondario Empolese Valdelsa - Provincia di Siena (2004) – *Studio di Area Vasta del bacino del fiume Elsa*;
- Chow (1959) – *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill;
- Da Deppo L., Datei C. e Salandin P. (1994) – *Sistemazione dei corsi d'acqua*. Ed. Libreria Cortina, Padova;
- Ferro V. (2002) – *La sistemazione dei bacini idrografici*. Mc Grow-Hill;
- Lanini V. (2003) – *Sviluppo di un modello idrologico distribuito per la valutazione dei deflussi di piena del fiume Elsa*. Tesi di Laurea, Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio;
- Provincia di Siena - Settore viabilità di interesse regionale della Regione Toscana (2004) – *Variante alla S.R. 429 di Val d'Elsa per il collegamento dei centri abitati di Certaldo e Poggibonsi - Progetto preliminare*;
- Regione Toscana (1998) – *Regionalizzazione delle portate di piena in Toscana, Manuale per l'analisi dei fenomeni alluvionali*;
- Università degli studi di Firenze, Dipartimento di Ingegneria Civile (2004) – *Interventi per la riduzione del rischio idraulico nel bacino del fiume Elsa, valutazione degli effetti indotti sulla dinamica d'alveo*;
- U.S. Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center (2002) – *HEC-RAS, River Analysis System, User's Manual*, version 3.1;

Siti Internet consultati:

www.arno.autoritadibacino.it

www.regionetoscana.it