

CASSA DI ESPANSIONE DEL TORRENTE BAGANZA NEI COMUNI DI FELINO, SALA BAGANZA, COLLECCHIO E PARMA (PR-E-1047)

PROGETTO DEFINITIVO

B	02/2018	Emissione a seguito dei rilievi del servizio di verifica (art. 26 D.Lgs. 50/2016)	MA	MN	DC
A	10/2016	Prima emissione	MA	MN	DC
INDICE	DATA	MODIFICHE	DISEGN.	CONTR.	APPROV.

GEOLOGIA, IDROGEOLOGIA E GEOTECNICA

RELAZIONE IDROGEOLOGICA:

Analisi degli effetti indotti dall'opera
mediante modello numerico di flusso

IL RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO DI PROFESSIONISTI:

MANDATARIA
PROGETTAZIONE GENERALE ED IDRAULICA

MAJONE&PARTNERS
ENGINEERING

Prof. Ing. Ugo Majone
Dott. Ing. Denis Cerlini
Dott. Ing. Marco Belicchi
Dott. Ing. Nicola Pessarelli
Dott. Ing. Michele Ferrari
Dott. Ing. Gaetano Di Franca

MANDANTE
STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE

AMBITER S.r.l.
società di ingegneria ambientale

Dott. Geol. Giorgio Neri
Dott. Amb. Gabriele Virgili
Dott. Amb. Alessio Ravera
Dott. Amb. Ecol. Adelia Sabatino
Dott. Nat. Silvia Del Fiore
Dott. Arch. Daniela Pisciotto
Dott. Leg. Rossana Valentini

MANDANTE
ASPETTI GEOLOGICI ED IDROGEOLOGICI

EG
ENGINEERING GEOLOGY

Prof. Geol. Giovanni Paolo Beretta
Dott. Geol. Maurizio Nespoli
Dott. Geol. Monica Avanzini
Dott. Geol. Anna Cantoni
Dott. Marta Maiocchi

MANDANTE
ANALISI DELL'ASTA FLUVIALE

Studio Prof. Ing.
Alberto Bizzarri

Prof. Ing. Alberto Bizzarri

MANDANTE
ASPETTI STRUTTURALI

Ing. Claudio Marcello S.r.l.
Dott. Ing. Carlo Claudio Marcello

MANDANTE
ASPETTI GEOTECNICI

colleselli & p.
INGEGNERIA GEOTECNICA
Prof. Ing. Francesco Colleselli

PER IL R.T.P.:

Dott. Ing. Denis Cerlini

(documento firmato digitalmente)

IL R.U.P.:

Dott. Ing. Mirella Vergnani

(documento firmato digitalmente)

CONSULENTI:

MODELLAZIONE FISICA E NUMERICA

DICATeA - Università degli studi di Parma
(Prof. Ing. Paolo Mignosa)

ASPETTI ARCHEOLOGICI

AR/S Archeosistemi società Cooperativa
(Archeologa Lorenza Bronzoni)

CODICE ELABORATO:

B A G 2 0 3 G E O R R E 0 3 B

ID (1)

CAP. (2)

TIPO (3)

DOC. (4)

PROGR. (5-6) REV. (7)

SCALA

OTTOBRE
2016

IL RESPONSABILE DELL'ATTIVITÀ SPECIALISTICA:

Dott. Geol. Maurizio Nespoli

(documento firmato digitalmente)

INDICE

1. PREMESSA.....	6
2. MODELLO IDROGEOLOGICO DI FLUSSO DELLE ACQUE SOTTERRANEE	8
2.1 PREMESSA	8
2.2 IMPOSTAZIONE DEL MODELLO IDROGEOLOGICO DI FLUSSO	9
2.3 DATI DI INPUT DEL CODICE NUMERICO	11
2.3.1 Discretizzazione dell'area di studio	11
2.3.2 Discretizzazione temporale e condizioni iniziali.....	17
2.3.3 Condizioni al contorno	17
2.3.4 Distribuzione dei parametri	20
2.4 FASE DI TARATURA DEL MODELLO	29
2.5 BILANCIO IDROGEOLOGICO	34
2.6 FASE DI VERIFICA DEL MODELLO	36
2.7 FASE DI APPLICAZIONE DEL MODELLO	40
3. VALUTAZIONE DELL'IMPATTO INDOTTO DALL'OPERA SULLA FALDA	47
3.1 SCENARIO 1: REALIZZAZIONE DELLA CASSA DI ESPANSIONE SUL T. BAGANZA - SOLUZIONE A.....	48
3.2 SCENARIO 2: REALIZZAZIONE DELLA CASSA DI ESPANSIONE SUL T. BAGANZA - SOLUZIONE A OTTIMIZZATA	55
3.3 SCENARIO 3: SIMULAZIONE DEGLI EFFETTI CONSEGUENTI AGLI INTERVENTI DI SCAVO E DRENAGGIO DELLA FALDA DALL'ALVEO DEL BAGANZA	67
3.4 SCENARIO 4: SIMULAZIONE DEGLI EFFETTI INDOTTI SULLA FALDA DALLA CASSA DI ESPANSIONE IN CONDIZIONI DI ALTO PIEZOMETRICO.....	72
3.5 SCENARIO 5: SIMULAZIONE IN TRANSITORIO DEGLI EFFETTI INDOTTI SULLA FALDA IN CONDIZIONI DI MASSIMO INVASO DELLA CASSA DI ESPANSIONE	82
4. BIBLIOGRAFIA	94

ELENCO FIGURE

Figura 1 – Inquadramento dell'areale modellato

Figura 2 – Discretizzazione orizzontale del modello di flusso

Figura 3 – Discretizzazione orizzontale del modello di flusso: dettaglio all'altezza della cassa di espansione sul T.Baganza

Figura 4 – Discretizzazione verticale del modello: sezione longitudinale

Figura 5 – Discretizzazione verticale del modello: sezione trasversale

Figura 6 – Aree modellate e rappresentazione delle condizioni al contorno: settore a flusso nullo (in ciano) e maglie a potenziale costante (in rosso)

Figura 7 – Discretizzazione per classi dei valori di conducibilità idraulica (m/s): 1 strato del modello

Figura 8 – Discretizzazione per classi dei valori di conducibilità idraulica (m/s): 2 strato del modello

Figura 9 – Discretizzazione per classi dei valori di conducibilità idraulica (m/s): 3 strato del modello

Figura 10 – Legenda dei valori di conducibilità idraulica (m/s)

Figura 11 – Andamento della base del primo strato del modello (m s.l.m.)

Figura 12 – Andamento della base del secondo strato del modello (m s.l.m.)

Figura 13 – Piezometria falda freatica – Complesso acquifero A0 - Campagna 26 Luglio 2016

Figura 14 – Discretizzazione dei valori di infiltrazione efficace per classi entro il 1 strato del modello

Figura 15 – Fase di taratura: Retta di calibrazione del modello di flusso e indicatori statistici

Figura 16 – Fase di taratura: Andamento piezometrico (m s.l.m.) ricostruito per la falda superficiale (primo strato)

Figura 17 – Fase di taratura: Andamento piezometrico (m s.l.m.) – dettaglio della figura precedente

Figura 18 – Fase di taratura: Andamento piezometrico (m s.l.m.) ricostruito per la falda superficiale e valori puntuali di scarto piezometrico tra simulato e reale

Figura 19 – Fase di taratura: Andamento piezometrico (m s.l.m.) e valori di scarto piezometrico – dettaglio della figura precedente

Figura 20 – Fase di taratura: Discretizzazione delle zone di calcolo del bilancio idrico sotterraneo entro il primo (a) e il secondo (b) strato del modello interessato dalla realizzazione della cassa di espansione sul T. Baganza.

Figura 21 – Fase di verifica: Andamento piezometrico (m s.l.m.) ricostruito per la falda superficiale in condizioni di ricarica media annua da parte degli afflussi meteorici

Figura 22 – Fase di verifica: Andamento piezometrico (m s.l.m.) ricostruito per la falda superficiale in condizioni di ricarica media annua da parte degli afflussi meteorici e entità dell'innalzamento puntuale rispetto alla situazione rilevata nel luglio 2016 (dettaglio)

Figura 23 – Esempio di schematizzazione dei sistemi di diaframmatatura e del sistema di drenaggio delle acque di falda entro il primo strato del modello previsto per la cassa di espansione sul T. Baganza (“Soluzione A”)

Figura 24 – Esempio di schematizzazione dei sistemi di diaframmatatura (in colore verde) e di drenaggio delle acque di falda (in colore grigio) entro il secondo strato del modello previsto per la cassa di espansione sul T. Baganza (“Soluzione A”)

Figura 25 – Esempio di schematizzazione dei sistemi di diaframmatatura (in colore verde) e di drenaggio delle acque di falda (in colore grigio) previsto per i comparti 1 e 2 della cassa di espansione sul T. Baganza entro il primo strato del modello (“Soluzione A ottimizzata”)

Figura 26 – Esempio di schematizzazione dei sistemi di diaframmatature (in colore verde) e di drenaggio delle acque di falda (in colore grigio) previsto per i comparti 1 e 2 della cassa di espansione sul T. Baganza entro il secondo strato del modello (“Soluzione A ottimizzata”)

Figura 27 – Scenario 1: Piezometria dinamica della falda (m s.l.m.) nella “Soluzione A”

Figura 28 – Scenario 1: Piezometria dinamica della falda (m s.l.m.) nella “Soluzione A” (dettaglio)

Figura 29 – Scenario 1: Isovariazione di livello della falda (in m) nella “Soluzione A”

Figura 30 – Scenario 1: Isovariazione di livello della falda (in m) nella “Soluzione A” (dettaglio)

Figura 31 – Scenario 2: Simulazione 2a: Piezometria dinamica della falda (m s.l.m.) nella “Soluzione A ottimizzata”

Figura 32 – Scenario 2: Simulazione 2a: Piezometria dinamica della falda (m s.l.m.) nella “Soluzione A ottimizzata” (dettaglio)

Figura 33 – Scenario 2: Simulazione 2a: Isovariazioni di livello della falda (in m) nella “Soluzione A ottimizzata”

Figura 34 – Scenario 2: Simulazione 2a: Isovariazioni di livello della falda (in m) nella “Soluzione A ottimizzata” (dettaglio)

Figura 35 – Scenario 2 – Simulazione 2b: Piezometria dinamica della falda (m s.l.m.) nella “Soluzione A ottimizzata”

Figura 36 – Scenario 2 – Simulazione 2b: Piezometria dinamica della falda (m s.l.m.) nella “Soluzione A ottimizzata” (dettaglio)

Figura 37 – Scenario 2 – Simulazione 2b: Isovariazioni di livello della falda (in m) nella “Soluzione A ottimizzata”

Figura 38 – Scenario 2 – Simulazione 2b: Isovariazioni di livello della falda (in m) nella “Soluzione A ottimizzata” (dettaglio)

Figura 39 – Scenario 3 – Simulazione 3a: Piezometria dinamica (m s.l.m.)

Figura 40 – Scenario 3 – Simulazione 3a: Isovazioni di livello della falda (in m)

Figura 41 – Scenario 3 – Simulazione 3b: Piezometria dinamica (m s.l.m.)

Figura 42 – Scenario 3 – Simulazione 3b: Isovazioni di livello della falda (in m)

Figura 43 – Scenario 4 – Piezometria dinamica (m s.l.m.) nella “Soluzione A”

Figura 44 – Scenario 4 – Piezometria dinamica (m s.l.m.) nella “Soluzione A” (dettaglio)

Figura 45 – Scenario 4 – Isovazioni di livello della falda (in m) nella “Soluzione A”

Figura 46 – Scenario 4 – Isovazioni di livello della falda (in m) nella “Soluzione A” (dettaglio)

Figura 47 – Scenario 4 – Piezometria dinamica (m s.l.m.) nella “Soluzione A ottimizzata”

Figura 48 – Scenario 4 – Piezometria dinamica (m s.l.m.) nella “Soluzione A ottimizzata” (dettaglio)

Figura 49 – Scenario 4 – Isovazioni di livello della falda (in m) nella “Soluzione A ottimizzata”

Figura 50 – Scenario 4 – Isovazioni di livello della falda (in m) nella “Soluzione A ottimizzata” (dettaglio)

Figura 51 – Scenario 5 – Curve di invaso e svasso dei comparti 1 e 2 della cassa di espansione “Soluzione A ottimizzata”

Figura 52 – Scenario 5 - Schematizzazione nel modello numerico degli invasi di monte e di valle mediante celle a carico

Figura 53 – Scenario 5 - Piezometria dinamica (m s.l.m.) dopo un tempo di 14 ore dall'inizio delle fasi di riempimento dei comparti e isovazioni rispetto al tempo iniziale di riferimento (1 strato del modello – Stress Period n. 4)

Figura 54 – Scenario 5 - Piezometria dinamica (m s.l.m.) dopo un tempo di 23 ore dall'inizio delle fasi di riempimento dei comparti e isovazioni rispetto al tempo iniziale di riferimento (1 strato del modello – Stress Period n. 5)

Figura 55 – Scenario 5 - Piezometria dinamica (m s.l.m.) dopo un tempo di 27.5 ore dall'inizio delle fasi di riempimento dei comparti e isovazioni rispetto al tempo iniziale di riferimento (1 strato del modello – Stress Period n.7)

Figura 56 – Scenario 5 - Piezometria dinamica (m s.l.m.) dopo un tempo di 37 ore dall'inizio delle fasi di riempimento dei comparti e isovazioni rispetto al tempo iniziale di riferimento (1 strato del modello – Stress Period n.9)

Figura 57 – Scenario 5 - Piezometria dinamica (m s.l.m.) dopo un tempo di 72 ore dall'inizio delle fasi di riempimento dei comparti e isovazioni rispetto al tempo iniziale di riferimento (1 strato del modello – Stress Period n. 12)

Figura 58 – Scenario 5 – Variazione del livello della falda (in m s.l.m.) in tutti i piezometri di controllo esistenti ubicati in prossimità degli invasi di monte (C1) e di vale (C2) e nei punti teorici di verifica prescelti (M1, M2, E1, E2 e V1) durante le fasi di riempimento delle casse di espansione

Figura 59 – Scenario 5 – Variazione del livello della falda (in m s.l.m.) nei piezometri di controllo e nei punti teorici di verifica posti nel settore di monte dell'invaso 1 (C1) durante le fasi di riempimento delle casse di espansione – dettaglio della figura precedente

1. PREMESSA

Con Det. n°749 del 13.07.2016, L'AIPO - Agenzia interregionale per il fiume Po, ha reso efficace l'aggiudicazione della progettazione definitiva relativa ai *Lavori di realizzazione della Cassa di espansione del torrente Baganza nei comuni di Felino, Sala Baganza, Collecchio e Parma (PR-E-1047)* allo scrivente R.T.P. Majone & Partners S.r.l. – Ambiter S.r.l. – Studio Prof. Ing. Alberto Bizzarri – Studio Colleselli & Partners – EG Engineering Geology di G.P. Beretta e Associati – Ing. Claudio Marcello S.r.l. (di seguito RTP).

Il progetto preliminare (marzo 2015), trasmesso dall'AIPO a Regione e Autorità di Bacino del fiume Po, è stato validato ed inserito da questi ultimi, nel luglio 2015, tra le istanze di finanziamento per interventi di mitigazione del rischio idrogeologico proposte dalla Regione Emilia-Romagna, mediante la validazione delle schede istruttorie inserite nella piattaforma telematica ReNDIS-web, dando atto che l'intervento è coerente con gli atti di pianificazione territoriale e tra gli interventi prioritariamente individuati attraverso gli strumenti di analisi del rischio.

Con decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri in data 15 settembre 2015 è stato approvato il Piano stralcio per le aree metropolitane e le aree urbane con alto livello di popolazione esposta al rischio di alluvioni, nel quale l'intervento in questione è stato inserito in tabella D¹ allegata all'atto, con la previsione di un finanziamento di 55.000.000,00 Euro, come da previsione del progetto preliminare.

Al fine di individuare, nei tempi ristretti assegnati per la progettazione, soluzioni condivise che perseguissero obiettivi a scala sovracomunale (di bacino) nel rispetto delle esigenze locali, è stato avviato un percorso progettuale in grado di definire le migliori opzioni d'intervento attraverso una progettazione integrata e multidisciplinare, che analizzasse ex ante in modo coordinato le esigenze tecniche, le esigenze territoriali e le esigenze ambientali e che consentisse un confronto costruttivo con le Amministrazioni coinvolte e con i portatori di interesse e più in generale con la cittadinanza attiva.

Tale percorso di partecipazione con i diversi stakeholder, avviato da AIPO nell'autunno 2015 e conclusosi nel novembre dello stesso anno, ha così permesso d'individuare gli elementi migliorativi da utilizzare nello sviluppo della progettazione definitiva della Cassa d'espansione sul Torrente Baganza. In particolare, è emersa da diversi soggetti la necessità di sviluppare la progettazione della cassa di laminazione con una visione complessiva di bacino Parma-Baganza che permettesse, oltre alla realizzazione dell'invaso, l'individuazione delle azioni complementari da attuare lungo le aste di Parma e Baganza al fine della riduzione e mitigazione del rischio residuale.

Nel presente progetto definitivo è pertanto contenuta, oltre al progetto dell'opera in senso stretto, anche una prima complessiva risposta alle suddette richieste, mediante un'analisi idraulica e geomorfologica a livello d'asta fluviale nel tratto di Torrente Baganza compreso tra Calestano e la confluenza con il T. Parma, ed una diagnosi sulle

¹ Nella tabella D sono indicati gli interventi di mitigazione del rischio alluvionale che presentano un livello di progettazione preliminare e per i quali è necessario raggiungere tempestivamente un livello di progettazione definitivo od esecutivo al fine di consentire l'utilizzo immediato delle risorse che si renderanno disponibili

arginature esistenti, eseguita per tratti omogenei, nel tratto d'alveo del T. Parma a valle della città sino alla confluenza con il Fiume Po.

Il presente progetto definitivo è stato predisposto in conformità con l'art. 23 c.7 del D.Lgs 50/2016 nonché, in applicazione dell'art. 216, c.4 dello stesso, con gli artt.24÷32 del D.P.R. 207/2010 e s.m.i., ed individua compiutamente i lavori da realizzare nel rispetto dei criteri, dei vincoli, degli indirizzi e delle indicazioni stabiliti dalla stazione appaltante nell'ambito del progetto preliminare e delle successive fasi di partecipazione sopra accennate e nel rispetto, laddove possibile e/o pertinente, delle *“Linee guida per le attività di programmazione e progettazione degli interventi per il contrasto del rischio idrogeologico (versione 2.0 del settembre 2016 - #italiasicura)”*.

La presente Relazione idrogeologica (art. 26 del D.P.R. 207/2010) si articola nello specifico nei seguenti capitoli:

- Modello idrogeologico di flusso delle acque sotterranee (Capitolo 2);
- Valutazione dell'impatto indotto dall'opera sulla falda (Capitolo 3);
- Bibliografia (Capitolo 4).

2. MODELLO IDROGEOLOGICO DI FLUSSO DELLE ACQUE SOTTERRANEE

2.1 PREMESSA

Sulla base delle caratteristiche idrogeologiche del sito descritte nell'elaborato BAG2_03GEO_R_RE_02_A, che hanno consentito di ricostruire il modello fisico-concettuale dell'area di studio, è stato implementato un modello numerico di flusso che ha utilizzato il codice numerico di calcolo alle differenze finite "MODFLOW", compatibile con gli attuali sistemi informatici di archiviazione e gestione dei dati.

Il modello di flusso è stato impostato in modo da poter effettuare applicazioni che interessano, nel caso specifico, il sistema delle falde più superficiali, identificate nel settore di studio sino ad una profondità di circa 45 m dal p.c., entro le unità geologiche che sulla base dei più recenti e affidabili studi e fonti e bibliografiche, sono state attribuite, a partire dalla più recente alla più antica, alle Unità di Modena (AES8a), Subsistema di Ravenna (AES8) e Subsistema di Villa Verucchio (AES7), ed è stato calibrato considerando le condizioni idrogeologiche ricostruite per il mese di luglio 2016, di cui si dispone della serie di dati idrogeologici più significativi e completi relativamente alla porzione di territorio considerata.

Le prime due unità rappresentano il complesso acquifero A0, contenente la falda freatica direttamente impattata dall'opera in progetto, mentre la porzione sommitale della terza (Unità di Niviano – AES7a – del Subsistema di Villa Verucchio – AES7), rappresenta i livelli di bassa permeabilità che formano il sostegno della falda contenuta nel soprastante acquifero e, più in profondità il complesso acquifero A1.

L'analisi effettuata è stata mirata alla stima degli impatti indotti sulla falda dalla realizzazione della cassa di espansione sul T. Baganza (scavi, drenaggi e diaframature perimetrali) a partire sia dalle condizioni di minima alimentazione della falda, che hanno contraddistinto il mese di luglio 2016, sia dalle condizioni di alimentazione della falda riferite alla media delle piogge registrate nell'areale di studio tra il 1960 e il 2000 alla stazione di Sala Baganza.

Lo scavo della cassa di espansione fino a profondità inferiori al livello di falda determinerà il drenaggio delle acque sotterranee che sarà spinto fino a garantire quote piezometriche analoghe o di poco inferiori a quelle del fondo scavo dell'opera e il conseguente abbassamento del livello freatico nei settori circostanti la cassa di espansione.

Le ulteriori opere necessarie per la realizzazione della cassa di espansione, quali gli interventi di bonifica di terreni per garantire un piano di posa delle arginature, adeguato in termini di permeabilità dei terreni e le diaframature in jet grouting da eseguire al di sotto di alcuni tratti delle arginature e dei manufatti di regolazione, entrambi interventi finalizzati a evitare fenomeni di sifonamento in condizioni di invaso dell'opera, produrranno anch'esse impatti sulla falda che si tradurranno in innalzamento o abbassamenti del livello freatico per i quali è richiesto un'attenta valutazione della loro entità.

Per garantire che quest'ultimo sia contenuto entro valori compatibili con la salvaguardia e la funzionalità delle strutture circostanti (infrastrutture, abitazioni, pozzi, ecc.) oltre che di vari elementi naturali quali i fontanili, sono state provate numerose soluzioni.

Per tali valutazioni sono state effettuate numerose simulazioni con il modello di flusso, sia inerenti la configurazione dell'opera come prevista nel progetto preliminare 2015 (definita come "Soluzione A"), sia quella alternativa proposta nell'ambito del presente progetto definitivo 2016 (definita come "Soluzione A ottimizzata").

Le simulazioni sono state condotte sia in regime stazionario, al fine di valutare gli impatti indotti a lungo termine sul sistema idrico sotterraneo, in quanto questo tipo di analisi restituisce dei risultati che rappresentano la situazione più cautelativa, sia in regime transitorio al fine di poter simulare gli impatti indotti a breve termine a seguito del funzionamento della cassa di espansione nelle condizioni di massimo invaso.

In particolare sono state analizzate in regime stazionario:

- le deformazioni attese in termini di morfologia piezometrica a seguito della realizzazione della cassa di espansione che comporta operazioni di scavo, fossi di drenaggio delle acque sul fondo cassa, parziale bonifica del piano di posa degli argini e infissione di diaframature perimetrali spinte a diversa profondità nel sottosuolo);
- l'entità delle variazioni piezometriche indotte nell'acquifero freatico direttamente interessato dalle opere di realizzazione della cassa di espansione, rappresentato nello specifico dagli orizzonti ghiaioso-sabbiosi attribuiti all'Unità di Modena (AES8a) e dagli orizzonti di ghiaie in abbondante matrice limoso-argillosa attribuiti al Subsistema di Ravenna (AES8);
- la morfologia e l'estensione della zona di influenza sulla falda esercitata conseguente alla realizzazione della cassa di espansione in progetto e la sua interferenza con infrastrutture, stabili, pozzi per acqua e fontanili, presenti nel territorio circostante;
- la variazione delle principali voci che compongono il bilancio idrico sotterraneo di questa porzione di conoide del T. Baganza.

Mentre in regime transitorio sono state invece analizzate:

- le deformazioni attese in termini di morfologia piezometrica a seguito del funzionamento della cassa di espansione nella condizione di massimo invaso considerando la curve di piena e le rispettive quote di invaso inerenti la piena millenaria.

2.2 IMPOSTAZIONE DEL MODELLO IDROGEOLOGICO DI FLUSSO

La ricostruzione del campo di moto della falda è stata condotta ricorrendo al programma Visual Modflow vers. 4.20 della Waterloo Hydrogeologic Software, che utilizza il codice di calcolo alle differenze finite "MODFLOW" del Servizio Geologico degli Stati Uniti (Modular Three Dimensional Finite Difference Ground-Water Flow Model, di McDonald M.G., Harbaugh A. W., 1981).

Il software è in grado di risolvere il carico idraulico in presenza di condizioni al contorno complesse, di numerose sollecitazioni idrauliche (ad esempio quelle prodotte da dreni o da diaframature), considerando condizioni di regime stazionario e transitorio e in presenza di diversi tipi di acquifero.

Il modello di flusso è stato elaborato seguendo lo specifico protocollo previsto da Anderson e Woessner (1992) che comprende le seguenti fasi di lavoro:

1. Predisposizione del modello:

- discretizzazione spaziale e verticale dell'areale di studio;
- discretizzazione temporale delle condizioni iniziali e delle condizioni al contorno;
- discretizzazione dei dati di input nel codice numerico.

2. Calibrazione (o taratura) del modello:

- *ricostruzione delle condizioni di deflusso idrico sotterraneo.*

3. Verifica del modello:

- *capacità del modello, mediante l'utilizzo di un set indipendente di misure dirette, di simulare condizioni diverse rispetto a quelle utilizzate in fase di taratura, anche se della stessa natura.*

4. Applicazione del modello:

- *simulazione degli effetti indotti dalla realizzazione dell'opera comprensiva di tutti gli elementi strutturali a essa connessi (in regime stazionario) e dal funzionamento nelle condizioni di massimo invaso (in regime transitorio) della cassa di espansione..*

Il dimensionamento dell'area da modellare e il tipo di condizioni al contorno sono stati condizionati dalla tipologia di acquifero coinvolto, dall'andamento piezometrico ricostruito per un intorno significativi e dalle opere interferenti con la falda necessarie alla realizzazione della cassa di espansione del T. Baganza, quali attività di scavo spinte sino ad una profondità massima di circa 7.5 m dal p.c., realizzazione di fossi di drenaggio per l'allontanamento delle acque di falda sul fondo delle casse nei periodi in cui le stesse non saranno invase, posa di diaframature mediante colonne di jet-grouting compenstrate di diametro non inferiore a 80 cm e interasse 60 cm, perimetrali ad alcune porzioni delle casse in progetto, spinte a differenti profondità nel sottosuolo.

L'analisi dei dati geologici e idrogeologici descritti in dettaglio nell'elaborato BAG2_03GEO_R_RE_02_A ha permesso di identificare nell'area di studio alcuni elementi caratteristici per l'impostazione del modello concettuale di flusso:

- presenza di un acquifero superficiale contenente una falda freatica (complesso acquifero A0) costituito nell'areale di studio dall'Unità di Modena (AES8a), avente spessori medi di 4-8 m e affiorante in una fascia della larghezza media di 600-800 m posta a ridosso dell'alveo attuale del Baganza e dal sottostante Subsistema di Ravenna (AES8), avente spessori variabili tra circa 10 e 25 m e affiorante lateralmente alla precedente unità in corrispondenza del terrazzo alluvionale più antico;
- le caratteristiche litologiche e di conducibilità idraulica delle succitate unità sono molto differenti tra loro, in quanto l'unità AES8a è contraddistinta da ghiaie e sabbie di elevata permeabilità che può essere assunta mediamente compresa tra $1 \cdot 10^{-4} \div 1 \cdot 10^{-3}$ m/s, mentre l'unità AES8, costituita da ghiaie in abbondante

matrice limoso-argillosa, manifesta una permeabilità alquanto più ridotta testimoniata da valori mediamente compresi tra $1 \cdot 10^{-6} \div 1 \cdot 10^{-4}$ m/s;

- al di sotto del subsistema di Ravenna compare un livello a predominanza limoso-argillosa, avente funzione di acquitardo (semi-impermeabile) o acquicludo (impermeabile), che costituisce il sostegno della falda freatica contenuta nel complesso acquifero A0, attribuito alla porzione sommitale del subsistema di Villa Verucchio (AES7) e, più in particolare, all'unità di Niviano (AES7a);
- più in profondità, sempre nell'ambito dell'unità AES7, si rinnova una sequenza di litotipi ghiaiosi in matrice limoso-argillosa che rappresenta il complesso acquifero A1, a sua volta sovrapposto a ulteriori complessi acquiferi (A2 e A3) separati da livelli limoso-argillosi riconducibili ai subsistemi più antichi del sistema Emiliano-Romagnolo Superiore tra cui quelli di Agazzano e Maiatico;
- presenza di limiti al contorno naturali, identificati nel settore meridionale (porzione occidentale e orientale) rispettivamente dall'affioramento dei livelli scarsamente permeabili dell'unità di Niviano (AES7a) contraddistinti da una circolazione idrica sotterranea trascurabile, che sono stati assimilati modellisticamente a un limite impermeabile a flusso nullo;

si evidenzia inoltre come nel modello di flusso non sia stato inserito il T. Baganza in quanto, sulla base dei dati piezometrici del luglio 2016 è emerso come il torrente, nella porzione di conoide in esame, fosse asciutto e non andasse ad interferire direttamente con il livello della falda che risultava essere a quote inferiori rispetto a quelle di fondo alveo.

In termini di bilancio idrico sotterraneo le voci in entrata e in uscita considerate nel modello di flusso implementato sono le seguenti:

entrate

afflusso da monte
precipitazioni efficaci

uscite

deflusso a valle
drenanza verso gli orizzonti acquiferi sottostanti
prelievi da falda

2.3 DATI DI INPUT DEL CODICE NUMERICO

2.3.1 Discretizzazione dell'area di studio

L'area modellata interessa una superficie di 14.4 km^2 e copre parte dei territori comunali di Parma, Sala Baganza, Felino e Collecchio; essa ha forma rettangolare e presenta uno sviluppo di 3000 m in direzione all'incirca WNW-ESE e di 4800 m in direzione all'incirca SSW-NNE.

In coordinate UTM32 - WSG84, l'areale modellato è compreso tra i limiti individuati dai seguenti punti A÷D indicati in Figura 1 e nell'elaborato BAG2_03GEO_D_PL_02_A:

A. 596414.81 – 4951746.42

- B. 599063.65 – 4950338.00
- C. 601317.12 – 4954576.15
- D. 598668.28 – 4955984.57

Tale superficie è stata discretizzata secondo una griglia regolare composta complessivamente da 300 colonne (direzione all'incirca SSW-NNE) e 240 righe (direzione all'incirca WNW-ESE), con maglie regolari di lato pari a 10 x 20 m, in modo da garantire un giusto compromesso tra la distribuzione dei dati di input e il grado di approssimazione richiesto per le applicazioni del modello (Figura 2 e Figura 3).

La griglia del modello di flusso è stata ruotata di 28° verso NW in modo tale che le colonne e le righe risultassero rispettivamente all'incirca parallele e perpendicolari al flusso principale delle acque sotterranee, diretto, in questo settore della conoide del T. Baganza, prevalentemente da SSW a NNE.

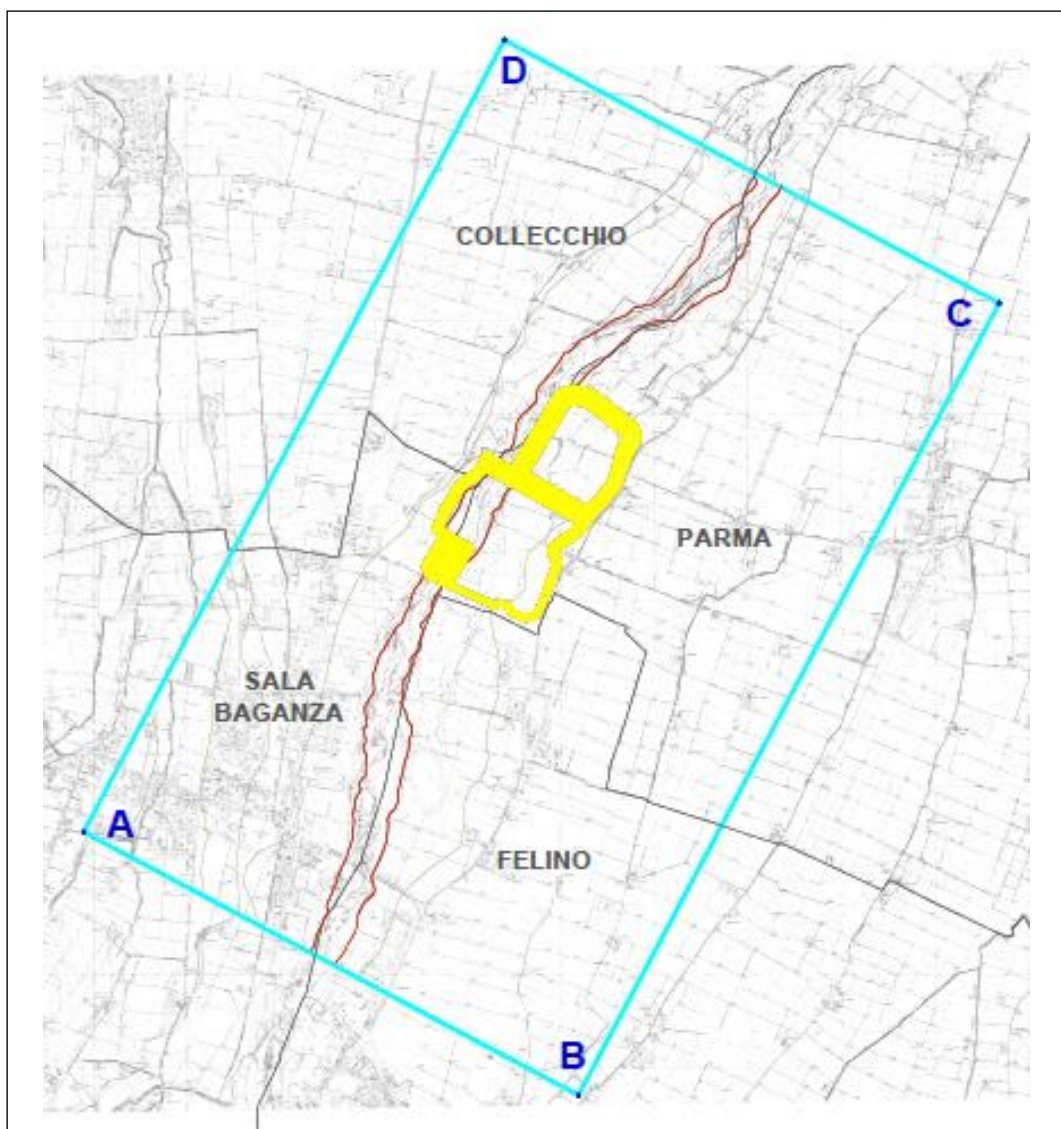


Figura 1 – Inquadramento dell'areale modellato

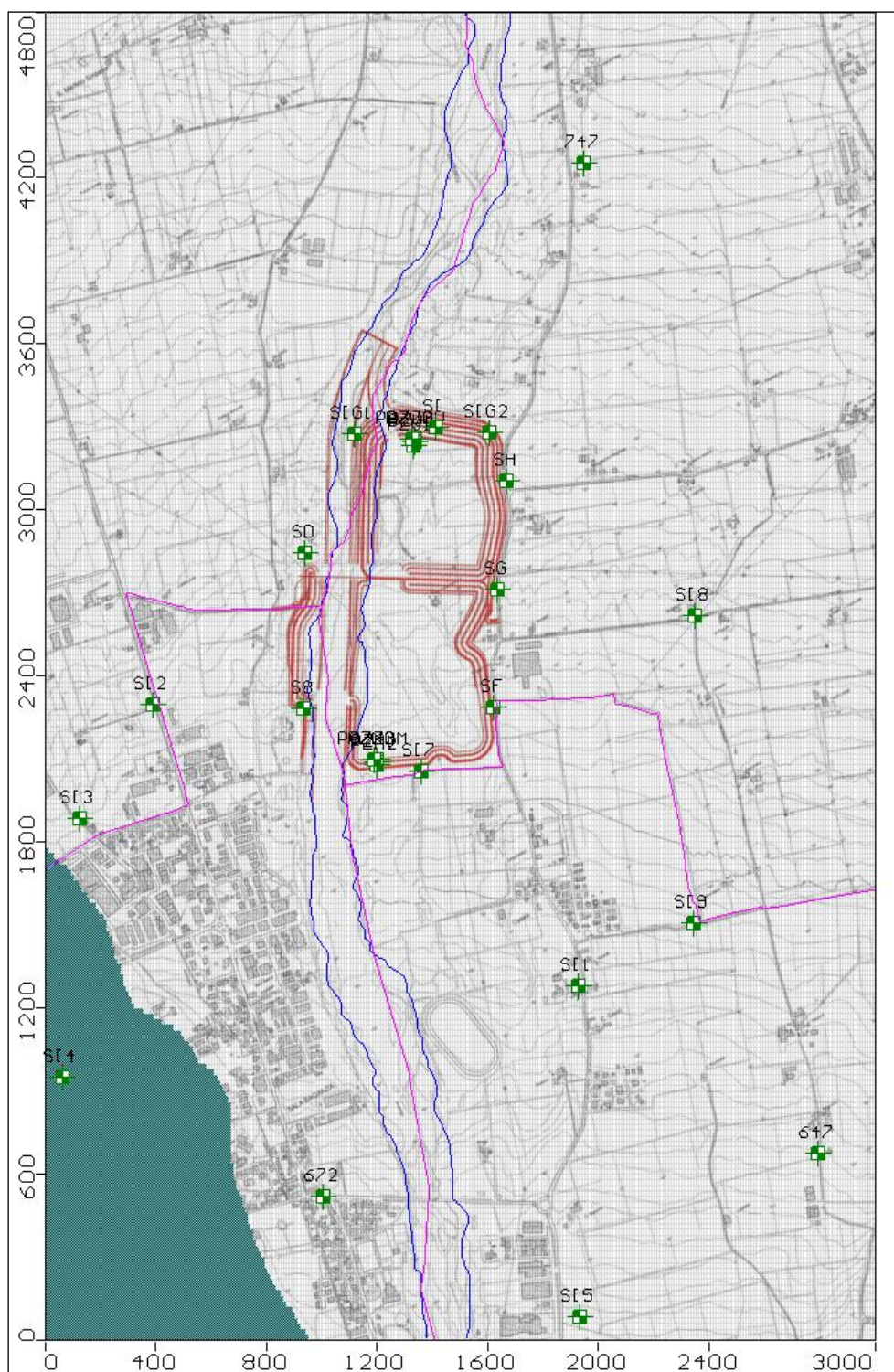


Figura 2 – Discretizzazione orizzontale del modello di flusso



Figura 3 – Discretizzazione orizzontale del modello di flusso: dettaglio all'altezza della cassa di espansione sul T.Baganza

La discretizzazione verticale ha previsto un sistema a cinque strati così costituito (Figura 4 e Figura 5):

- **strato 1 del modello:** rappresentativo dell'orizzonte di ghiaie e sabbie di colore grigio che affiorano in una fascia lungo l'asse del T. Baganza, per una larghezza variabile tra 600 e 800 m circa), aventi uno spessore complessivo di circa 4-8 m e sede di una falda libera (Unità di Modena – AES8a);
- **strato 2 del modello:** ghiaie in abbondante matrice limoso-argillosa di colore nocciola, attribuite al Subsistema di Ravenna (AES8), identificate sino ad una profondità variabile all'incirca tra 10-25 m dal p.c., sede di una falda libera o localmente semi-confinata;

- **strato 3 del modello:** orizzonte semi-impermeabile, attribuibile all'unità di Niviano p.p. (AES7a), di sostegno della falda freatica contenuta nel soprastante acquifero e di separazione tra la falda superficiale, direttamente coinvolta dalla realizzazione dell'opera in progetto;
- **strati 4 e 5 del modello:** unità appartenenti ai subsistemi più profondi (Villa Verucchio, Agazzano, Maiatico) contraddistinti nel complesso da valori di permeabilità piuttosto scarsi e sede di falde confinate messe in produzione per lo più da pozzi ad uso irriguo.

In termini di quote assolute il modello schematizzato risulta essere compreso tra valori di 172 e 78 m s.l.m..

Ogni orizzonte è stato discretizzato in termini di conducibilità idraulica orizzontale e verticale k_h , k_v (m/s) ed è stato altresì ricostruito l'andamento della quota in termini assoluti dei rispettivi tetto e letto. Per differenza tra questi ultimi elementi strutturali il codice numerico calcola lo spessore di ogni orizzonte e quindi ne determina la trasmissività.

Sebbene il modello di flusso sia stato inizialmente ricostruito ricorrendo ad un numero complessivo di 5 strati per poter comprendere nella schematizzazione concettuale anche il sistema delle unità appartenenti ai subsistemi più profondi non direttamente coinvolti nella realizzazione dell'opera in progetto, la successiva constatazione della loro ininfluenza, per le finalità previste dal modello di flusso implementato, ha suggerito di "congelare" dal processo di taratura e di calcolo numerico, inserendo negli strati 4 e 5 del modello condizioni di flusso nullo (condizioni evidenziate in colore ciano nelle due sezione tipo riportate in Figura 4 e in Figura 5.

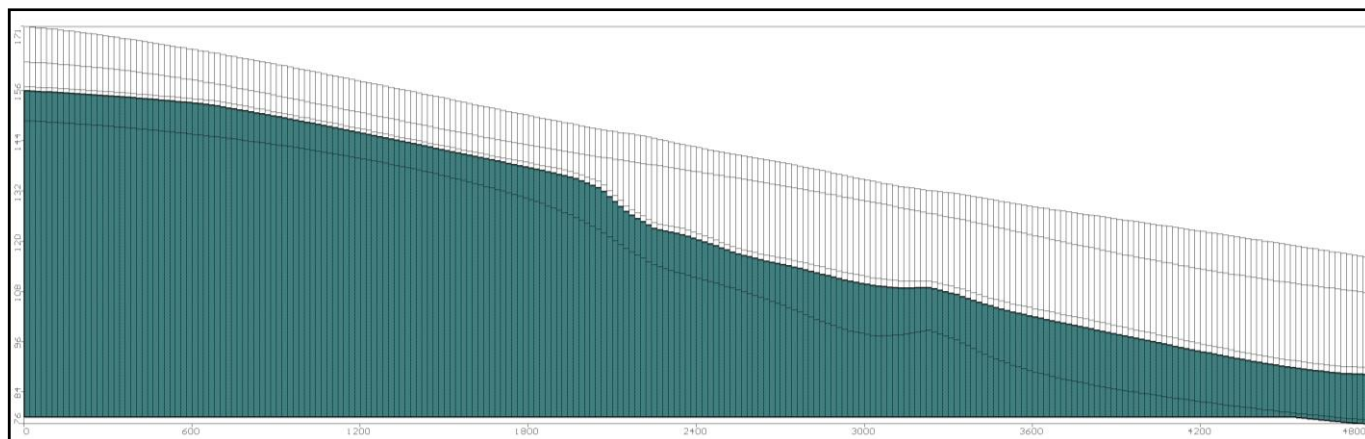


Figura 4 – Discretizzazione verticale del modello: sezione longitudinale

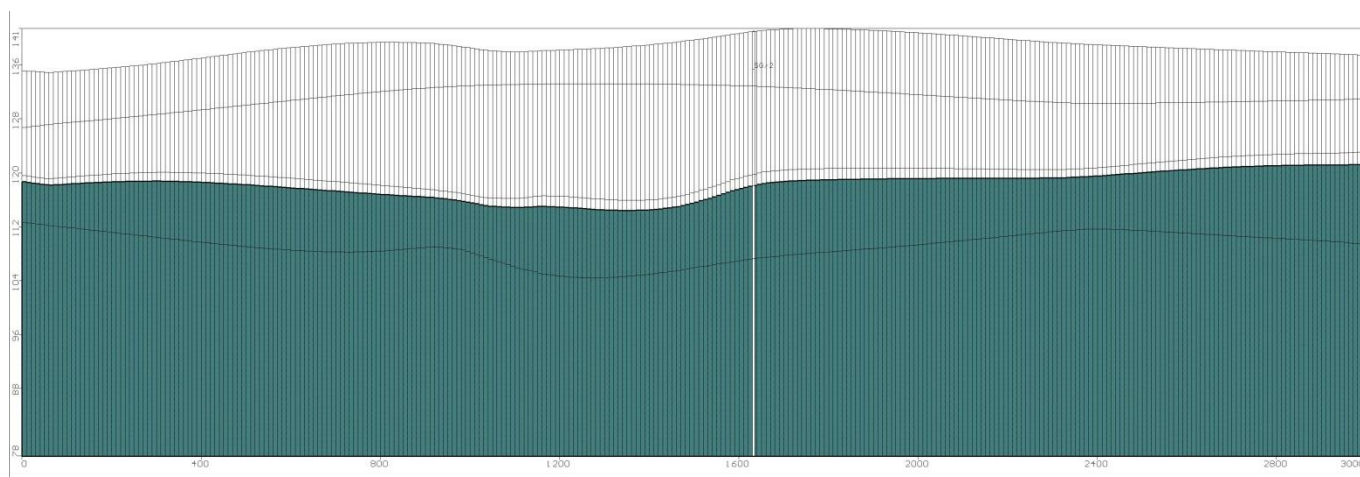


Figura 5 – Discretizzazione verticale del modello: sezione trasversale

2.3.2 Discretizzazione temporale e condizioni iniziali

Quali condizioni iniziali del livello di falda, da utilizzare nel codice di calcolo in fase di taratura del modello, sono state adottate le condizioni piezometriche registrate nel mese di luglio 2016.

Sulla base del set di dati a disposizione, la campagna piezometrica effettuata in data 26 luglio 2016 è infatti quella che permette la ricostruzione di maggiore dettaglio in conseguenza del più elevato numero di punti di controllo a disposizione, estesi su di un areale sufficientemente adeguato per poter allontanare i limiti del modello dall'area di influenza della cassa di espansione.

Si deve tuttavia evidenziare che le condizioni piezometriche utilizzate per la taratura del modello sono rappresentative di un periodo di ridotta alimentazione della falda e pertanto, in termini assoluti di quota piezometrica, di una condizione di morbida o magra della falda.

2.3.3 Condizioni al contorno

Per garantire l'unicità della soluzione del campo di moto è necessario specificare opportune condizioni idrauliche lungo il contorno dell'area modellata.

La ricostruzione della struttura idrogeologica dell'area di studio e la morfologia della superficie piezometrica hanno evidenziato in corrispondenza di parte dei settori occidentale e orientale dell'areale analizzato, la presenza di limiti al contorno di tipo piezometrico e fisico, tali per cui è stato possibile imporre lungo gli stessi limiti a flusso nullo; ne consegue che anche in tutte le maglie che ricadono esternamente a tali limiti sono state inserite celle a flusso nullo (cfr. Figura 6).

Nello specifico i limiti posti ad Ovest ed Est si sviluppano all'incirca parallelamente alla direzione di deflusso principale assunta dalla falda superficiale mentre parte del limite sud-occidentale è ubicato in corrispondenza

dell'affioramento del substrato impermeabile e pertanto, da un punto di vista modellistico, tali limiti sono stati schematizzati con maglie a flusso nullo.

Ne consegue che nel modello implementato sono state introdotte, negli strati modellati, le seguenti condizioni idrauliche al contorno (cfr. Figura 6). Più in particolare:

- lati Est e Ovest: limiti a flusso nullo con maglie a carico variabile; tale scelta è avvalorata dall'andamento assunto dalle isopiezometriche che su questi lati risultano all'incirca perpendicolari ai limiti dell'area modellata;
- lato Sud-Ovest: parte di questo lato è stato schematizzato con maglie a flusso nullo per la presenza in affioramento del substrato impermeabile del terzo layer (unità di Niviano – AES7a);
- lati Sud e Nord: nei lati rispettivamente di monte e di valle rispetto alla direzione di flusso principale delle acque sotterranee sono stati inseriti limiti a potenziale costante del tipo “Costant Head”; questo tipo di limite è stato ricostruito sulla base dell'andamento piezometrico ricostruito a grande scala nella campagna condotta nel mese di luglio 2016, verificando opportunamente che essi non andassero a interferire con l'entità delle variazioni indotte internamente al sistema sia dal drenaggio operato dalla cassa di espansione in progetto sia dalle diaframature perimetrali.

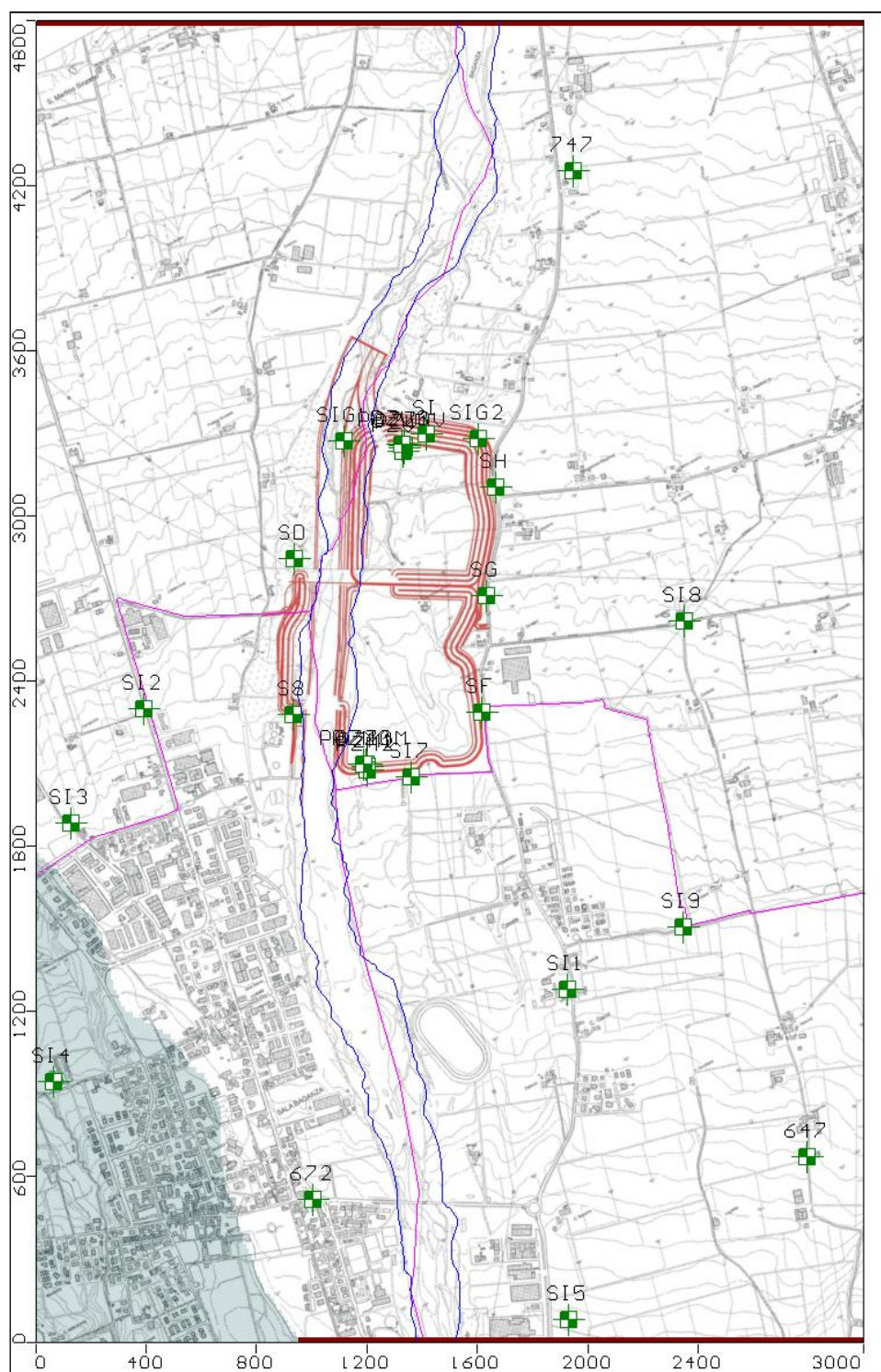


Figura 6 – Aree modellate e rappresentazione delle condizioni al contorno: settore a flusso nullo (in ciano) e maglie a potenziale costante (in rosso)

2.3.4 Distribuzione dei parametri

Il modello di flusso tridimensionale necessita di parametri iniziali che descrivano le caratteristiche idrogeologiche sia degli orizzonti acquiferi che dei setti impermeabili/semipermeabili.

I parametri di input inseriti nel modello sono descritti di seguito.

Parametri idrogeologici e strutturali degli acquiferi

Conducibilità idraulica degli acquiferi (m/s): ottenuta dal rapporto tra la trasmissività (ottenuta dai dati forniti da prove in pozzo) e lo spessore saturo; rimandando al capitolo 5.4 nell'elaborato BAG2_03GEO_R_RE_02_A per una descrizione dettagliata dei valori di conducibilità idraulica ricostruiti per gli orizzonti acquiferi interessati dalla realizzazione della cassa di espansione in progetto, si riportano, in Figura 7 e Figura 8, la discretizzazione per classi di conducibilità idraulica ottenuta al termine della fase di taratura del modello di flusso, riferita nello specifico ai primi due strati del modello, sede della falda superficiale interferita dalle opere in progetto.

In particolare si osserva che nel primo strato, nel settore di affioramento delle ghiaie e sabbie dell'Unità di Modena, i valori di conducibilità idraulica inseriti nel modello varino tra $6.5 \cdot 10^{-4}$ e $1.21 \cdot 10^{-3}$ m/s (con i valori più elevati, compresi tra $9.7 \cdot 10^{-4}$ e $1.21 \cdot 10^{-3}$ m/s, nel settore interessato dalla cassa di espansione in progetto), mentre nel settore più esterno all'asse fluviale, laddove affiorano le ghiaie sabbiose in matrice limoso-argillosa appartenenti al subsistema di Ravenna, i valori di conducibilità idraulica sono inferiori e variabili tra $1 \cdot 10^{-5}$ e $4.5 \cdot 10^{-5}$ m/s; valori ancora inferiori, variabili tra $1 \cdot 10^{-6}$ e $5.5 \cdot 10^{-6}$ m/s sono stati inseriti nelle porzioni di conoide poste ai margini dell'affioramento o subaffioramento dell'unità AES7a (Figura 7).

Nel secondo strato, riferito interamente ai depositi ghiaioso-limoso-argillosi, attribuiti al subsistema di Ravenna, i valori di conducibilità idraulica ricostruiti in fase di taratura del modello variano tra $3.53 \cdot 10^{-6}$ e $1.14 \cdot 10^{-6}$ m/s; valori più elevati compresi tra $2 \div 6.5 \cdot 10^{-5}$ m/s sono stati inseriti nelle porzioni laterali di valle (Figura 8).

Nel terzo strato, corrispondente all'aquiclude limoso-argilloso (unità di Niviano – AES7a) identificato alla base del Subsistema di Ravenna, è stato infine attribuito un valore di conducibilità idraulica variabile tra $2 \cdot 10^{-6}$ m/s nel settore di monte e $1 \cdot 10^{-7}$ m/s nel settore centrale e di valle (Figura 9).

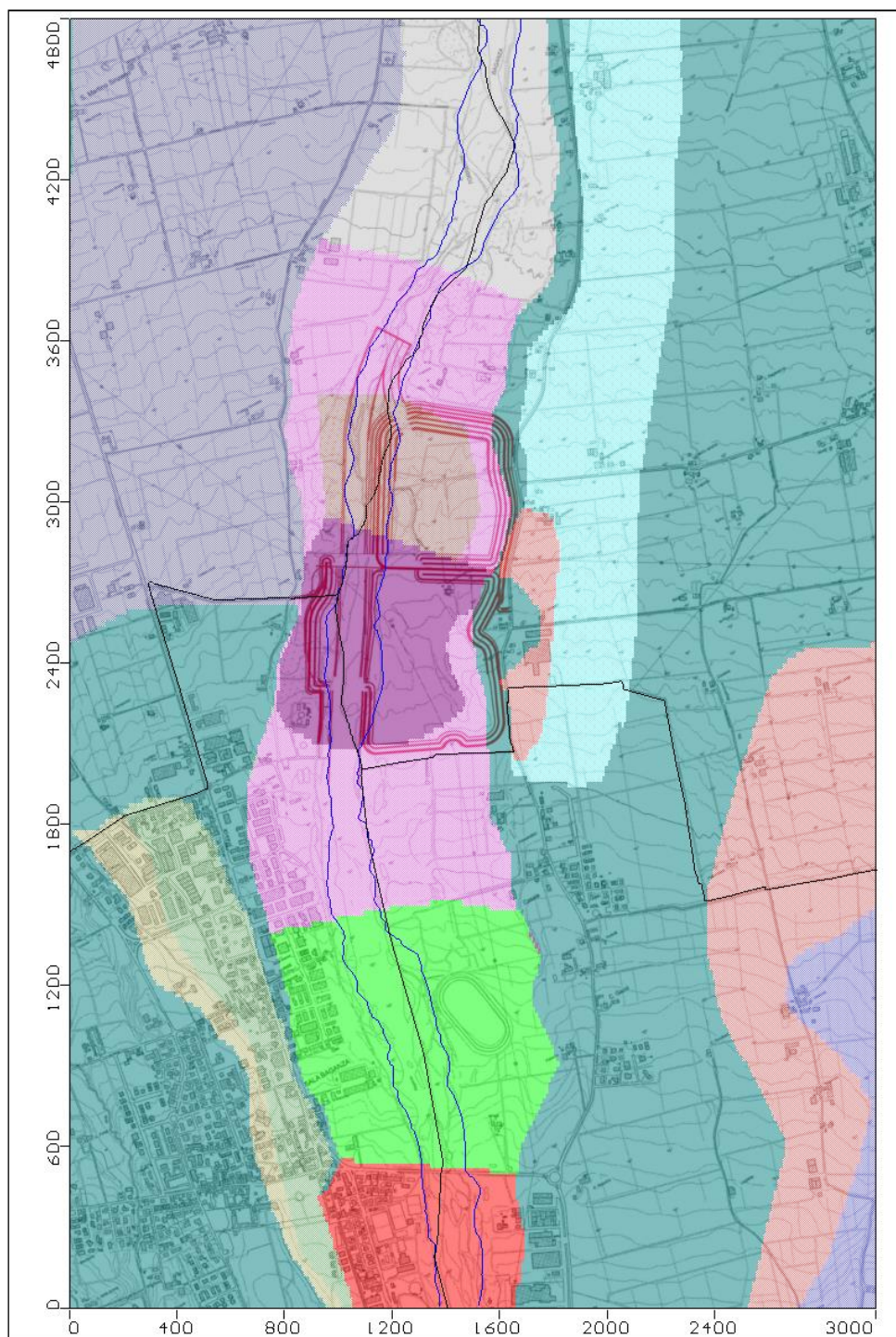


Figura 7 – Discretizzazione per classi dei valori di conducibilità idraulica (m/s): 1 strato del modello

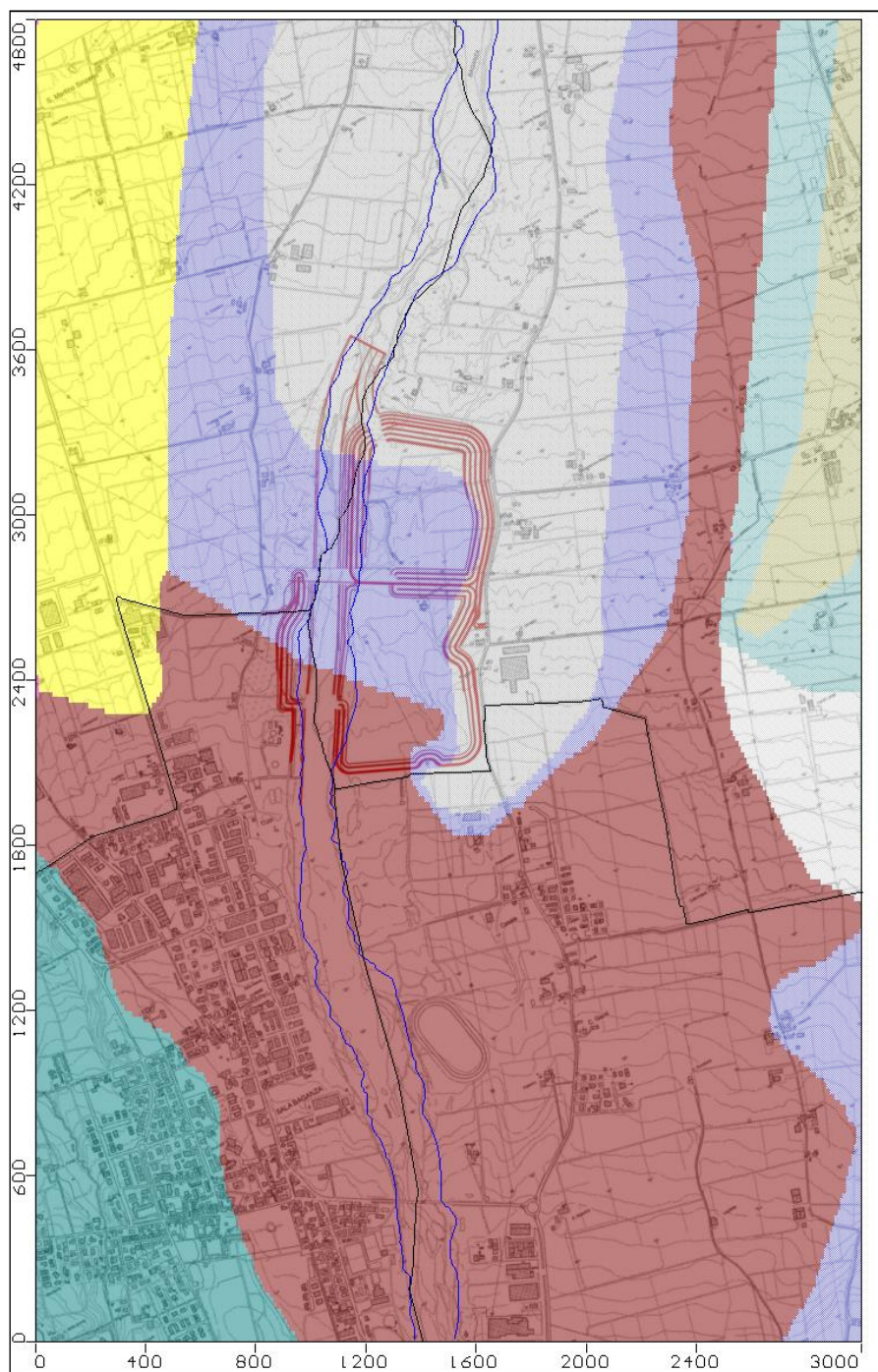


Figura 8 – Discretizzazione per classi dei valori di conducibilità idraulica (m/s): 2 strato del modello

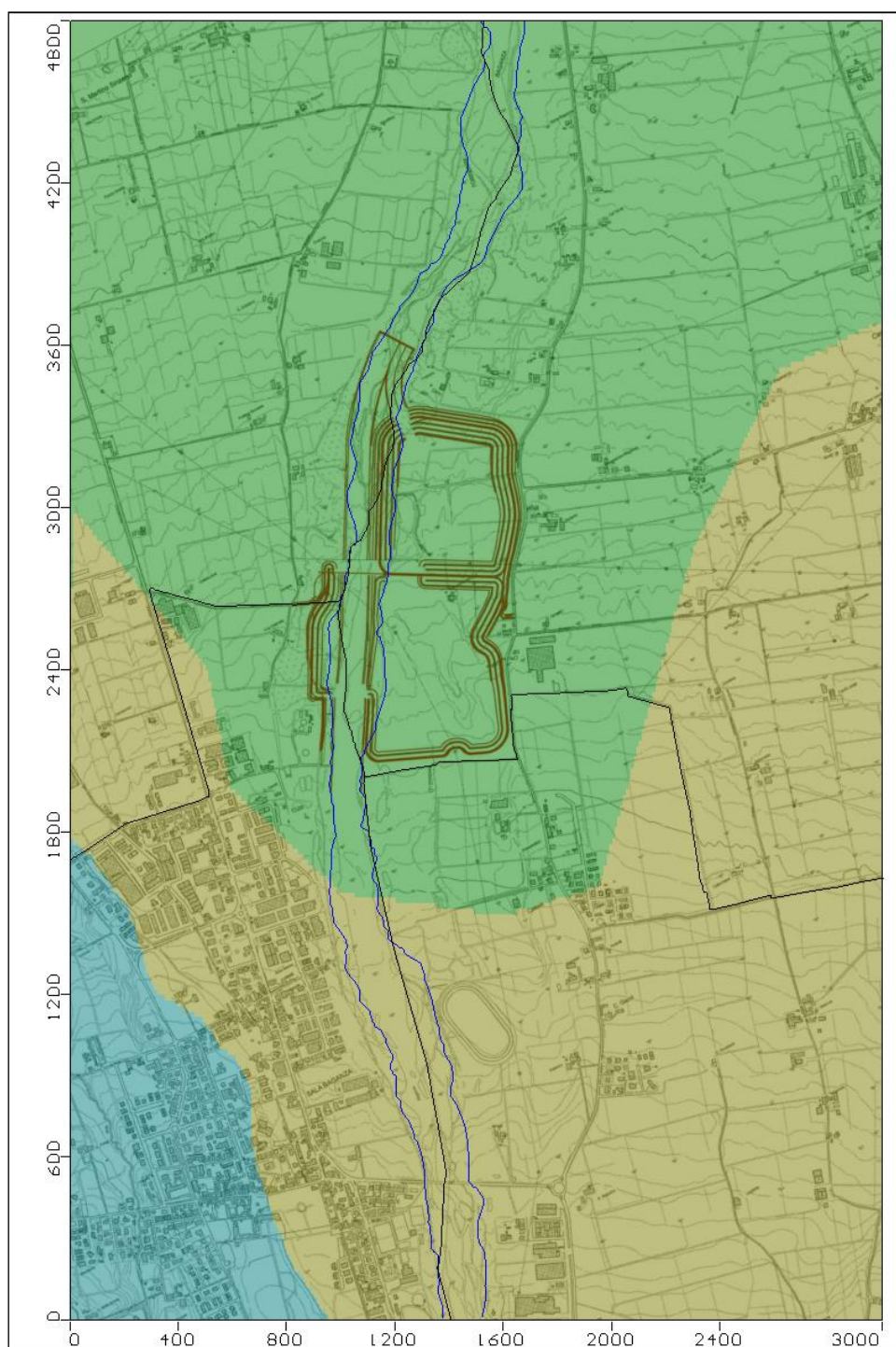


Figura 9 – Discretizzazione per classi dei valori di conducibilità idraulica (m/s): 3 strato del modello

Zone	K _x [m/s]	K _y [m/s]	K _z [m/s]	Active
1	3.53E-6	3.53E-6	3.53E-7	✓
2	1E-6	1E-6	1E-7	✓
3	1E-7	1E-7	1E-8	✓
4	3E-5	3E-5	3E-6	✓
5	3.53E-6	3.53E-6	3.53E-7	✓
6	0.001215	0.001215	0.0001215	✓
7	2E-6	2E-6	2E-7	✓
8	0.00065	0.00065	6.5E-5	✓
9	0.0008	0.0008	8E-5	✓
10	7E-5	7E-5	7E-6	✓
11	0.00082	0.00082	8.2E-5	✓
12	0.00012	0.00012	1.2E-5	✓
13	0.00075	0.00075	7.5E-5	✓
14	3.53E-6	3.53E-6	3.53E-6	✓
15	5.8E-5	5.8E-5	5.8E-6	✓
16	4.5E-5	4.5E-5	4.5E-6	✓
17	5.5E-6	5.5E-6	5.5E-7	✓
18	1E-6	1E-6	1E-7	✓
19	3.53E-6	3.53E-6	3.53E-7	✓
20	0.00082	0.00082	8.2E-5	✓
21	1E-6	1E-6	1E-7	✓
22	3E-5	3E-5	3E-6	✓
23	1E-5	1E-5	1E-6	✓
24	1E-6	1E-6	1E-7	✓
25	3E-5	3E-5	3E-5	✓
26	3E-5	3E-5	3E-6	✓
27	1E-5	1E-5	1E-6	✓
28	0.0008	0.0008	8E-5	✓
29	0.0146	0.00146	0.000146	✓
30	0.0001	0.0001	1E-5	✓
31	3E-5	3E-5	3E-5	✓
32	4E-5	4E-5	4E-6	✓
33	0.00097	0.00097	9.7E-5	✓
34	0.001215	0.001215	0.0001215	✓
35	6.5E-5	6.5E-5	6.5E-6	✓
36	2E-5	2E-5	2E-6	✓
37	1.14E-6	1.14E-6	1.14E-7	✓
38	2.33E-6	2.33E-6	2.33E-7	✓
39	1.14E-6	1.14E-6	1.14E-7	✓
40	2E-5	2E-5	2E-6	✓
41	7E-6	7E-6	7E-7	✓
42	3E-5	3E-5	3E-5	✓

Figura 10 – Legenda dei valori di conducibilità idraulica (m/s)

Quota della base e del tetto (m s.l.m.) dei diversi orizzonti: ottenuta dall'elaborazione dei dati stratigrafici puntuali; dall'analisi di tutte le stratigrafie di sondaggi e pozzi disponibili per l'areale di studio sono state ricostruite le superfici geometriche riferite alla base del subsistema di Ravenna (base dello strato 2 del modello - Figura 12) e della base dell'unità di Modena (strato 1 del modello –Figura 11) la quale però, come già descritto in dettaglio nell'elaborato BAG2_03GEO_R_RE_02_A, interessando solo una fascia allungata lungo l'asse del T. Baganza di larghezza variabile tra circa 600 e 800 m, è stata necessariamente interpolata in modo fittizio anche per i settori posti esternamente a essa, al fine di poter definire un limite geometrico esteso sull'intero areale modellato. In tale ottica deve essere pertanto letto l'andamento in quota assoluta ricostruito per la base di questo strato del modello.

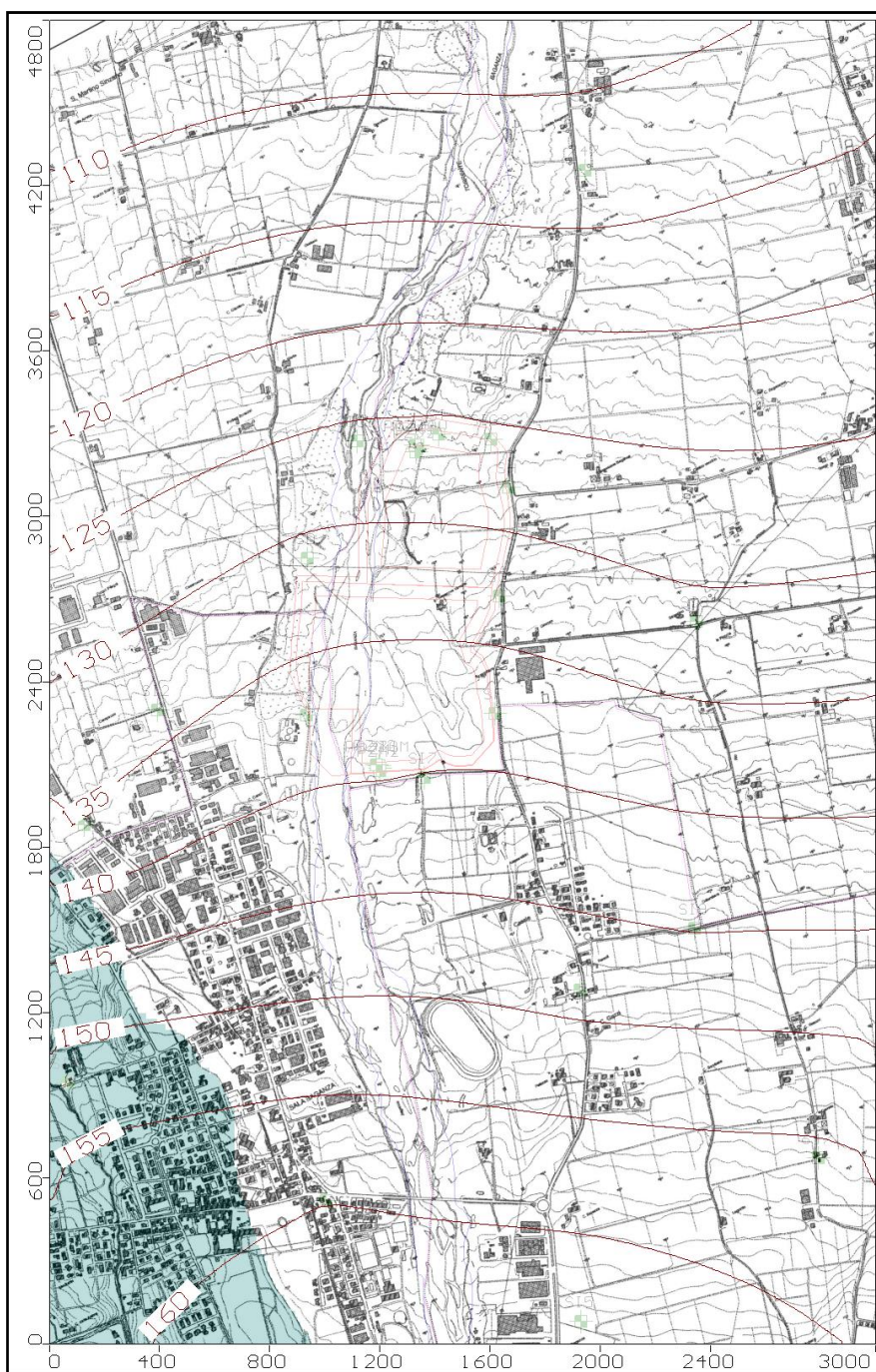


Figura 11 – Andamento della base del primo strato del modello (m s.l.m.)

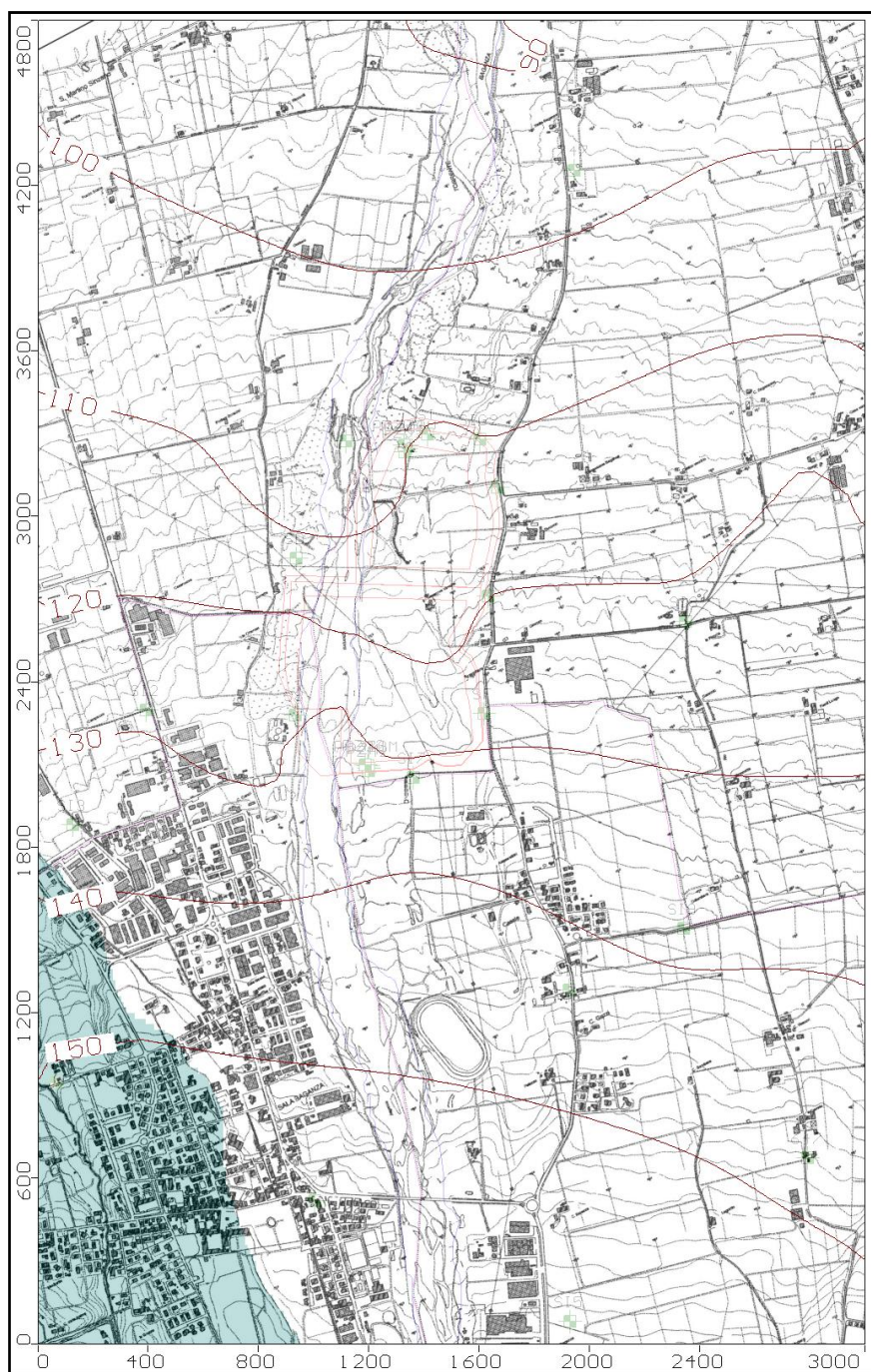


Figura 12 – Andamento della base del secondo strato del modello (m s.l.m.)

Piezometria

La piezometria di riferimento utilizzata è quella ricostruita nell'ambito della campagna di monitoraggio appositamente condotta nel mese di luglio 2016 (cfr. dati campagna del 26 luglio), a seguito della realizzazione di adeguati piezometri di monitoraggio entro la falda più superficiale. Le elaborazioni inerenti questa superficie piezometrica sono riportate nello stralcio riportato in Figura 13 e con maggiore dettaglio, esteso su tutta l'area, nella tavola BAG2_03GEO_D_PL_02_A.

Ricarica della falda

Afflussi meteorici (mm/anno): sono stati utilizzati i valori di precipitazione media annua rilevati presso la stazione di Sala Baganza nel periodo 1960÷2000; in particolare in fase di taratura si è fatto riferimento alle piogge medie rilevate nel mese di luglio, pari a 41 mm. A partire da questo quantitativo di piogge molto ridotto, sono state inserite nel modello tre differenti classi di ricarica in funzione della distribuzione areale dei valori di conducibilità idraulica (cfr. Figura 14). Più in particolare, nel settore interessato dall'alveo inciso del T. Baganza e della fascia interessata dall'Unità ghiaioso-sabbiosa di Modena (zone di colore viola e ciano) sono stati inseriti valori di infiltrazione efficace pari a 12.3 mm/anno, nelle aree di affioramento del subsistema di Ravenna (zona di colore verde) valori di infiltrazione pari a 6.15 mm/anno e nelle restanti aree (zona di colore bianco) valori di 4.1 mm/anno.

Uscita dalla falda

Prelievi da falda (m³/s) esercitati da pozzi. Come già descritto nell'elaborato BAG2_03GEO_R_RE_02_A, nell'acquifero A0 interno all'areale analizzato non si hanno prelievi effettuati da pozzi per acqua ad uso acquedottistico, mentre sono presenti pozzi privati a uso perlopiù irriguo. Dal momento che questi pozzi presentano filtri ubicati a profondità generalmente superiori a 25-30 m, nei primi due strati del modello non è stato inserito alcun prelievo, poiché in tale orizzonte operano unicamente pochi pozzi di cascina con prelievi sconosciuti e verosimilmente di entità insignificante.

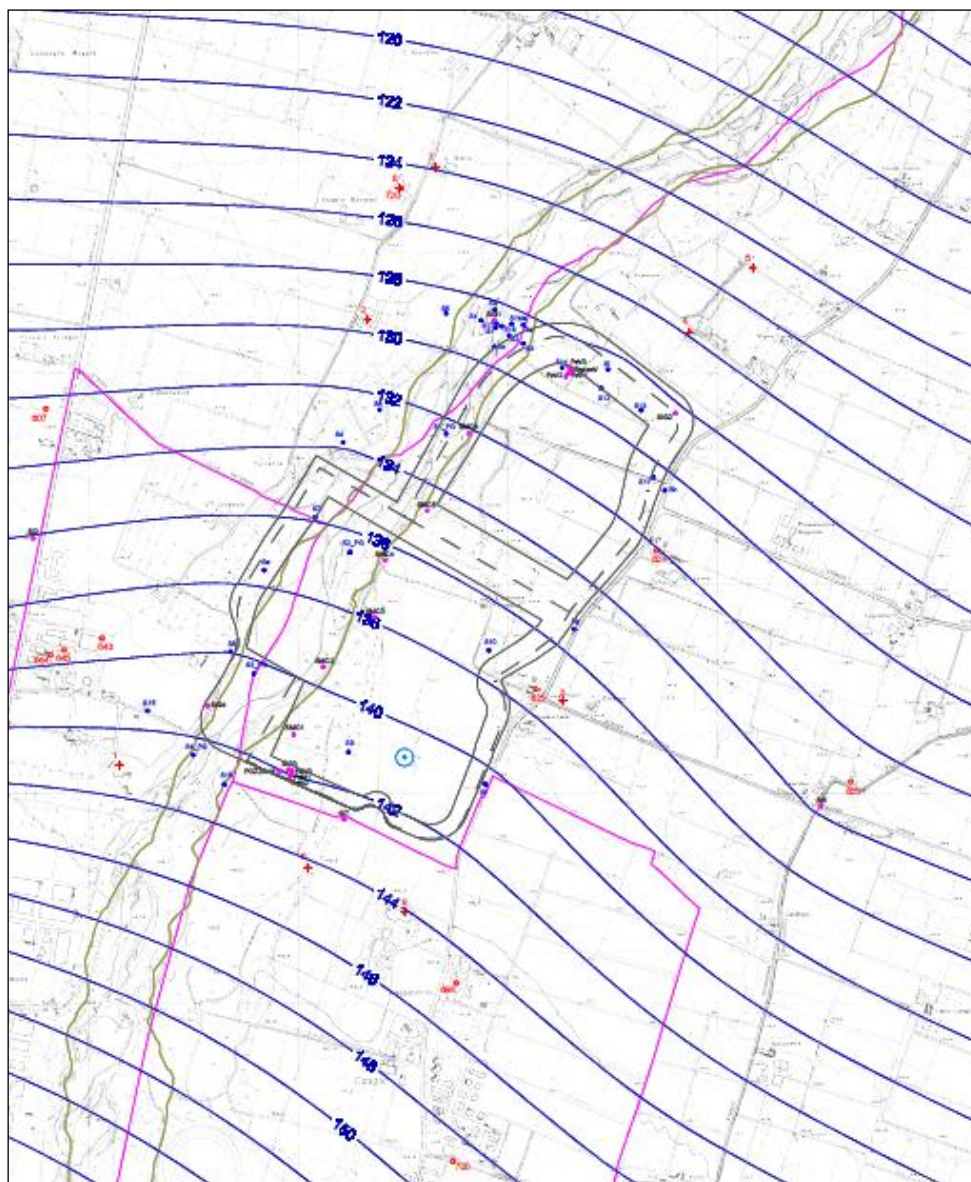


Figura 13 – Piezometria falda freatica – Complesso acquifero A0 - Campagna 26 Luglio 2016

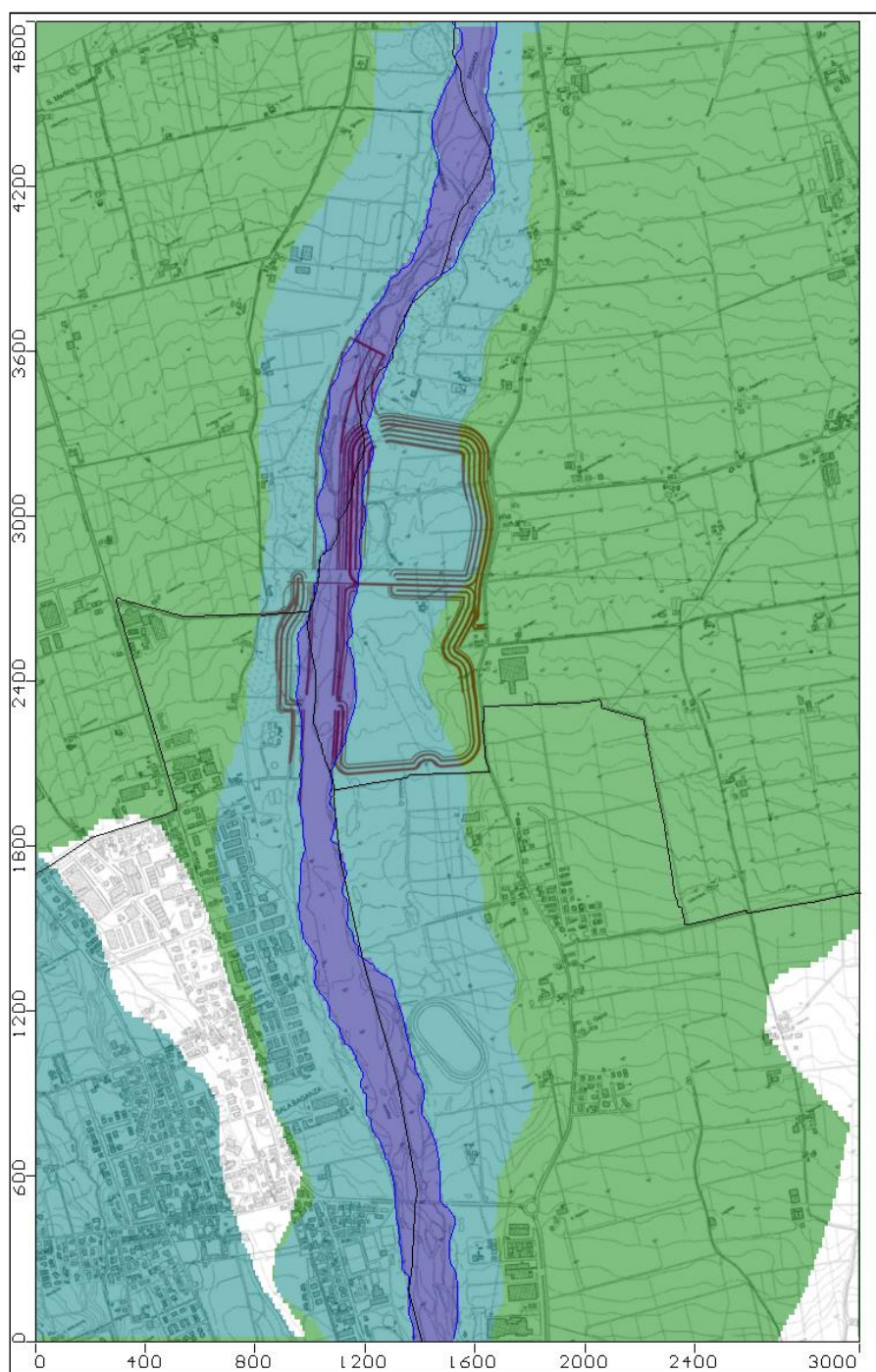


Figura 14 – Discretizzazione dei valori di infiltrazione efficace per classi entro il 1 strato del modello

2.4 FASE DI TARATURA DEL MODELLO

La taratura del modello è consistita nella ricostruzione, in regime stazionario, della piezometria relativa alla falda superficiale elaborata sulla base delle misure effettuate nella campagna del 26 luglio 2016, mediante procedura

"trial and error". Questa metodologia è stata protratta sino all'ottenimento di uno scarto sufficientemente accettabile tra i valori di piezometria calcolati (modello teorico) e quelli realmente misurati (modello reale).

I dati di input che hanno necessitato di una maggiore taratura/verifica sono stati quelli relativi ai valori di conducibilità idraulica nei settori posti esternamente all'areale direttamente interessato dalla cassa di espansione del T. Baganza, dal momento che per tali aree non si dispone di dati sito-specifici dei parametri idrogeologici derivanti da prove di pompaggio o prove Lefranc.

L'analisi della retta di calibrazione del modello, riportata in Figura 15, evidenzia errori estremamente contenuti; analogamente, anche l'entità degli stessi indicatori statistici riassunti nella stessa figura testimoniano l'affidabilità della calibrazione secondo quanto previsto dalla letteratura scientifica sull'argomento.

In dettaglio, esaminando i 23 punti di controllo disponibili per la falda superficiale si osserva che lo scarto tra i valori misurati e quelli simulati dal modello è molto contenuto con valori di errore medio di circa 4.5 cm, errore medio assoluto 12.1 cm e scarto quadratico medio dell'errore di 15.8 cm.

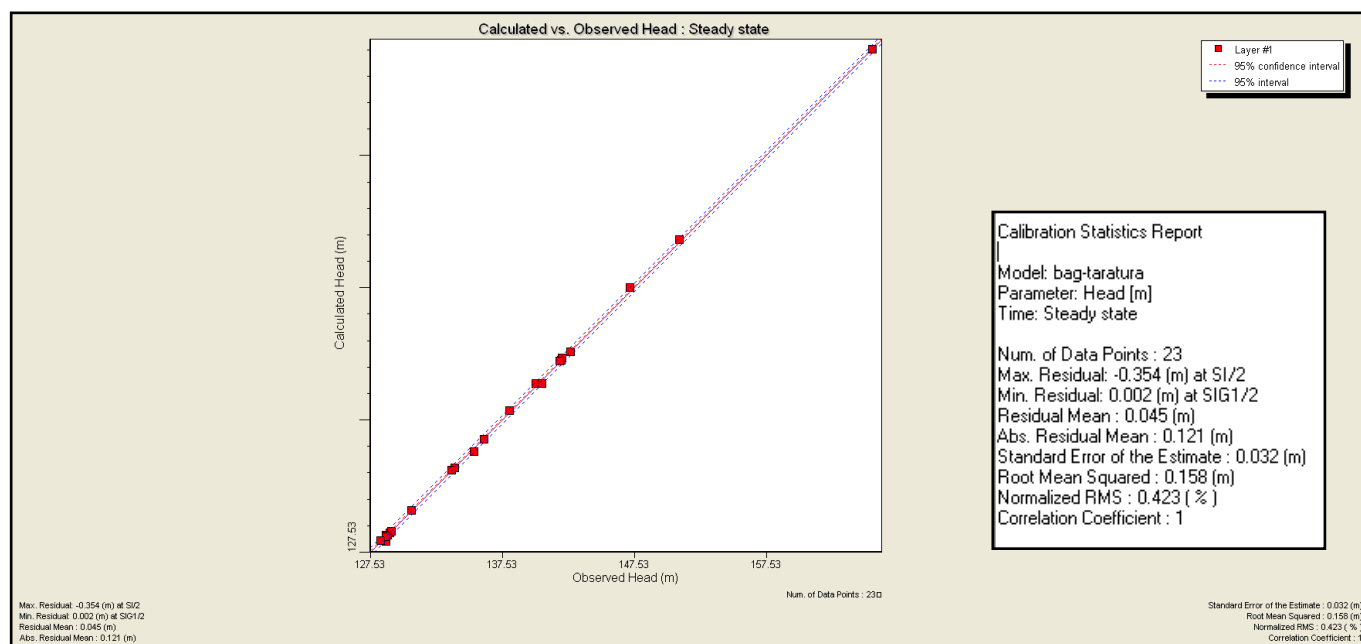


Figura 15 – Fase di taratura: Retta di calibrazione del modello di flusso e indicatori statistici

Il risultato della taratura, espresso in termini di andamento piezometrico della falda superficiale (1 strato), è riportato nella Figura 16 e nel dettaglio in Figura 17.

Da tali elaborati si osserva che le quote piezometriche della falda più superficiale, in corrispondenza della cassa di espansione in progetto, sono comprese tra valori di circa 143 e 127 m s.l.m.; tali valori evidenziano come la piezometria simulata dal modello ricostruisca con buona fedeltà l'andamento della piezometria misurata nel settore

di studio per la falda superficiale, registrandosi errori contenuti in corrispondenza dei punti di controllo del livello della falda (cfr. Figura 18 e Figura 19).

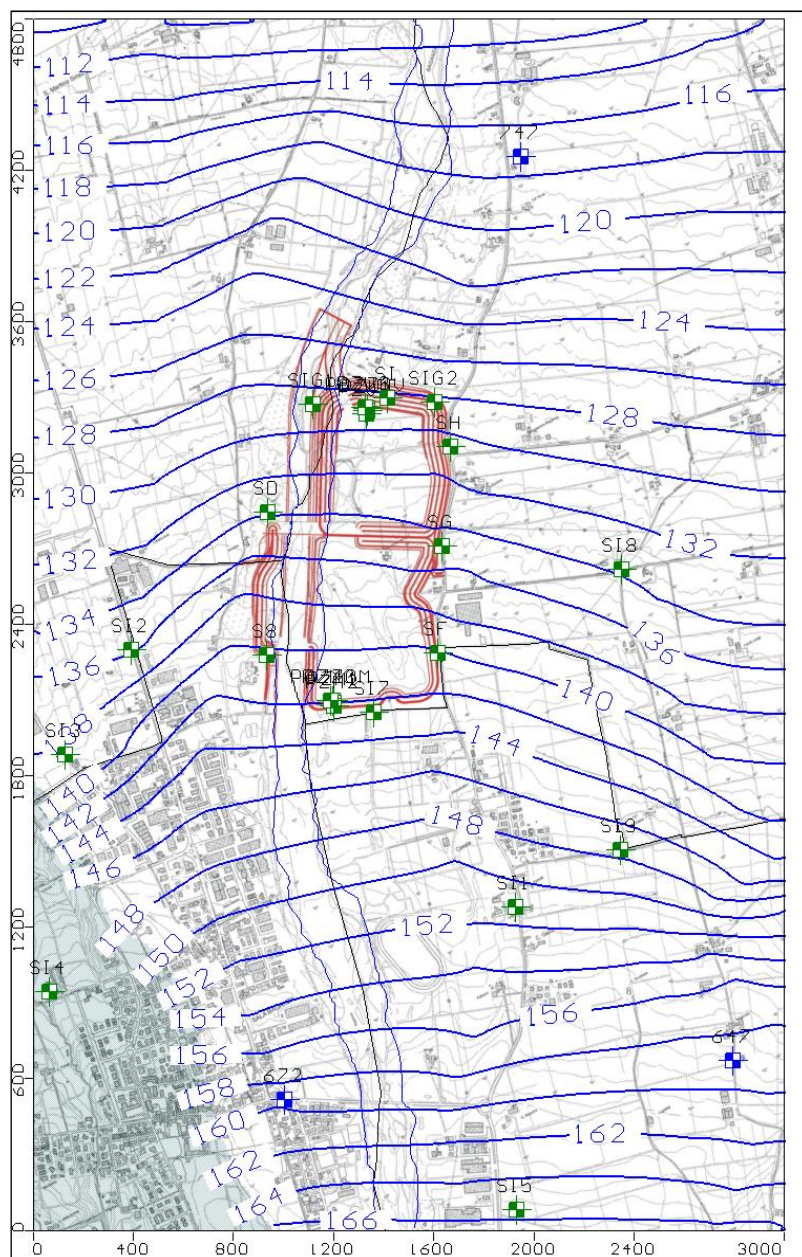


Figura 16 – Fase di taratura: Andamento piezometrico (m s.l.m.) ricostruito per la falda superficiale (primo strato)



Figura 17 – Fase di taratura: Andamento piezometrico (m s.l.m.) – dettaglio della figura precedente

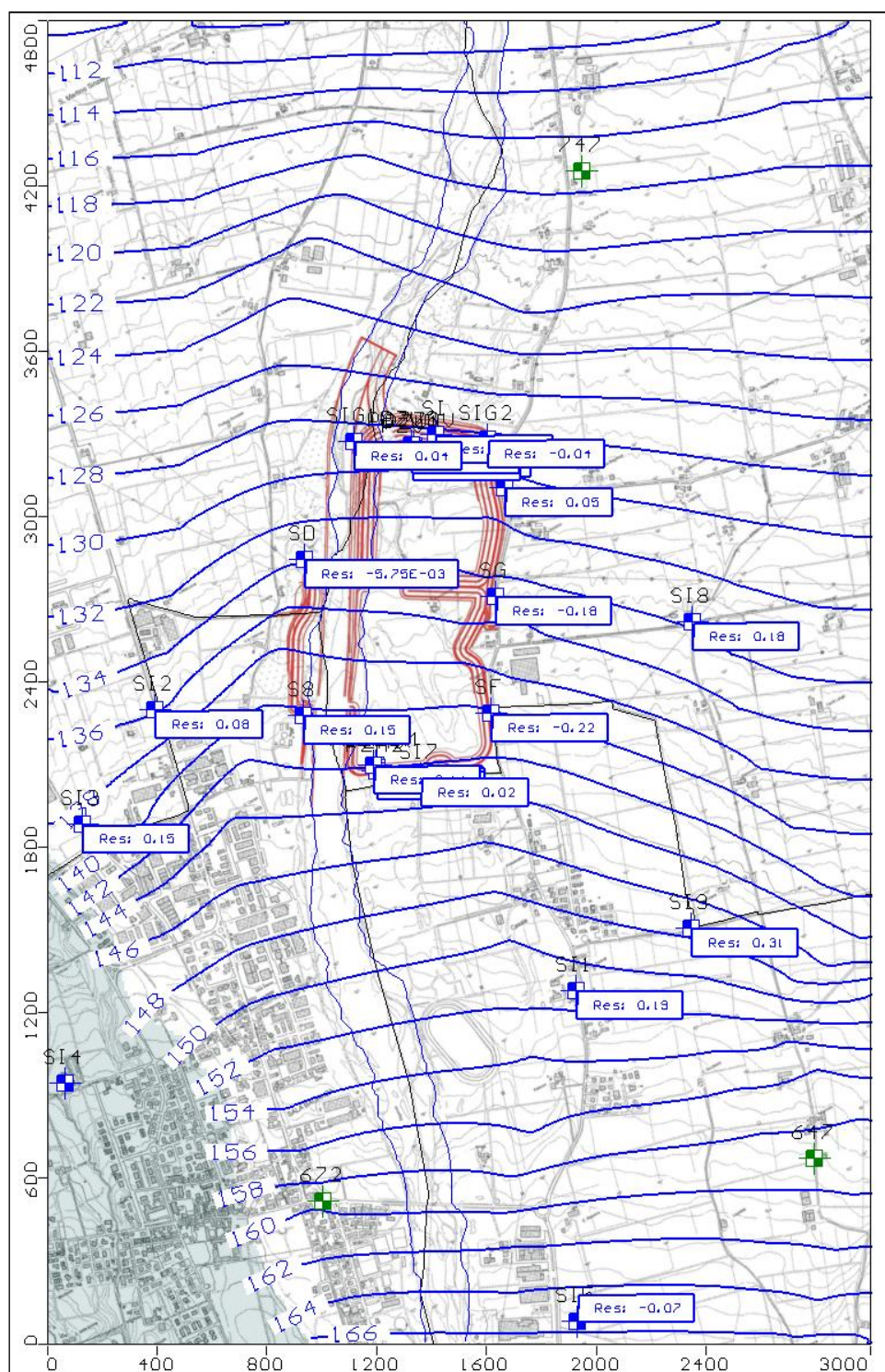


Figura 18 – Fase di taratura: Andamento piezometrico (m s.l.m.) ricostruito per la falda superficiale e valori puntuali di scarto piezometrico tra simulato e reale

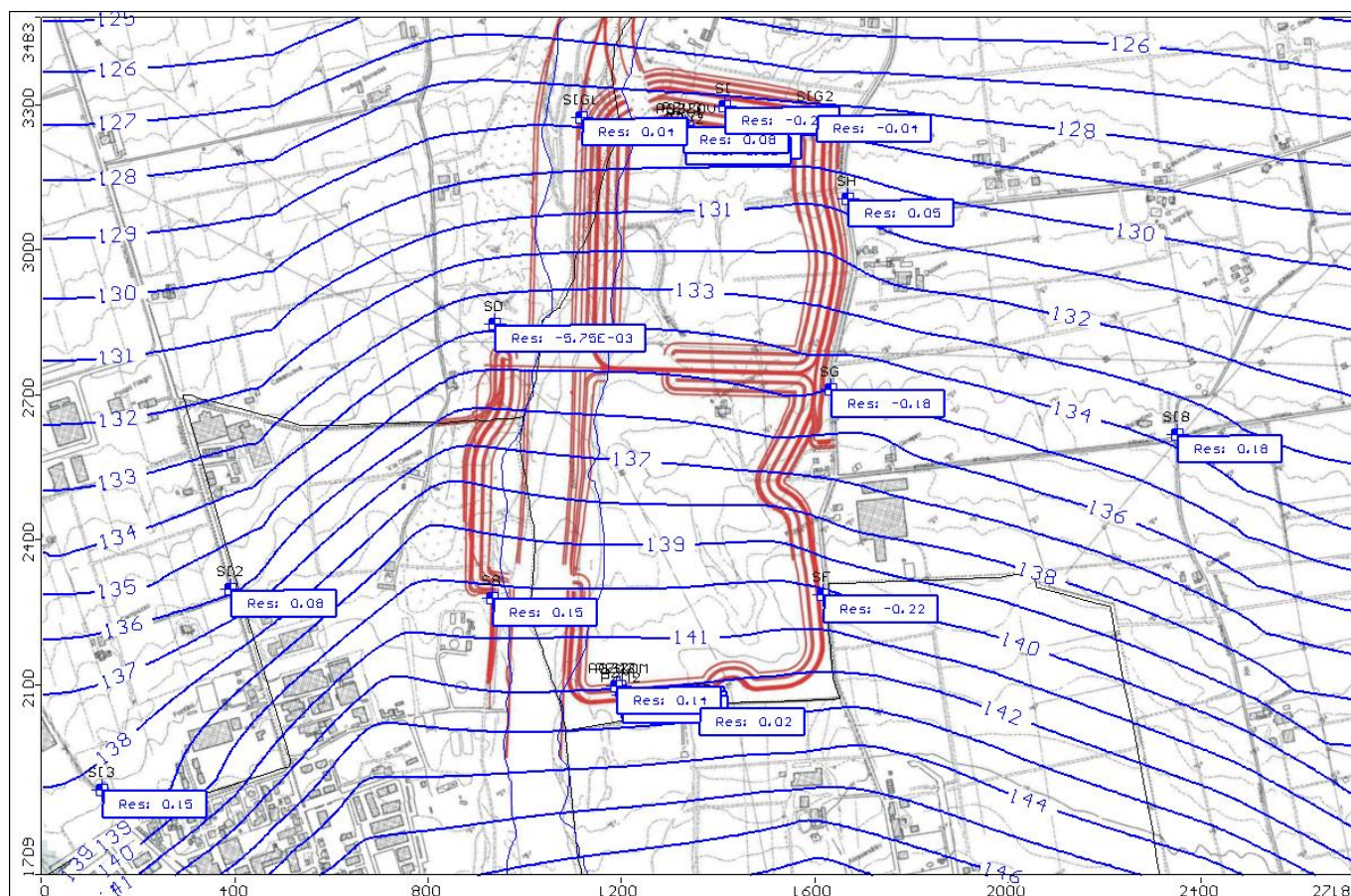


Figura 19 – Fase di taratura: Andamento piezometrico (m s.l.m.) e valori di scarto piezometrico – dettaglio della figura precedente

2.5 BILANCIO IDROGEOLOGICO

Un primo risultato della modellazione è costituito dalla quantificazione delle principali voci del bilancio idrico sotterraneo in quanto il volume immagazzinato negli acquiferi è determinato in funzione delle risorse idriche in entrata e in uscita dal modello.

Nell'areale preso in esame la voce attiva del bilancio idrico sotterraneo è data dalla somma dei seguenti contributi:

$$R = Pe + Af$$

dove con Pe si intendono le piogge efficaci e con Af l'afflusso dalle falde da monte.

La voce passiva del bilancio, costituita dalle uscite da falda, viene così ripartita:

$$U = Df + Dp$$

dove Df rappresenta il deflusso della falda a valle della zona di studio e Dp il prelievo di acque sotterranee dai pozzi privati.

Avendo operato, in fase di taratura del modello, in regime stazionario, il mese preso a riferimento (campagna del 26 luglio 2016 rappresentativa di un periodo di ridotta alimentazione della falda) viene approssimativamente considerato come periodo di equilibrio in cui non esiste immagazzinamento di acque nel sottosuolo e quindi le portate entranti al sistema idrogeologico sono uguali a quelle uscenti.

Il bilancio idrico sotterraneo è stato determinato sull'areale di dominio del modello (superficie 14.4 km²) e su quello sotteso dalla futura cassa di espansione (superficie complessiva pari a circa 770.685 m²), così come rappresentato in Figura 20.

I risultati ottenuti per la fase di taratura sono riassunti in Tabella 1, dove sono evidenziati i valori delle voci principali che compongono il bilancio idrico sotterraneo, distinti anche per i due principali orizzonti acquiferi che concorrono ad individuare il complesso acquifero A0, sede della falda freatica (primo e secondo strato).

In ragione dei valori maggiori di conducibilità idraulica dei sedimenti appartenenti all'Unità di Modena, costituiti prevalentemente da ghiaie e sabbie, le voci principali del bilancio idrico sotterraneo sono quelle riferite al primo strato del modello in corrispondenza della fascia centrale disposta a ridosso dell'alveo del T. Baganza, sebbene lo spessore complessivo raggiunto da tale unità sia molto ridotto (circa 1-3 m in condizioni di magra).

Nel dettaglio le principali voci di entrata del modello sono quelle di afflusso da monte dal primo strato (circa 58 l/s) seguite da quelle dovute all'infiltrazione efficace (3.28 l/s). Di contro, i quantitativi idrici che circolano entro il sistema delle ghiaie in matrice limoso-argillosa appartenenti al subsistema di Ravenna sono molto ridotti, dell'ordine di qualche l/s.

Tabella 1 – Voci del bilancio idrico sotterraneo: Fase di taratura del modello (luglio 2016)

Bilancio idrico sotterraneo Area modello: 14.4 km²	I strato	II strato	Falda superficiale (I + II strato)
VOCI DI RICARICA (l/s)			
Afflusso da monte	58,02	1,25	59,27
Infiltrazione efficace	3,28	-	3,28
Drenanza	2,2	8,87	-
Totale	63,5	10,12	62,55
VOCI DI USCITA (l/s)			
Deflusso a valle	54,63	7,92	62,55
Prelievo da pozzi	-	-	-
Drenanza	8,87	2,2	-
Totale	63,5	10,12	62,55

Analizzando il bilancio idrico riferito alla sola porzione di acquifero sotteso dal sedime della cassa di espansione in progetto, si osserva che da essa transitano verso valle portate di circa 51.46 l/s dal primo strato e di circa 0.23 l/s nel secondo strato; considerando un fronte di ingresso di circa 720 m si ottiene mediamente una portata in ingresso di 0.071 l/s per metro lineare dall'orizzonte delle ghiaie grigie del primo strato e di 0.00032 l/s per metro lineare dall'orizzonte delle ghiaie limoso-argillose del secondo strato; tali quantitativi rappresentano

complessivamente oltre l'80% delle portate circolanti nell'acquifero A0 nel settore modellato della conoide del Baganza.

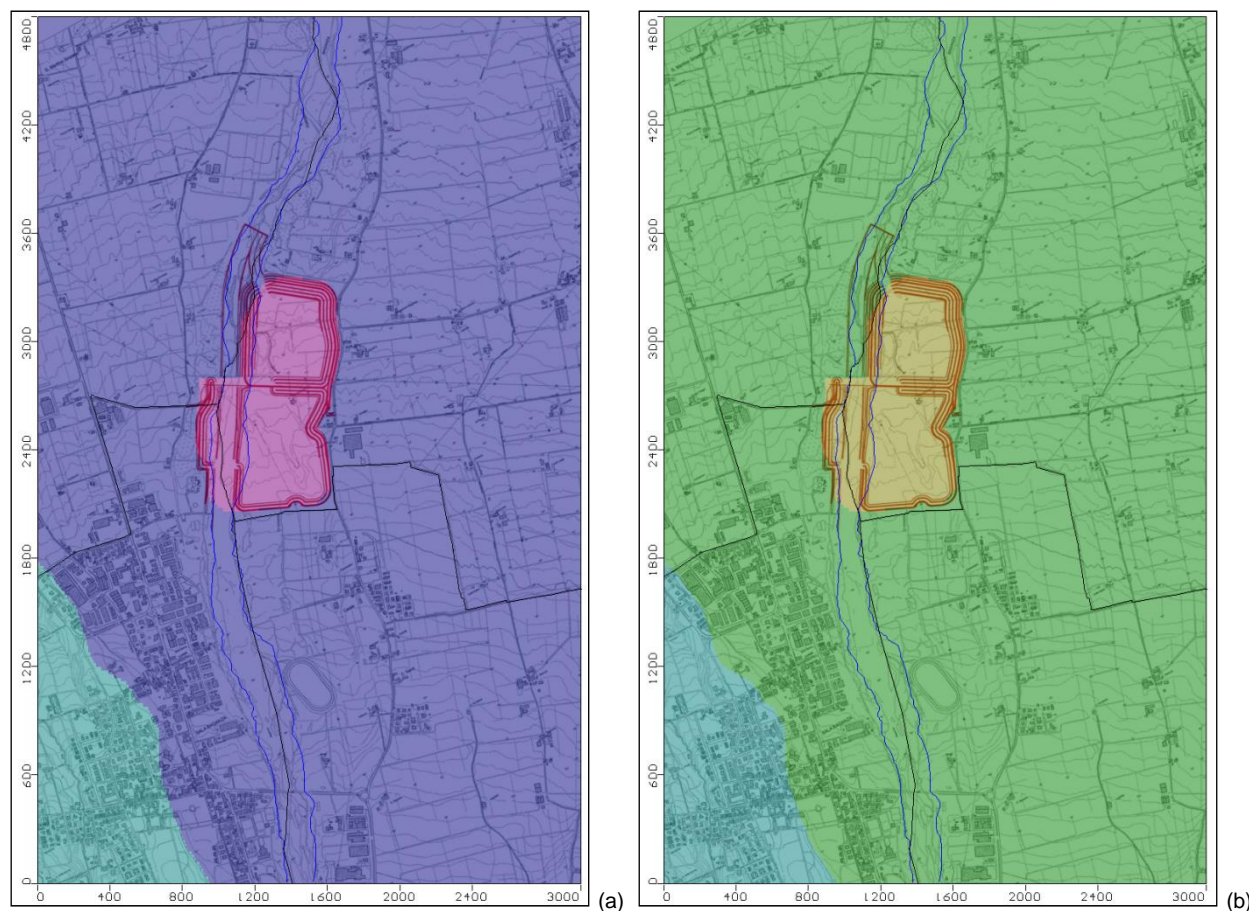


Figura 20 – Fase di taratura: Discretizzazione delle zone di calcolo del bilancio idrico sotterraneo entro il primo (a) e il secondo (b) strato del modello interessato dalla realizzazione della cassa di espansione sul T. Baganza.

2.6 FASE DI VERIFICA DEL MODELLO

Una volta completata la fase di calibrazione del modello è stata condotta una fase di verifica dello stesso, utilizzando un set indipendente di misure dirette, con la finalità di verificare la capacità del modello di simulare condizioni diverse rispetto a quelle utilizzate in fase di taratura, anche se della stessa natura.

Nello specifico, non disponendo di un'ulteriore campagna piezometrica di controllo sui punti di monitoraggio di nuova realizzazione riferita a una differente condizione stagionale di portata della falda, si è optato di verificare il modello modificando le condizioni di alimentazione, in modo da ricostruire una piezometria riferita a condizioni di ricarica media della falda.

Sulla base del dato medio annuo di pioggia rilevata alla stazione di Sala Baganza, nel periodo 1960÷2000 (801 mm), sono stati pertanto modificati i valori di infiltrazione efficace discretizzati nelle 4 classi individuate in fase di taratura del modello.

Nello specifico, richiamando Figura 14, relativa alla discretizzazione delle classi di ricarica del modello, con la finalità di simulare le condizioni medie di ricarica della falda, sono stati inseriti valori medi annui di infiltrazione pari a 120 mm/anno per le classi di colore viola e ciano, 20 mm/anno per la classe di colore verde e 4.1 mm/anno (per la classe di colore bianco).

La piezometria della falda superficiale (primo strato), ricostruita a partire da queste nuove condizioni medie di ricarica della falda, è illustrata in Figura 21; rispetto alla piezometria del luglio 2016 si osserva un innalzamento della falda mediamente pari a 2.2 m e variabile sull'areale come illustrato nella Figura 22.

In termini di bilancio idrico sotterraneo si osserva un incremento della voce attribuita alle infiltrazioni efficaci che passa, alla scala dell'areale modellato, da valori di circa 3.3 l/s a valori di circa 20 l/s, mentre non si osservano variazioni significative in termini di portate in ingresso al settore sotteso dalla realizzazione della cassa di espansione in progetto.

Questa nuova configurazione piezometrica è stata analizzata anche in fase di applicazione del modello allo scopo di verificare le eventuali variazioni in termini di deformazione piezometrica e di variazioni dei livelli indotti dal sistema di drenaggio e di diaframmatatura in progetto per la realizzazione delle casse di espansione del T. Baganza.

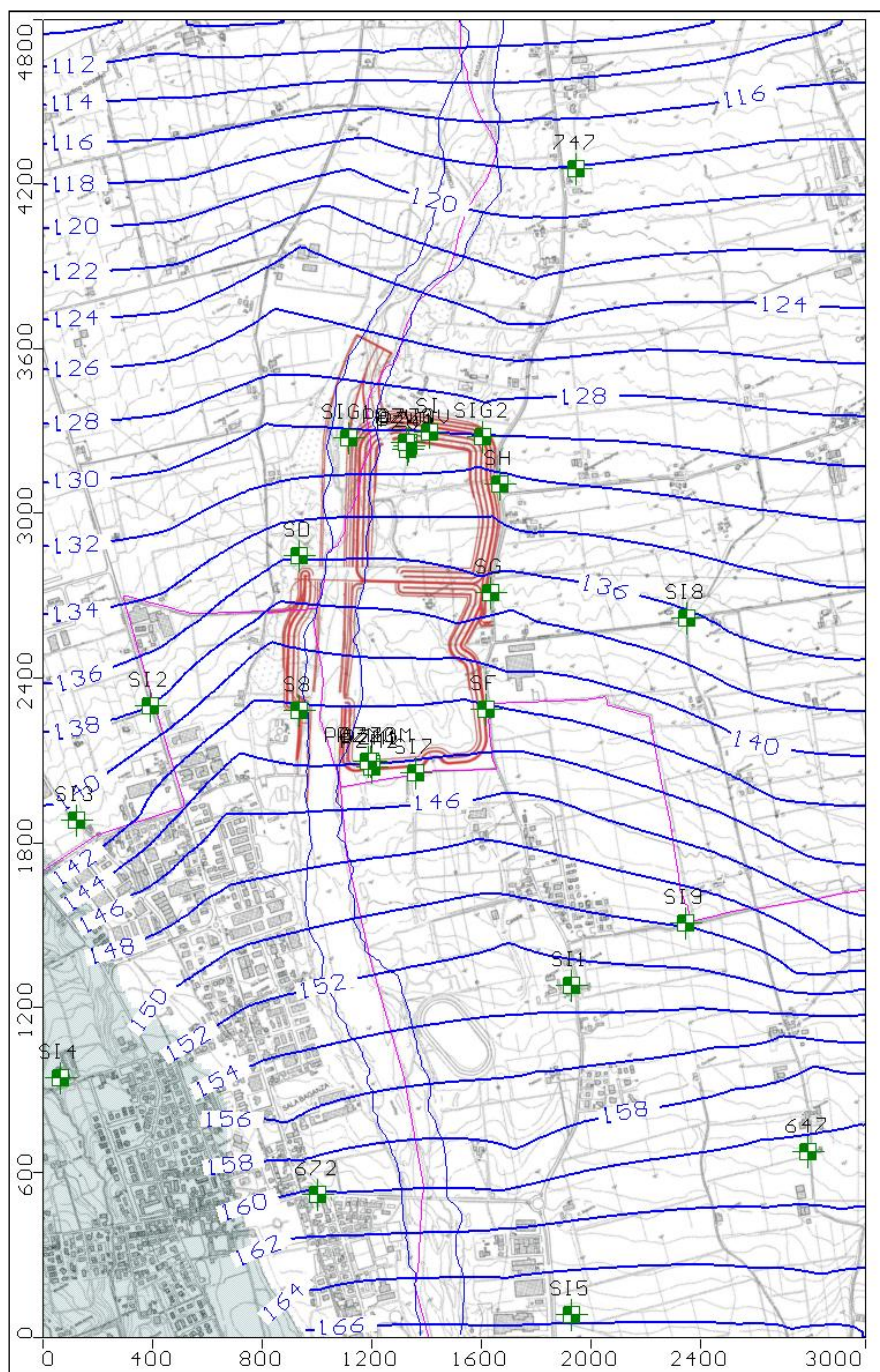


Figura 21 – Fase di verifica: Andamento piezometrico (m s.l.m.) ricostruito per la falda superficiale in condizioni di ricarica media annua da parte degli afflussi meteorici

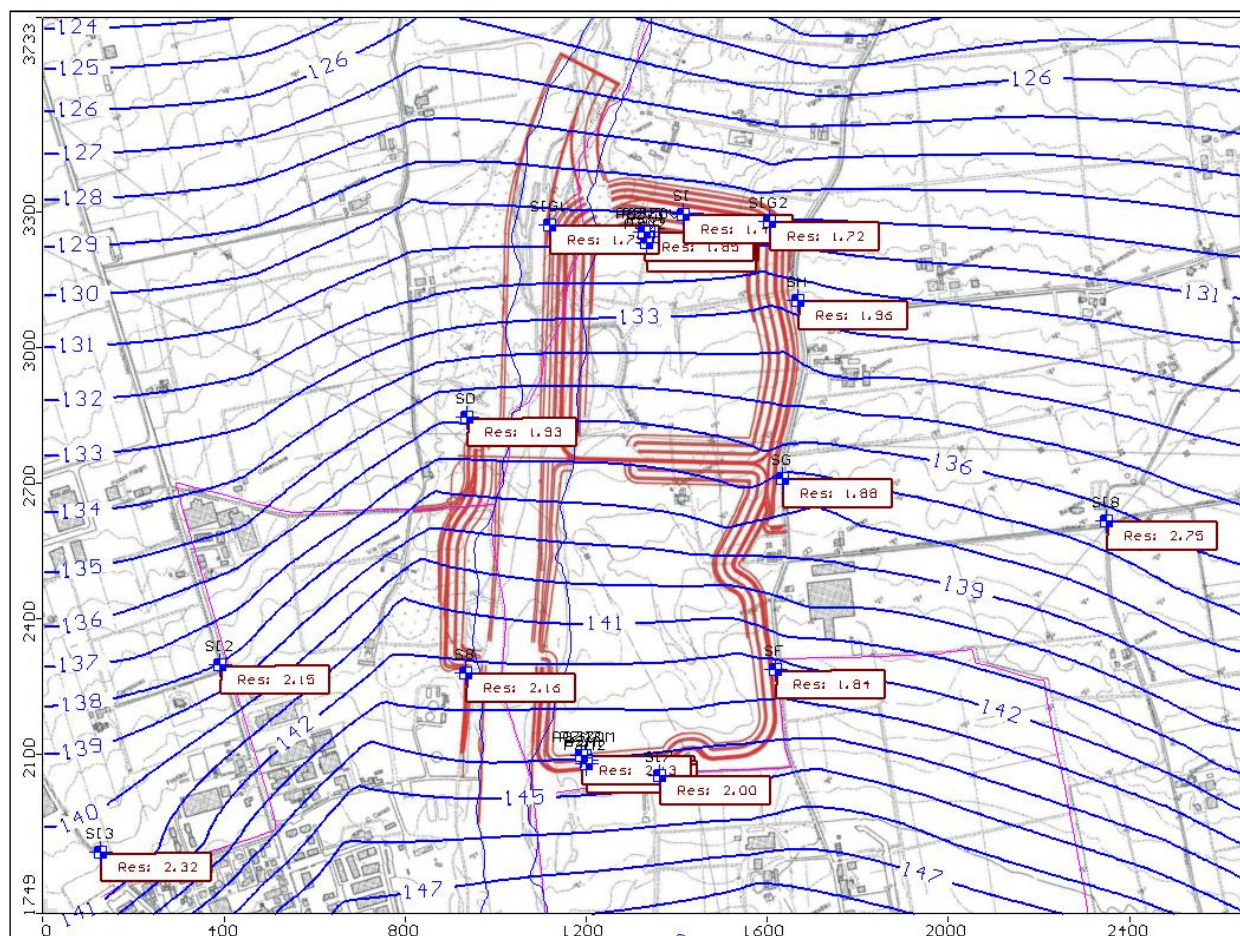


Figura 22 – Fase di verifica: Andamento piezometrico (m s.l.m.) ricostruito per la falda superficiale in condizioni di ricarica media annua da parte degli afflussi meteorici e entità dell'innalzamento puntuale rispetto alla situazione rilevata nel luglio 2016 (dettaglio)

2.7 FASE DI APPLICAZIONE DEL MODELLO

Il modello di flusso implementato è stato utilizzato allo scopo di fornire indicazioni circa l'effetto complessivo indotto, sul sistema idrico sotterraneo locale, dalla cassa di espansione sul T. Baganza per la cui realizzazione sono previsti diversi interventi che vanno a interferire con le acque sotterranee.

Nello specifico tali interventi consistono in:

- attività di escavazione spinte sino ad una profondità massima di circa 7.5 m dall'attuale p.c. nel settore sud di monte;
- predisposizione di fossi di drenaggio delle acque di falda da realizzare sul fondo della cassa di espansione con la finalità di convogliare e regimare le acque drenate dai fronti di scavo in falda;
- realizzazione di diaframature perimetrali mediante iniezioni di colonne di jet-grouting compenetrante di diametro non inferiore a 80 cm ed interasse di 60 cm, spinte a profondità nel sottosuolo tali da raggiungere la base impermeabile dell'acquifero A0;
- realizzazione di opere di bonifica del piano di posa di alcuni tratti degli argini perimetrali della cassa di espansione.

Sulla base dei dati progettuali è stato necessario inserire nel modello di flusso, sia in fase di taratura che di verifica, gli elementi utili per schematizzare le opere in progetto.

In particolare, per quantificare e dimensionare il sistema di drenaggi da realizzare sul fondo delle casse di espansione al fine di garantire, in regime ordinario, condizioni di asciutta o di minimo battente idrico, si è fatto ricorso all'opzione "Drain" del pacchetto del codice di calcolo MODFLOW; nello specifico tale opzione permette di simulare il funzionamento di sistemi di drenaggio a partire dalle informazioni progettuali relative alla quota assoluta di fondo prevista per la vasca e del valore di conduttanza tra il sistema drenante (fosso) e il sistema acquifero in cui esso sarà impostato.

Le quote di base del sistema drenante sono state poste all'incirca 1 m al di sotto delle quote di fondo cassa previste nel progetto preliminare ("Soluzione A") e di circa 0.5 m al di sotto delle quote di fondo cassa previste dal Progetto Definitivo ("Soluzione A ottimizzata") e ricostruite sulla base dei dati indicati nei profili longitudinali e trasversali riportati rispettivamente negli elaborati BAG2_01GEN_D_PR_01_A e BAG2_01GEN_D_SZ_01_A, così come sinteticamente riassunto nella Tabella 2 e nella Tabella 3.

Analizzando la "Soluzione A", sviluppata nel Progetto Preliminare, il fondo della vasca, che raggiunge uno sviluppo lineare di circa 1200 m, varia tra quote assolute massime di circa 135 m s.l.m. e minime di 133.3, alle quali corrisponde una pendenza media pari allo 0.15%. La pendenza del fondo dell'alveo del Baganza, a valle delle tre briglie di monte che determineranno un salto complessivo di 12 m, sarà invece pari allo 0.23% e compreso tra quote assolute di 133.5 e 131 m s.l.m..

Considerando invece la "Soluzione A ottimizzata", proposta nell'ambito del presente Progetto Definitivo, il fondo della vasca entro il comparto 1 di monte, avente uno sviluppo lineare di circa 290 m, varia tra quote assolute

massime di 138.8 m s.l.m. e 134.72 m s.l.m., alle quali corrisponde una pendenza media pari allo 0.7%; il fondo della vasca entro il comparto 2 di valle, avente uno sviluppo lineare di circa 225 m, varia invece tra quote di 132.5 m s.l.m. e 129.32 m s.l.m. e pendenza media pari sempre allo 0.7%. In questa nuova configurazione, l'alveo del Baganza sarà invece compreso tra quote assolute di 143.67 e 135 m s.l.m. in corrispondenza del comparto 1 in linea al Baganza e tra quote comprese tra 132.43 e 129.32 nel settore posto lateralmente al comparto 2 fuori linea.

Il valore di conduttanza per unità di superficie tarato durante l'analisi di sensitività è risultato pari a 1000 1/giorno.

Tabella 2 – Quadro di sintesi delle quote di fondo vasca della cassa di espansione sul T. Baganza previste in base alla "Soluzione A" del Progetto Preliminare

	Quote assolute fondo cassa* (m s.l.m.)	Quote assolute fondo alveo* (m.s.l.m.)
Inizio cassa	135	133.5
Sez 1	134.89	133.34
Sez 4	134.44	132.65
Sez 7	134	131.96
Sez9	133.7	131.5
Fine cassa	133.3	131
Fuori cassa		129

(*) da profilo longitudinale

Tabella 3 – Quadro di sintesi delle quote di fondo vasca dei comparti 1 e 2 della cassa di espansione sul T. Baganza previste in base alla “Soluzione A ottimizzata” del progetto definitivo

Comparto 1 in linea (di monte)		
	Quote assolute fondo cassa (m s.l.m.)	Quote assolute fondo alveo (m.s.l.m.)
Inizio cassa	138.8	143.67
S03 (ex 1)	138.58	142.58
Briglie		136 (141 a monte: salto 5 m)
S06 (ex 4)	136.48	134.92
S08 (ex 4)	135.08	135.08
Comparto 2 fuori linea (di valle)		
Inizio cassa S09 (ex 7)	132.50	132.43 (133.17 a monte)
S12	130.79	130.72
S14	129.39	129.32
Fine cassa	129.32	

A titolo esemplificativo nelle Figura 23 e Figura 24 si riporta la schematizzazione delle maglie (in colore grigio) in cui è stato inserito l'elemento “dreno”, rispettivamente nel primo e nel secondo strato del modello sia per la “Soluzione A” che per la “Soluzione A ottimizzata”.

In base ai caratteri progettuali e alla diversa profondità raggiunta dagli scavi si osserva come in base alla “soluzione A ottimizzata”, in corrispondenza del comparto 1 di monte il sistema di drenaggio si spinga a profondità alquanto inferiori, andando comunque a interessare sia le unità ghiaioso-sabbiose grigie del primo strato del modello che le ghiaie in matrice limoso-argillosa del secondo strato, mentre in corrispondenza del comparto 2 di valle il sistema di drenaggio andrà ad interessare il solo primo strato del modello in quanto minore è la profondità raggiunta dalle escavazioni.

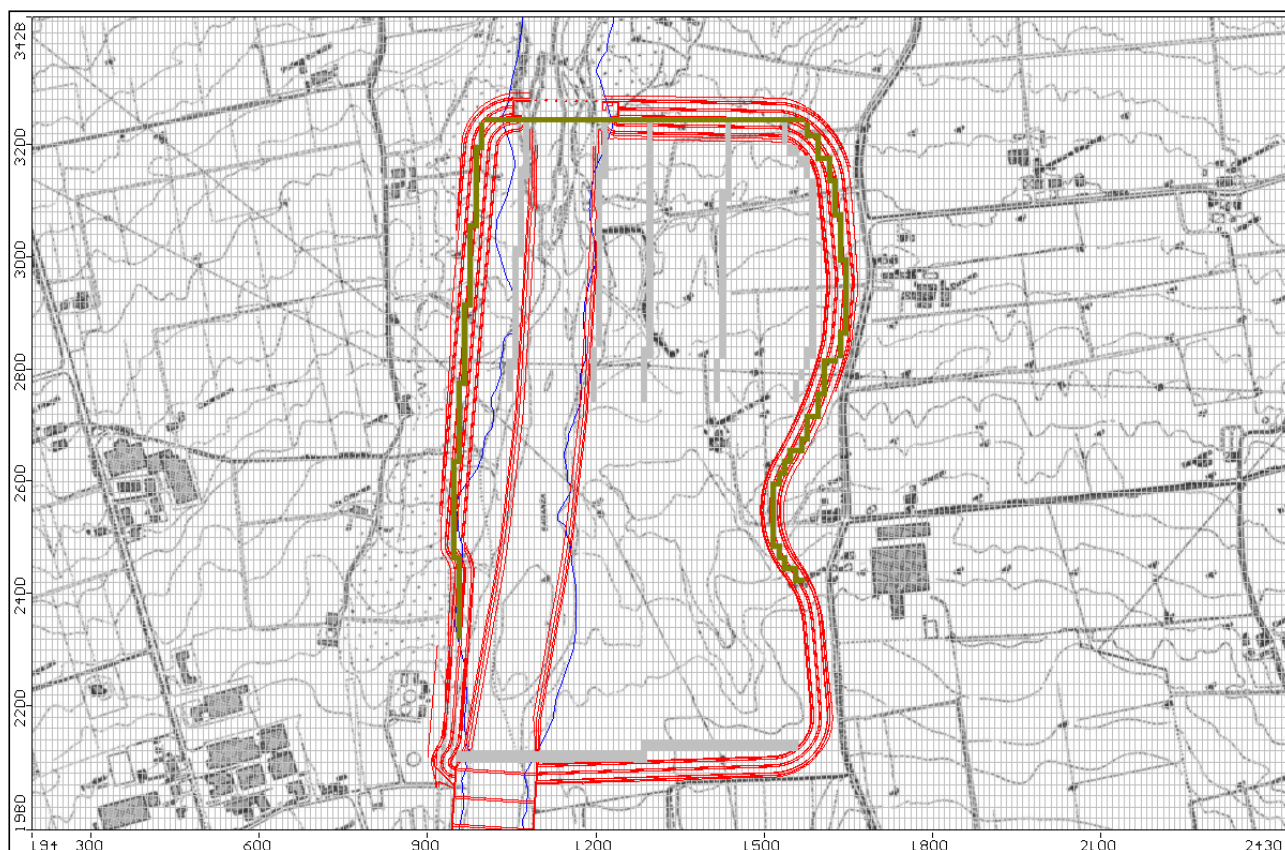


Figura 23 – Esempio di schematizzazione dei sistemi di diaframmatura e del sistema di drenaggio delle acque di falda entro il primo strato del modello previsto per la cassa di espansione sul T. Baganza ("Soluzione A")

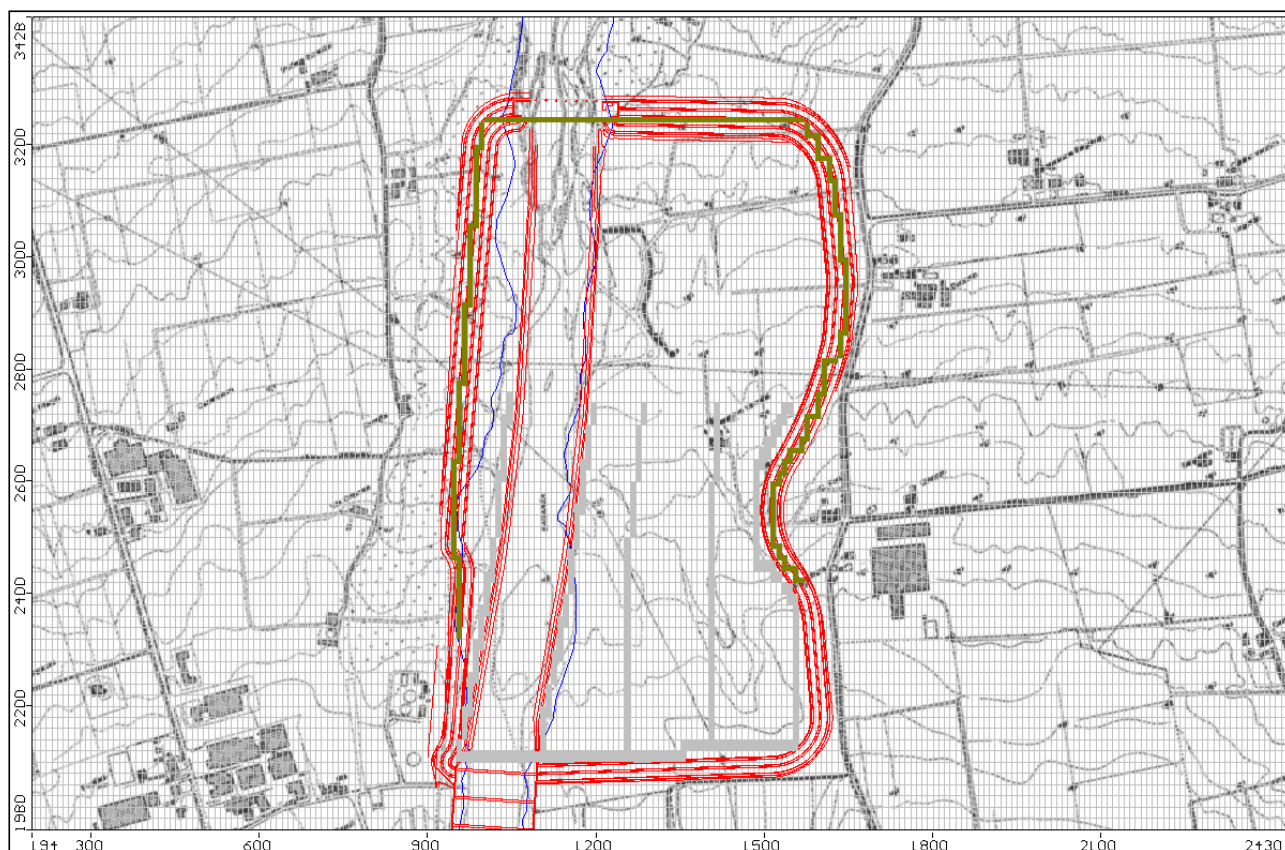


Figura 24 – Esempio di schematizzazione dei sistemi di diaframmatura (in colore verde) e di drenaggio delle acque di falda (in colore grigio) entro il secondo strato del modello previsto per la cassa di espansione sul T. Baganza (“Soluzione A”)

Per schematizzare invece la presenza dei tratti diaframmati mediante la realizzazione di colonne compenstrate di jet-grouting che si spingono nel sottosuolo a profondità variabili tra 12 e 15 m a partire dal “piano di bonifica delle ghiaie grigie”, vale a dire fino a una profondità tale da raggiungere la base impermeabile dell’acquifero A0, si è fatto ricorso all’opzione “wall” del pacchetto del codice numerico MODFLOW.

Da un punto di vista modellistico la presenza della diaframmatura è stata schematizzata inserendo nelle maglie in cui ricade il diaframma i seguenti valori caratteristici: conducibilità idraulica $2 \cdot 10^{-9}$ m/s; spessore 0.6 m.

Dal momento che il diaframma si spinge sino a raggiungere la base del subsistema di Ravenna che, localmente, si rinviene a profondità variabili tra circa 10 e 25 m (cfr elaborati BAG2_03GEO_D_SZ_01_A e BAG2_03GEO_D_SZ_02_A), nel modello di flusso implementato le maglie in cui ricade la diaframmatura interessano sia il primo che il secondo strato del modello.

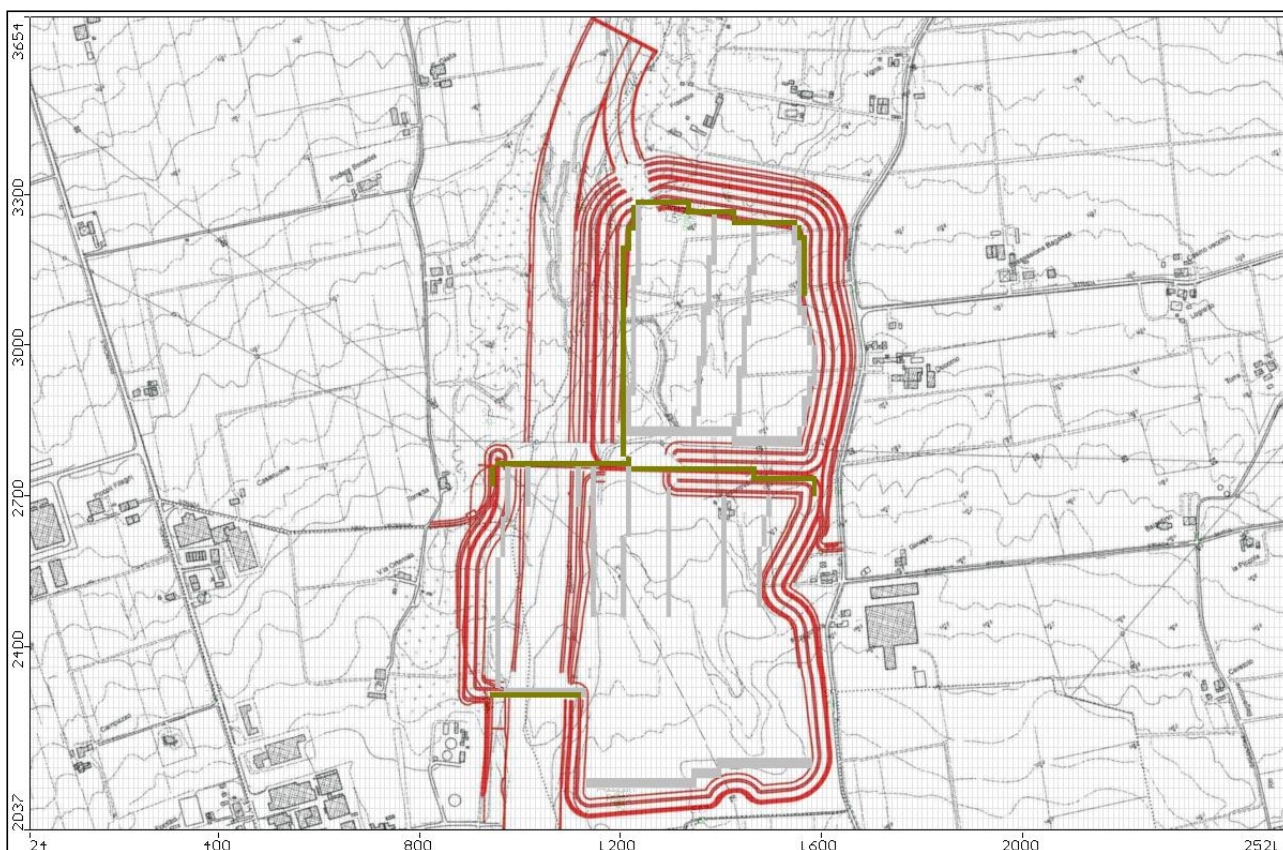


Figura 25 – Esempio di schematizzazione dei sistemi di diaframmatrice (in colore verde) e di drenaggio delle acque di falda (in colore grigio) previsto per i comparti 1 e 2 della cassa di espansione sul T. Baganza entro il primo strato del modello (“Soluzione A ottimizzata”)

Infine la presenza degli argini perimetrali alle casse è stata schematizzata nella modellazione riferita alla “Soluzione A ottimizzata”, inserendo in corrispondenza delle maglie del primo strato del modello interessate dagli argini, valori di conducibilità idraulica pari a $1 \cdot 10^{-7}$ m/s (in base alle indicazioni riportate nella Relazione Geotecnica - elaborato BAG2_03GEO_R_RE_04_A), solo laddove sono previsti interventi di bonifica del piano di posa delle arginature, che consistono nell'asportazione delle ghiaie e sabbie dell'unità AES8a e nella successiva posa e compattazione di terreni dell'unità AES8.

In fase di applicazione del modello le simulazioni sono state condotte in regime stazionario al fine di valutare gli impatti indotti a lungo termine sul sistema idrico sotterraneo - in quanto, come già evidenziato, questo tipo di analisi restituisce risultati che rappresentano la situazione più cautelativa – ricorrendo sia alla situazione idrologica utilizzata in fase di taratura del modello (mese di luglio 2016 contraddistinto da condizioni di basso piezometrico) sia alla situazione idrologica ricostruita in fase di verifica del modello di flusso, rappresentativa di una condizione media di alimentazione della falda superficiale.

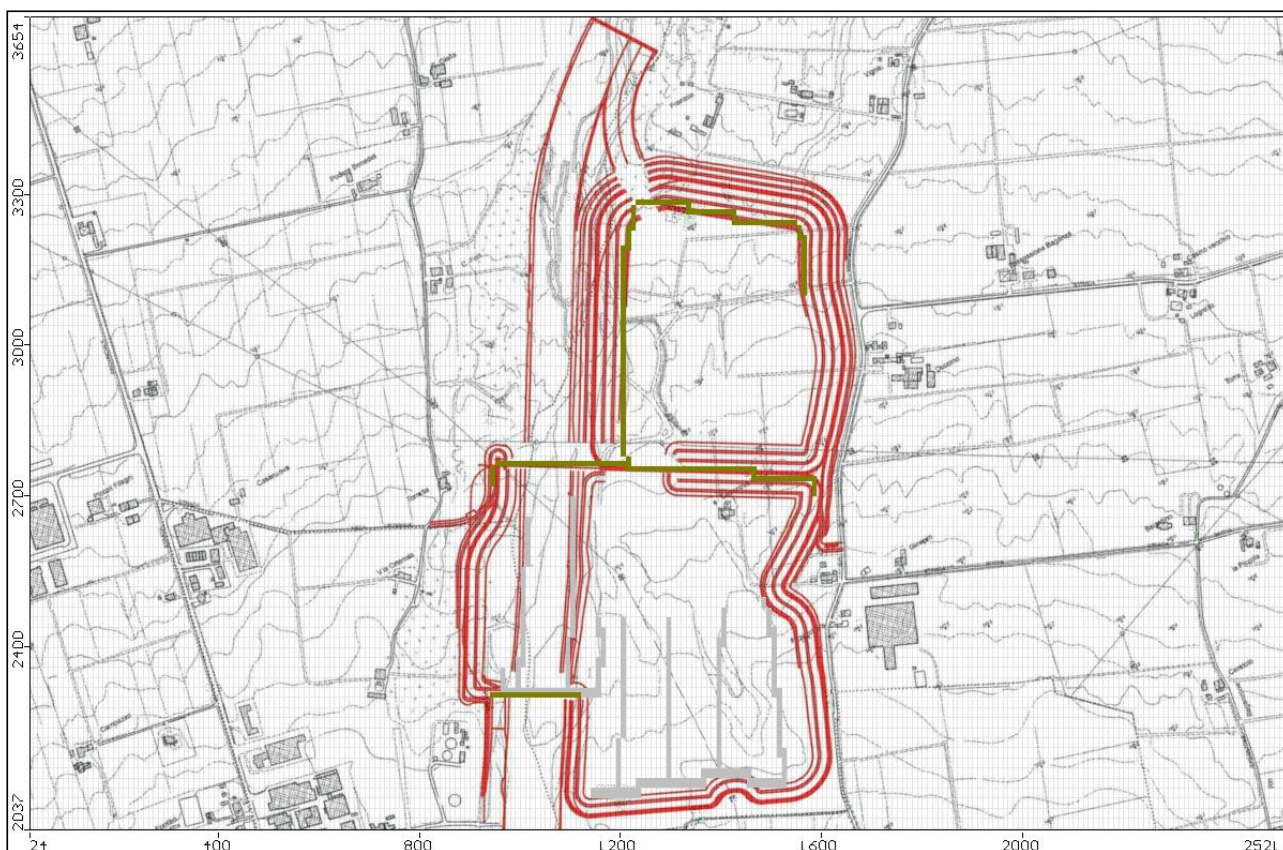


Figura 26 – Esempio di schematizzazione dei sistemi di diaframature (in colore verde) e di drenaggio delle acque di falda (in colore grigio) previsto per i comparti 1 e 2 della cassa di espansione sul T. Baganza entro il secondo strato del modello (“Soluzione A ottimizzata”)

Sono state altresì condotte simulazioni in regime transitorio al fine invece di poter simulare gli impatti indotti a breve termine a seguito del funzionamento della cassa di espansione nelle condizioni di massimo invaso.

I risultati conseguiti mediante la modellazione delle opere sopra descritte sono illustrati nel capitolo seguente.

3. VALUTAZIONE DELL'IMPATTO INDOTTO DALL'OPERA SULLA FALDA

A partire dalle piezometrie di riferimento ricostruite con il modello di flusso sia in fase di taratura che di verifica, sono state condotte diverse simulazioni in regime stazionario, volte principalmente a valutare l'impatto indotto sulla falda dall'opera in progetto e transitorio, finalizzate alla verifica modellistica in condizioni di invaso.

Nello specifico ciò ha permesso di analizzare e quantificare i seguenti aspetti:

- le deformazioni attese in termini di morfologia piezometrica a seguito della realizzazione della casse di espansione sul T. Baganza;
- l'entità delle variazioni piezometriche indotte entro l'acquifero a falda freatica (complesso acquifero A0) direttamente interessato dalle opere di realizzazione della cassa di espansione, identificato nello specifico dagli orizzonti ghiaioso-sabbiosi attribuiti all'Unità di Modena (AES8a) e dagli orizzonti di ghiaie in abbondante matrice limoso-argillosa attribuiti al Subsistema di Ravenna (AES8);
- la morfologia e l'estensione della zona di influenza esercitata dalla realizzazione della cassa di espansione e la sua interferenza con infrastrutture, stabili, pozzi e fontanili presenti nel territorio circostante;
- la variazione delle principali voci che compongono il bilancio idrico sotterraneo di questa porzione di conoide del T. Baganza, facendo riferimento a condizioni ante-operam e post-operam;
- le modifiche indotte sulla falda in condizioni di massimo invaso e in relazione alle curve di invaso per tempi di ritorno millenari

Gli impatti in regime stazionario sono stati analizzati considerando sia la configurazione della cassa di espansione secondo quanto previsto nel progetto preliminare ("Soluzione A"), sia la nuova configurazione individuata nell'ambito del progetto definitivo ("Soluzione A ottimizzata") che prevede, anziché la realizzazione di un unico invaso, la presenza di due distinti invasi indicati come "comparto 1 in linea" di monte e "comparto 2 fuori linea" di valle.

Sono stati inoltre sviluppati ulteriori scenari rappresentativi di situazioni che si verranno a verificare in corso d'opera, al fine di quantificarne i principali impatti sulla componente acque sotterranee; in particolare è stata analizzata la sola fase di escavazione nell'alveo del Baganza per la realizzazione del salto di monte e i conseguenti effetti dovuti al drenaggio delle acque di falda.

È stato infine effettuato uno scenario mirato a verificare gli effetti indotti sulla falda dalla cassa di espansione in condizioni di alto piezometrico.

Gli impatti analizzati in regime transitorio hanno invece comportato la verifica della filtrazione in moto vario in condizioni di invaso delle casse per la soluzione A ottimizzata.

Tra tutti gli scenari implementati, molti dei quali abbandonati e di conseguenza non presentati, in quanto inidonei in termini di impatti indotti dall'opera, verranno descritti i seguenti:

- **scenario 1:** simulazione degli effetti indotti sulla falda a seguito della realizzazione della cassa di espansione del T. Baganza in base a quanto previsto nel progetto preliminare (“Soluzione A”);
- **scenario 2:** simulazione degli effetti indotti sulla falda a seguito della realizzazione della cassa di espansione del T. Baganza in base alla proposta avanzata in sede di progettazione definitiva (“Soluzione A ottimizzata”);
- **scenario 3:** simulazione degli effetti indotti sulla falda a seguito degli interventi di scavo e drenaggio delle acque dall'alveo del Baganza a seguito della realizzazione del salto di monte;
- **scenario 4:** simulazione degli effetti indotti sulla falda a seguito della realizzazione della cassa di espansione in condizioni di alto piezometrico della falda, sia per la “soluzione A” che per la “Soluzione A ottimizzata”;
- **scenario 5:** simulazione in regime transitorio degli effetti sulla falda conseguenti all'invaso delle acque in condizioni di piena millenaria.

3.1 SCENARIO 1: REALIZZAZIONE DELLA CASSA DI ESPANSIONE SUL T. BAGANZA - SOLUZIONE A

Questo scenario simula la realizzazione della cassa di espansione sul T. Baganza secondo quanto previsto nel Progetto preliminare (“Soluzione A”).

Da un punto di vista modellistico il sistema di diaframmatrice perimetrale alla cassa che si spinge sino a raggiungere la base del subsistema di Ravenna (strati 1 e 2 del modello) per uno sviluppo lineare complessivo pari a circa 2400 e il sistema di drenaggio delle acque di falda sul fondo vasca, sono stati schematizzati ricorrendo rispettivamente alle opzioni “Wall” e “Drain” del pacchetto MODFLOW, come già descritto in un precedente paragrafo.

Nelle Figure 28 e 29 è riportata la piezometria dinamica (m s.l.m.), riferita sia all'intero areale che a quello di dettaglio del settore interessato dalla cassa di espansione, conseguente alla realizzazione del sistema progettato, riferite al secondo strato del modello, che rappresenta la condizione a regime degli impatti indotti dalla cassa di espansione.

Nelle Figure 29 e 30 sono invece riportate le isovariations piezometriche complessive indotte nella falda rispetto alla situazione di taratura, riferite al secondo strato del modello.

Dagli elaborati proposti si osserva come la realizzazione della cassa in progetto è responsabile di una deformazione piezometrica della falda superficiale tale da indurre un significativo abbassamento del livello rispetto alla situazione ante-operam di taratura presa a riferimento.

Ciò in ragione della profondità degli scavi operati in falda e delle quote di posa dei sistemi di drenaggio, che risultano essere, per gran parte del loro sviluppo, di molto inferiori rispetto alle quote di falda anche nelle condizioni di portata di magra prese a riferimento.

Questi elaborati tengono già in considerazione l'effetto di restituzione in falda, nel settore posto subito a valle del manufatto di sfioro tra la cassa e il T. Baganza, dei quantitativi di acqua di falda drenata dalla cassa di espansione.

I quantitativi drenati dalla cassa di espansione, al fine di ottenere quote di falda sul fondo cassa compatibili con condizioni di sostanziale asciutta dello stesso, l'elaborazione modellistica ha restituito i seguenti valori:

- portata complessivamente drenata dall'acquifero A0: circa 48 l/s;
- portata drenata dall'unità AES8a (primo strato): circa 22 l/s;
- portata drenata dall'unità AES8 (secondo strato): circa 27 l/s.

In termini di quote piezometriche assolute si verrebbero a registrare valori di circa 139 m s.l.m. a ridosso del perimetro di monte della cassa e di circa 126-128 m s.l.m. a ridosso dell'argine di valle.

La piezometria dinamica (Figura 27 e Figura 28) evidenzia:

- lateralmente alla porzione meridionale della cassa, la flessione verso Sud delle isopieze provocata dallo scavo e dal conseguente drenaggio della falda;
- lateralmente alla porzione settentrionale della cassa, la flessione verso Nord delle isopieze provocata dai diaframmi;
- internamente alla cassa le cuspidi dovute all'effetto dei dreni di fondo nel settore meridionale e l'innalzamento della falda dovuta allo sbarramento dell'acquifero da parte dei diaframmi in quello settentrionale.

In termini di isovariazioni del livello di falda (Figura 29 e

Figura 30) i massimi abbassamenti si registrerebbero a ridosso dell'argine di monte per l'ovvio effetto indotto dal drenaggio, mentre a livello territoriale si avrebbero:

- abbassamenti di circa 3 m per un intorno piuttosto limitato posto a ridosso dell'argine meridionale e presso il depuratore di Sala Baganza;
- abbassamenti variabili tra 2 e 2.5 m nella parte settentrionale dell'abitato di Sala Baganza e tra circa 1 e 2 m in quella meridionale;
- abbassamenti di circa 2 m presso la località Casale;
- abbassamenti di circa 1 m presso la località Carignano;
- abbassamenti variabili tra 1.5 e 2.5 m nel settore NE a ridosso della cassa, presso le caschine della località Vigna e la località Ducomò;
- innalzamenti di circa 2 m internamente alla cassa, nella sua porzione settentrionale

Con specifico riferimento agli impatti indotti su opere di captazione sono attesi effetti limitati unicamente su pozzi domestici di profondità inferiore a 10 m, ma nessun effetto su altri pozzi privati, soprattutto irrigui, che superano la profondità di 20 m, come nessun effetto su pozzi pubblici.

Impatti significativi potrebbero essere attesi sui fontanili posti a meridione della cassa per i quali si potrebbe determinare l'estinzione completa o stagionale durante i periodi di minore ricarica o maggiore sfruttamento della falda.

Per quanto attiene i possibili impatti sugli edifici presenti nell'intorno, connessi a cedimenti del terreno di fondazione per effetto dell'abbassamento del livello di falda, sulla base delle elaborazioni effettuate nel merito nella relazione geotecnica (elaborato BAG2_03GEO_R_RE_04_A), alla quale si rimanda per ulteriori approfondimenti, per le quali risultano accettabili abbassamenti fino a 3-3.5 m o, in un ipotesi molto più conservativa, fino a 2.5 cm, si potrebbero potenzialmente innescare problematiche per gli edifici posti a ridosso dell'argine di monte e per un limitato settore dell'abitato di Sala Baganza.

Ovviamente tali considerazioni vanno lette in termini di potenziale impatto, in quanto andrebbero commisurate alla specifica composizione litologica dello spessore di sottosuolo soggetto a desaturazione e solo qualora entro il medesimo vi sia la concomitante presenza di terreni limoso-argillosi, poiché per terreni a scheletro ghiaioso, anche se immersi in matrice limoso-argillosa, si possono ritenere cautelativamente accettabili anche abbassamenti fino a 3.5 m, mentre per terreni a predominanza ghiaioso-sabbiosa non dovrebbe sussistere alcuna problematica.

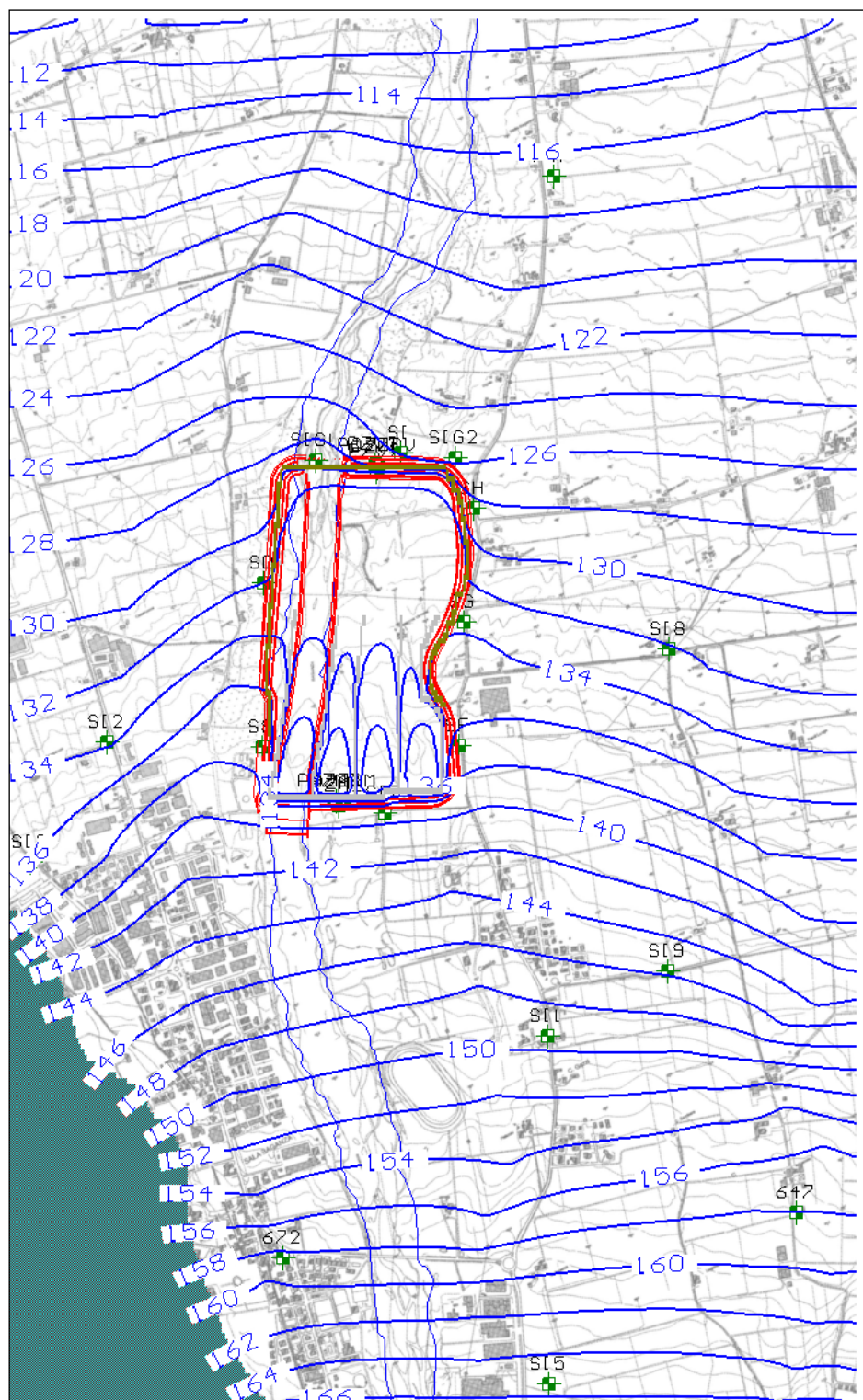


Figura 27 – Scenario 1: Piezometria dinamica della falda (m s.l.m.) nella “Soluzione A”

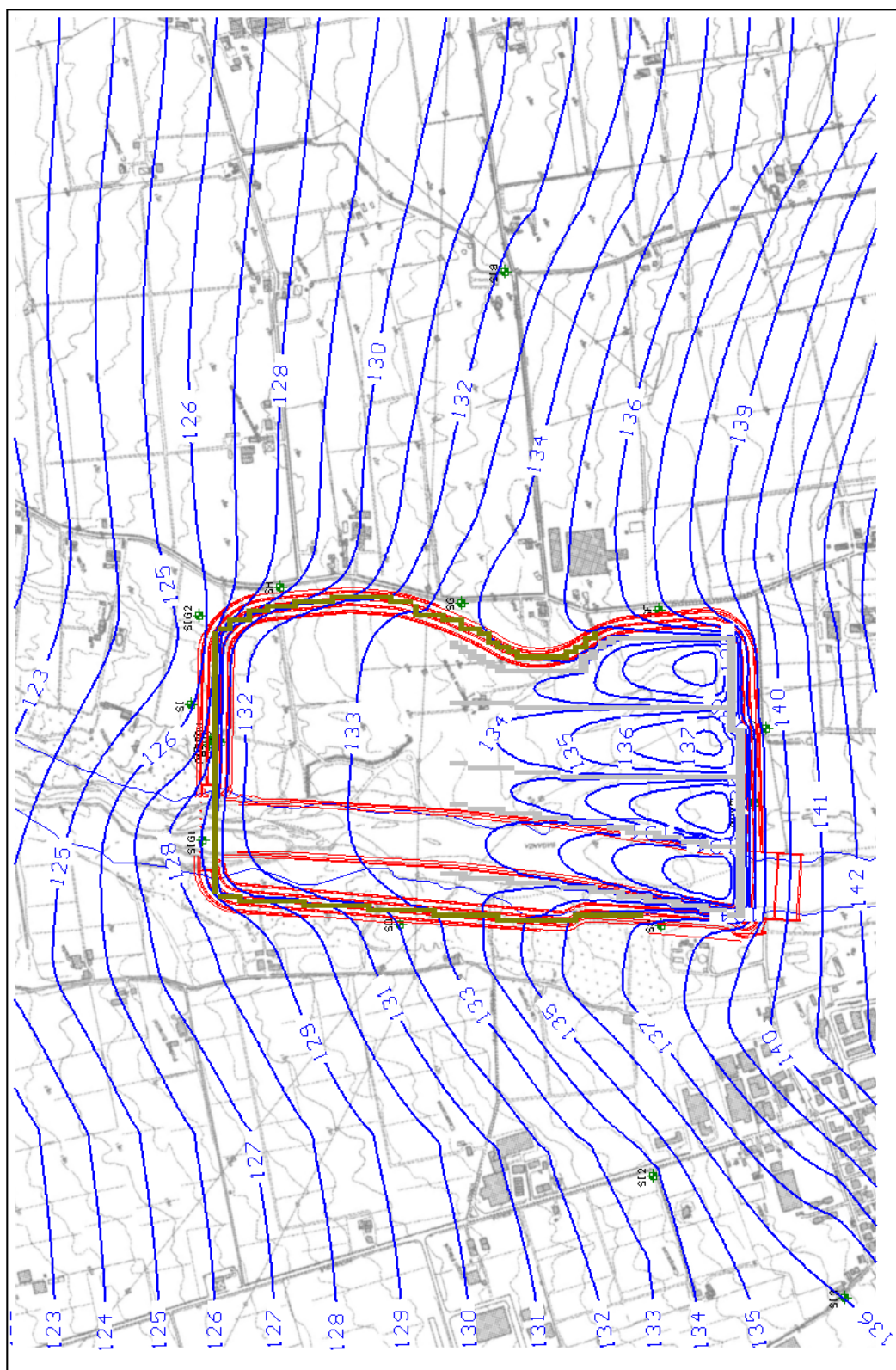


Figura 28 – Scenario 1: Piezometria dinamica della falda (m s.l.m.) nella “Soluzione A” (dettaglio)

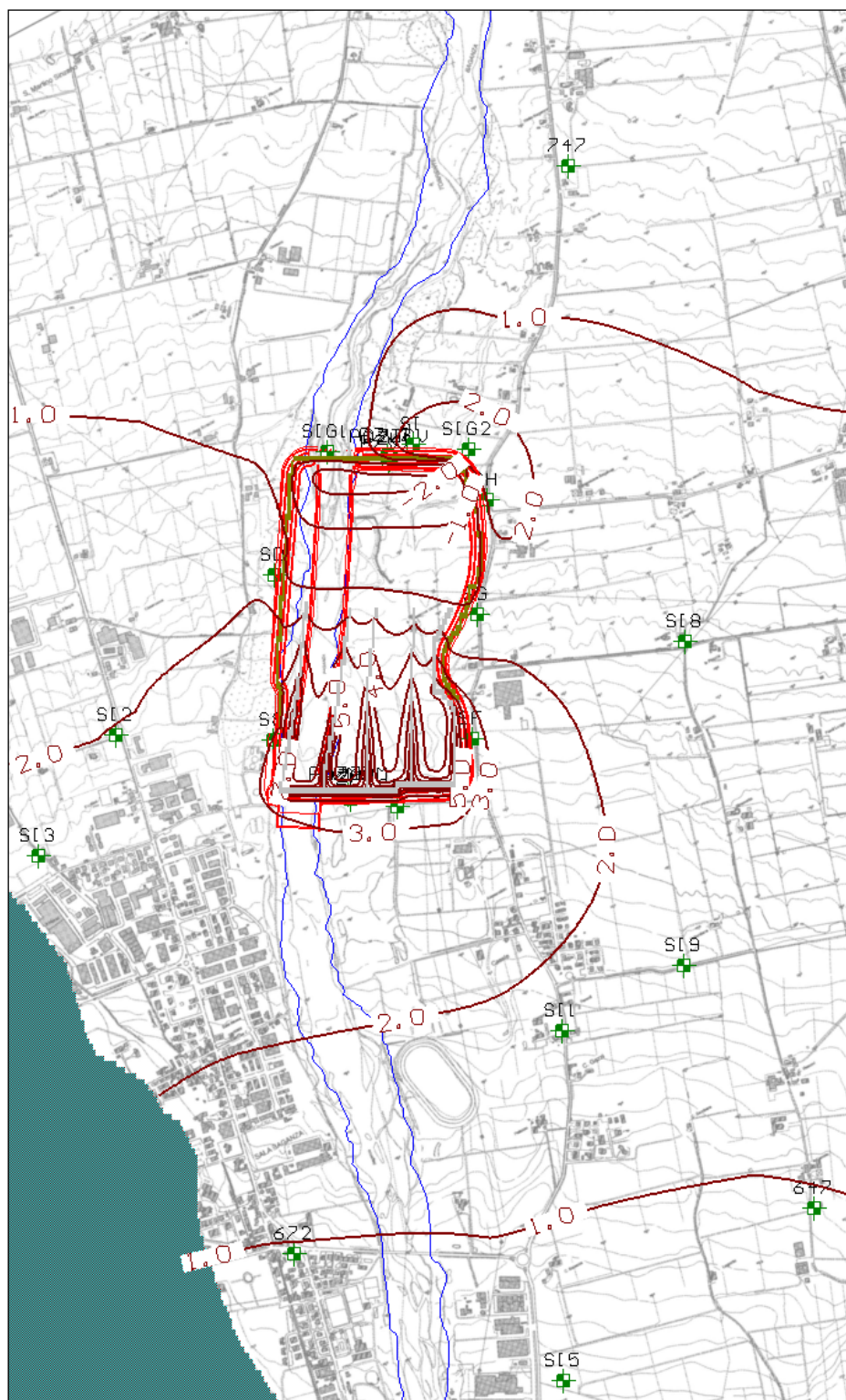


Figura 29 – Scenario 1: Isovariazione di livello della falda (in m) nella “Soluzione A”

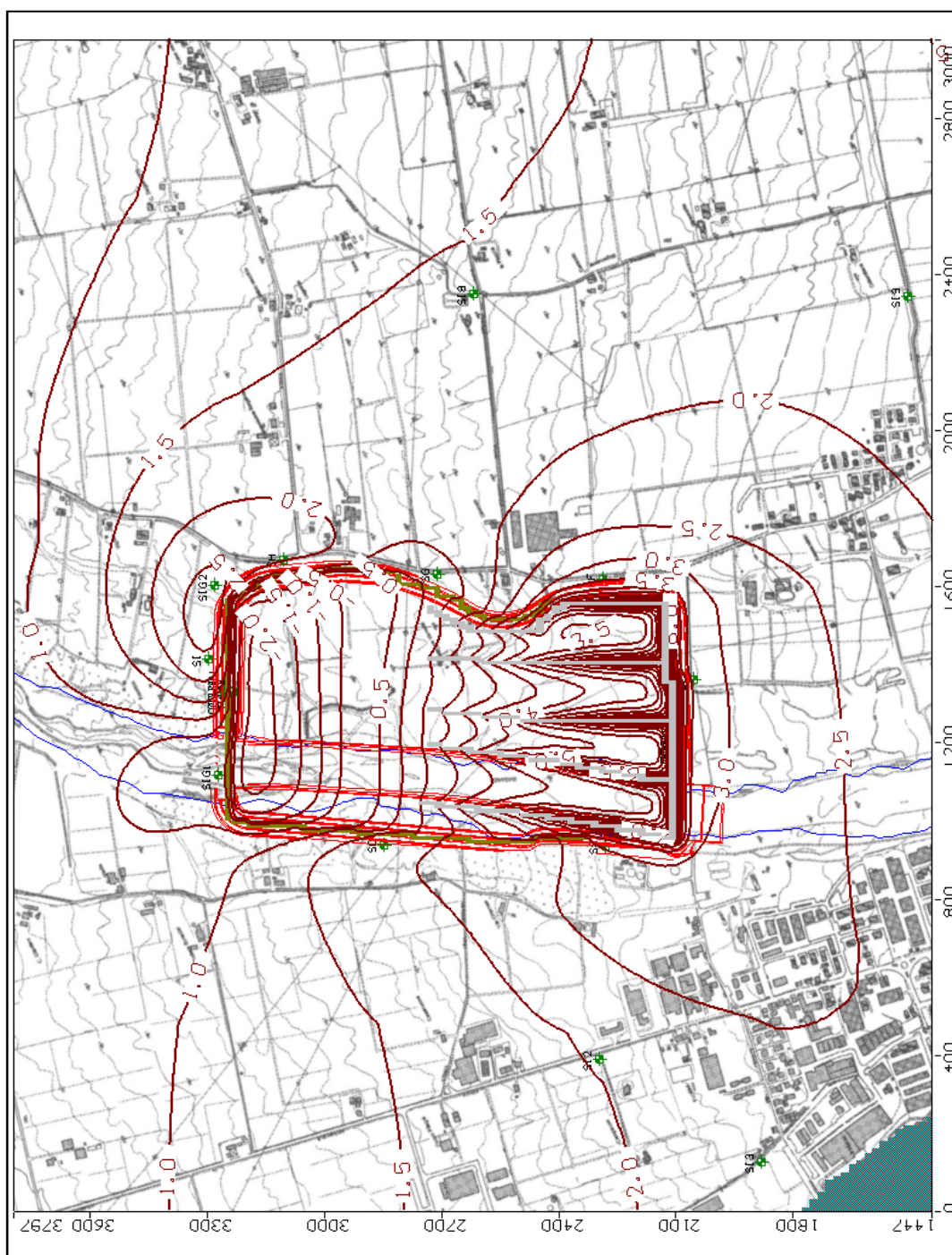


Figura 30 – Scenario 1: Isovariazione di livello della falda (in m) nella “Soluzione A” (dettaglio)

3.2 SCENARIO 2: REALIZZAZIONE DELLA CASSA DI ESPANSIONE SUL T. BAGANZA - SOLUZIONE A OTTIMIZZATA

Questo scenario simula la realizzazione della cassa di espansione sul T. Baganza secondo quanto proposto nella "Soluzione A ottimizzata" del progetto definitivo.

Anche in questo caso per la descrizione di dettaglio degli elementi progettuali che sono stati inseriti e discretizzati nel modello di flusso implementato (sistema di drenaggio, diaframature e argini) si rimanda a quanto già descritto in un precedente paragrafo.

Per questo scenario sono state eseguite due simulazioni che si differenziano per le diverse condizioni di rialimentazione della falda a valle della cassa di espansione.

Nella simulazione 2a si è considerato che la portata drenata dalla falda sia reimpressa lungo l'alveo del Baganza a valle del manufatto di sfioro A, mentre nella simulazione 2b si è ipotizzata una reimmissione lineare immediatamente a Nord lungo l'argine di valle del comparto 2.

Nella Figura 31 e nella Figura 32 inerenti la simulazione 2°, è riportata la piezometria dinamica (m s.l.m.), sia estesa sull'intero areale che di dettaglio del settore interessato dalla cassa di espansione.

Nella Figura 33 e nella Figura 34 sono invece riportate le isovariations piezometriche complessive indotte nella falda superficiale rispetto alla situazione di taratura.

Gli elaborati evidenziano che nel settore di monte la realizzazione della cassa in progetto determini, in ragione della minore profondità dello scavo in falda, una deformazione piezometrica alquanto inferiore rispetto a quella indotta dalla Soluzione A, mentre in quello di valle, soprattutto per quanto riguarda il settore a NE della cassa si verificano abbassamenti leggermente più marcati in conseguenza del maggiore sviluppo delle diaframature.

I quantitativi drenati dalla cassa di espansione, al fine di ottenere quote di falda sul fondo cassa compatibili con condizioni di sostanziale asciutta dello stesso, sono risultati i seguenti:

- portata complessivamente drenata dall'acquifero A0: circa 43 l/s;
- portata drenata dall'unità AES8a (primo strato): circa 38 l/s;
- portata drenata dall'unità AES8 (secondo strato): circa 5 l/s.

Rispetto alla simulazione della soluzione A si osserva una modesta riduzione della portata drenata, in ragione del fatto che la diaframmatura sottostante l'argine di separazione tra i comparti 1 e 2 determina un innalzamento della falda anche nel comparto 1 e il conseguente incremento della portata da drenare.

Alquanto inferiore risulta invece la portata drenata dall'unità AES8 in quanto poco interessata dallo scavo.

A ridosso del perimetro di monte si avrebbero quote piezometriche di circa 140-141 m s.l.m., mentre a ridosso dell'argine di valle di circa 124-126 m s.l.m..

La piezometria dinamica (Figura 31 e Figura 32) evidenzia principalmente:

- la minore deformazione delle isopieze connessa al drenaggio all'interno della cassa;
- la flessione verso Nord delle isopieze in corrispondenza degli argini lato Ovest dei comparti, provocata dalla presenza delle diaframature;

Le isovariazioni territoriali del livello di falda (Figura 33 e Figura 34) evidenziano:

- abbassamenti massimi tra 1.5 e 2 m in un intorno piuttosto limitato posto a ridosso dell'argine meridionale;
- abbassamenti insignificanti i quanto inferiori a 0.5 m presso il centro abitato di Sala Baganza;
- abbassamenti di circa 1 m presso la località Casale;
- abbassamenti di circa 1 m presso la località Carignano;
- abbassamenti variabili tra 2.5 e 3.5 m nel settore NE a ridosso della cassa, presso le cascine della località Vigna e la località Ducomò;
- abbassamenti da 0.5 a 3 m internamente al comparto 2 e abbassamenti medi di 2 m nel comparto1;
- innalzamenti di circa 0.5 m presso il depuratore di Sala Baganza.

Con specifico riferimento agli impatti indotti su opere di captazione sono attesi effetti limitati unicamente su pozzi domestici di profondità inferiore a 10 m ubicati nelle cascine a Nord dell'argine di valle, ma nessun effetto su altri pozzi privati, che superano la profondità di 20 m, e tanto meno su pozzi pubblici. Non sono attesi impatti significativi sui fontanili posti a meridione della cassa, mentre per quanto attiene i possibili impatti sugli edifici presenti nell'intorno, si potrebbero determinare potenziali effetti unicamente per la cascina in località Ducomò, escludibili in assenza di terreni limoso-argillosi entro la porzione di terreno desaturato.

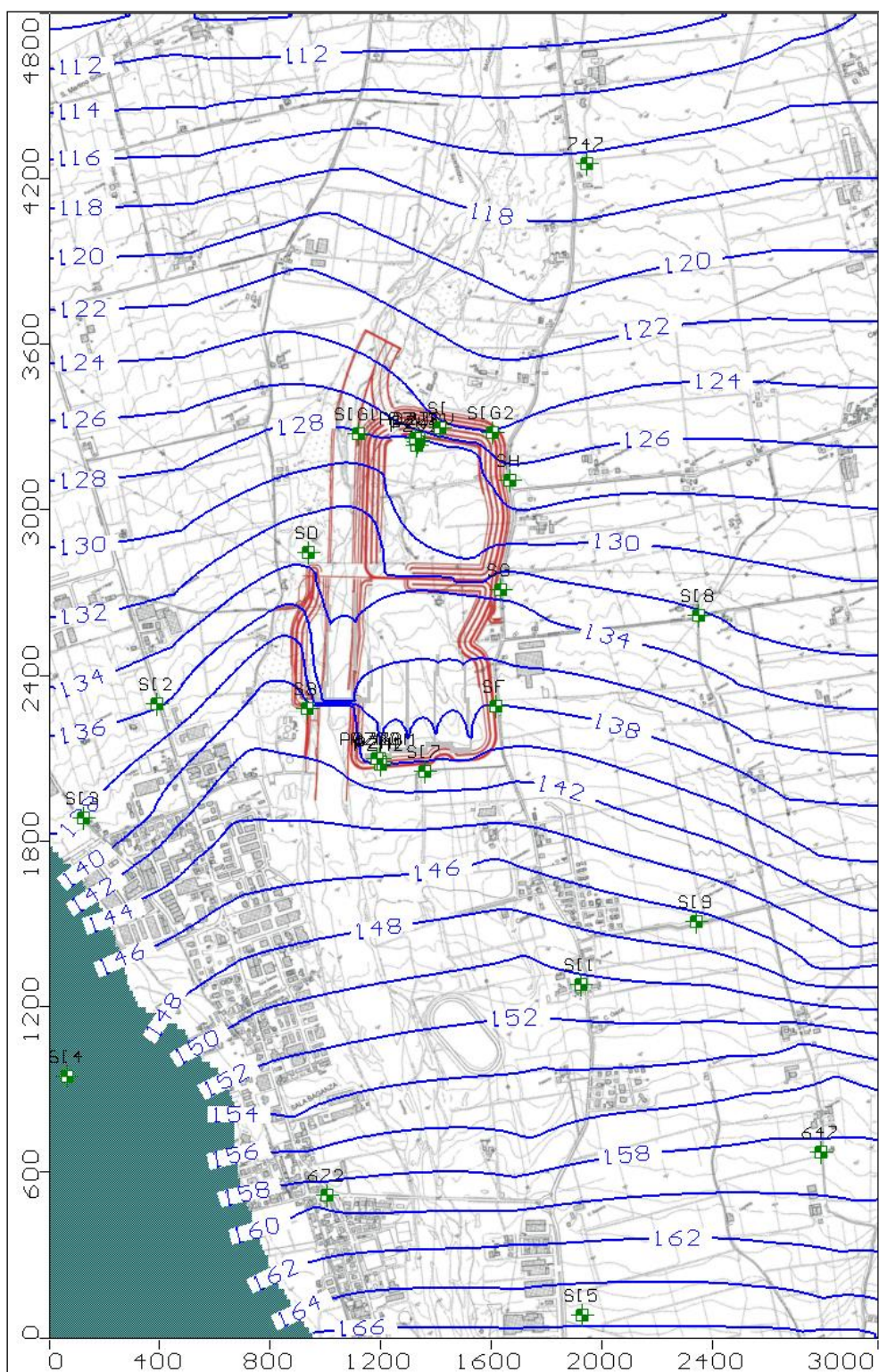


Figura 31 – Scenario 2: Simulazione 2a: Piezometria dinamica della falda (m s.l.m.) nella “Soluzione A ottimizzata”

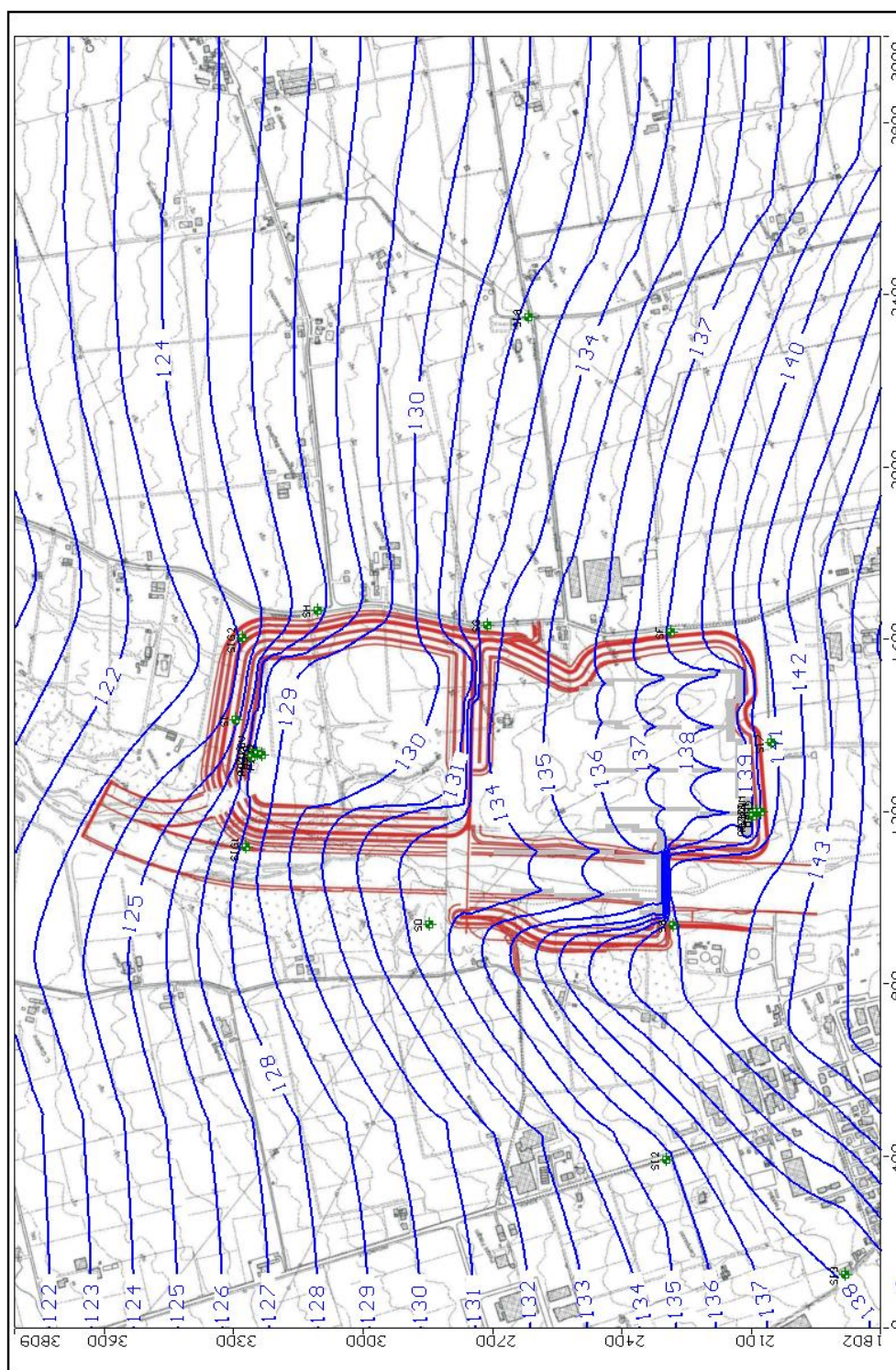


Figura 32 – Scenario 2: Simulazione 2a: Piezometria dinamica della falda (m s.l.m.) nella “Soluzione A ottimizzata” (dettaglio)

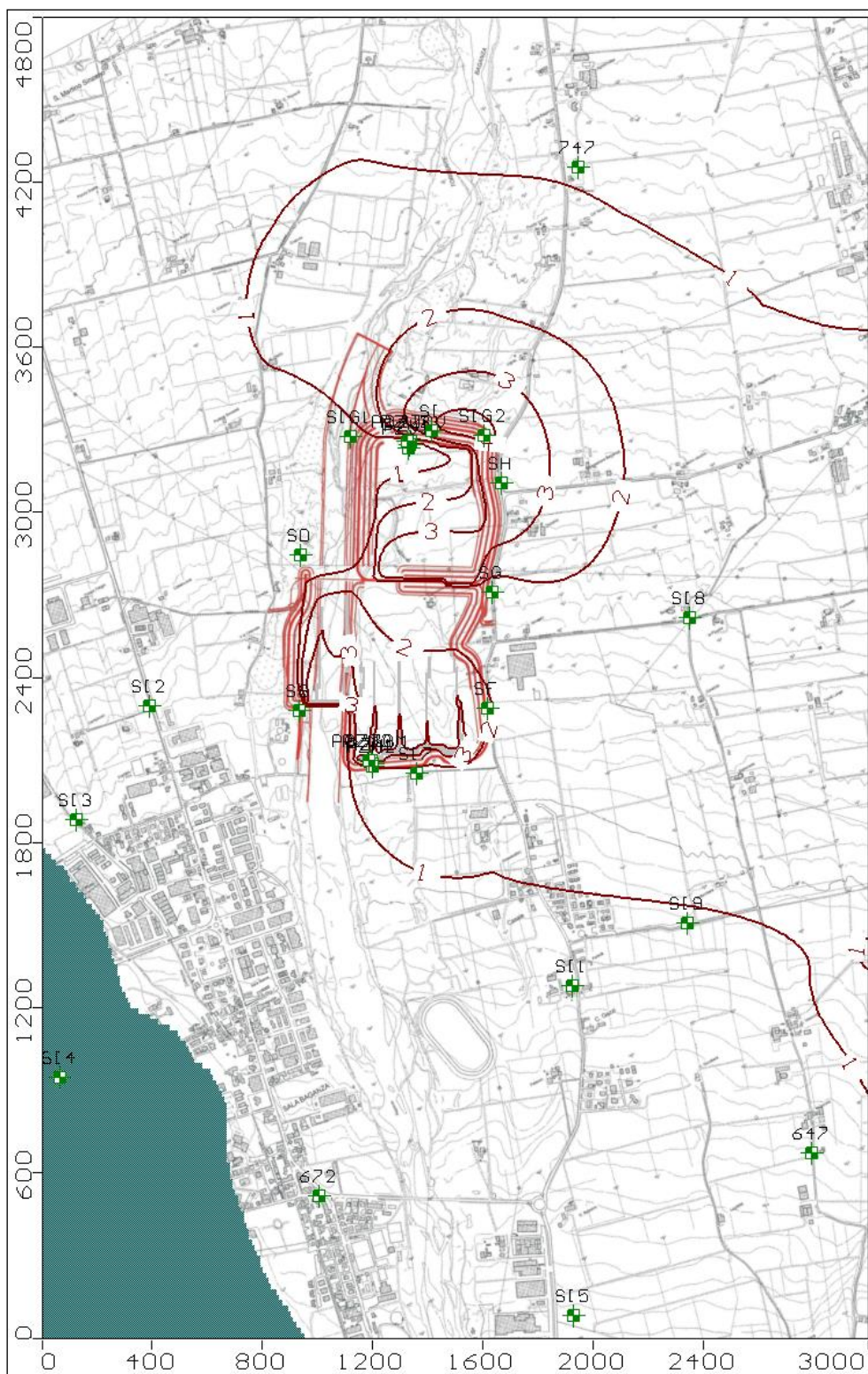


Figura 33 – Scenario 2: Simulazione 2a: Isovariazioni di livello della falda (in m) nella “Soluzione A ottimizzata”

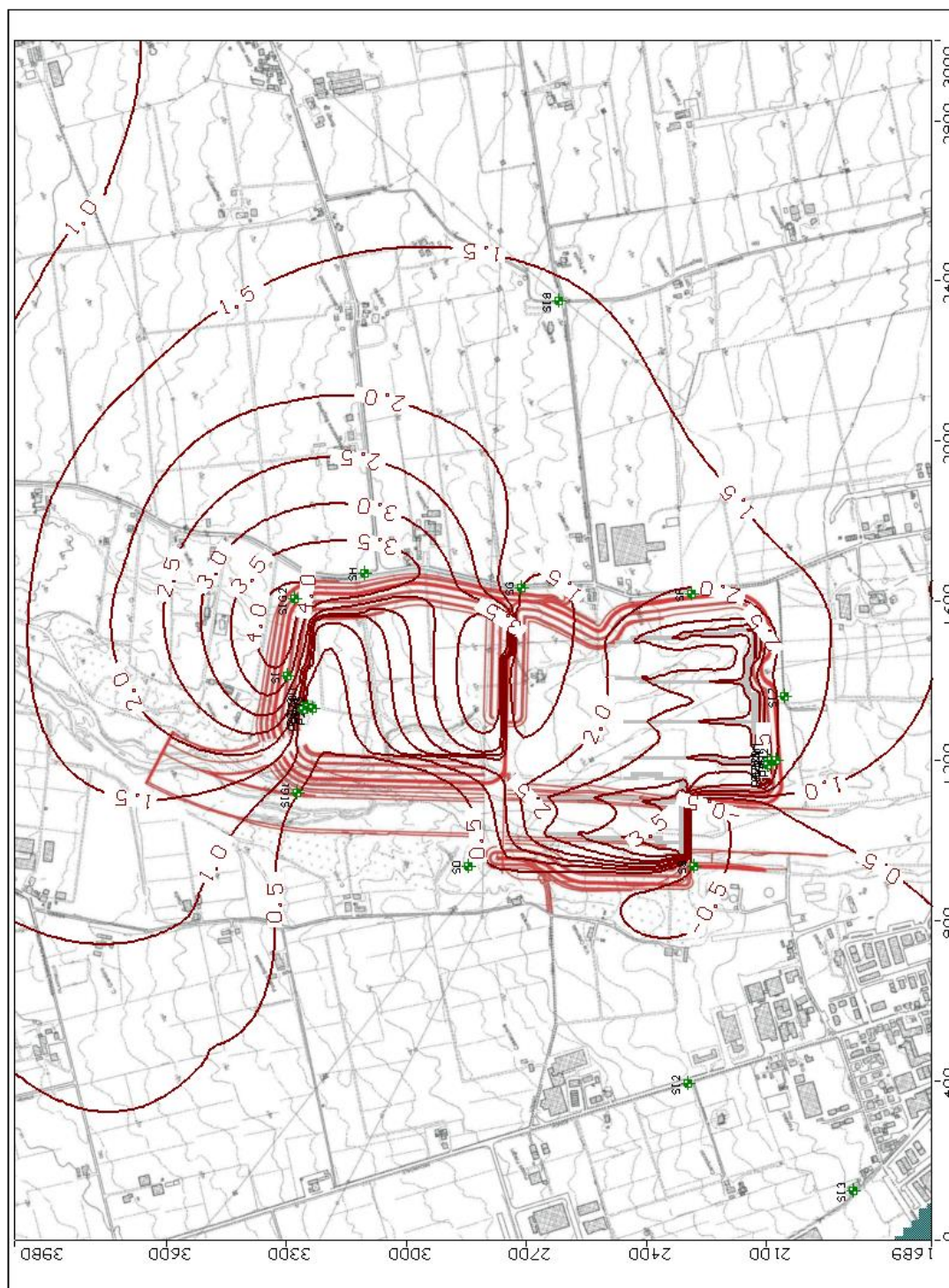


Figura 34 – Scenario 2: Simulazione 2a: Isovariazioni di livello della falda (in m) nella “Soluzione A ottimizzata” (dettaglio)

Gli abbassamenti indotti nel settore NE della cassa hanno suggerito di verificare un'ulteriore ipotesi che considerasse una rialimentazione della falda a valle dell'argine arealmente più diffusa (simulazione 2b), da attuare

con una trincea di ricarica che raccolga e disperda nel sottosuolo parte delle acque drenate dalla cassa di espansione.

Nella Figura 35 e nella Figura 36, inerenti la simulazione 2b è riportata la piezometria dinamica (m s.l.m.) estesa e di dettaglio, mentre nella Figura 37 e nella Figura 38 sono mostrate le isovariazioni piezometriche indotte nella falda superficiale rispetto alla situazione di taratura.

Gli elaborati evidenziano deformazioni piezometriche sostanzialmente analoghe a quelle della precedente simulazioni, fatta eccezione per il settore NE del comparto 2 dove si ha una riduzione degli abbassamenti indotti dalle diaframature.

Anche i quantitativi drenati dalla cassa di espansione, sono simili a quelli della precedente simulazione in quanto l'elaborazione modellistica ha restituito i seguenti valori:

- portata complessivamente drenata dall'acquifero A0: circa 40 l/s;
- portata drenata dall'unità AES8a (primo strato): circa 35 l/s;
- portata drenata dall'unità AES8 (secondo strato): circa 5 l/s.

A ridosso del perimetro di monte si avrebbero quote piezometriche di circa 140-141 m s.l.m., mentre a ridosso dell'argine di valle di circa 126-126.5 m s.l.m..

La piezometria dinamica (Figura 35 e Figura 36) evidenzia principalmente:

- la leggera deformazione delle isopieze connessa al drenaggio all'interno della cassa;
- la flessione verso Nord delle isopieze soprattutto in corrispondenza dell'argine lato Ovest del comparto 1, provocata dalla presenza della diafammatura;

Le isovariazioni territoriali del livello di falda (Figura 37 e Figura 38) evidenziano:

- abbassamenti massimi tra 1.5 e 2 m in un intorno piuttosto limitato posto a ridosso dell'argine meridionale;
- abbassamenti insignificanti, dell'ordine di 0.5 m, presso il centro abitato di Sala Baganza;
- abbassamenti di circa 1 m presso la località Casale;
- abbassamenti di circa 1 m presso la località Carignano;
- abbassamenti variabili tra 1 e 1.5 m nel settore NE a ridosso della cassa, con un massimo di 2.5 m in vicinanza dell'argine Est del comparto 2;
- abbassamenti da 0.5 a 3.5 m internamente al comparto 2 e abbassamenti medi di 2 m nel comparto 1;
- abbassamenti di circa 0.5 m presso il depuratore di Sala Baganza.

Con specifico riferimento agli impatti indotti sui pozzi non sono attesi effetti negativi quali che siano le loro caratteristiche di profondità e di uso, come non sono attesi impatti significativi sui fontanili posti a meridione della

cassa. Anche per quanto attiene potenziali impatti sugli edifici nell'intorno della cassa di espansione non è atteso alcun effetto.

Tra quelle verificate, quella in oggetto è pertanto la soluzione che consente di ottenere i minori effetti in termini di impatto.

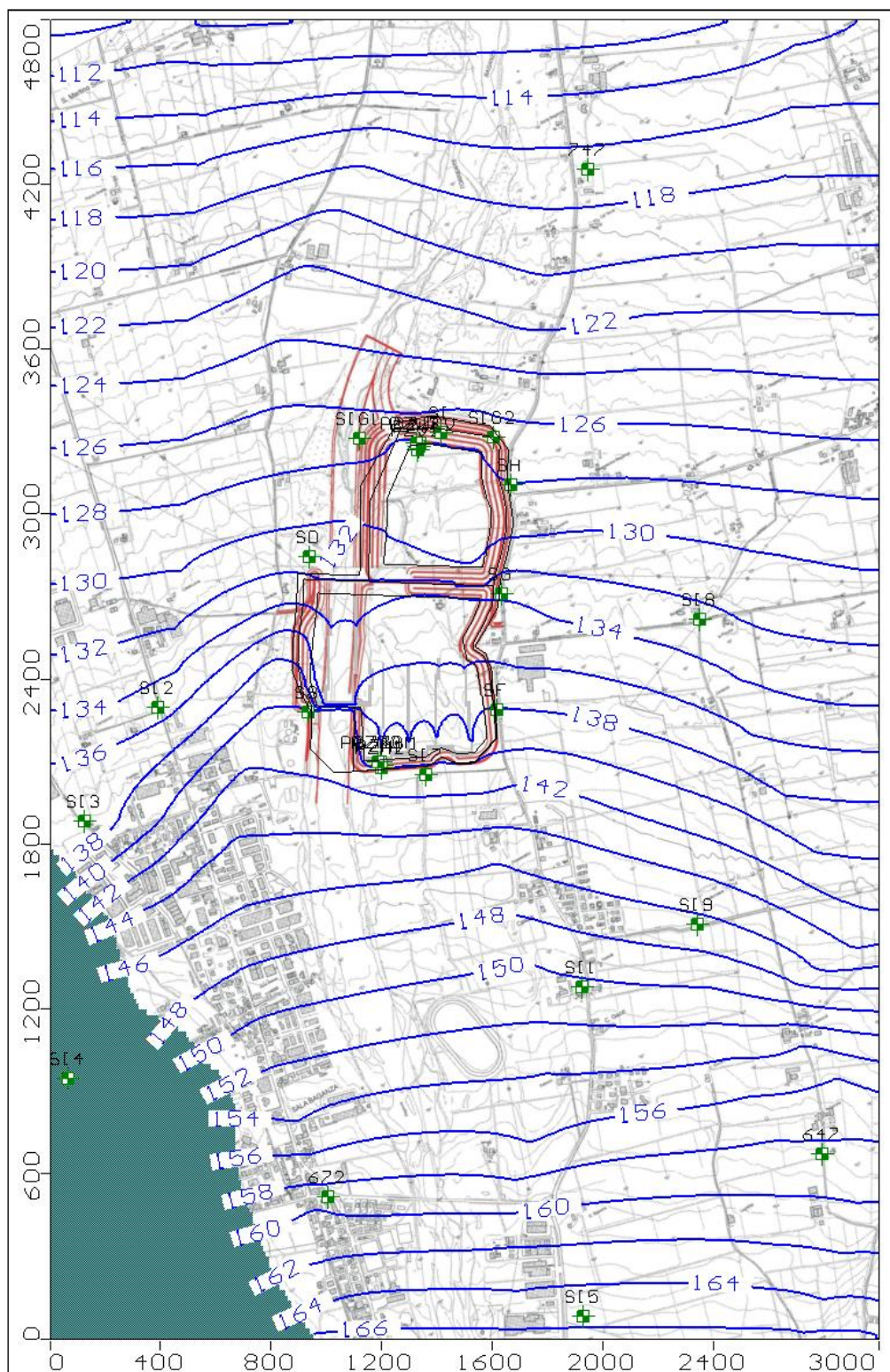


Figura 35 – Scenario 2 – Simulazione 2b: Piezometria dinamica della falda (m s.l.m.) nella “Soluzione A ottimizzata”

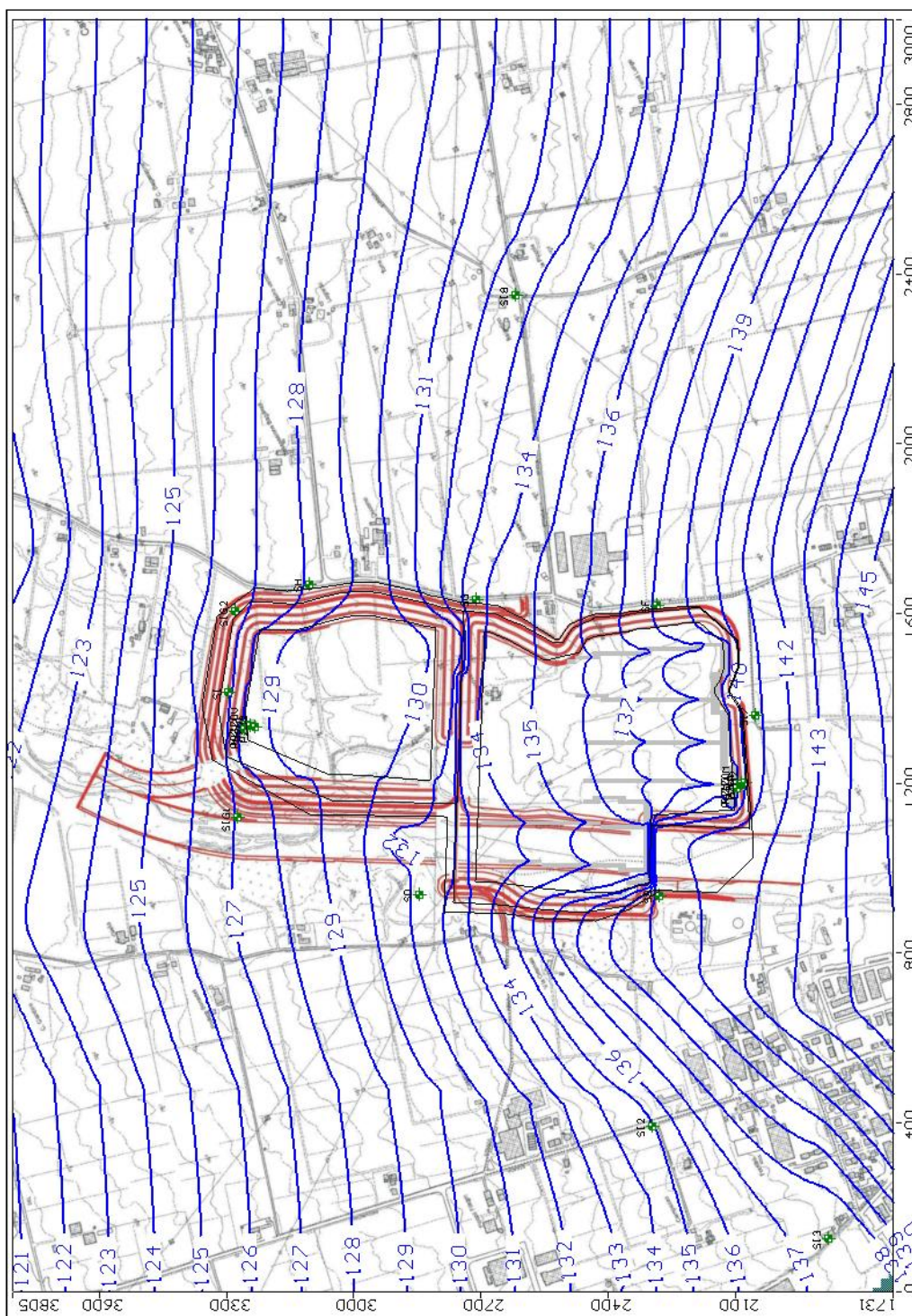


Figura 36 – Scenario 2 – Simulazione 2b: Piezometria dinamica della falda (m s.l.m.) nella “Soluzione A ottimizzata” (dettaglio)

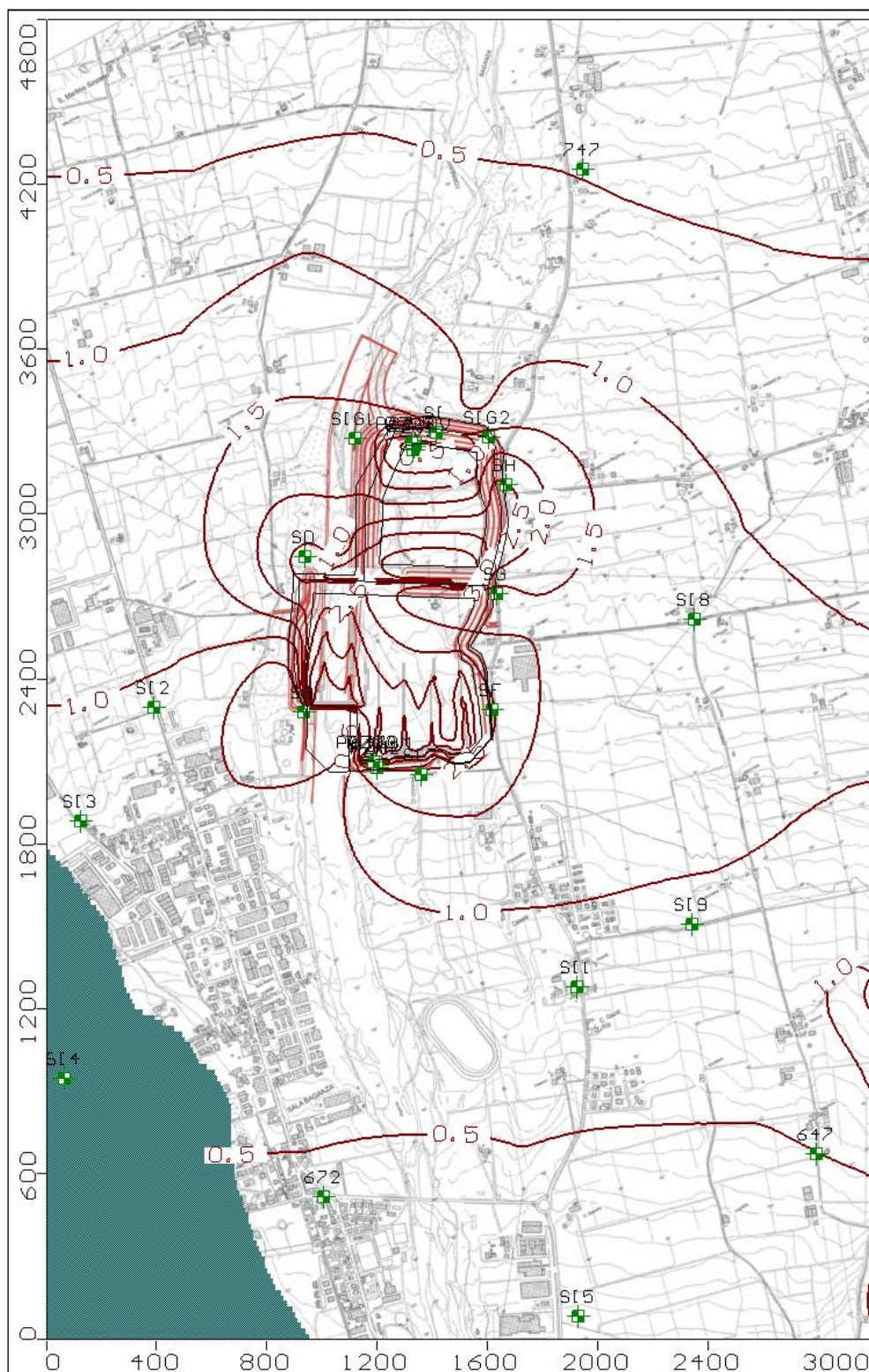


Figura 37 – Scenario 2 – Simulazione 2b: Isovariazioni di livello della falda (in m) nella “Soluzione A ottimizzata”

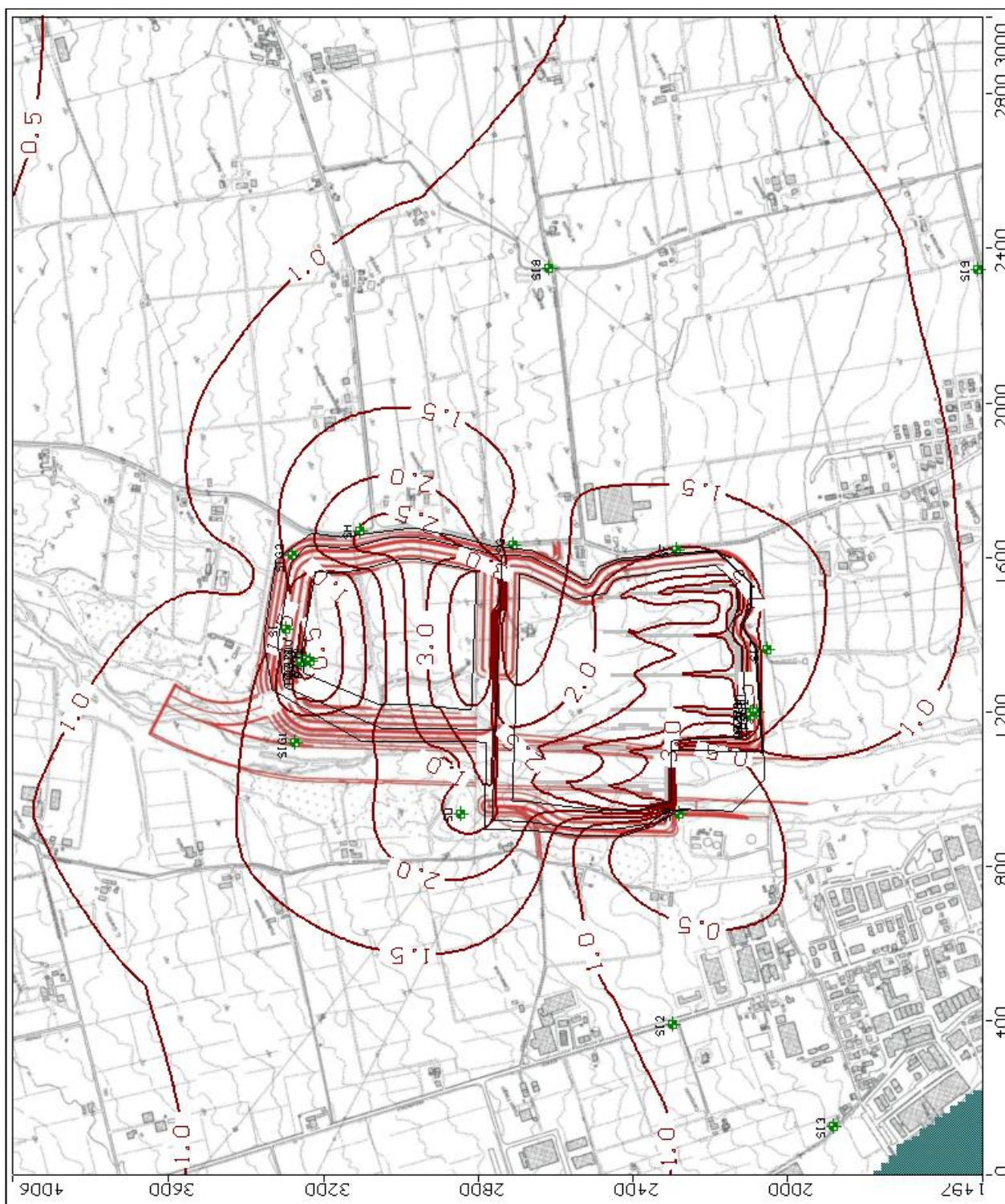


Figura 38 – Scenario 2 – Simulazione 2b: Isovazioni di livello della falda (in m) nella “Soluzione A ottimizzata” (dettaglio)

3.3 SCENARIO 3: SIMULAZIONE DEGLI EFFETTI CONSEGUENTI AGLI INTERVENTI DI SCAVO E DRENAGGIO DELLA FALDA DALL'ALVEO DEL BAGANZA

Questo scenario è stato effettuato per la sola “soluzione A ottimizzata”, con la finalità di simulare alcuni effetti temporanei connessi alla realizzazione dell'opera tra cui lo scavo lungo l'alveo del Baganza per la realizzazione delle briglie nel settore di monte dell'opera e i conseguenti impatti provocati dal drenaggio delle acque di falda.

Le simulazioni sono state effettuate in un primo caso ipotizzando di procedere direttamente all'escavazione in alveo (simulazione 3a) e in un secondo caso nell'ipotesi di far precedere alle attività di scavo la realizzazione dei diaframmi sia sul lato Ovest del comparto 1 che trasversalmente al corso d'acqua all'altezza delle briglie (simulazione 3b).

Nelle Figura 39 e Figura 40, inerenti la simulazione 3a sono rispettivamente riportate la piezometria dinamica (m s.l.m.) e le isovariations del livello di falda, mentre nelle Figura 41 e Figura 42 la piezometria dinamica e le isovariations di livello per la simulazione 3b.

In riferimento alla simulazione 3a il modello ha restituito i seguenti valori di portata drenata dallo scavo in alveo Baganza:

- portata complessivamente drenata dall'acquifero A0: circa 10 l/s;
- portata drenata dall'unità AES8a (primo strato): circa 6 l/s;
- portata drenata dall'unità AES8 (secondo strato): circa 4 l/s.

mentre in riferimento alla simulazione 3b i seguenti valori:

- portata complessivamente drenata dall'acquifero A0: circa 6 l/s;
- portata drenata dall'unità AES8a (primo strato): circa 4 l/s;
- portata drenata dall'unità AES8 (secondo strato): circa 2 l/s.

in termini di isoabbassamenti entrambe le elaborazioni evidenziano risultati compatibili in termini di potenziali impatti. La simulazione 3a (Figura 40) mostra abbassamenti massimi compresi tra 2 e 2.5 m in corrispondenza delle abitazioni poste in vicinanza dello scavo in alveo e del depuratore di Sala Baganza e abbassamenti compresi tra 1.5 e 2 nel settore settentrionale dell'abitato di Sala Baganza.

Impatti ancor meno rilevanti sono attesi nel caso di procedere a una preventiva costruzione dei diaframmi (simulazione 3b in Figura 42) in conseguenza di abbassamenti inferiori a 2 m in tutti i settori esterni allo scavo e al sedime della cassa e inferiori a 0.5 m presso l'abitato di Sala Baganza.

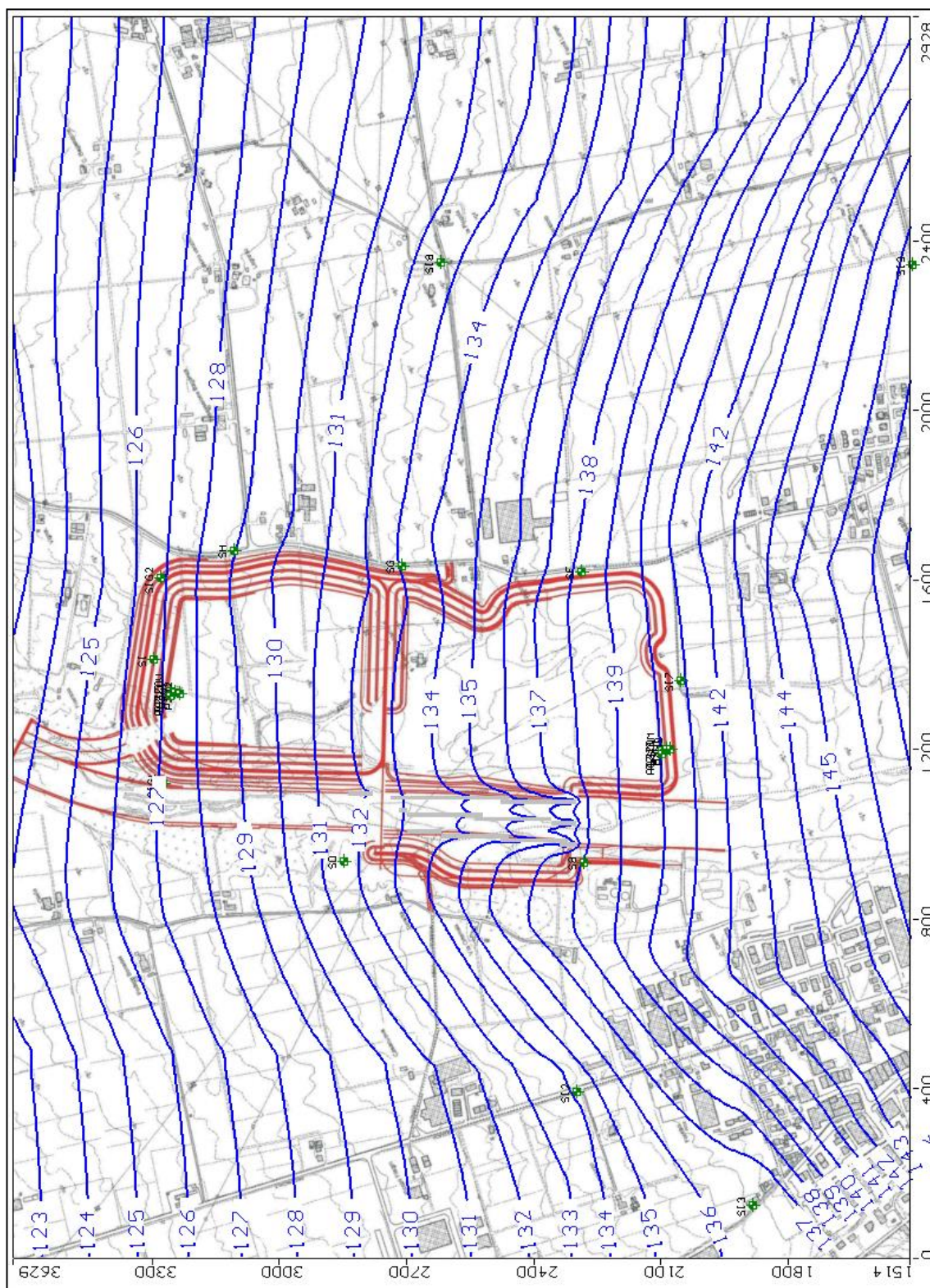


Figura 39 – Scenario 3 – Simulazione 3a: Piezometria dinamica (m s.l.m.)

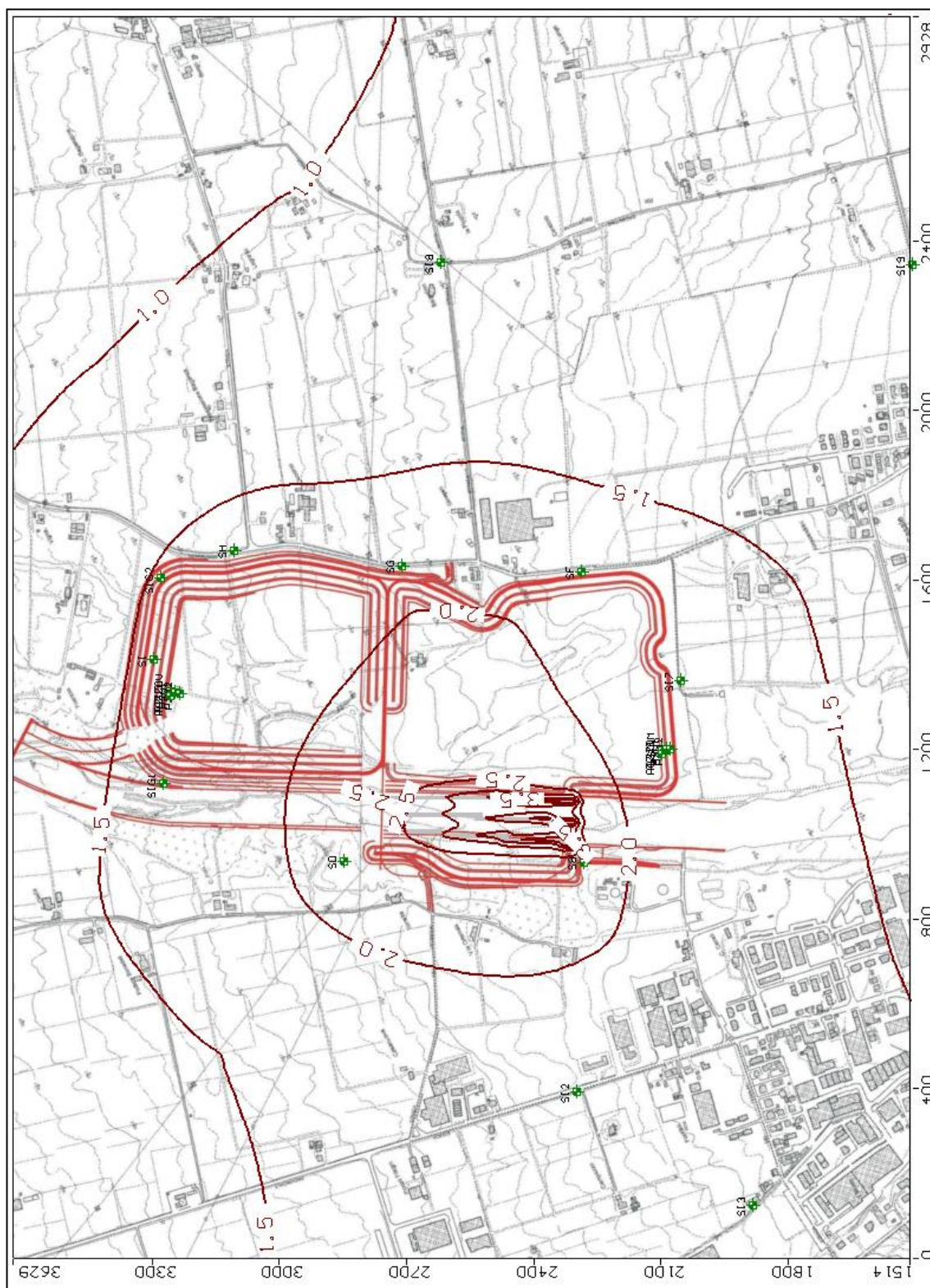


Figura 40 – Scenario 3 – Simulazione 3a: Isovazioni di livello della falda (in m)

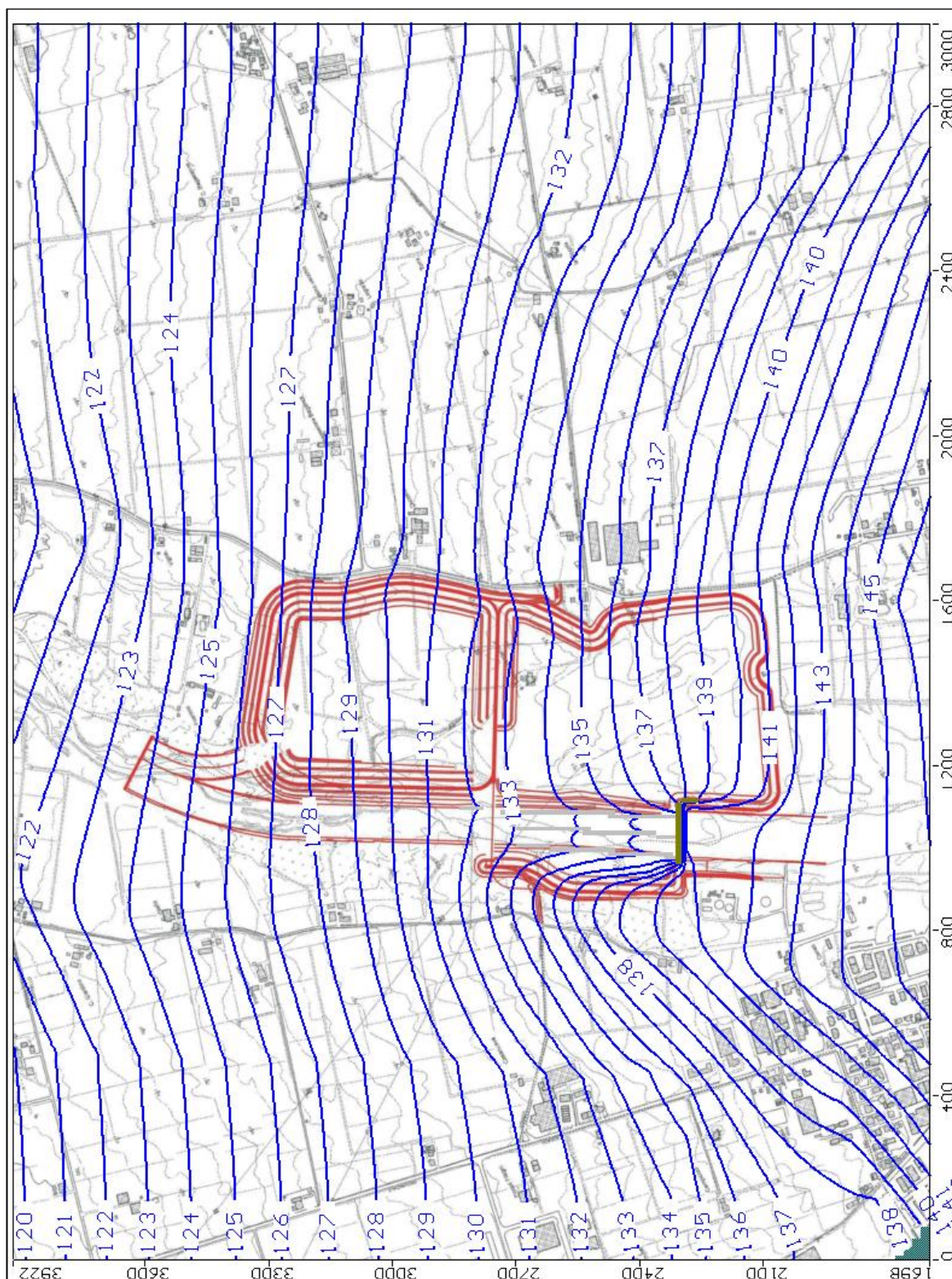


Figura 41 – Scenario 3 – Simulazione 3b: Piezometria dinamica (m s.l.m.)

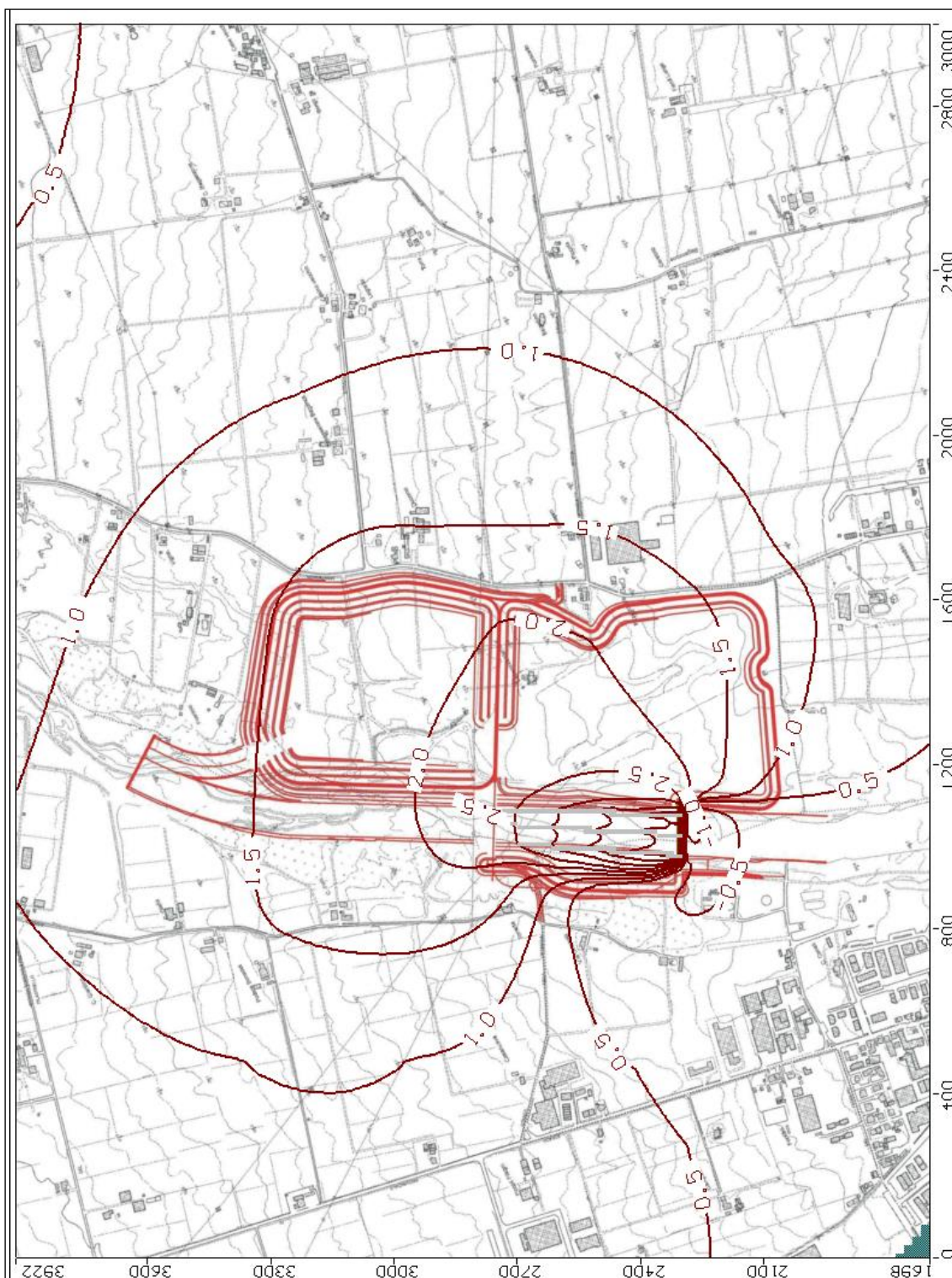


Figura 42 – Scenario 3 – Simulazione 3b: Isovariazioni di livello della falda (in m)

3.4 SCENARIO 4: SIMULAZIONE DEGLI EFFETTI INDOTTI SULLA FALDA DALLA CASSA DI ESPANSIONE IN CONDIZIONI DI ALTO PIEZOMETRICO

In questo scenario sono state verificate le isovariations del livello di falda prodotte dalla costruzione della cassa di espansione in condizioni di altezza piezometrica correlata alla piovosità media annua del settore in oggetto, principalmente con la finalità di verificare l'incremento delle portate da drenare nei periodi contraddistinti da maggiori portate della falda.

Come evidenziato in fase di verifica del modello, l'aumento dell'infiltrazione efficace determinerebbe un innalzamento dei livelli di falda dell'ordine di circa 2 m, che rappresenta un valore all'incirca paragonabile alla massima escursione misurata nel periodo di monitoraggio 2012-2013 della falda freatica contenuta nell'acquifero A0.

Tale condizione è stata verificata sia per la "Soluzione A" che per la Soluzione A ottimizzata", per le quali i risultati in termini di piezometria dinamica sono riportate nella Figura 43 e nella Figura 44 (soluzione A) e Figura 47 e Figura 48 (soluzione A ottimizzata).

In termini di portate drenate la modellazione inerente la "soluzione A" ha restituito i seguenti risultati.

- portata complessivamente drenata dall'acquifero A0: circa 55 l/s;
- portata drenata dall'unità AES8a (primo strato); circa 26 l/s;
- portata drenata dall'unità AES8 (secondo strato); circa 29 l/s.

mentre in riferimento alla "Soluzione A ottimizzata" quantitativi pari a:

- portata complessivamente drenata dall'acquifero A0: circa 48 l/s;
- portata drenata dall'unità AES8a (primo strato): circa 42 l/s;
- portata drenata dall'unità AES8 (secondo strato): circa 6 l/s.

La deformazione indotta sul campo di moto della falda freatica mostra sostanziali analogie con quella riportata negli scenari 1 e 2 con la sola eccezione dei valori di quota piezometrica.

Per quanto attiene invece le elaborazioni che evidenziano le isovariations del livello di falda, mostrate nella Figura 45 e nella Figura 46 per la "Soluzione A" e nelle Figura 49 e Figura 50 per la "Soluzione A ottimizzata", si riscontrano valori superiori in quanto, mantenendosi fisse le quote di drenaggio al fondo della cassa di espansione, una condizione di partenza che preveda una maggiore elevazione della falda determinerà abbassamenti dell'ordine di circa 2 m superiori a quelli verificati negli scenari 1 e 2.

Tale situazione non deve tuttavia creare alcuna preoccupazione in riferimento agli impatti prodotti nei confronti di pozzi e fontanili e soprattutto degli edifici presenti nell'intorno, che devono essere considerati della medesima entità di quelli dei pari scenari descritti in precedenza.

Infatti, l'innalzamento di circa 2 m rispetto alle condizioni di portata di magra della falda misurate nel luglio 2016, deve essere considerato all'interno della naturale oscillazione stagionale della falda e pertanto già "assimilato" in termini di impatto, sia dagli elementi dell'ambiente naturale (fontanili), sia da quelli antropici (pozzi) oltre che dagli eventuali cedimenti già "maturati" nei terreni.

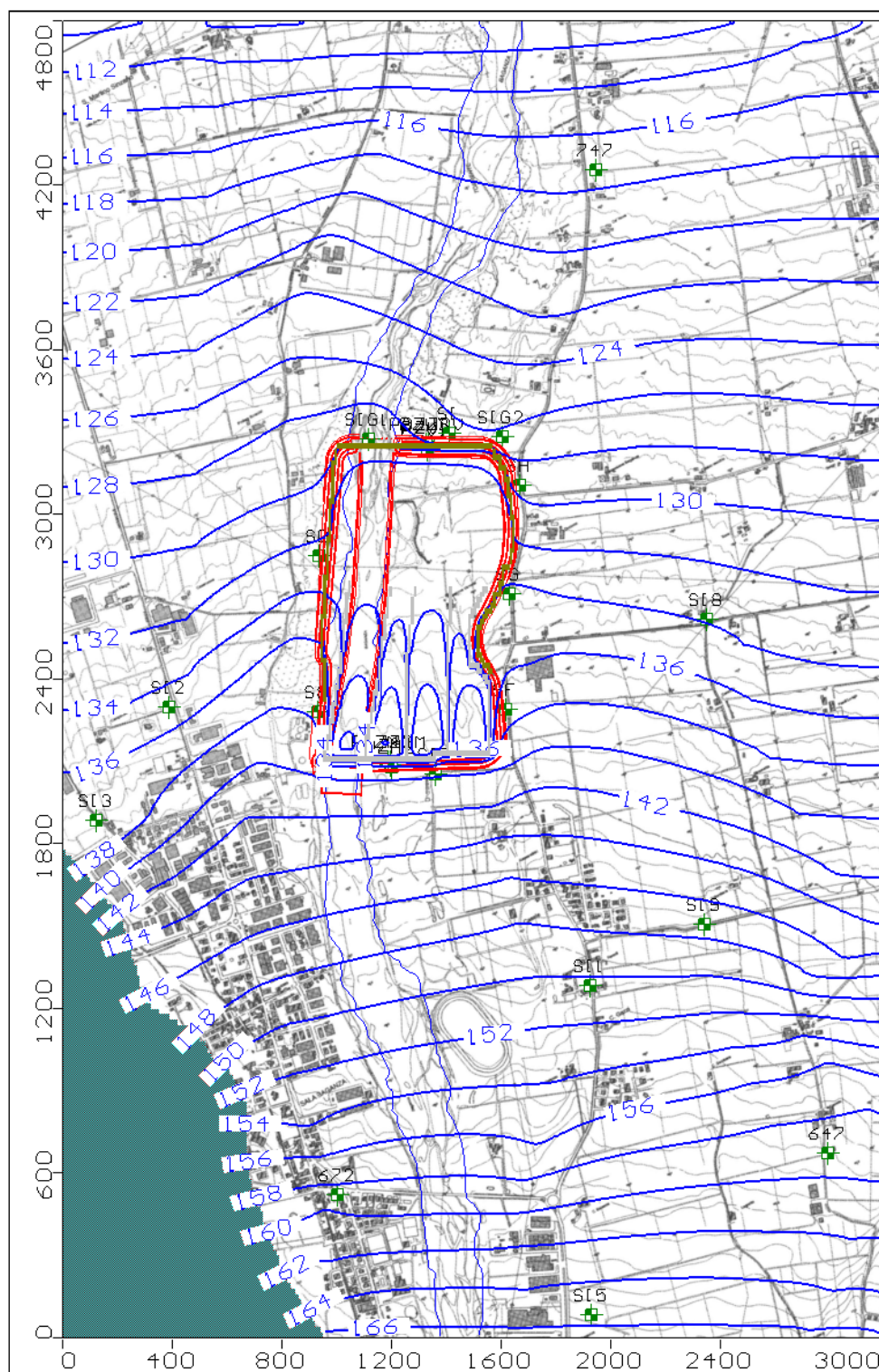


Figura 43 – Scenario 4 – Piezometria dinamica (m s.l.m.) nella “Soluzione A”

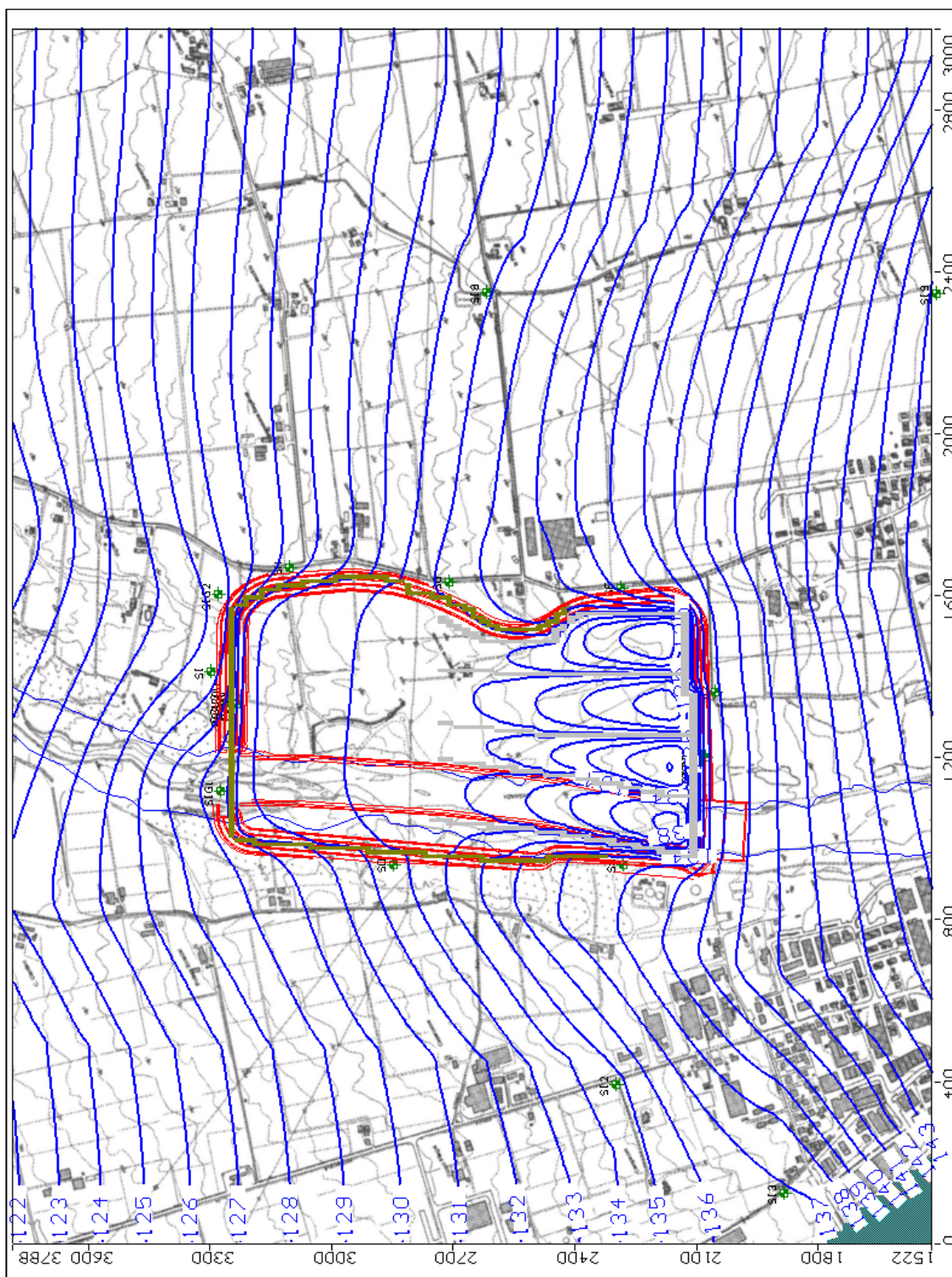


Figura 44 – Scenario 4 – Piezometria dinamica (m s.l.m.) nella “Soluzione A” (dettaglio)

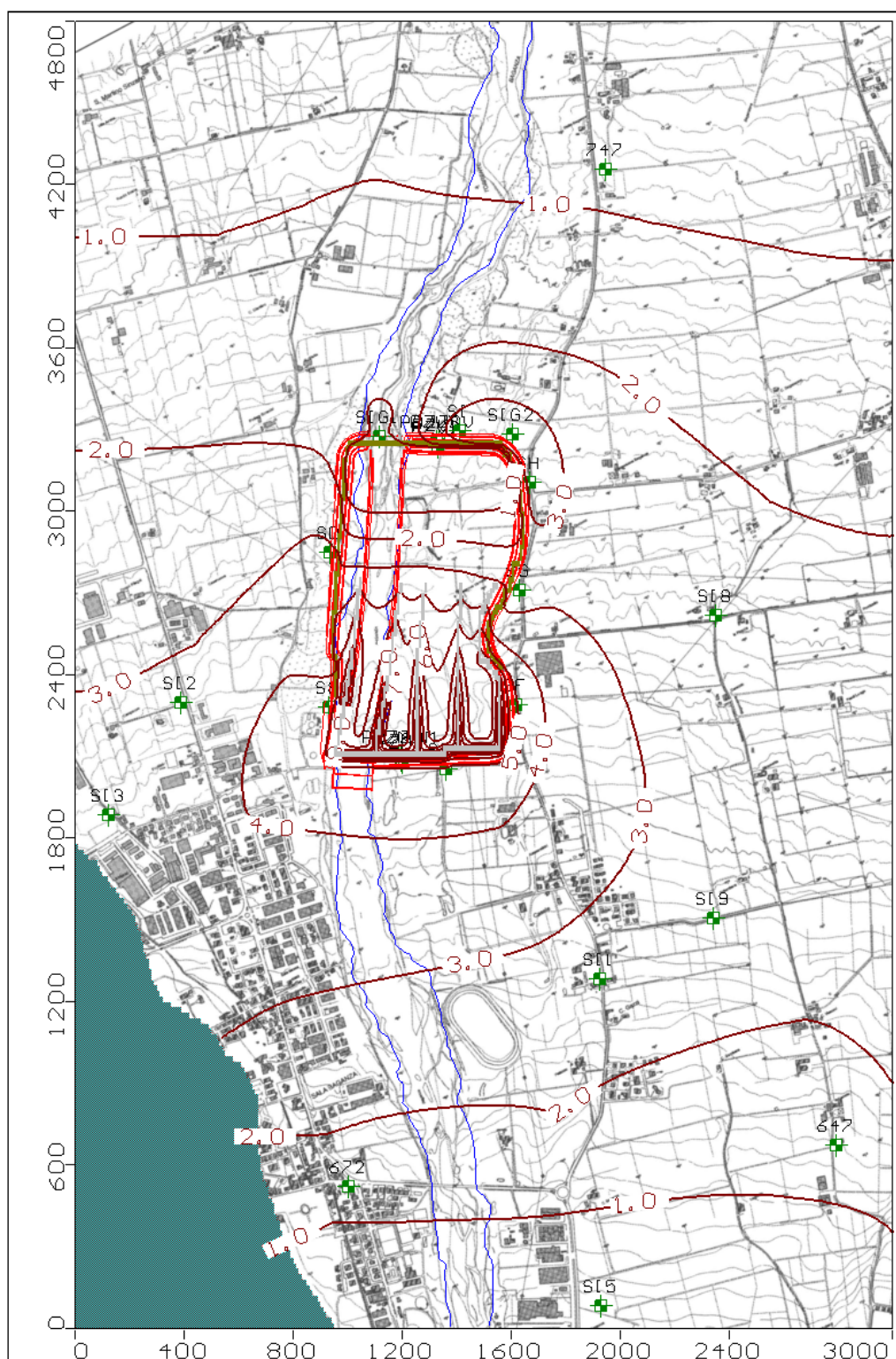


Figura 45 – Scenario 4 – Isovazioni di livello della falda (in m) nella “Soluzione A”

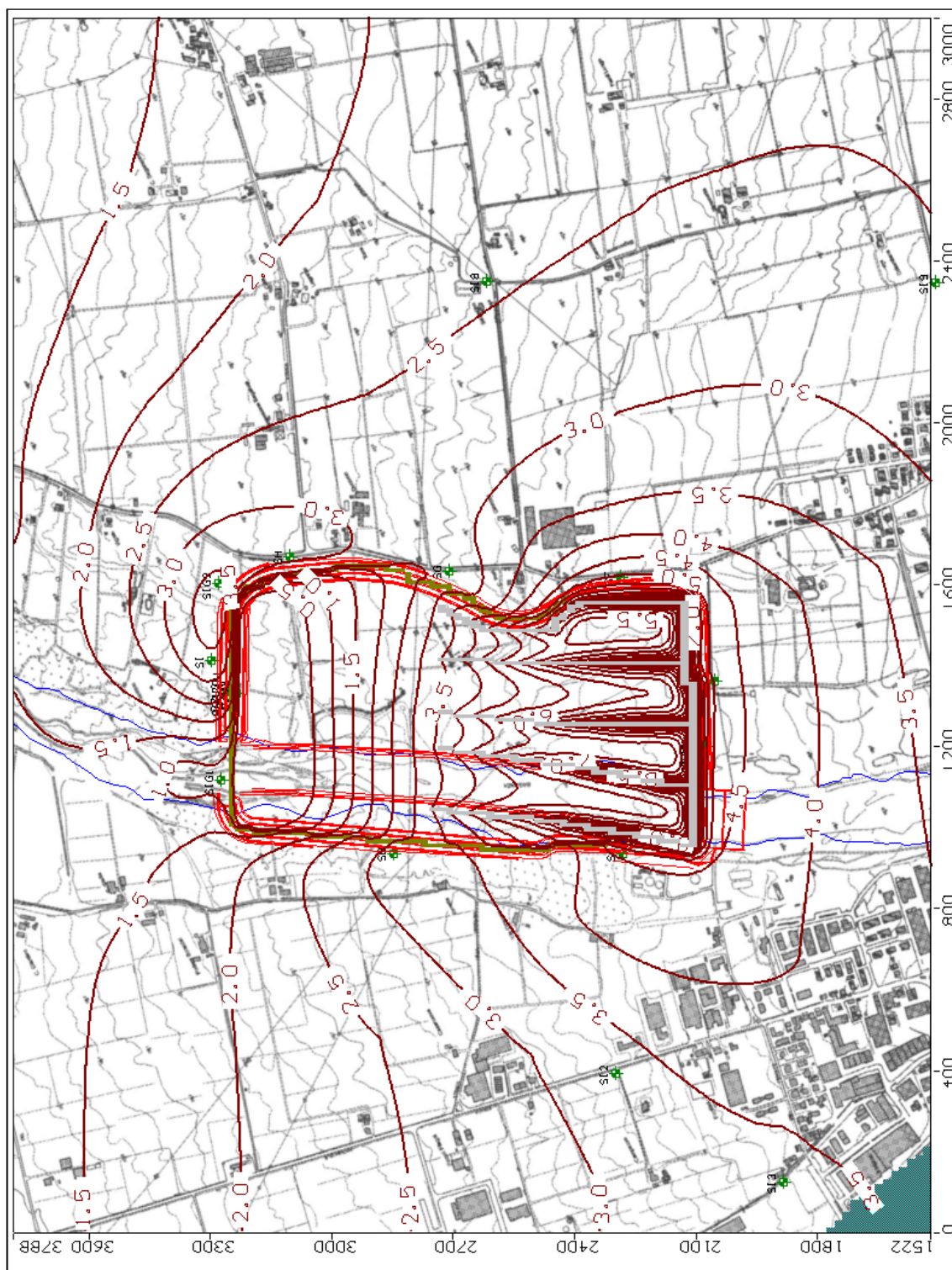


Figura 46 – Scenario 4 – Isovariazioni di livello della falda (in m) nella “Soluzione A” (dettaglio)

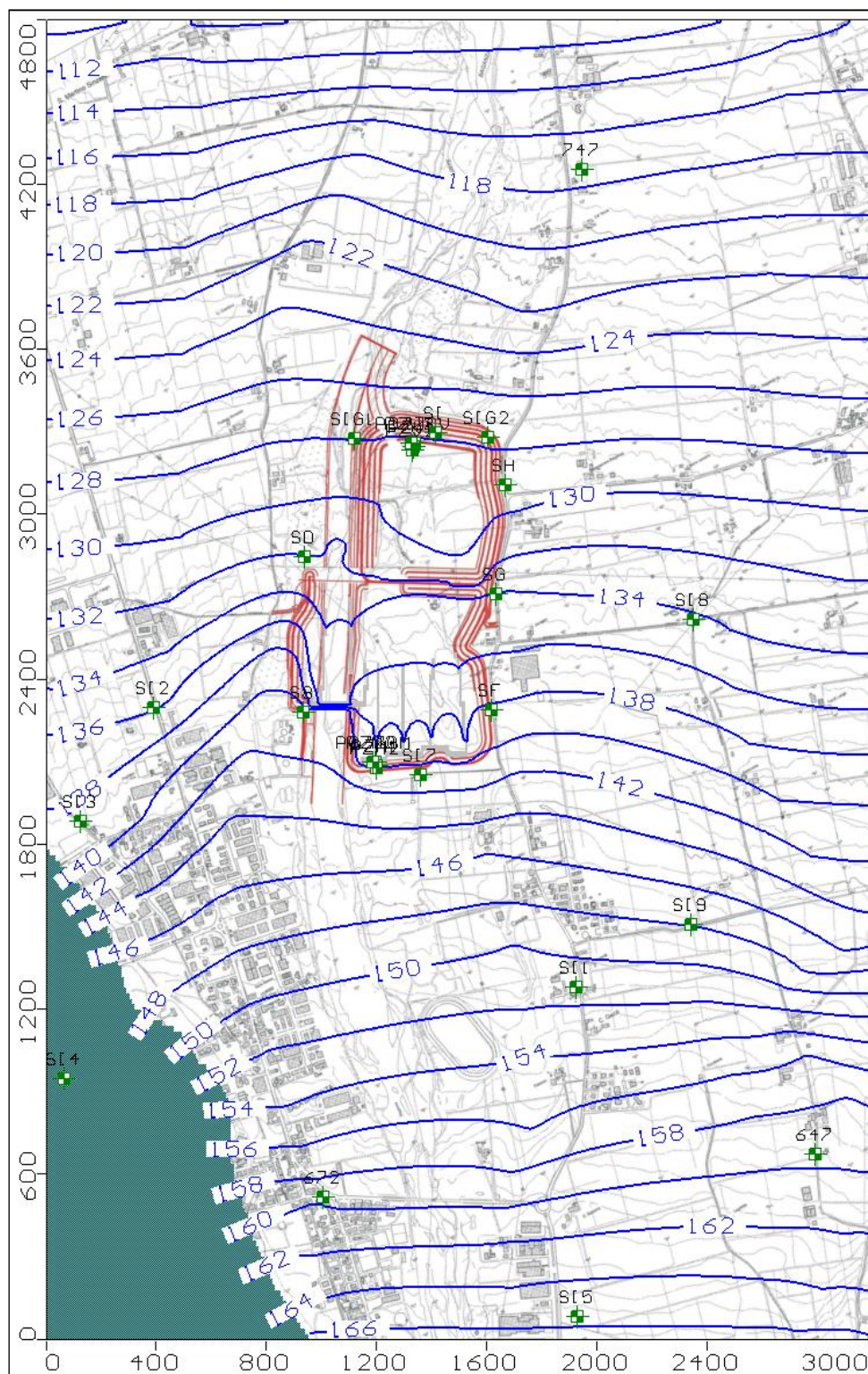


Figura 47 – Scenario 4 – Piezometria dinamica (m s.l.m.) nella “Soluzione A ottimizzata”

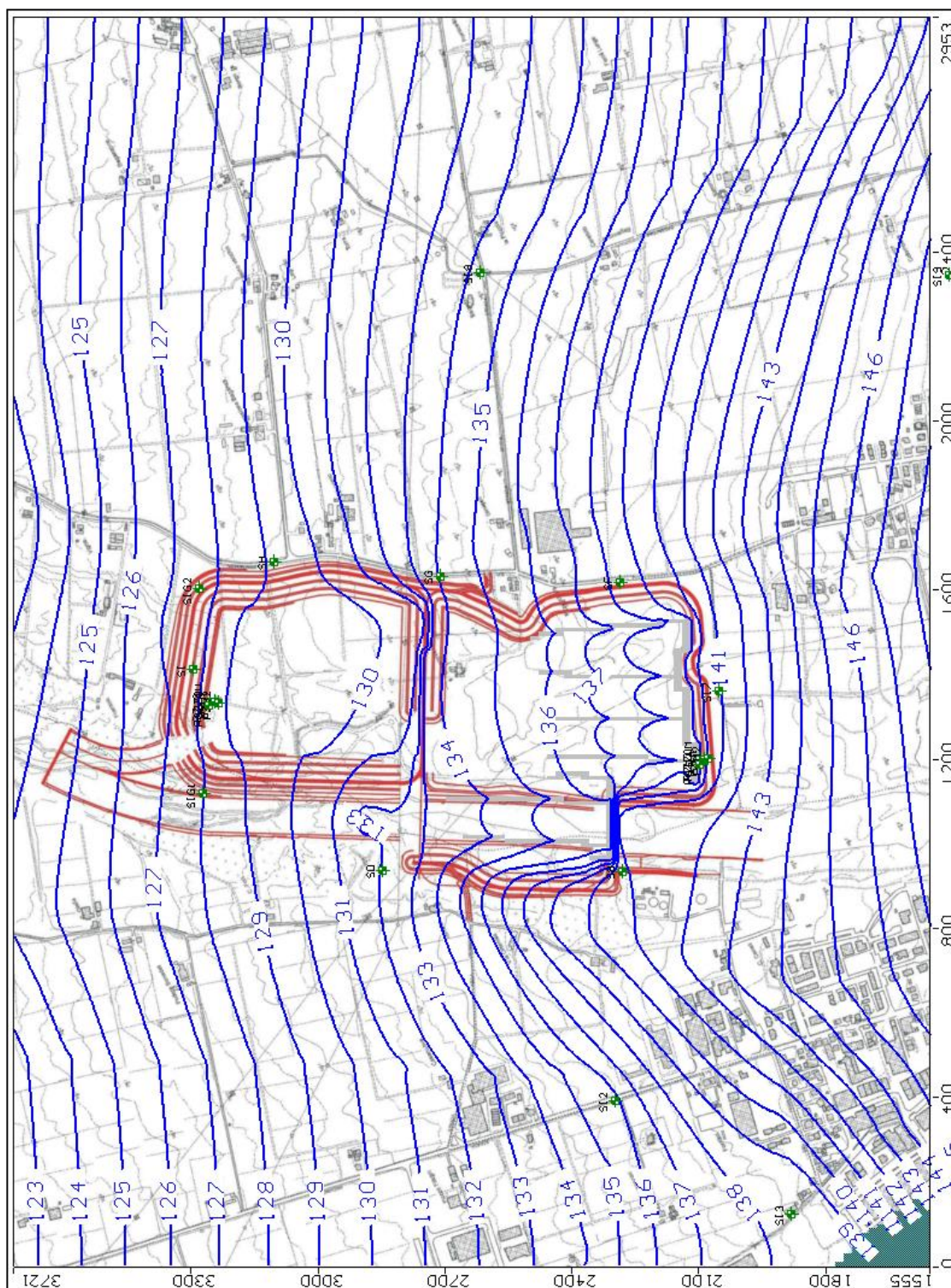


Figura 48 – Scenario 4 – Piezometria dinamica (m s.l.m.) nella “Soluzione A ottimizzata” (dettaglio)

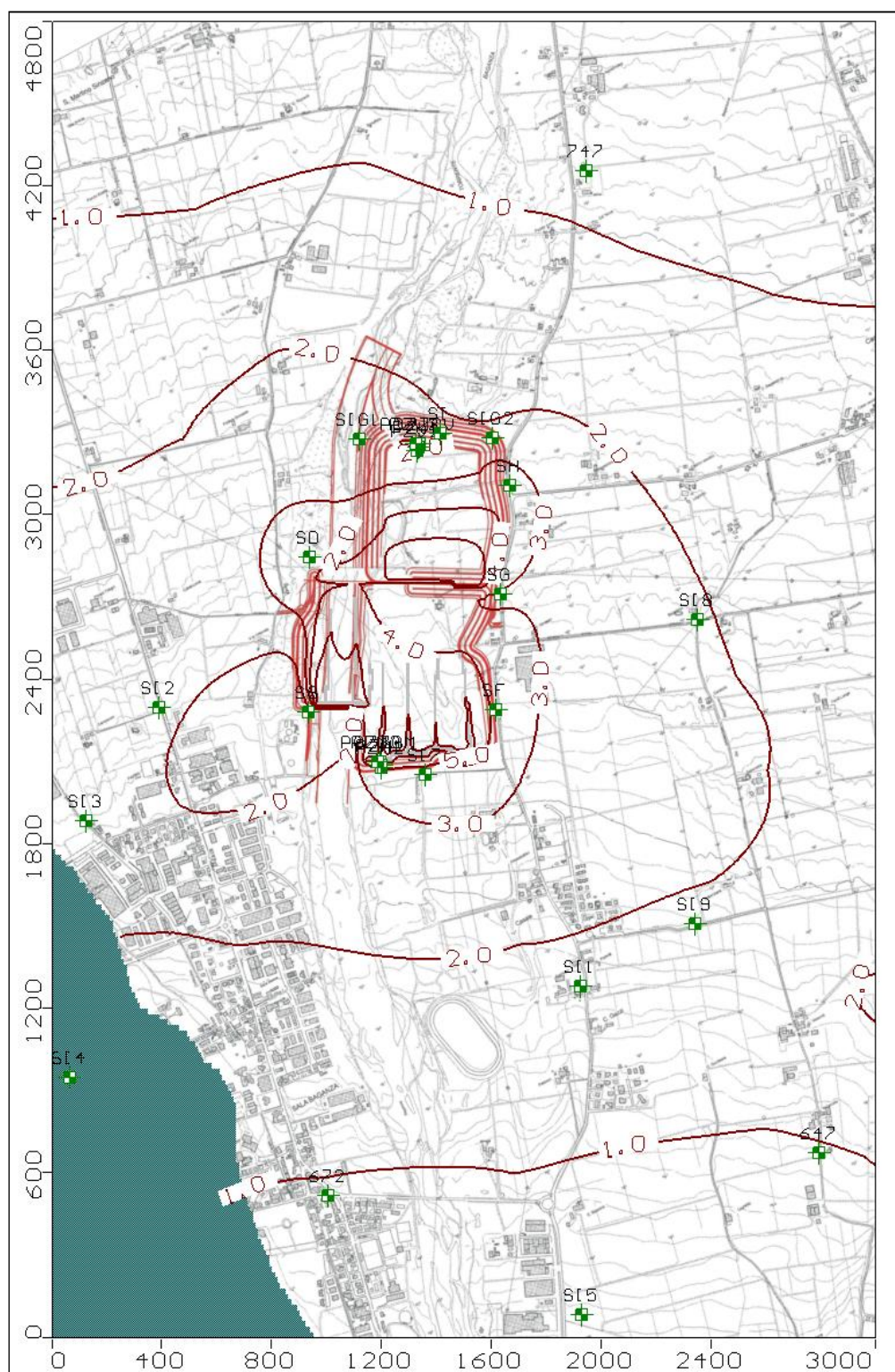


Figura 49 – Scenario 4 – Isovazioni di livello della falda (in m) nella “Soluzione A ottimizzata”

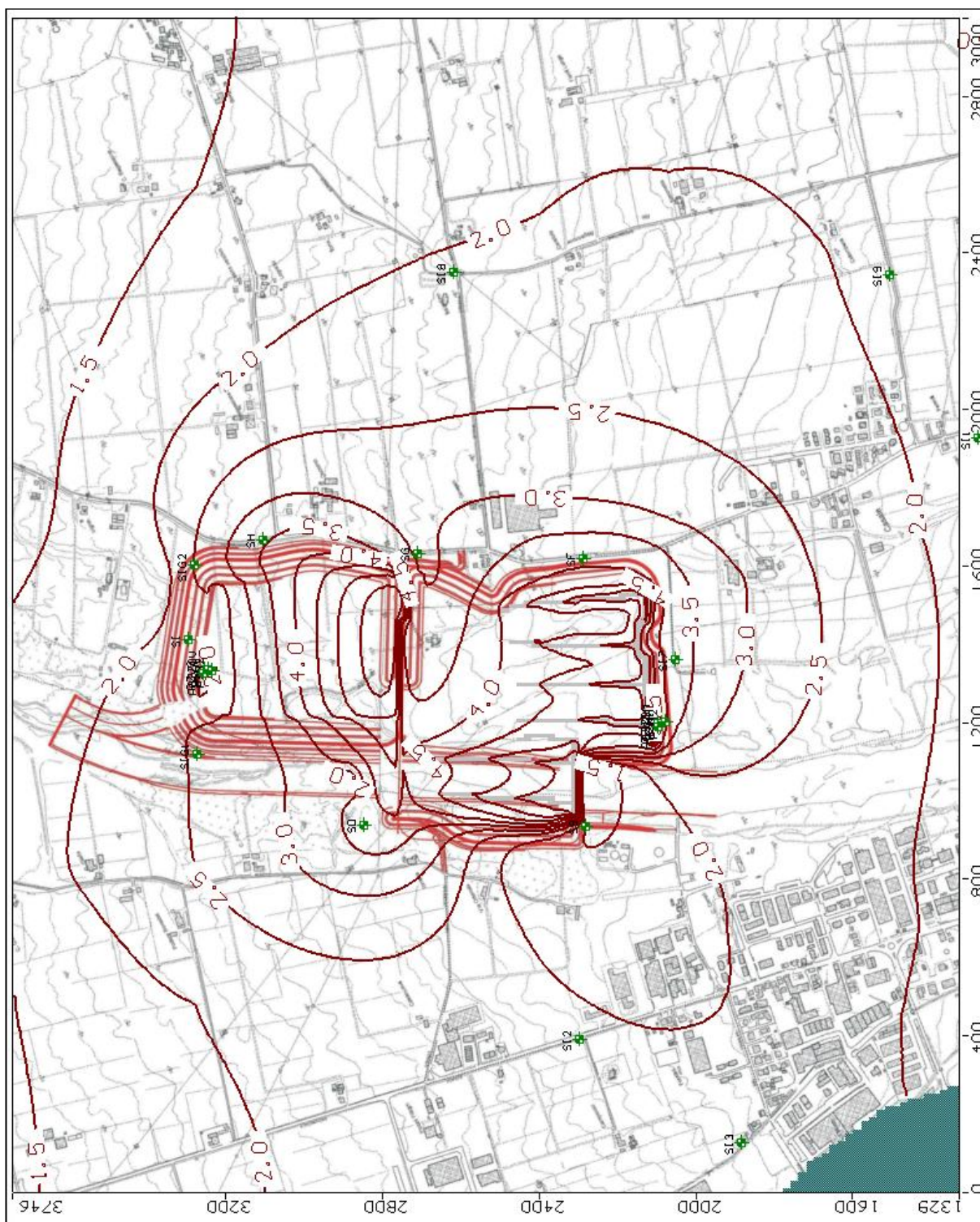


Figura 50 – Scenario 4 – Isovariazioni di livello della falda (in m) nella “Soluzione A ottimizzata” (dettaglio)

3.5 SCENARIO 5: SIMULAZIONE IN TRANSITORIO DEGLI EFFETTI INDOTTI SULLA FALDA IN CONDIZIONI DI MASSIMO INVASO DELLA CASSA DI ESPANSIONE

Allo scopo di quantificare gli effetti indotti sulla falda a seguito del funzionamento della cassa di espansione del T. Baganza nelle condizioni di massimo invasore, è stato necessario predisporre alcune simulazioni in regime transitorio.

Tra queste si è scelto di riportare i risultati riferiti alla condizione più gravosa prevista per gli invasi, vale a dire quella ipotizzata per un tempo di ritorno $T=1000$ anni, analizzando la configurazione della cassa di espansione denominata "Soluzione A ottimizzata", proposta nel progetto definitivo.

In base ai dati progettuali si evidenzia come nel comparto 1 di monte, la quota di massimo invasore prevista per il tempo di ritorno $T=1000$ sia pari a 145.7 m s.l.m., mentre nel comparto 2 di valle risulti inferiore e pari a 143.7 m s.l.m..

La discretizzazione temporale del modello di flusso in regime transitorio è stata impostata in modo tale da poter descrivere con un buon dettaglio l'andamento delle curve di simulazione relative alle modalità di riempimento e svuotamento degli invasi riportato in Figura 51.

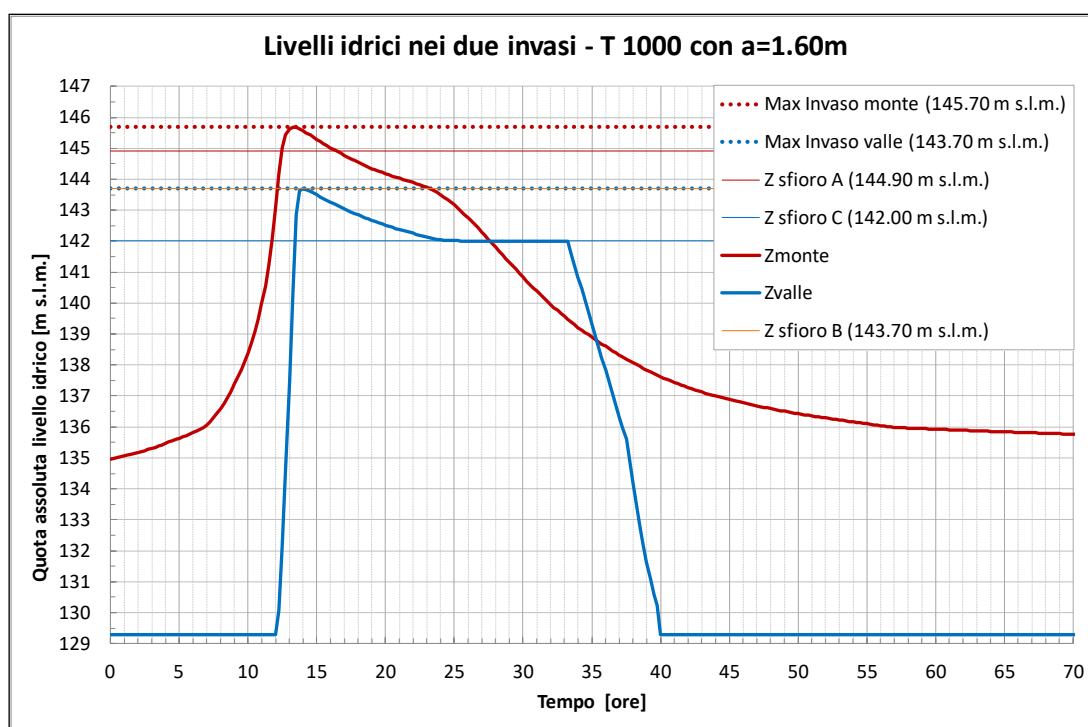


Figura 51 – Scenario 5 – Curve di invaso e svaso dei compartimenti 1 e 2 della cassa di espansione "Soluzione A ottimizzata"

In Tabella 4 viene riassunta nel dettaglio la discretizzazione temporale delle fasi di invaso e svaso delle casse di laminazione della durata complessiva di 72 ore e della relativa quota assoluta di livello idrico raggiunta nei compartimenti di valle e di monte.

Sulla base delle curve il periodo modellato è stato suddiviso in 14 “Stress Period” della durata variabile tra 1 e 24 ore, se si esclude l'ultimo Stress Period, della durata di 8664 ore, che simula una condizione finale di tipo stazionario (Tabella 5).

Tabella 4 – Discretizzazione temporale dell'andamento del livello idrico negli invasi per T=1000
 (Soluzione A ottimizzata)

Discretizzazione temporale curva invaso/svaso		Quota assoluta livello idrico (m s.l.m.)	
(ore)	(giorni)	vasca 1	vasca 2
0	0	~135 (138.8)*	129.3 (132.5)*
11.75	0.49	142	129.3(132.5)*
12	0.5	143.1	129.3(132.5)*
13.25	0.55	~145.7	140.325
14	0.58	145.5	143.7
23	0.95	143.7	142.1
24	1	143.5	~142
27.5	1.14	142	142
33.25	1.38	139.5	142
37	1.55	138.3 (138.8)*	136.3
40	1.66	137.6 (138.8)*	129.3 (132.5)*
45	1.88	136.9 (138.8)*	129.3 (132.5)*
48	2	136.6 (138.8)*	129.3 (132.5)*
55	2.29	136.1 (138.8)*	129.3 (132.5)*
60	2.5	135.9 (138.8)*	129.3 (132.5)*
70	2.9	135.8 (138.8)*	129.3 (132.5)*
72	3	135.7 (138.8)*	129.3 (132.5)*
96	4	~135 (138.8)*	129.3 (132.5)*

(*) valori di quota inseriti nel modello numerico quale condizione di minimo invaso

Tabella 5 – Discretizzazione temporale del modello implementato in regime transitorio

Stress period	Durata
numero	ore
1	11.75
2	0.25
3	1.25
4	0.75
5	9
6	1
7	3.5
8	5.75
9	3.75
10	3
11	8
12	24
13	24
14	8664

La presenza degli invasi è stata discretizzata nel modello inserendo, in tutte le maglie interessate dagli invasi, celle a potenziale costante, come rappresentato in Figura 52.

Si fa osservare che in base alla schematizzazione adottata per simulare nel modello numerico il livello idrico degli invasi, è stato necessario inserire come quota assoluta minima del livello idrico rispettivamente i valori di 138.8 m s.l.m. per il comparto 1 e di 132.5 m s.l.m. per il comparto 2, in quanto tali valori corrispondono alle quote massime dei fondi scavo dei due comparti (cfr. Tabella 4). Tale approssimazione nella schematizzazione dei livelli idrici minimi nell'invaso non interferisce comunque con le finalità previste dalle simulazioni condotte, in quanto le medesime sono volte a ricostruire l'entità massima degli innalzamenti attesi in falda a seguito delle condizioni di massimo invaso.

Le simulazioni numeriche così condotte hanno permesso di ricostruire e analizzare le deformazioni attese in termini di morfologia piezometrica a seguito del regime di funzionamento della cassa di espansione nella condizione di massimo invaso (T 1000) in corrispondenza di ogni "Stress Period" considerato.

Per poter meglio rappresentare l'entità delle variazioni attese sull'areale, il confronto tra le quote iniziali e quelle relative agli stress period considerati è stato eseguito sui piezometri di monitoraggio esistenti e in alcuni punti teorici di verifica, che sono stati ubicati nel settore a monte del comparto 1 (punti M1 e M2) a una distanza rispettivamente di circa 100 e 200 m, nel settore orientale (punti E1 e E2) a distanza di circa 100 m dall'argine e nel settore di valle (punto V1) a distanza di circa 100 m dall'argine.

L'ubicazione dei punti di controllo piezometrico e del livello idrico negli invasi è illustrata in Figura 52.

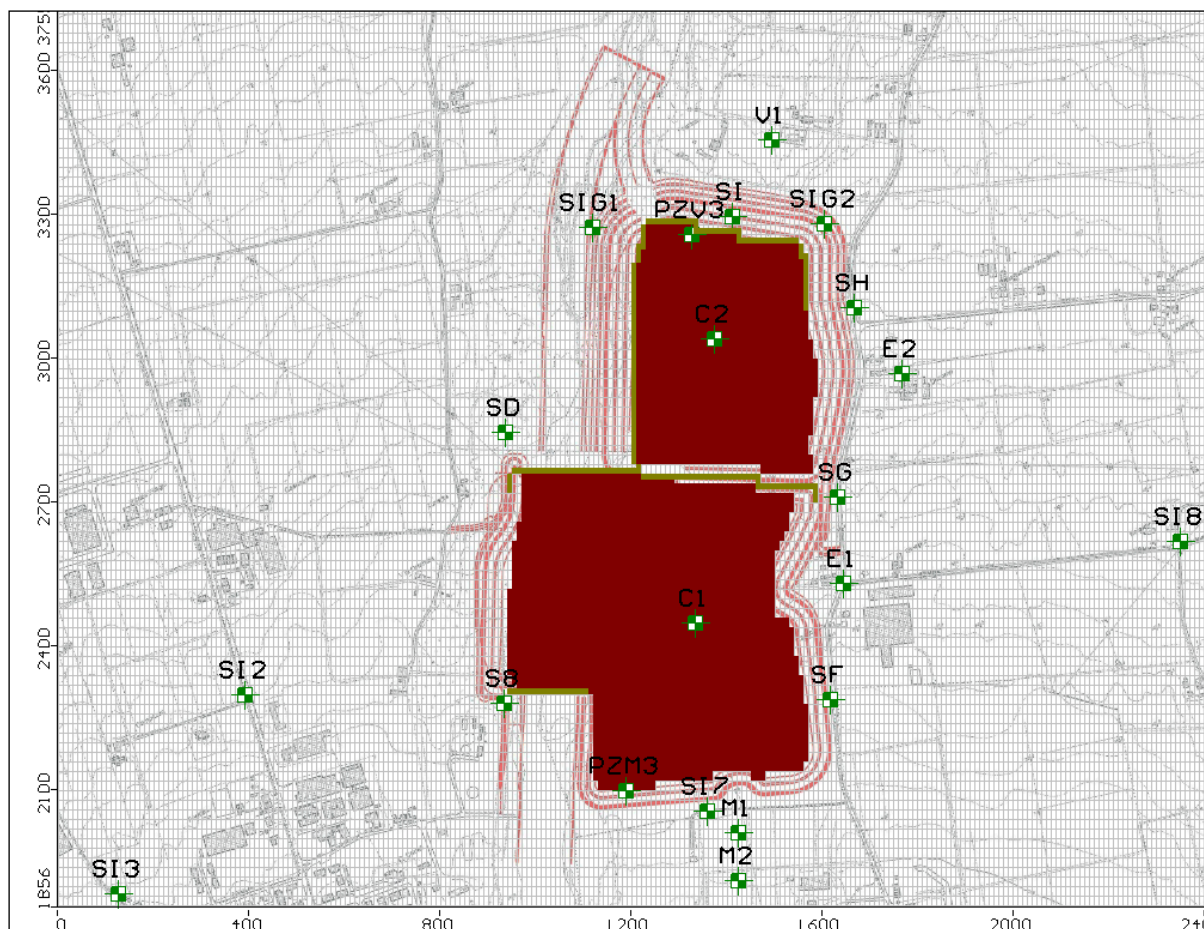


Figura 52 – Scenario 5 - Schematizzazione nel modello numerico degli invasi di monte e di valle mediante celle a carico costante (maglie in colore rosso) ed ubicazione dei piezometri di monitoraggio esistenti e dei punti di verifica dell'innalzamento (M1, M2, E1, E2, V1)

A titolo esemplificativo si riportano nella Figura 53, Figura 54, Figura 55, Figura 56 e in Figura 57 le piezometrie dinamiche riferite al primo strato del modello, ricostruite rispettivamente dopo un tempo di 14, 23, 27.5, 37 e 72 ore dall'inizio delle operazioni di invaso delle acque.

Il confronto tra questi elaborati piezometrici con la piezometria dinamica presa a riferimento, ossia quella ricostruita in base alla schematizzazione utilizzata per il modello in regime transitorio, evidenzia variazioni piezometriche che sulla maggior parte dell'area sono sostanzialmente trascurabili o nulle.

I settori che evidenziano i maggiori innalzamenti sono quelli posti a monte e a Est del comparto 1, vale a dire su lati privi di diaframature, laddove in vicinanza degli argini si potrebbero verificare innalzamenti del livello di falda dell'ordine massimo di 2.4-3 m dopo un tempo di circa 14÷27 ore dall'inizio della fase di invaso.

Già dopo un tempo di 37 ore dall'inizio dell'invaso gli innalzamenti tendono a ridursi a valori inferiori a circa 0.4 m nel settore di monte e a circa 1-2 m nel settore orientale.

L'andamento assunto dal livello della falda durante le fasi di riempimento degli invasi in corrispondenza dei piezometri di monitoraggio esistenti ubicati in prossimità degli invasi di monte e di valle e dei punti teorici di verifica (M1, M2, E1, E2 e V1), ricostruito con il modello in regime transitorio è illustrato in Figura 58 e in Figura 59.

Da un'analisi di tali elaborati si evince come nel settore di monte della cassa di espansione, il massimo innalzamento si verificherebbe dopo un tempo di circa 18 ore dall'inizio dell'invaso, come illustra l'andamento ricostruito per il piezometro SI7, laddove si raggiungerebbe, a fronte di un sollevamento di circa 3.2 m, una quota piezometrica massima pari a circa 144.15 m s.l.m., a cui corrisponderebbe una soggiacenza dal piano campagna di circa 2 m.

Nel settore Est i massimi innalzamenti sono stati invece osservati al piezometro SF dopo un tempo di circa 30 ore, laddove, a fronte di un innalzamento di circa 2.3 m si è raggiunta una quota piezometrica pari a circa 140.85 m s.l.m., a cui corrisponde una soggiacenza di circa 5 m dal p.c.. Sempre ad Est, ma nel settore posto in vicinanza del piezometro SG, i massimi innalzamenti si verificherebbero invece dopo un tempo di circa oltre 3 giorni, come illustra il grafico riferito al piezometro SG, laddove si registra a fronte di un sollevamento di circa 1.5 m, una quota di falda pari a circa 136 m s.l.m., a cui corrisponde una soggiacenza dal piano campagna di poco superiore a 5 m.

Si fa tuttavia evidenziare come il modello numerico di flusso delle acque sotterranee non costituisca lo strumento più idoneo per la valutazione degli effetti indotti all'esterno della cassa durante il suo invaso e per tale motivo, per valutazioni di maggiore dettaglio si rimanda ai calcoli eseguiti nell'elaborato BAG2_03GEO_R_RE_04_A.

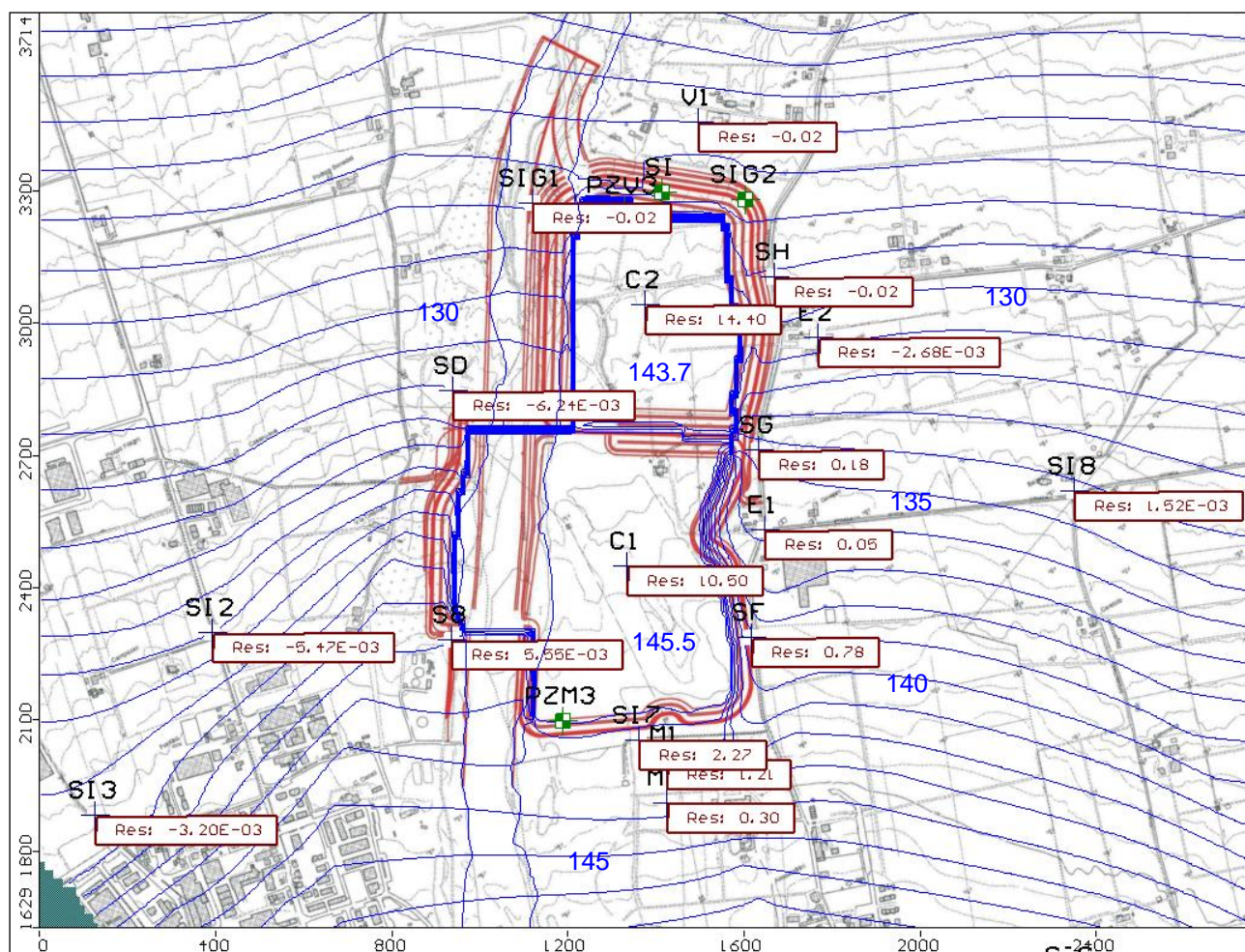


Figura 53 – Scenario 5 - Piezometria dinamica (m s.l.m.) dopo un tempo di 14 ore dall'inizio delle fasi di riempimento dei comparti e isovariazioni rispetto al tempo iniziale di riferimento (1 strato del modello – Stress Period n. 4)

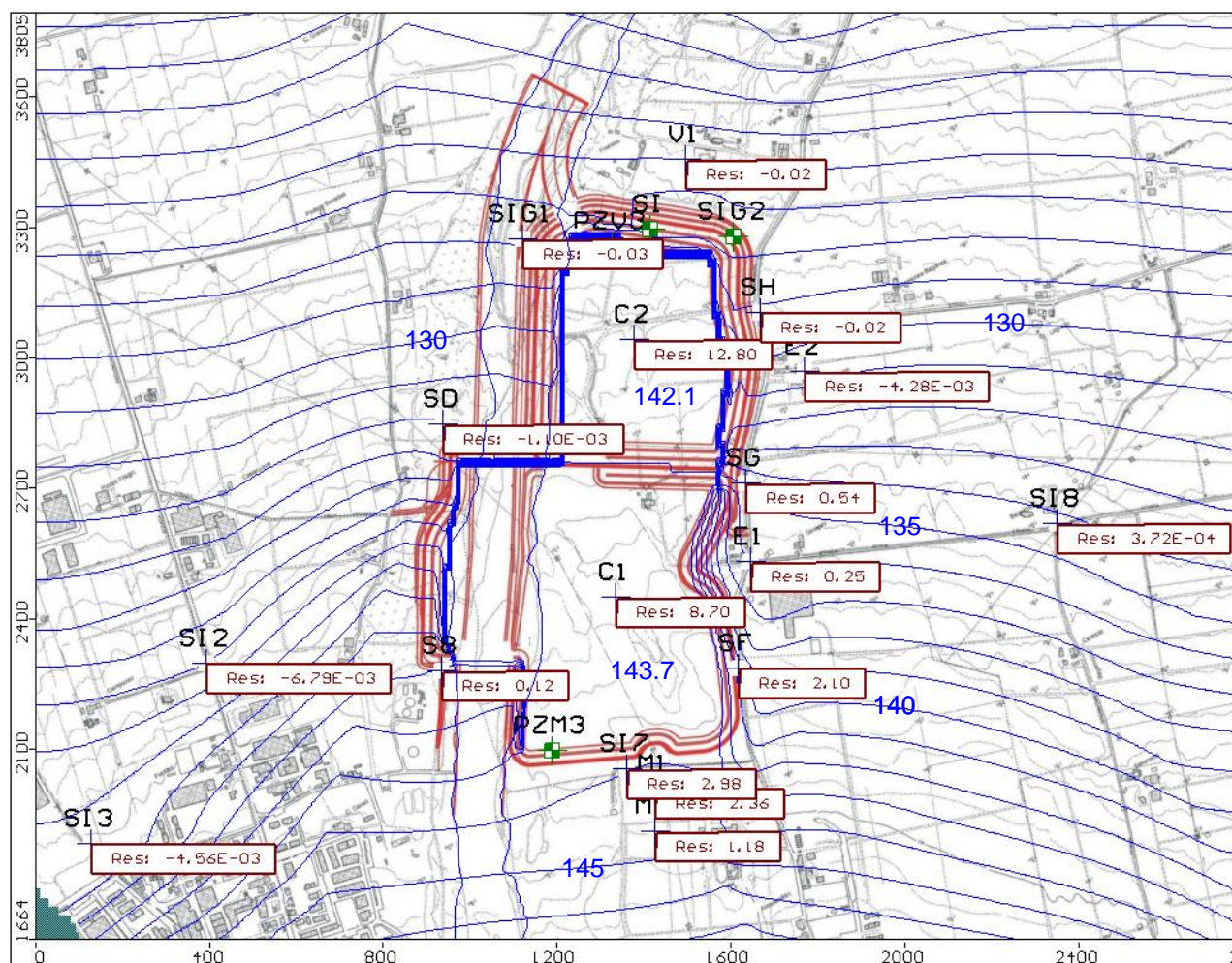


Figura 54 – Scenario 5 - Piezometria dinamica (m.s.l.m.) dopo un tempo di 23 ore dall'inizio delle fasi di riempimento dei comparti e isovariazioni rispetto al tempo iniziale di riferimento (1 strato del modello – Stress Period n. 5)

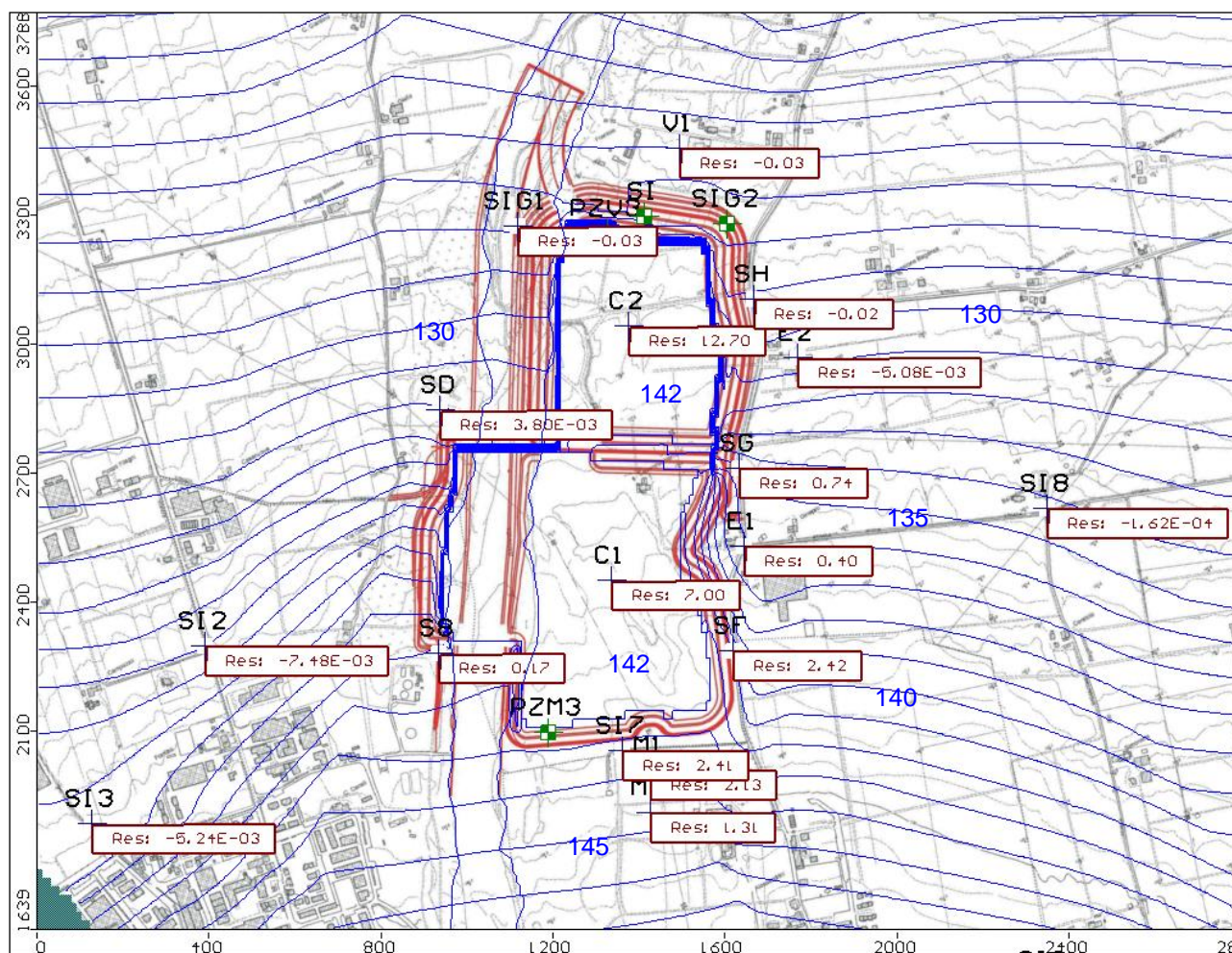


Figura 55 – Scenario 5 - Piezometria dinamica (m s.l.m.) dopo un tempo di 27.5 ore dall'inizio delle fasi di riempimento dei comparti e isovariazioni rispetto al tempo iniziale di riferimento (1 strato del modello – Stress Period n.7)

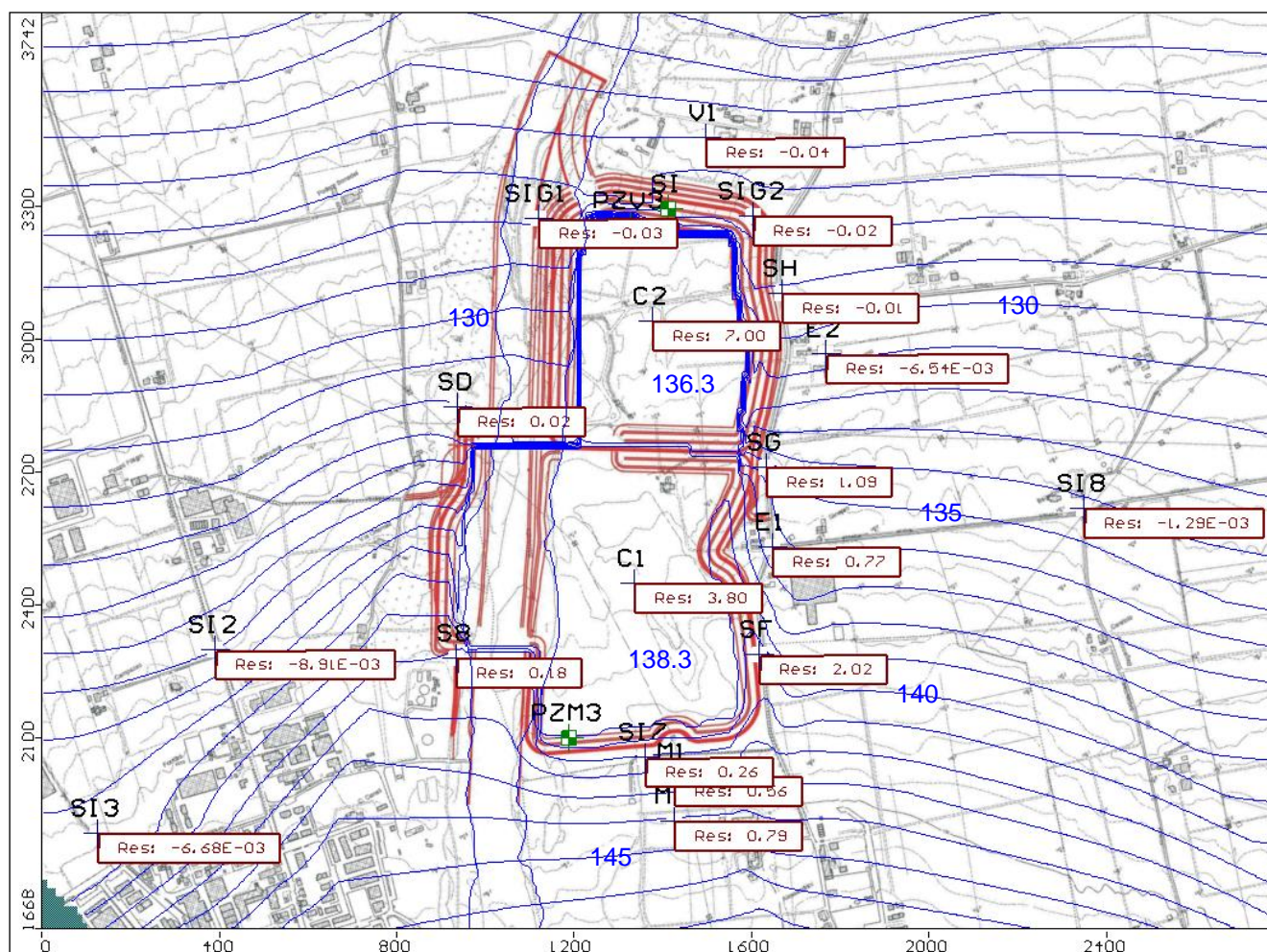


Figura 56 – Scenario 5 - Piezometria dinamica (m s.l.m.) dopo un tempo di 37 ore dall'inizio delle fasi di riempimento dei comparti e isovariazioni rispetto al tempo iniziale di riferimento (1 strato del modello – Stress Period n.9)

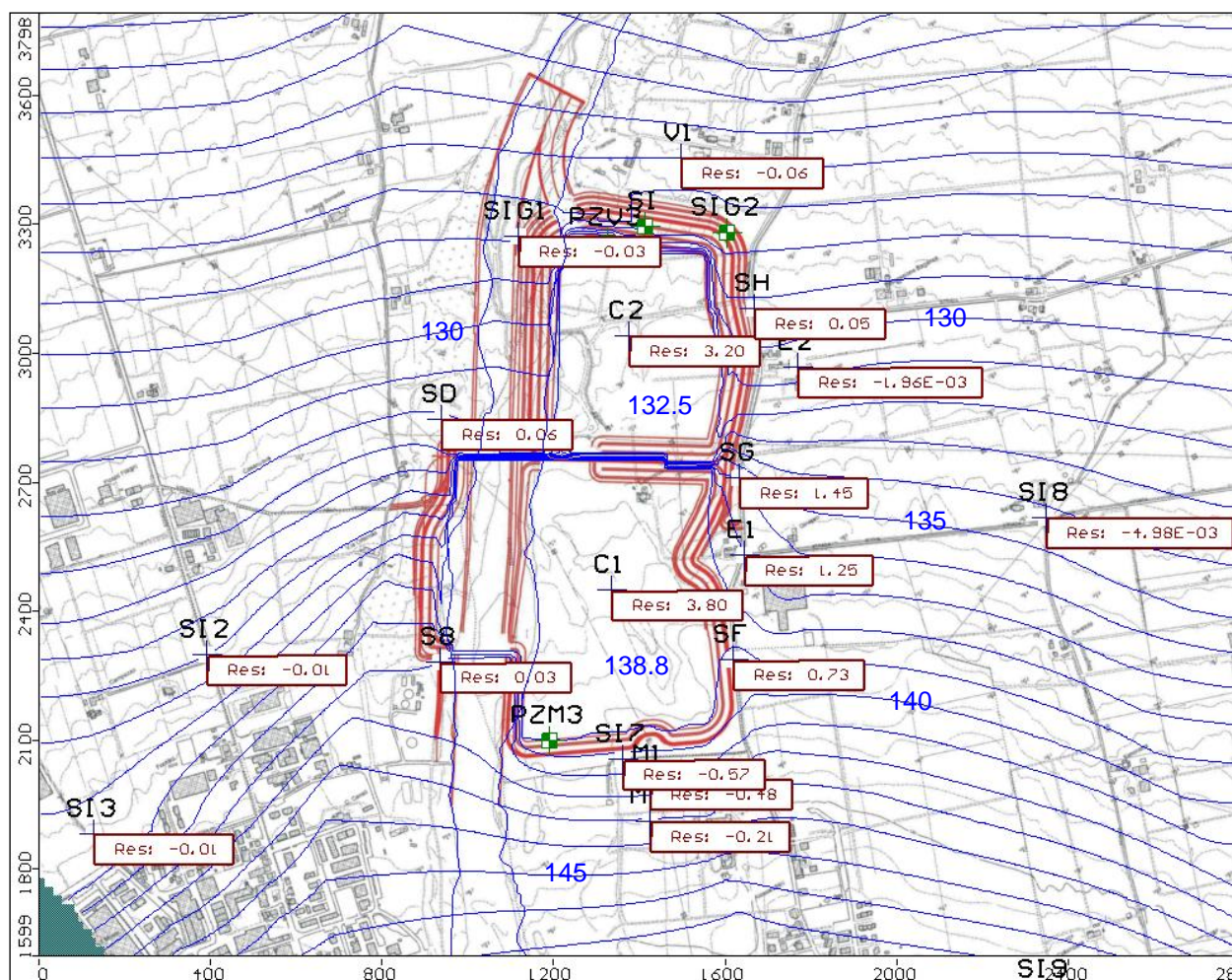


Figura 57 – Scenario 5 - Piezometria dinamica (m s.l.m.) dopo un tempo di 72 ore dall'inizio delle fasi di riempimento dei comparti e isovariations rispetto al tempo iniziale di riferimento (1 strato del modello – Stress Period n. 12)

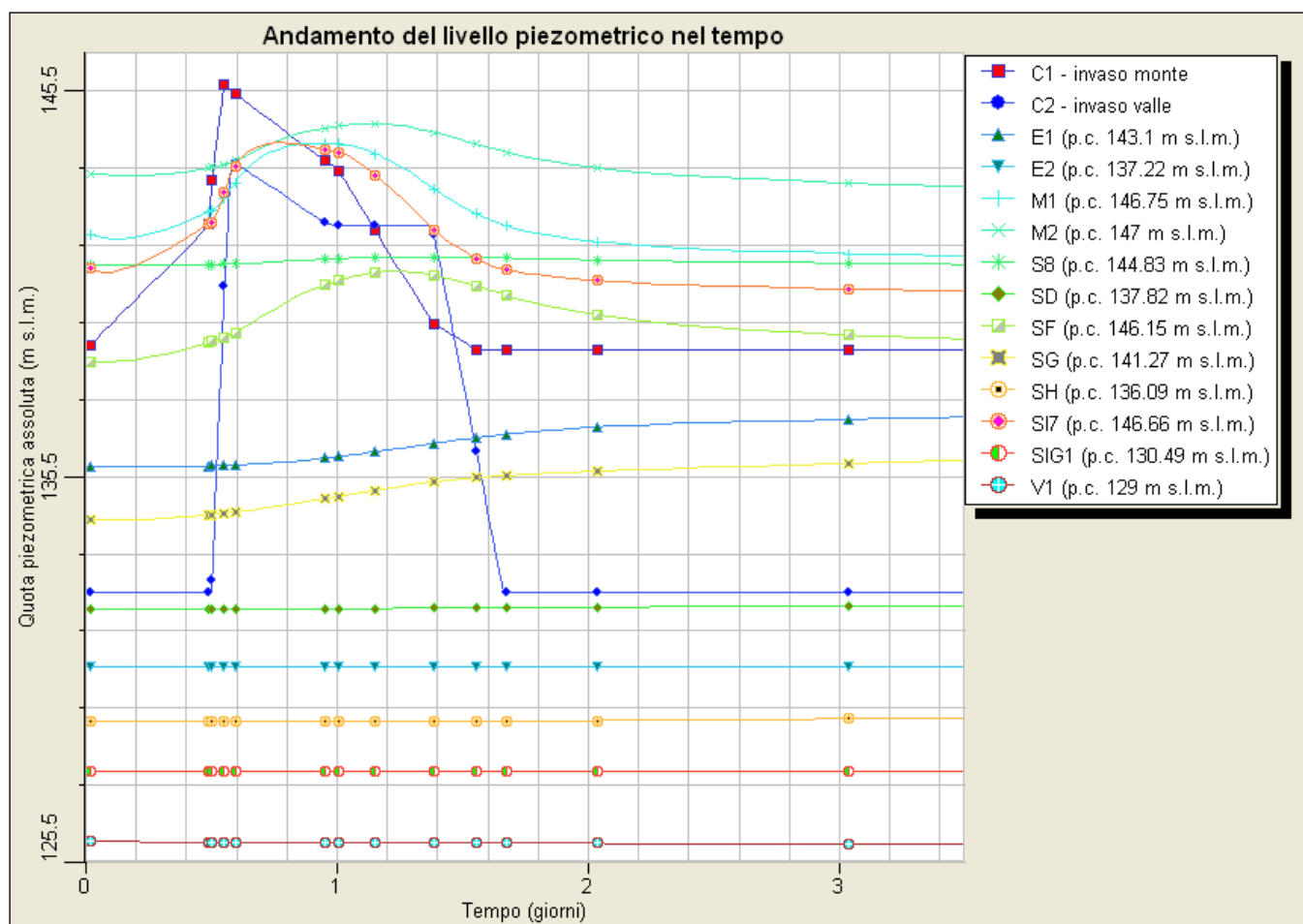


Figura 58 – Scenario 5 – Variazione del livello della falda (in m s.l.m.) in tutti i piezometri di controllo esistenti ubicati in prossimità degli invasi di monte (C1) e di vale (C2) e nei punti teorici di verifica prescelti (M1, M2, E1, E2 e V1) durante le fasi di riempimento delle casse di espansione

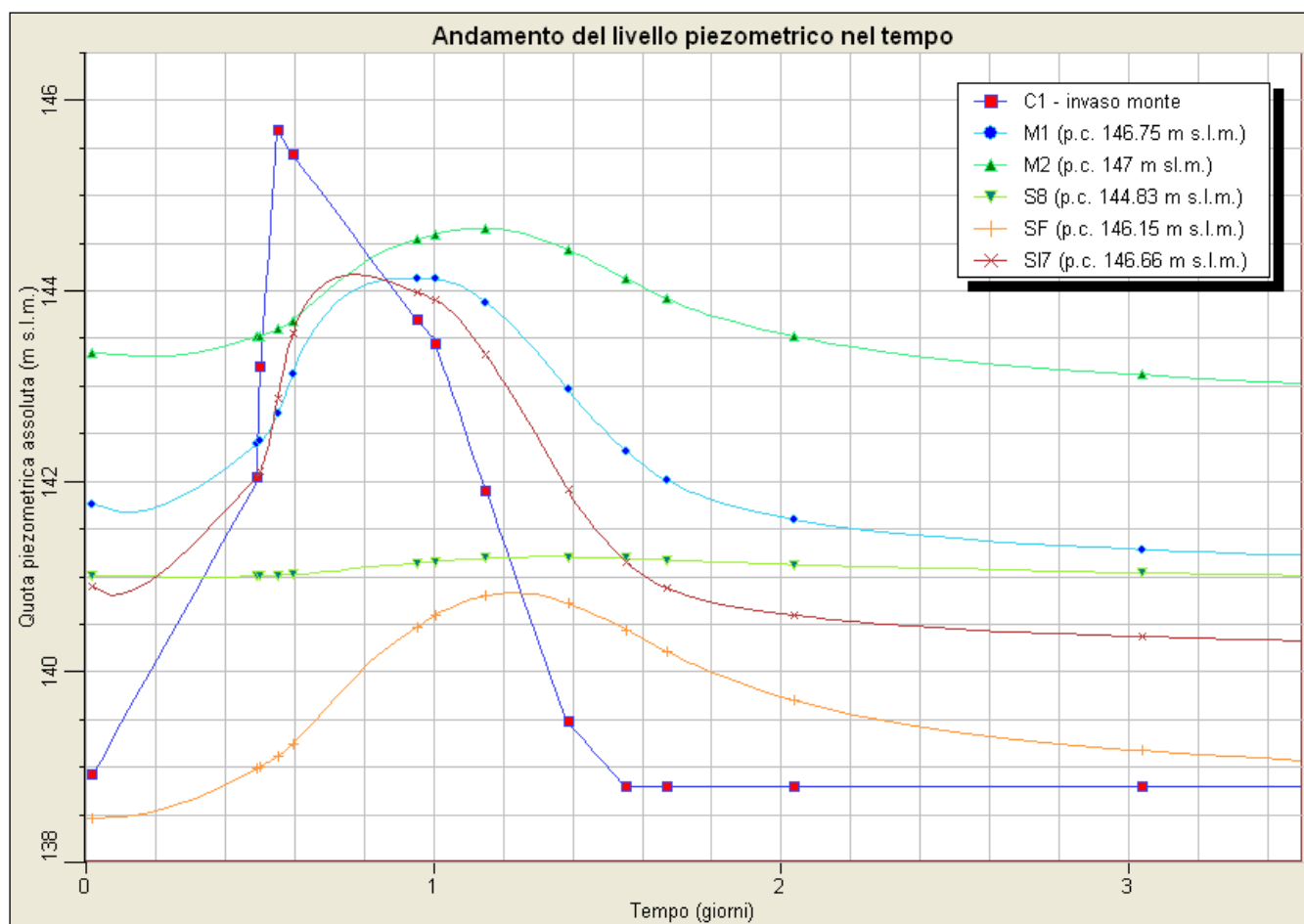


Figura 59 – Scenario 5 – Variazione del livello della falda (in m s.l.m.) nei piezometri di controllo e nei punti teorici di verifica posti nel settore di monte dell'invaso 1 (C1) durante le fasi di riempimento delle casse di espansione – dettaglio della figura precedente

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] DICATeA-RER Servizio Provinciale Difesa del Suolo Risorse Idriche e Forestali (2003) "Studio della messa in sicurezza del territorio parmense, con particolare riferimento alla realizzazione della cassa di espansione sul Torrente Baganza - Relazione Idrologica".
- [2] DICATeA-RER Servizio Provinciale Difesa del Suolo Risorse Idriche e Forestali (2003) "Studio della messa in sicurezza del territorio parmense, con particolare riferimento alla realizzazione della cassa di espansione sul Torrente Baganza - Relazione Idraulica".
- [3] NERC (National Environmental Research Council) (1975), Flood Studies Report, v.1, London.
- [4] Bacchi B., Brath A., Kottegoda N.T. (1992). Analysis of the Relationships Between Flood Peaks and Flood Volumes Based on Crossing Properties of River Flow Processes, Water Resources Research, 28(10), p. 2773-2782.
- [5] DICATeA-AIPo (2012) "Modellazione 2D del tratto del torrente Parma: da Colorno alla confluenza in Po, con possibili scenari di sistemazione; da Parma a Colorno, con possibili interventi volti a migliorare l'effetto di laminazione".
- [6] DICATeA-AIPo (2008) "Prove su modello fisico del manufatto regolatore della cassa di espansione sul torrente Parma"
- [7] DICATeA-AIPo (2008) "Cassa di espansione sul torrente Parma: Quinta fase di invasi sperimentali (17 marzo-31 luglio 2008)"
- [8] DICATeA-AIPo (2012) "Aggiornamento delle analisi idrologiche e revisione del progetto preliminare della cassa di espansione sul torrente Baganza"
- [9] Alberini A. (2011) "Dimensionamento e simulazioni numeriche del manufatto di regolazione della cassa di espansione sul torrente Baganza", tesi di laurea magistrale, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Parma.
- [10] Forni A. (2011) "Dimensionamento e simulazioni numeriche 2D della cassa di espansione sul torrente Baganza", tesi di laurea magistrale, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Parma.
- [11] Ferrari A. (2011) "Cassa di espansione sul torrente Baganza: valutazione dell'efficienza in assenza e in presenza di manovre sulle paratoie", tesi di laurea, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Parma.
- [12] Surfer Version 9.1.352 – Apr 8 2009, Surface Mapping System, Copyright © 1993-2009, Golden Software, Inc.
- [13] SMS 11.0.00, Surface-Water Modeling System, Copyright 2011, Aquaveo LLC, All Rights Reserved.
- [14] ETH Zurich, VAW "BASEMENT, Basic Simulation Environment For Computation Of Environmental Flow And Natural Hazard Simulations", Copyright © 2006-2011, Faeh R., Mueller R., Rousselot P., Veprek R., Vetsch D., Volz C., Vonwiller L., Farshi D.
- [15] D'Oria M., Mignosa P., Tanda M.G. (2012). Reverse level pool routing: Comparison between a deterministic and a stochastic approach. Journal of Hydrology, vol. 470-471; p. 28-38, ISSN: 0022-1694, doi:10.1016/j.jhydrol.2012.07.045.
- [16] Anderson, M. P. and W. W. Woessner (1992). Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. San Diego, Academic Press.
- [17] ASTM-Standard (95 (2006)). D5880 Standard Guide for Subsurface Flow and Transport Modeling. West Conshohocken, PA, ASTM International.
- [18] Harbaugh, A. W., E. W. Banta, et al. (2000). MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model--User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process, United States Geological Survey: Open File Report 00-92: 121.
- [19] SOGEO (2012) Indagini geognostiche funzionali alla realizzazione della cassa di espansione del torrente Baganza nei comuni di Parma, Collecchio, Sala e Felino.
- [20] DICATeA-AIPo (2012) Revisione del progetto preliminare del collegamento tra la S.P. n. 56 e la S.P. n. 15 con nuovo ponte sul Baganza, Valutazione trasportistica sulle possibili alternative di progetto ed implicazioni sulla viabilità esistente.
- [21] AA.VV. (1995) - Studi sulla vulnerabilità degli acquiferi - Vol.3 - Alta e media pianura parmense - Copyright © 1992 Pitagora Editrice Bologna

- [22] AA.VV. (1992) "Carta della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento - Unità idrogeologiche Alta e media pianura parmense - Scala 1:25000" - Studi sulla vulnerabilità degli acquiferi - Vol.3 - Copyright © 1992 Pitagora Editrice Bologna
- [23] AA.VV. (1995) "La carta della vulnerabilità all'inquinamento dell'acquifero della pianura delle province di Parma, Reggio Emilia e Modena. Note illustrative" - Studi sulla vulnerabilità degli acquiferi - Vol.11 - pp.57-91 - Copyright © 1995 Pitagora Editrice Bologna
- [24] AIPO (2015) Cassa di espansione sul T.Baganza - Progetto Preliminare - Relazione geologica e geotecnica
- [25] AIPO (2015) Cassa di espansione sul T.Baganza - Progetto Preliminare - Relazione idrologica e idraulica
- [26] AIPO (2016) Cassa di espansione del Torrente Baganza nei comuni di Felino, Sala Baganza, Collecchio e Parma - Piano delle indagini propedeutiche alla Progettazione Definitiva - Relazione illustrativa
- [27] Ambiter s.r.l. (2010) Piano Strutturale Comunale - Comune di Sala Baganza
- [28] Ambiter s.r.l. (2015) Polo estrattivo sovracomunale G9 "Cassa Baganza" - Progetto Definitivo Unitario - Relazione paesaggistica
- [29] Ambiter s.r.l. (2015) Polo estrattivo sovracomunale G9 "Cassa Baganza" - Progetto Definitivo Unitario - Relazione tecnica
- [30] APAT - Dipartimento Difesa del suolo - Servizio Geologico d'Italia (2005) Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50000 - Foglio 199 Parma Sud
- [31] ARPA RER (2003) Le caratteristiche degli acquiferi della Regione Emilia Romagna - Report 2003
- [32] ARPA RER - Parma (2014) Report sullo stato delle acque sotterranee in Provincia di Parma - Anno 2013
- [33] DICATeA (2014) "Convenzione di ricerca per lo sviluppo di una serie di attività propedeutiche alla realizzazione di una cassa di espansione del torrente Baganza" - Studio geologico, geotecnico e idrogeologico dell'acquifero interagente con la cassa di laminazione del torrente Baganza
- [34] DICATeA (2014) "Convenzione di ricerca per lo sviluppo di una serie di attività propedeutiche alla realizzazione di una cassa di espansione del torrente Baganza" - Relazione Geologica
- [35] DICATeA-AIPo (2013) "Realizzazione di un modello matematico della falda mirato a simulare gli effetti della presenza del lago sull'acquifero sottostante"
- [36] Petrucci et alii (1975) Il sottosuolo del comprensorio di Parma nel programma di ricerche idriche dell'I.R.S.A. nel Bacino Padano-Veneto
- [37] Petrucci et alii (1976) Osservazioni geoidrologiche nella pianura a Sud di Parma
- [38] Provincia di Parma - Servizio Ambiente, Difesa del Suolo e Tutela del Territorio (2003) Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale - B. Relazione illustrativa
- [39] Provincia di Parma - Servizio Ambiente, Difesa del Suolo e Tutela del Territorio (2008) Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale - A. Quadro conoscitivo
- [40] Provincia di Parma - Servizio Ambiente, Difesa del Suolo e Tutela del Territorio (2008) Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale - A.1 Approfondimento in materia di tutela delle acque
- [41] ARPA Regione Emilia Romagna - Servizio geologico, sismico e dei suoli - Portale cartografico (<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/cartografia/webgis-banchedati>)
- [42] Università degli Studi di Parma (1992) Le acque nel Comune di Parma
- [43] Vannucchi M. Studio Tecnico Professionale (2014) "Piano di sviluppo aziendale - Progetto di realizzazione di un fabbricato colonico - Azienda Agricola La Grande - Loc.S.Michele Gatti - Comune di Felino (PR)" - Relazione geologica - Relazione sismica