



PROGETTO AdSP n. 1951

Estensione delle infrastrutture comuni per lo sviluppo del Punto Franco Nuovo nel porto di Trieste

CUP: C94E21000460001

Progetto di Fattibilità Tecnico Economica Fascicolo A– intervento PNC da autorizzare

GRUPPO DI PROGETTAZIONE:		
arch. Gerardo Nappa	AdSP MAO	Responsabile dell'integrazione e Coordinatore per la Sicurezza in fase di Progettazione
arch. Sofia Dal Piva	AdSP MAO	Progettazione generale
arch. Stefano Semenic	AdSP MAO	Progettazione generale
ing. Roberto Leoni	BITECNO S.r.l.	Sistema di trazione elettrica ferroviaria
ing. Saturno Minnucci	MINNUCCI ASSOCIATI S.r.l.	Impianti speciali e segnalamenti ferroviari
ing. Dario Fedrigo	ALPE ENGINEERING S.r.l.	Progettazione strutturale oo.cc. ferrovia e strade
ing. Andrea Guidolin p.i. Furio Benci	SQS S.r.l.	Progettazione della sicurezza
ing. Sara Agnoletto	HMR Ambiente S.r.l.	Progettazione MISP e cassa di colmata
p.i. Trivellato, dott. G. Malvasi, dott. S. Bartolomei	p.i. Antonio Trivellato d.i.	Modellazione rumore, atmosfera, vibrazioni
dott. Gabriele Cailotto ing. Anca Tamasan	NEXTECO S.r.l.	Studio di impatto ambientale e piano di monitoraggio ambientale
ing. Sebastiano Cristoforetti	CRISCON S.r.l.s.	Relazione di sostenibilità
ing. Tommaso Tassi	F&M Ingegneria S.p.A.	Progettazione degli edifici pubblici nel contesto dell'ex area "a caldo"
ing. Michele Titton	ITS s.r.l.	Connessione stradale alla GVT
Prof. Andrea Borgia	Geologo	Professionista geologo
RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO: ing. Paolo Crescenzi		

NOME FILE: 1GNR_P_R_C-GEO_2AT_001_02_00	SCALA: ---
TITOLO ELABORATO: Relazione idrogeologica parte 2 di 2	ELABORATO: 1GNR_P_R_C-GEO_2AT_001_02_00

Rev.	Data	Descrizione	Redatto	Verificato	Approvato
00	30/06/2023	Definitivo	A.Borgia	S.Dal Piva	G.Nappa

drenati circa 3,62 l/s (pari a circa 312 m³/d) per un totale di 8,80 l/s (pari a circa 760 m³/d).

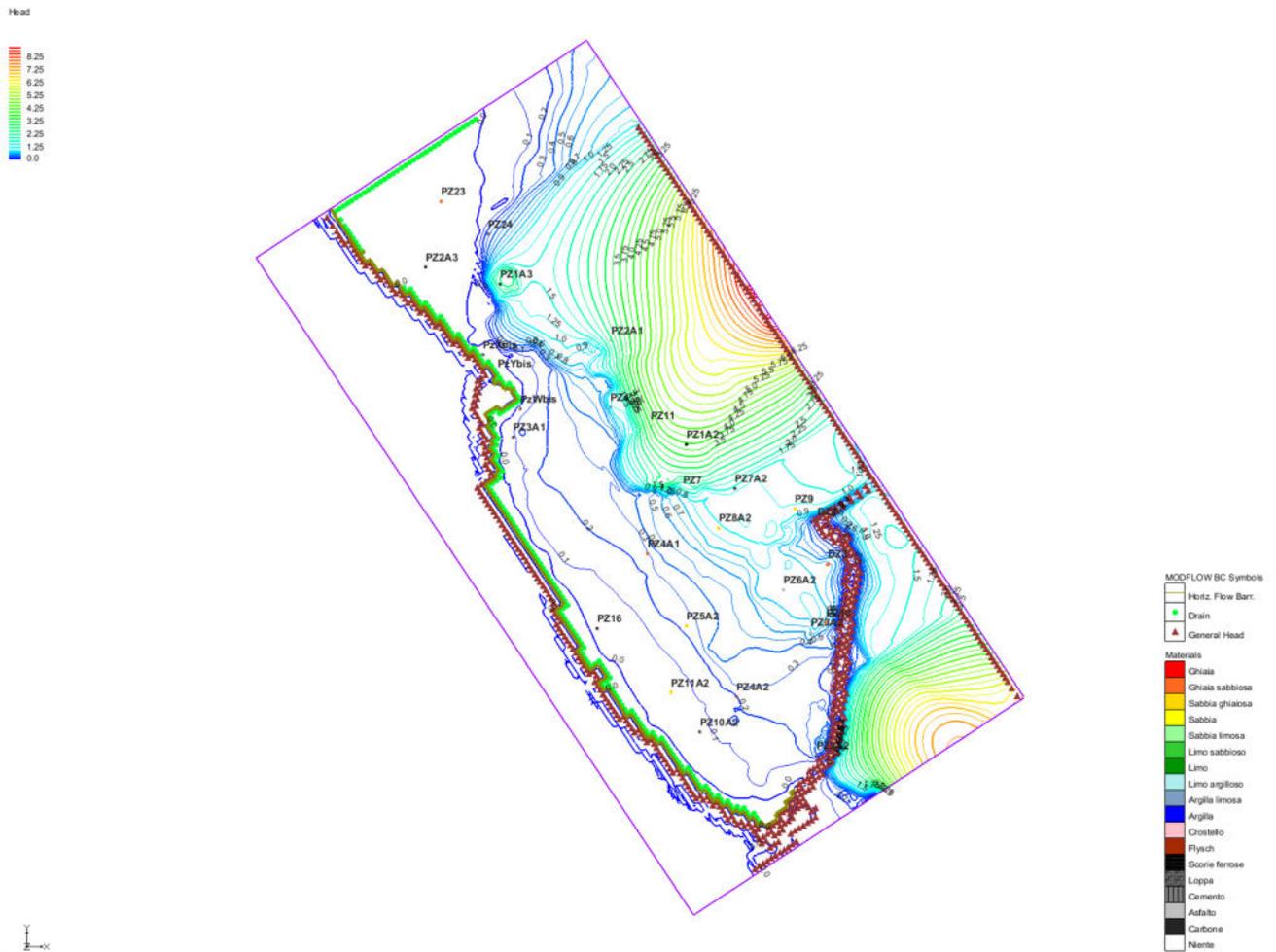


Figura 3-26: Modello "Rio Primario" – livello di falda calibrata a seguito della messa in sicurezza. Notare la barriera fisica lato mare (linea spezzata marrone) ed il drenaggio (verde) a monte di questa

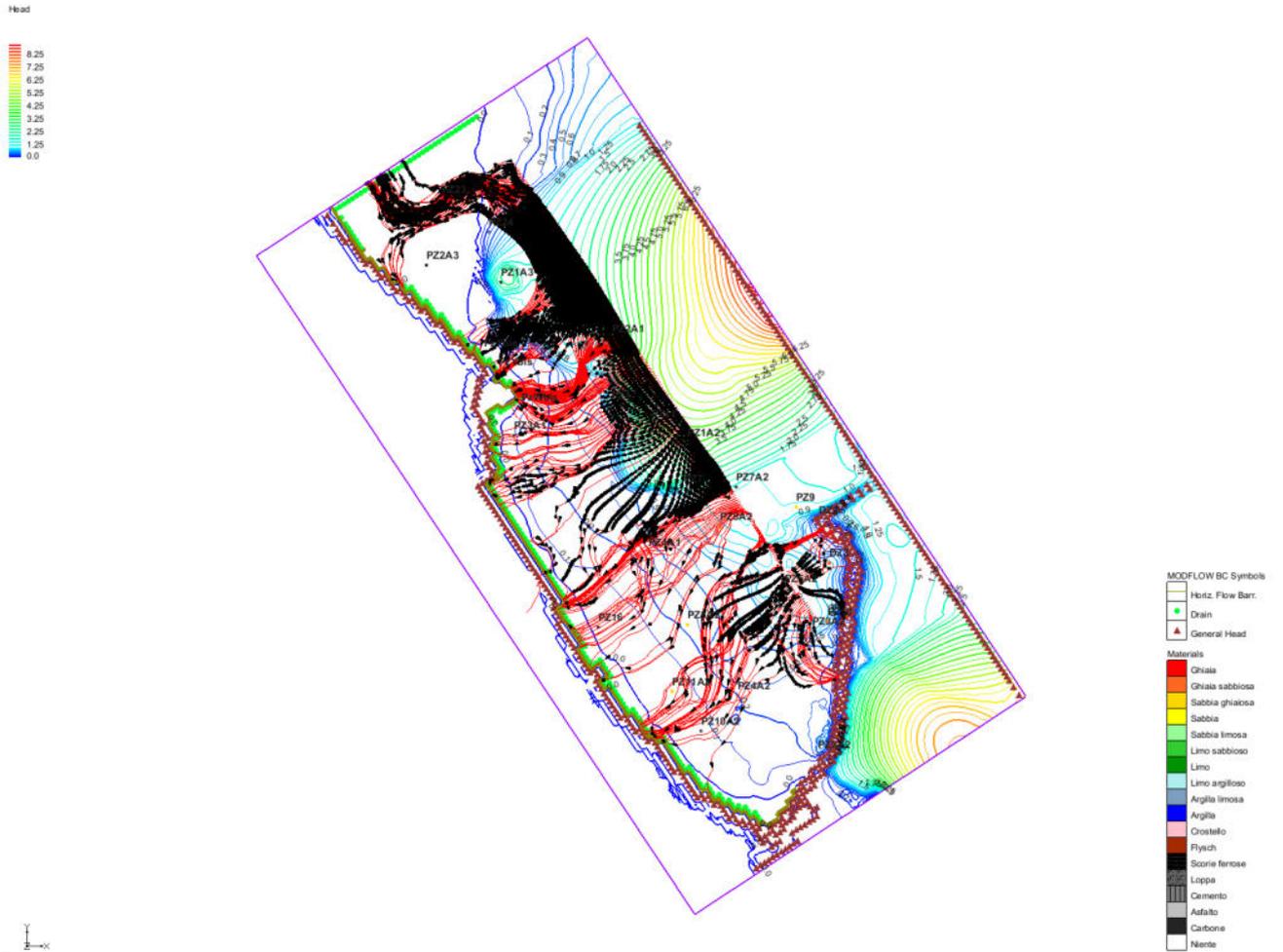


Figura 3-27: Linee di flusso del modello "Rio Primario" – dopo la messa in sicurezza esse sono sostanzialmente identiche a prima della messa in sicurezza a meno del fatto che le stesse terminano nella trincea drenante. Notare come queste linee vengano "catturate" anche dal drenaggio costituito dal Rio Primario. Le freccette nere lungo le linee di flusso sono ad intervalli temporali di 10 anni

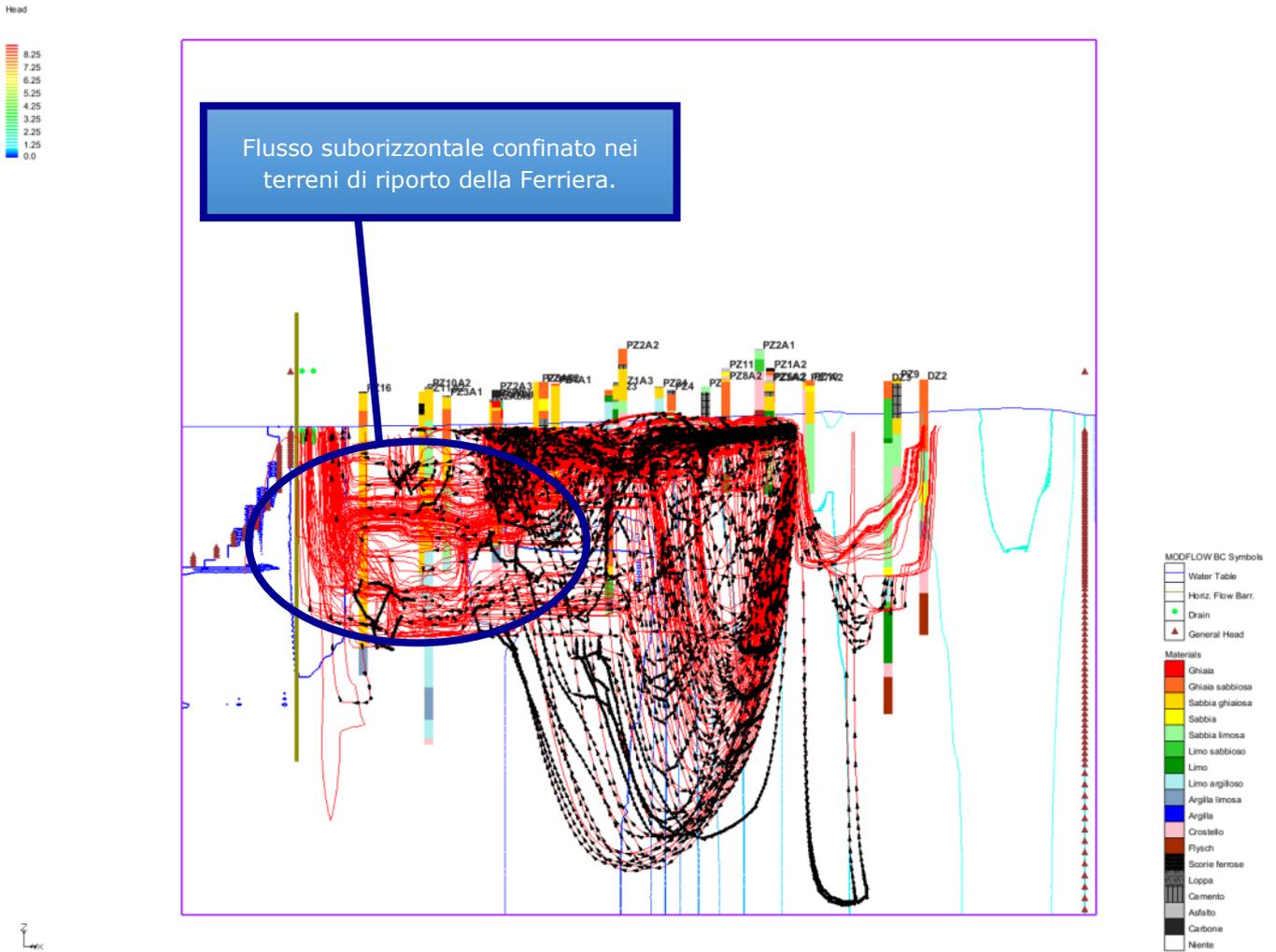


Figura 3-28: Sezione verticale delle linee di flusso del modello "Rio Primario" dopo la messa in sicurezza. Notare come la barriera fisica lato mare (linea verticale marrone) blocchi il propagarsi verso mare delle linee di flusso. Notare altresì come le linee di flusso risalgano dal Flysch verso l'alto confinando il flusso all'interno dei materiali di riporto.

5.5.2 Il modello "Mandracchio"

Il barrieramento fisico e la trincea drenante sono stati anch'essi trasferiti alla griglia di calcolo del modello "Mandracchio". Come in precedenza, il coefficiente di permeabilità orizzontale attraverso la barriera è assunto nullo ed il drenaggio, come già fatto è posizionato ad una quota di -0.05 m s.l.m.m.. I risultati del modello "Mandracchio" sono riportati in Figura 3-29. Si nota come, anche in questo caso il livello piezometrico non sia sostanzialmente diverso dal precedente, a meno di un leggero arretramento delle isopieze dovuto alla somma delle due condizioni imposte nel modello e cioè che il barrieramento ha di fatto arretrato, rispetto alla riva attuale, il livello di conferimento delle acque al drenaggio lungo il diaframma che è posizionato ad una quota inferiore rispetto al livello medio mare.

La Figura 3-30 mostra le linee di flusso per il modello a seguito della messa in sicurezza. Si nota come le stesse terminino tutte nel drenaggio realizzato a monte del barrieramento fisico. Questo risultato da conto, nei limiti della modellizzazione idrogeologica, della bontà dell'intervento progettato anche nel caso del modello "Mandracchio". Si nota, altresì, come il Rio Primario continui a drenare significativamente ma in misura molto minore, rispetto

alla condizione attuale ed al modello "Rio Primario", le acque contenute nei terreni di riporto della Ferriera.

Notare come la Figura 3-31 mostri che la barriera fisica lato mare (linea verticale marrone) in aggiunta al drenaggio blocchi in pratica completamente il propagarsi del flusso di acqua riducendo praticamente a valori bassissimi il trasporto degli inquinanti verso mare. Il modello evidenzia, altresì, come le linee di flusso risalgano dal Flysch verso l'alto confinando il flusso all'interno dei materiali di riporto.

Come riportato nella Figura 3-23, le portate totali alla trincea drenante nel modello "Mandrachio" sono pari a 4,86 l/s (pari a circa 419 m³/d), mentre dal Rio Primario risultano drenati circa 0,63 l/s (pari a circa 54 m³/d) per un totale di 6,93 l/s (pari a circa 598 m³/d).

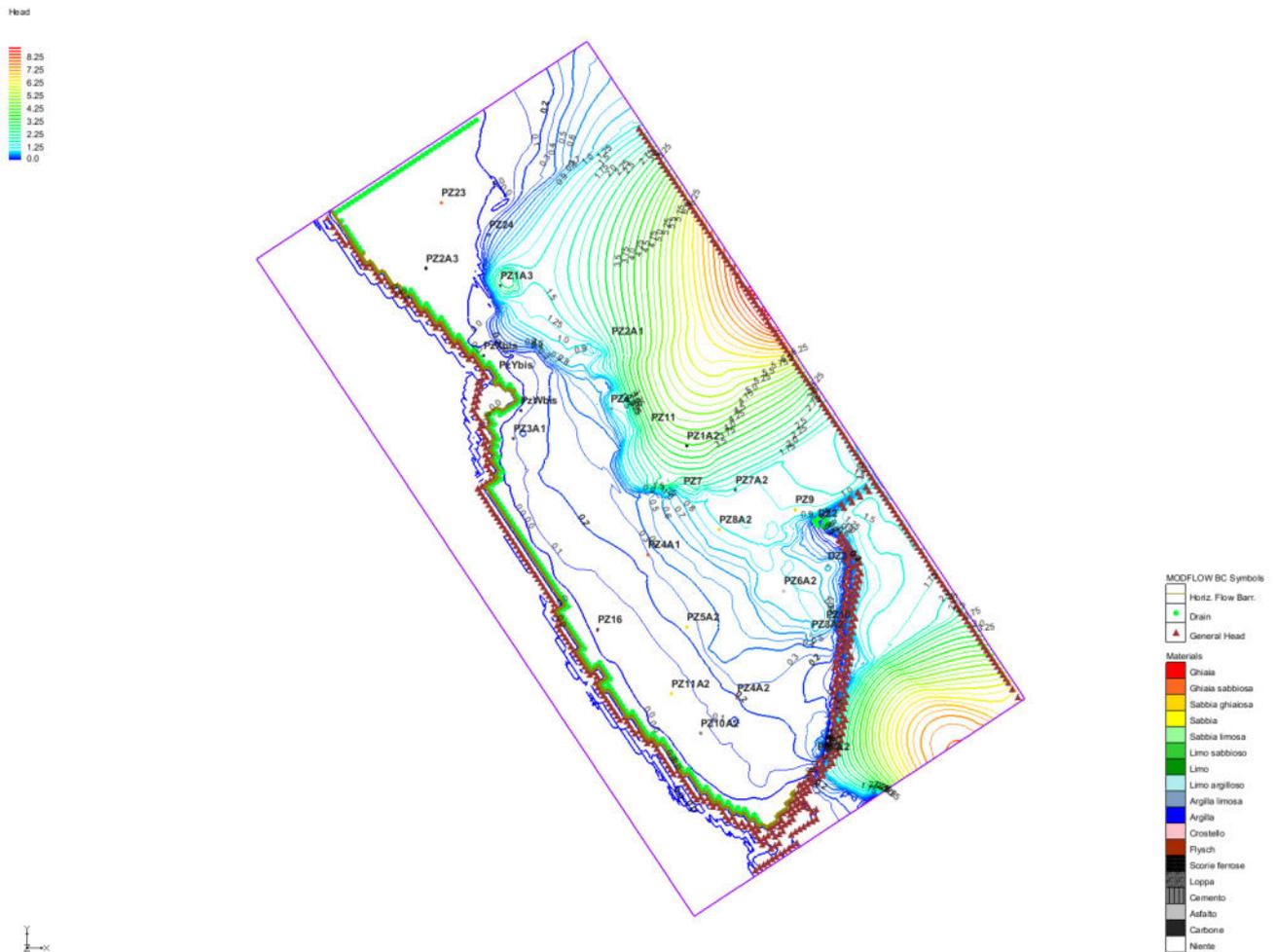


Figura 3-29: Modello "Mandrachio", livello di falda calibrata a seguito della messa in sicurezza. Notare la barriera fisica lato mare (linea spezzata marrone) ed il drenaggio (verde) a monte di questa.

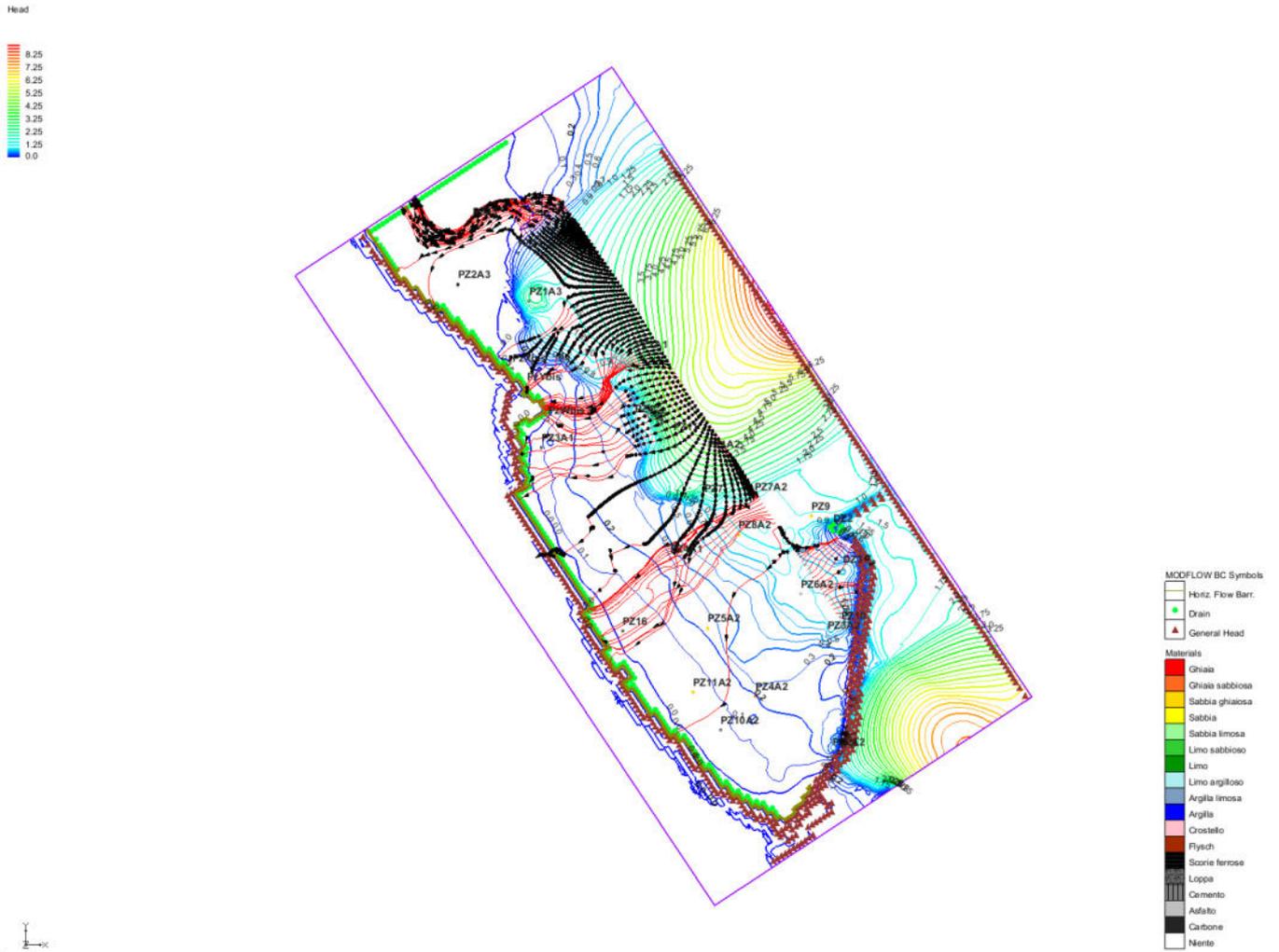


Figura 3-30: Linee di flusso relative al Modello "Mandracchio". Notare come vi siano delle zone di maggior permeabilità dove il flusso si concentra. Notare, altresì, come il flusso sia relativamente lento all'interno del Flysch, ma diventi significativamente più veloce all'interno dei terreni di riporto della Ferriera. Le freccette nere lungo le linee di flusso sono ad intervalli temporali di 10 anni.

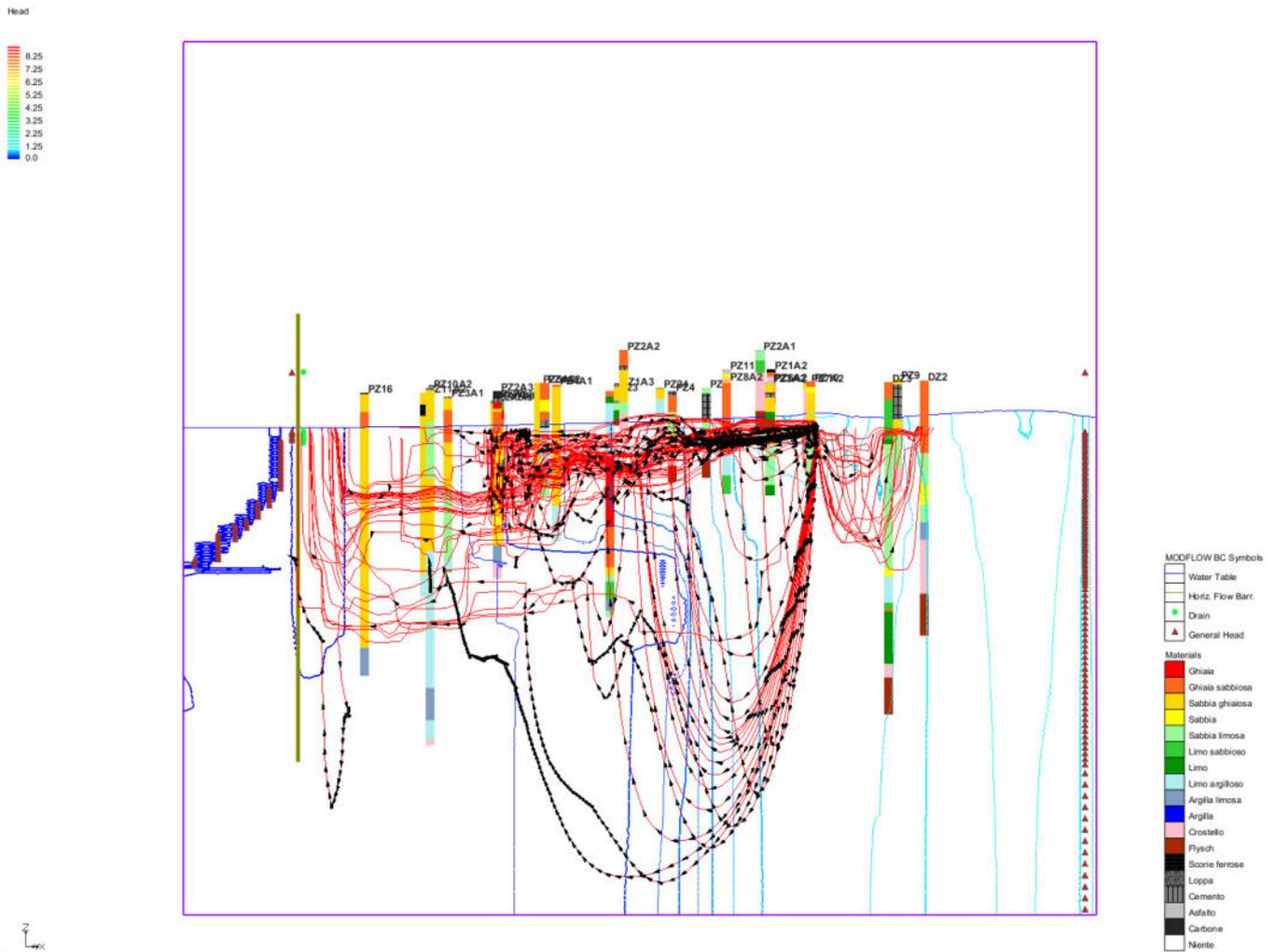


Figura 3-31: Linee di flusso relative al Modello "Mandracchio". Notare come le linee di flusso siano tutte intercettate dalla barriera e dal drenaggio associato.

5.5.3 Laminazione nei terreni di riporto della Ferriera di Servola

È opportuno, infine, verificare come risponda il sistema idrogeologico qualora venga variato il livello del drenaggio a monte della barriera di confinamento lato mare della Ferriera. A tal fine, nei modelli idrogeologici realizzati tale drenaggio è posto a quote 0.00, -0.05 e -0.010 m s.l.m.m.. Le differenti portate calcolate per ogni determinata area sia in relazione al modello "Rio Primario" (Figura 3-17) che al modello "Mandracchio" (Figura 3-23) mostra come le tre condizioni analizzate allo stato stazionario abbiano portate simili e che in ogni caso non variano la portata massima di progetto al drenaggio.

La motivazione, di questo risiede nel fatto che una piccola variazione del livello di falda al drenaggio comporta una variazione minima a monte del modello su distanze che possono essere anche di qualche centinaio di metri.

Questa osservazione, permette di ritenere che, qualora si verificano eventi straordinari (quali piovosità eccessiva, riduzione nel tempo dell'impermeabilizzazione delle coperture, o rottura di elementi delle reti di raccolta delle acque), l'acquifero freatico della Ferriera possa essere efficientemente laminato per almeno circa 10 cm di spessore (da -0.10 a 0.00 m

s.l.m.m.) all'interno degli stessi terreni di riporto, senza che vi siano variazioni significative nell'efficienza delle opere di confinamento fisico da realizzare. Ovviamente laminazioni con variazioni di quote superiori a quella indicata sopra, devono essere analizzate in dettaglio prima di essere applicate al fine di non creare situazioni impreviste di comportamento anomalo del sistema.

Nella pratica di esercizio del sistema di messa in sicurezza si suggerisce, quindi, di mantenere il livello del drenaggio associato al barriera lato mare della Ferriera a - 0.05 m s.l.m.m., portandolo a -0,10 m s.l.m.m. alla fine dell'estate (o in altri periodi precedenti a piovosità straordinaria) in modo da poter avere una maggiore capacità di laminazione.

5.5.4 L'effetto drenante del Rio Primario

Dai risultati presentati per entrambi i modelli si osserva che le portate drenate dal Rio Primario (circa 3,62 l/s, pari a circa 312 m³/d, per il modello "Rio Primario" e 0,63 l/s, pari a circa 54 m³/d, per il modello "Mandrachio") sono significative.

Al fine di ridurre questo flusso ad una condizione ambientalmente accettabile, se da un lato la realizzazione di un ulteriore barriera con trincea drenante per tutta la lunghezza del Rio Primario potrebbe essere considerata la soluzione teoricamente più appropriata, dall'altro, la presenza di infrastrutture il cui utilizzo non può essere interrotto (binari ferroviari, condotte idrocarburi, sottoservizi vari, ecc.) impedisce nei fatti di poter adottare tale soluzione. In effetti, oltre a questa soluzione ottimale, sono state testate anche una serie di ulteriori soluzioni alternative, riscontrando per esse delle controindicazioni, così come riportato in Tabella 3-5, che allo stato non possono essere superate.

Tra le varie soluzioni testate, viene proposto di realizzare una barriera attiva tramite una batteria di pozzi in emungimento, dimensionata (nella distanza tra i pozzi e negli emungimenti) in modo tale da minimizzare il flusso dai terreni di riporto della Ferriera verso il Rio Primario, senza tuttavia dover trattare un volume consistente di acqua proveniente dalle aree esterne alla stessa Ferriera di Servola.

Si rimarca che, al fine di verificare adeguatamente le condizioni al contorno ed il dimensionamento di questo intervento, è comunque necessario eseguire un monitoraggio specifico, della durata di almeno un anno, di cui si discuterà nel seguito.

Tabella 3-5: Soluzioni verificate tramite modelli idrogeologici specifici

Tipo di soluzione	Controindicazioni
<p>a) Barriera fisica (setto impermeabile lungo tutto il Rio Primario esteso sino ad intercettare il Flysch).</p>	<p>La presenza di infrastrutture vitali alla Ferriera ne impedisce la realizzazione. Inoltre, tale barriera farebbe risalire la falda a monte fino ad almeno 2 m s.l.m.m. potenzialmente creando problemi alla gestione delle acque ed alla stabilità delle fondazioni ed alla manutenzione/utilizzo delle infrastrutture interrate.</p>

<p>b) Barriera drenante (drenaggio lungo tutto il Rio Primario con quota a 0.00 m s.l.m.m.).</p>	<p>La presenza di infrastrutture vitali alla Ferriera ne impedisce la realizzazione.</p> <p>Inoltre, non può essere garantito che vengano intercettati tutti i flussi (potenzialmente contaminati) che attualmente sono drenati dal Rio Primario.</p>
<p>c) Barriere fisica + drenante (somma delle soluzioni precedenti).</p>	<p><u>Per quanto questa sia la soluzione ipoteticamente migliore</u>, la presenza di infrastrutture vitali all'esercizio della Ferriera, ne impedisce la realizzazione.</p>
<p>d) Barriera fisica lunga esterna alla Ferriera di Servola lungo tutto il corso del Rio Primario in "sponda" sinistra, con intasamento alla foce del drenaggio del Rio Primario e trattamento di tutte le acque drenate dallo stesso.</p>	<p>Sussistendo delle indeterminazioni nelle condizioni al contorno all'esterno della Ferriera tale soluzione potrebbe comportare problemi derivanti da un innaturale innalzamento della falda esterna che risulterebbe non più drenata.</p>
<p>e) Barriera fisica corta esterna alla Ferriera di Servola estesa soltanto nella parte finale del Rio Primario con intasamento del drenaggio alla foce.</p>	<p>Sussistendo delle indeterminazioni nelle condizioni al contorno all'esterno della Ferriera ciò potrebbe comportare un innalzamento della falda sia interna che esterna alla Ferriera che potrebbe raggiungere i +2.50 m s.l.m.m..</p>
<p>f) Batteria di pozzi in emungimento in "sponda" destra lungo il corso del Rio Primario deviato.</p>	<p>Questa soluzione è tecnicamente realizzabile ed allo stesso tempo potrebbe garantire un alto coefficiente di recupero delle acque sotterranee che circolano nei terreni di riporto della Ferriera e che attualmente sono drenate dal Rio Primario.</p>

Per quanto riguarda il modello "Rio Primario" la batteria di pozzi in emungimento (Figura 3-32) è composta da circa 15 pozzi con un emungimento complessivo pari a circa 324 m³/d e con un flusso tuttavia drenante dalla Ferriera al Rio Primario di circa 75 m³/d. Si ritiene, a causa di tutte le approssimazioni imposte, sempre cautelativamente per eccesso, che tale flusso possa essere sovrastimato almeno di un fattore compreso fra 2 e 3. D'altronde, i monitoraggi eseguiti allo stato attuale, anche per la loro carenza informativa, non permettono di raffinare i modelli idrogeologici di calcolo più di quanto sia già stato fatto. Ad ogni buon conto, il totale complessivo che dovrebbe essere convogliato agli impianti di trattamento, pari a circa 801 m³/d, rientra nelle capacità di progetto dell'impianto stesso.

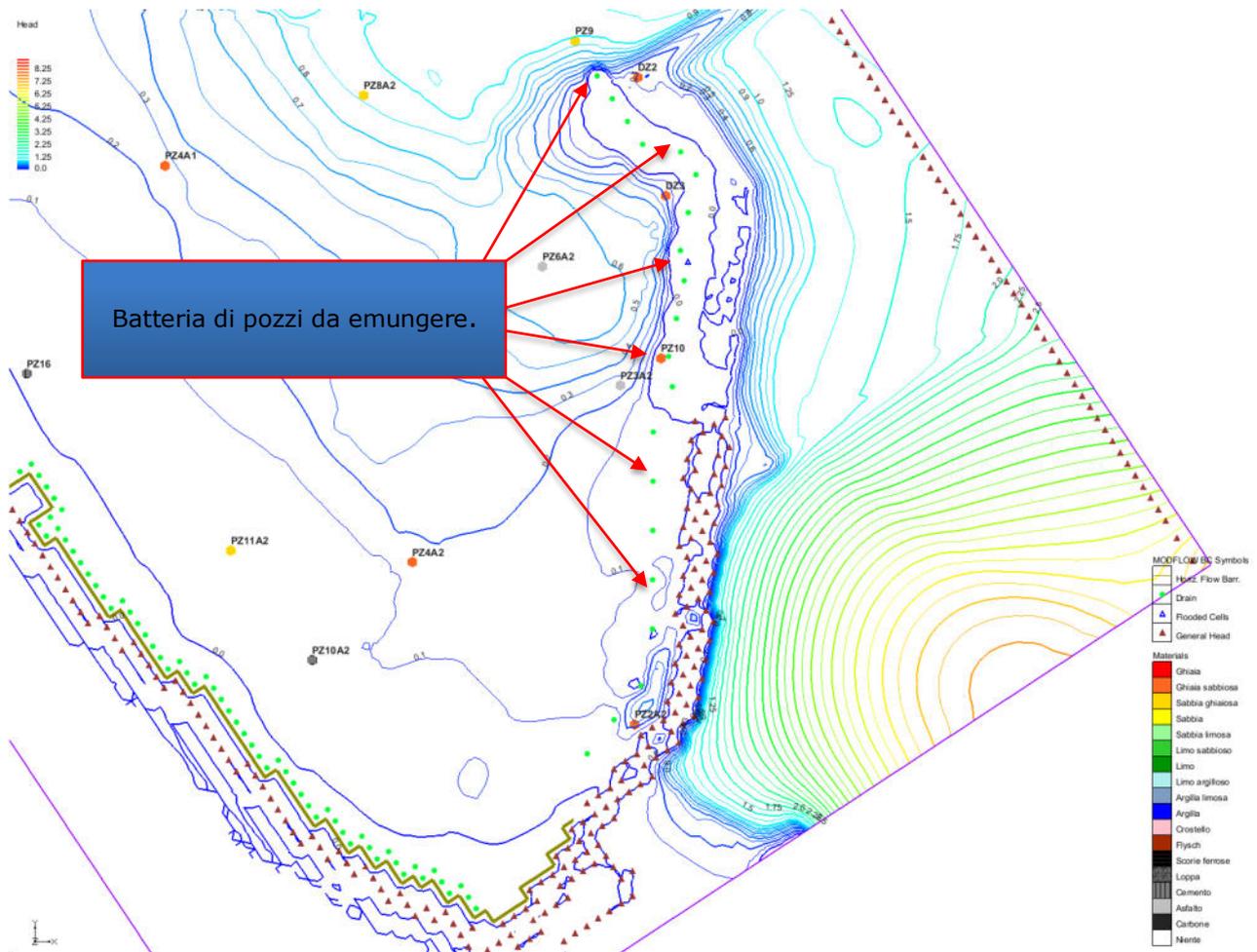


Figura 3-32: Modello "Rio Primario" con batteria di pozzi in emungimento in sponda destra. I pozzi nel tratto più a valle possono non essere realizzati in quanto le loro portate sono considerate esigue

Per quanto riguarda il modello "Mandrachio" la batteria di pozzi in emungimento (Figura 3-33) dovrebbe essere composta da almeno 10 pozzi con emungimento totale di 193 m³/d e con un flusso tuttavia drenante dalla Ferriera al Rio Primario di circa 11 m³/d. Anche in questo caso si ritiene che il valore di portata possa essere sovrastimato, ma di un fattore che dovrebbe essere inferiore a 2. Il totale complessivo della portata di acqua che dovrebbe essere convogliata agli impianti di trattamento è pari a circa 472 m³/d e ben rientra nella capacità complessiva di progetto dell'impianto stesso.

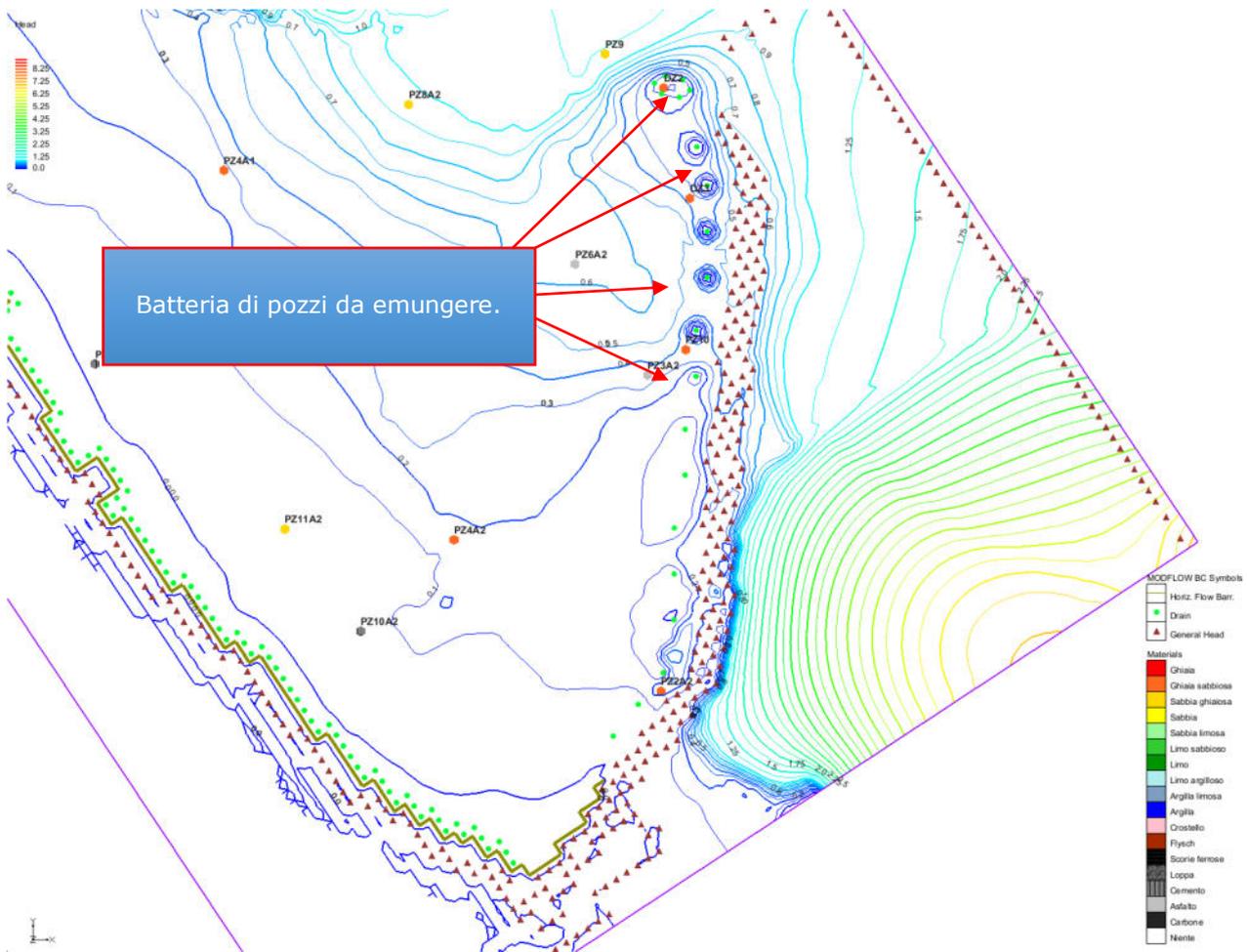


Figura 3-33: Modello "Mandrachio" con batteria di pozzi in emungimento in sponda destra. I 5 pozzi nel tratto più a valle possono non essere realizzati in quanto le loro portate sono considerate esigue.

5.5.5 Monitoraggio e caratterizzazione del drenaggio del Rio Primario

Le carenze informative derivanti dallo stato attuale delle conoscenze desunte dal monitoraggio nella zona del Rio Primario non permettono di tirare conclusioni definitive al riguardo di quale modello dei due presentati (modello "Rio Primario" e modello "Mandrachio") sia da considerare corretto, anche se si ritiene che il modello "Rio Primario" è più probabile.

In questa sede viene pertanto indicato di eseguire un monitoraggio specifico, della durata di almeno un anno, al fine di poter identificare con maggior affidabilità quale dei due modelli presentati o quale combinazione di essi possa essere considerato quello che meglio rappresenti la realtà. In base ai risultati di questo monitoraggio, sarà possibile stabilire con migliore definizione quale siano il numero, le portate e l'intervallo ottimali dei pozzi in emungimento.

La fase di monitoraggio dovrà essere necessariamente preceduta da una serie d'indagini geognostiche e geofisiche specifiche tese ad identificare con certezza la planimetria e le profondità del tracciato dello scatolare in cemento armato del Rio Primario deviato e del suo drenaggio di base. Tali indagini potrebbero anche servire a ricostruire la superficie di falda in prossimità del Rio Primario.

Successivamente, ai fini del monitoraggio, si ritiene di dover realizzare almeno cinque "doppiette" costituite ciascuna da due piezometri affiancati in monitoraggio continuo. Il primo pozzo di ogni doppietta dovrà essere localizzato per quanto possibile in prossimità del drenaggio dello scatolare in cemento armato del Rio Primario deviato con sezione fenestrata stimata tra circa -2.00 e +1.00 m s.l.m.m., tenendo presente però di mantenere la parte fenestrata per quanto possibile all'interno dei terreni di riporto della Ferriera.

Si propone di utilizzare i sei piezometri già esistenti come base per le doppiette di monitoraggio. In particolare, i piezometri DZ2bis e PZ9 costituiscono già la prima doppietta delle 5 da realizzare. Le altre quattro doppiette saranno basate sui piezometri DZ3bis, PZ10, PZ3.A2 e PZ2.A2. A ciascuno di questi piezometri dovranno essere affiancati i 4 pozzi da realizzare, la cui locazione dovrà necessariamente essere determinata a valle delle indagini geofisiche previste per l'ubicazione dello scatolare in cemento armato del Rio Primario deviato. Questi pozzi dovranno essere posizionati in direzione grossomodo perpendicolare all'asse del Rio Primario per quanto possibile in prossimità dello scatolare in cemento armato. L'esatta posizione dovrà ovviamente essere mediata in base alla possibilità effettiva di realizzare il piezometro nella posizione stabilita idealmente a priori.

Tra gli obiettivi di questo monitoraggio, oltre alla definizione del gradiente idraulico medio effettivo tra il piezometro lontano e quello vicino al Rio Primario ed all'analisi del comportamento della doppietta piezometrica in funzione delle variazioni del livello di falda imposte dalla marea e dalla piovosità, sarà anche quello di meglio definire le permeabilità dei terreni di riporto nel loro intorno.

L'analisi del comportamento piezometrico dovrà essere accompagnata dalla realizzazione di un modello idrogeologico specifico dell'area del Rio Primario che discerna in modo definitivo quale sia, tra i modelli in questa sede proposti, la effettiva realtà idrogeologica.

Tale modello idrogeologico dovrà, infine, permettere di ubicare definitivamente la batteria di pozzi da porre in emungimento e di quantificarne le portate.

5.5.6 Monitoraggio in corso d'opera e post operam

Durante le fasi di costruzione, messa in esercizio ed esercizio dell'opera in oggetto, viene ritenuto opportuno affinare il modello idrogeologico già realizzato in modo da poterne validare il comportamento ed in particolare le portate in questa sede calcolate, ottimizzare così eventualmente il processo di raccolta e depurazione delle acque drenate dal confinamento a mare. A questo riguardo viene suggerito l'utilizzo, verificandone ed eventualmente ripristinandone la funzionalità, dei seguenti pozzi piezometri ai fini della registrazione in continuo del livello di falda e dei parametri fisici dell'acquifero:

- Sezione NW - PZ3.A3, PZ24 e PZ2.A3;
- Sezione centrale - PZ2A1, PZYbis;
- Sezione SE - PZ7.A2, PZ4.A1, PZ16.

Ovviamente, a tali pozzi di monitoraggio si affiancheranno quelli eseguiti nelle doppiette di piezometri lungo il Rio Primario:

- DZ2bis-PZ9;
- DZ3bis + 1 da realizzare;
- PZ10 + 1 da realizzare;
- PZ3.A2 + 1 da realizzare;

- PZ2.A2 + 1 da realizzare.

Le cinque doppiette saranno monitorate in corso d'opera per poi ridursi a tre in fase di esercizio, individuate sulla base degli esiti del monitoraggio in corso d'opera.

6 VERIFICA DEL MODELLO GEOLOGICO E REALIZZAZIONE DELLE SEZIONI GEOLOGICHE

Il modello geologico sviluppato per il progetto di messa in sicurezza dell'area della Ferriera (cioè il cosiddetto Progetto INVITALIA), che è discusso in dettaglio nei capitoli precedenti, è stato analizzato e verificato in modo da estenderne la sua validità fino a +5 m s.m.m.. Tale quota è infatti sufficiente ad includere le opere in progetto ed a poter quindi realizzare delle sezioni geologiche lungo la pianta delle opere in progetto (Figura 4-1).

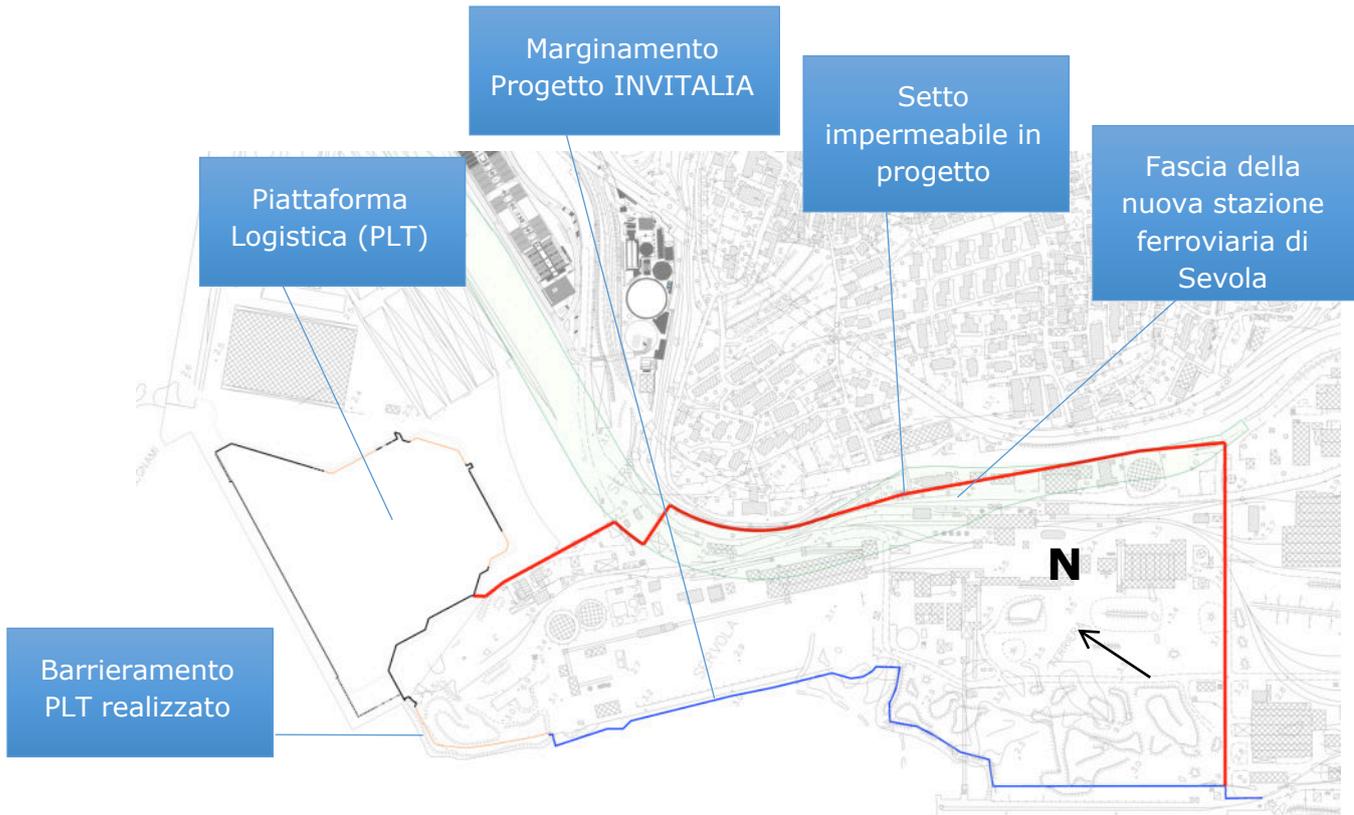


Figura 4-1. Pianta dell'area della Ferriera con gli interventi realizzati ed in progetto prima del sopralluogo. In puntinato verde chiaro il nuovo asse ferroviario.

Sono state a questo fine realizzate due sezioni. La prima, quella di monte (Figure 4-2 e 4-3), segue il tracciato del setto impermeabile in progetto lungo tutta la sua estensione e si raccorda dal lato NO al setto impermeabile della Piattaforma Logistica, mentre dal lato SE si allaccia al setto impermeabile del Progetto INVITALIA immediatamente a sud del cosiddetto molo minerali, dove si localizza la strada di separazione tra l'area "a caldo" e quella "a freddo". La seconda sezione è localizzata lungo il muro di sostegno lato mare del nuovo asse ferroviario (Figure 4-4, 4-5).

La sezione lungo il setto impermeabile (lato monte) in progetto mostra come il Flysch sia praticamente subaffiorante in tutta la parte della Collina di Servola mentre si approfondisca notevolmente verso i due estremi. In via cautelativa, considerate anche le approssimazioni del modello geologico, si suggerisce di estendere il piede del setto impermeabile sempre

all'interno del Flysch, basandolo altresì a quote non superiori a 5 m al di sotto del livello medio mare. Questo punto verrà discusso anche successivamente nella modellazione idrogeologica.

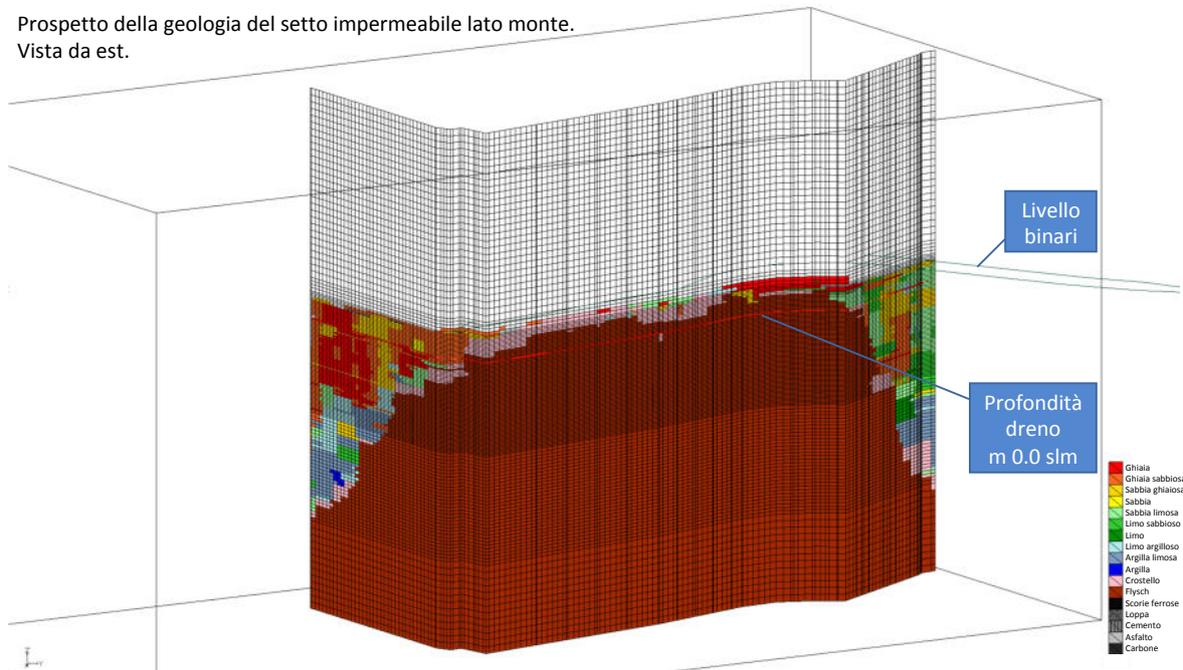


Fig. 4-2. Vista prospettica della sezione geologica lungo il tracciato del setto impermeabile. I vari colori dei terreni rappresentano classi di litologia e permeabilità distinte. A destra la terminazione verso la Piattaforma Logistica, a sinistra la terminazione verso il progetto INVITALIA. Esagerazione verticale: 10 volte.

A seguito di indagini geologiche mirate, cioè sulla base del perfezionamento del modello idrogeologico che includa ulteriori dati specifici di litologia e permeabilità particolarmente delle unità del "Crostello" e del Flysch – che saranno eventualmente realizzate in fase di progetto esecutivo –, potrà essere verificata l'opportunità di ridurre o confermare la profondità del setto impermeabile. Ad ogni buon conto, in avvicinamento ai due estremi del setto impermeabile in progetto, la sua profondità dovrebbe essere la stessa di quella delle barriere idrogeologiche a cui si raccorda: cioè, il setto impermeabile dovrebbe raggiungere prima di entrambi gli estremi la profondità massima di -29.5 m s.l.m.m. (vedi Figura 4-3).

Inoltre, si nota che la profondità dei drenaggi che si considera necessario realizzare intorno allo ± 0.0 m s.m.m. internamente al setto impermeabile nei due lati di raccordo con il diaframma esistente lato Piattaforma Logistica con quello del Progetto INVITALIA, interessa sia il Flysch che i materiali di riporto della ex Ferriera. Questo fatto impone di dover necessariamente impedire la contaminazione delle acque di falda contenute nel Flysch da parte delle acque inquinate presenti nei terreni di riporto della ex Ferriera. A tal fine i pozzi di drenaggio dovranno essere opportunamente realizzati impermeabilizzando le sezioni specifiche dei pozzi che possano portare a contatto le acque di falda inquinate con le acque potenzialmente salubri contenute nel Flysch. Il modello idrogeologico da realizzare in fase di progetto esecutivo dovrà specificamente tenere conto di tale problematica.

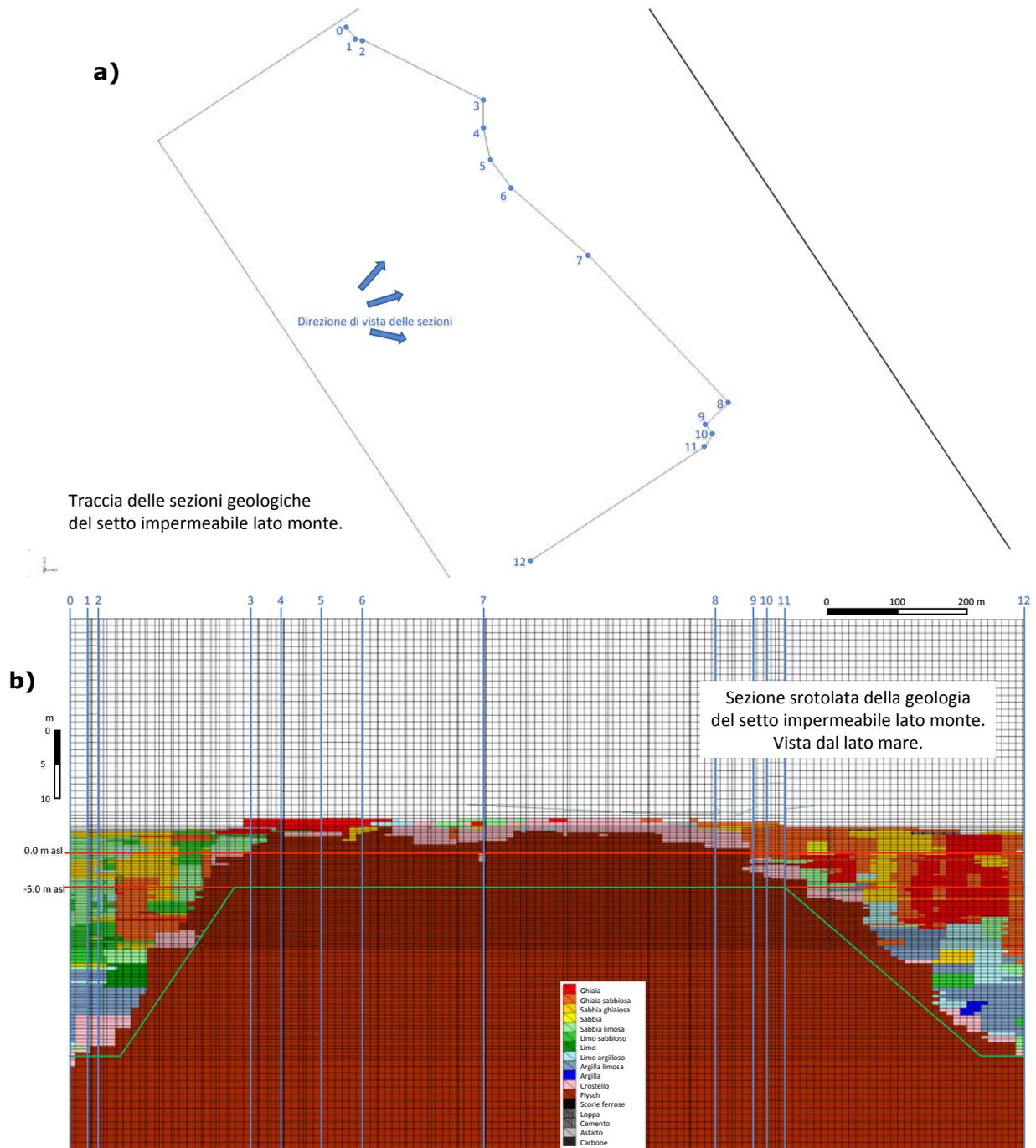


Fig. 4-3. Sezione geologica lungo il tracciato del setto impermeabile. **a)** Pianta con vertici della sezione geologica del tracciato. Esagerazione verticale 10 volte. **b)** Sezione geologica "srotolata" lungo la pianta del setto impermeabile; notare come il fondo del setto impermeabile (linea verde) sia localizzato almeno un metro all'interno del flysch, mantenendosi comunque a quota non superiore ai -5 m s.m.m.. La linea rossa indica il livello medio mare, quota a cui è stato ipotizzato il dreno a monte del setto impermeabile.

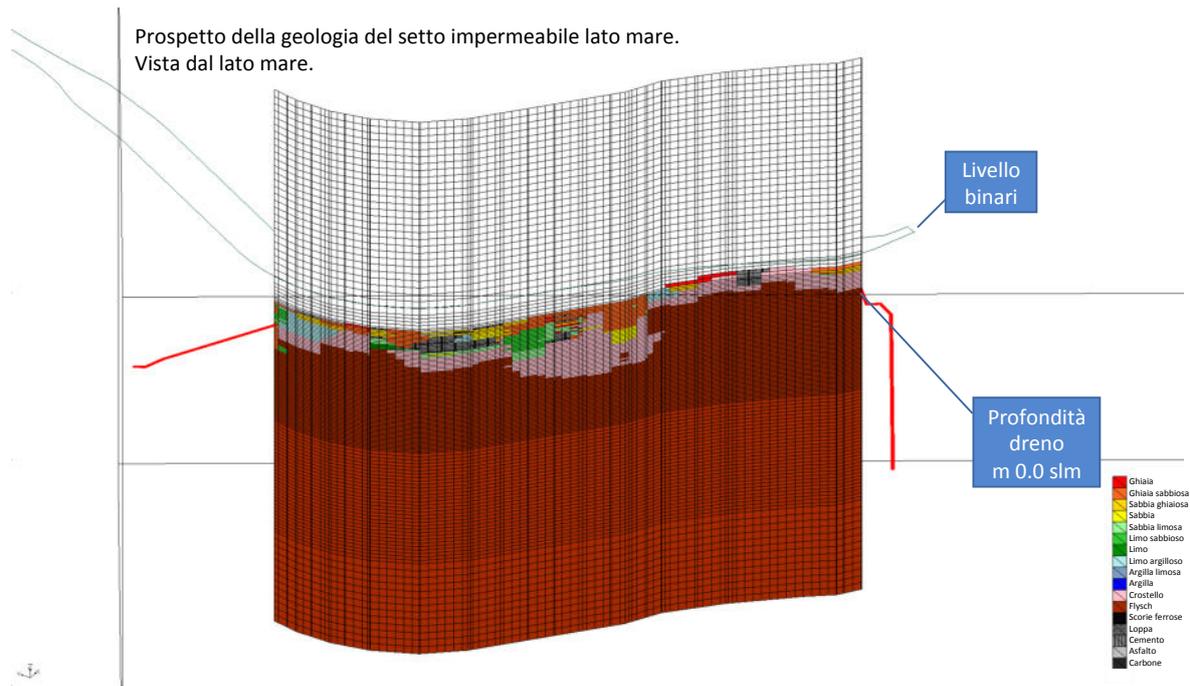


Fig. 4-4. Vista prospettica da sudovest della sezione geologica lungo la pianta del muro di sostegno della ferrovia a SO del setto impermeabile. I vari colori dei terreni rappresentano classi di litologia e permeabilità. Lungo questa sezione geologica dovrebbero essere posizionati i pozzi drenanti delle acque della falda superficiale. Esagerazione verticale 10 volte.

La sezione geologica lungo il muro di sostegno del nuovo asse ferroviario (sezione lato mare; Figure 4-4 e 4-5) rappresenta, con i citati limiti di approssimazione del modello idrogeologico, la condizione nella quale dovrebbero essere realizzati i pozzi di drenaggio della falda "residua" interna all'area della ex Ferriera. Lungo tale muro dovrebbero essere posizionati ulteriori pozzi di drenaggio della falda interna alla ex Ferriera.

Si nota fin d'ora che la profondità di drenaggio dei pozzi, che dovrebbe essere a 0.0 m s.m.m., interessa sia il Flysch che i materiali di riporto della ex Ferriera. Vale anche per questi pozzi quanto già detto nei paragrafi precedenti, cioè i pozzi drenanti da realizzare internamente all'area "a caldo", dovranno ridurre al minimo il mescolamento delle acque di falda contenute nel riporto con quelle contenute nel Flysch e contemporaneamente garantire il controllo del gradiente imposto fra la falda a monte e a valle del diaframma.

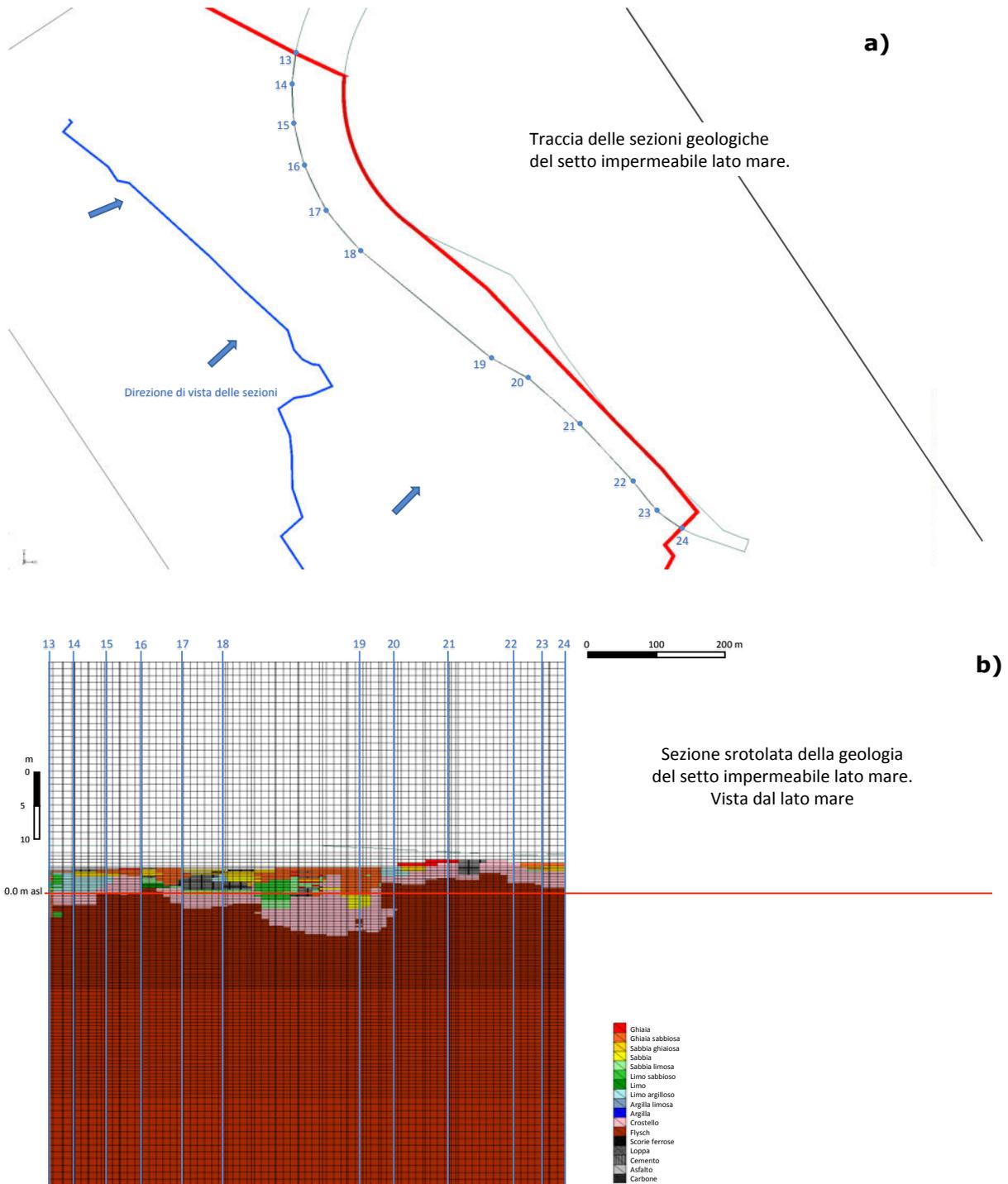


Fig. 4-5. Sezione geologica lungo il tracciato del muro di sostegno dei binari. **a)** Pianta con vertici della sezione geologica. **b)** Sezione geologica "srotolata". La linea rossa indica il livello medio mare, quota a cui è stato ipotizzato il drenaggio dei pozzi. Esagerazione verticale 10 volte.

7 UTILIZZO DEL MODELLO IDROGEOLOGICO ATTUALE PER LA VERIFICA DELLE CARATTERISTICHE PRELIMINARI DEL SETTO IMPERMEABILE E DEI DRENAGGI

7.1 Il modello generale iniziale e i possibili modelli di dettaglio

Per la realizzazione del modello idrogeologico preliminare utile alla realizzazione del nuovo scalo ferroviario di Servola, è stato utilizzato come base di partenza il modello idrogeologico già realizzato e calibrato per il cosiddetto Progetto INVITALIA (Figura 5-1), con le opere di marginamento spondale marine come fossero già realizzate ed in funzione. Con particolare riguardo alle due ipotesi modellistiche "Rio Primario" e "Mandracchio" è stato adottato il primo dei due modelli che sembrerebbe, allo stato attuale delle conoscenze anche in base ai dati raccolti durante la fase esecutiva del marginamento, il più plausibile.

Nella parte che segue vengono presentati tre modelli principali relativi a distinte situazioni potenziali al fine di evidenziare quale possa essere la soluzione ottimale, che cioè mantenga il sistema acquifero in sicurezza, minimizzando i costi di gestione e quelli di costruzione.

I risultati ottenuti mostrano come al momento si ritenga opportuno optare per un'opzione più costosa al fine essere sufficientemente certi della bontà dell'intervento in fase di progetto preliminare. In fase di progetto esecutivo, quando sarà realizzato il modello idrogeologico aggiornato con i nuovi dati da raccogliere (sondaggi geognostici e misure piezometriche), sarà possibile optare per una delle soluzioni alternative presentate di seguito, o per eventuali soluzioni intermedie, meno costose, ma ugualmente efficienti.

7.2 Primo modello, cosiddetto "di base", con solo setto impermeabile e barriera drenante

Il modello di partenza è quello risultante dalla calibrazione del modello idrogeologico cosiddetto "Rio Primario" del progetto INVITALIA (Figura 5-1). A questo modello è stato aggiunto un setto impermeabile lato monte secondo il tracciato finale comunicato dalla HHLA PLT Italy S.r.l. con una profondità così come indicata in Figura 4-3.

Al setto impermeabile lato monte, lungo il tratto che costeggia la Collina di Servola, è stato posizionato un drenaggio a quota 0.0 m s.m.m.. Questa quota è necessaria per massimizzare da un lato il drenaggio delle acque di falda "esterne" provenienti dal Flysch in modo che non vengano in contatto con i terreni contaminati presenti nel riporto della ex Ferriera, dall'altro per essere certi di non interferire negativamente con la dinamica dei drenaggi già progettati ed approvati che prevedono di mantenere un flusso costante verso il drenaggio del marginamento lato mare (Progetto INVITALIA), opera che è progettata per mantenere una quota media di drenaggio pari a -0.05 m s.m.m..

La permeabilità delle unità idrogeologiche è la stessa di quella utilizzata nel modello calibrato "Rio Primario" (Tabella 2.1).

L'analisi dell'efficienza del drenaggio in progetto a quote differenti da quella proposta di 0.0 m s.m.m. dovrebbe essere valutata in fase di progetto esecutivo con il modello geologico aggiornato – che includa i risultati dei sondaggi da eseguire – e con condizioni al contorno

Infine, per quanto riguarda la ricarica efficace, essa è stata arbitrariamente posta su tutta area "a caldo" della ex Ferriera a $3 * 10^{-10}$ m/s (cioè pari a circa 10 mm/a) per simulare una per quanto minima ricarica che da un punto di vista ingegneristico è comunque da considerare praticamente nulla). Questa scelta è fatta in base alla previsione del progetto di messa in sicurezza permanente di rendere l'area "impermeabile" tramite "capping" ottenuto con geotessili impermeabili, spessori di protezione e per lo più con una finitura data da una pavimentazione di cemento fibrorinforzata.

Due ulteriori modelli idrogeologici sono presentati per analizzare la validità del caso "di base" in relazione a potenziali non accurate misure di permeabilità nel Flysch. È stata in particolare verificata la possibilità che questo possa avere una permeabilità di un ordine di grandezza maggiore di quella effettivamente utilizzata nel modello "di base" (modello 5.1.1), ed alla opportunità o meno di spingere il setto impermeabile fino alla profondità di 29.5 m s.m.m. (modello 5.1.2) lungo tutto il tracciato.

7.2.1 Caso "di base" a bassa permeabilità.

Nel modello "di base" (Figura 5-2) si osserva come sia effettivamente ridotto il livello di falda all'interno dell'area perimetrata dal nuovo setto impermeabile (ex area "a caldo"), mentre al di fuori dell'area perimetrata il livello rimane in pratica identico al livello precedente.

Si nota però come verso il limite SE della stessa area rimanga un livello di falda abbastanza elevato di circa 1.0 m s.m.m.. Valore che è paragonabile al livello di falda immediatamente a monte del setto impermeabile poco oltre il drenaggio. Questo implica che parte dell'acqua di falda percola attraverso il Flysch al disotto della barriera per rientrare all'interno della ex ferriera esattamente come succede per i vasi comunicanti. Il volume di acqua che fluisce all'interno della ex Ferriera, è però limitato a causa della permeabilità relativamente bassa del Flysch.

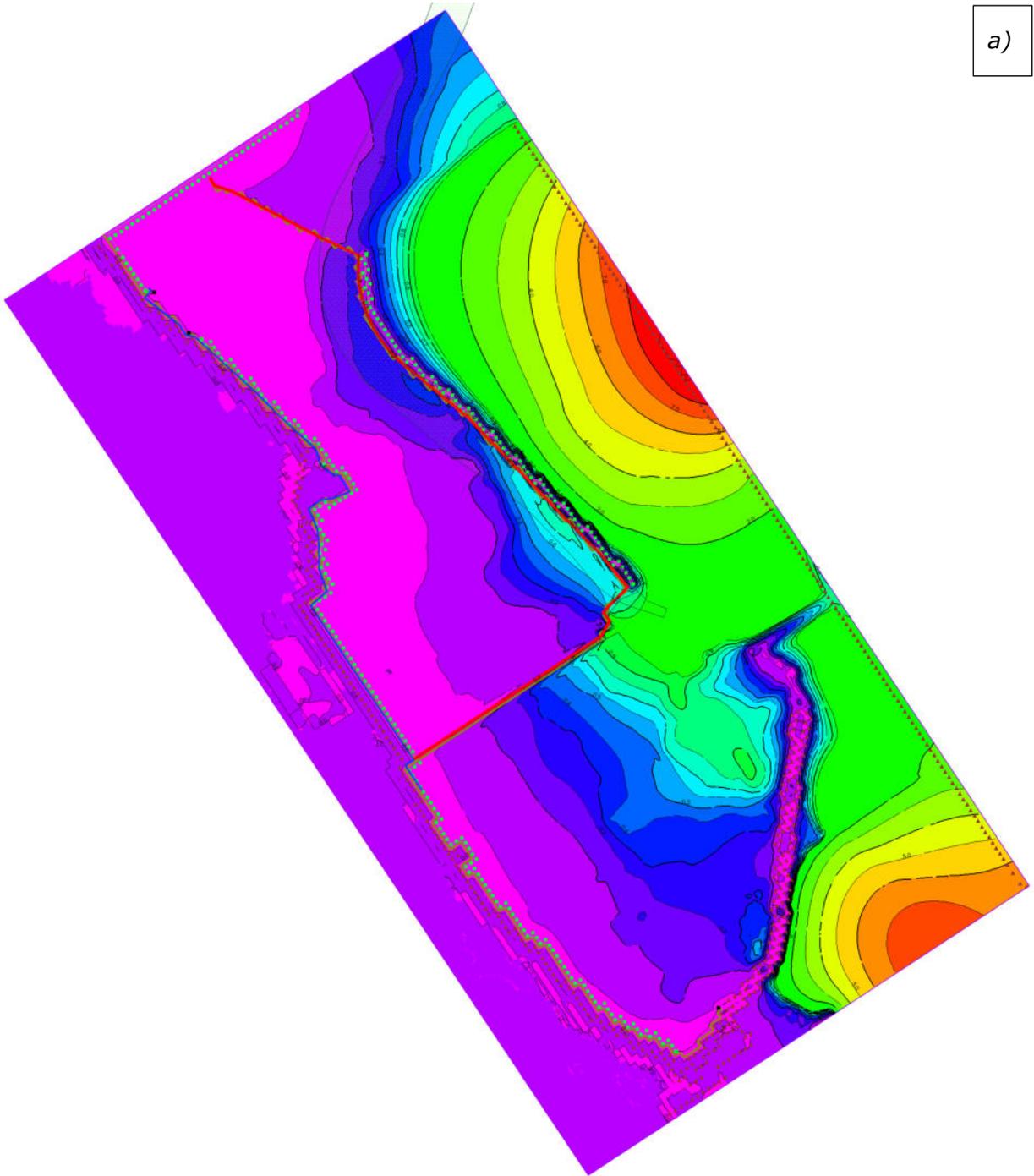
Per ridurre ulteriormente il livello di falda all'interno del perimetro della ex Ferriera, occorre drenare ulteriormente dall'interno dello stesso perimetro la falda come sarà verificato nei modelli riportati ai capitoli seguenti.

7.2.2 Caso di alta permeabilità.

In questo modello è stato imposto alle unità idrogeologiche del Flysch e del "Crostello" una permeabilità di un ordine di grandezza maggiore rispetto alle permeabilità di queste unità utilizzate per il modello "di base" (Tab. 5-1). Il risultato di questo incremento di permeabilità è mostrato in Fig. 5-3 ed è il risultato di un flusso maggiore di acqua di falda che entra all'interno dei terreni di riporto della ex-Ferriera e della parallela diminuzione del gradiente della falda.

La differenza tra questo modello ad alta permeabilità ed il modello "di base" è riprodotta in Fig. 5-4. Si osserva come, relativamente alle zone esterne all'area perimetrata, a monte della barriera il livello di falda scenda apprezzabilmente (-1.0 m), mentre nella Collina di San Pantaleo, la diminuzione del livello di falda risulta essere fuoriscala. Nella zona a nord dove è localizzato il depuratore, invece, la falda sale significativamente (+0.7 m).

a)



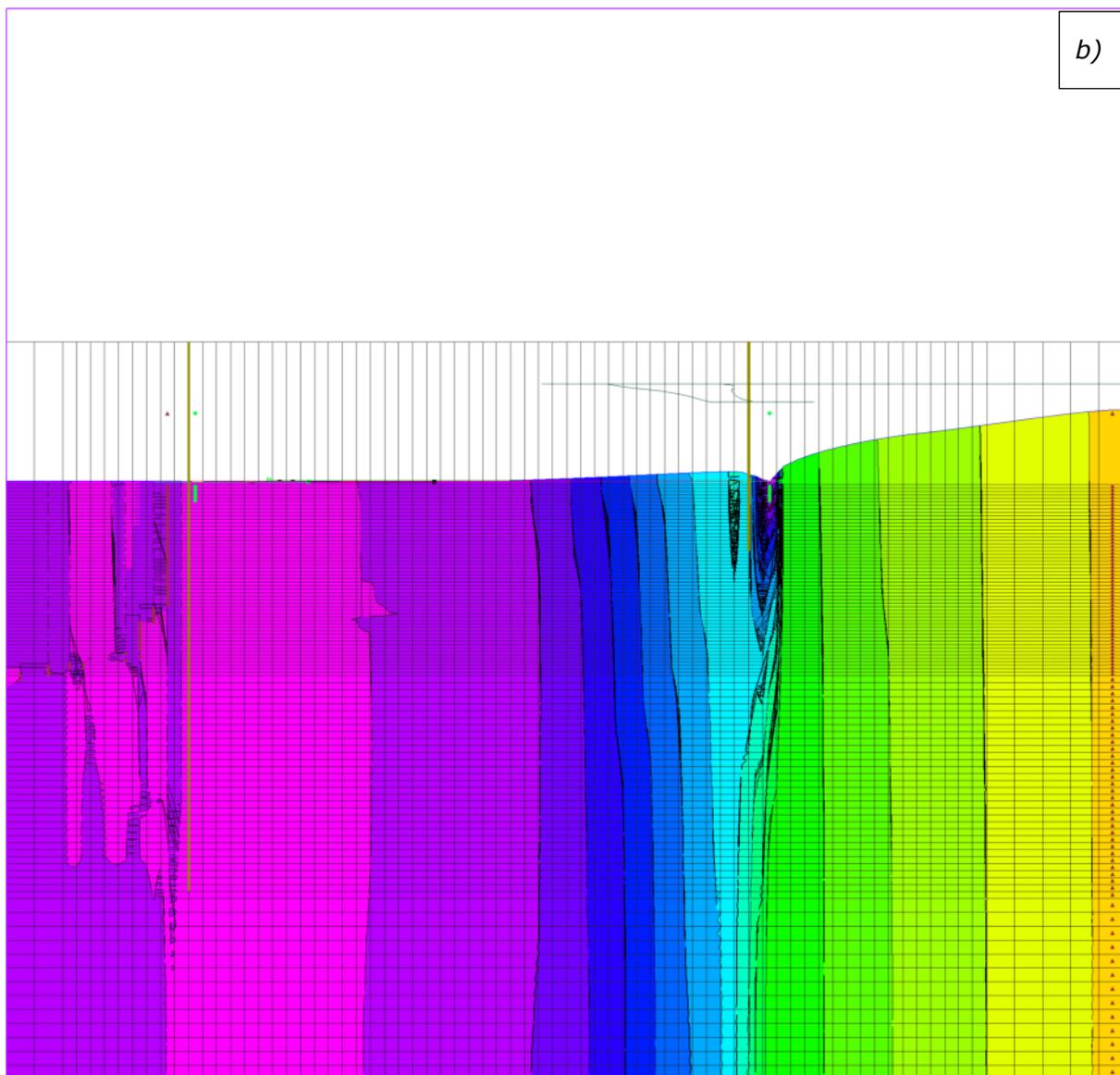
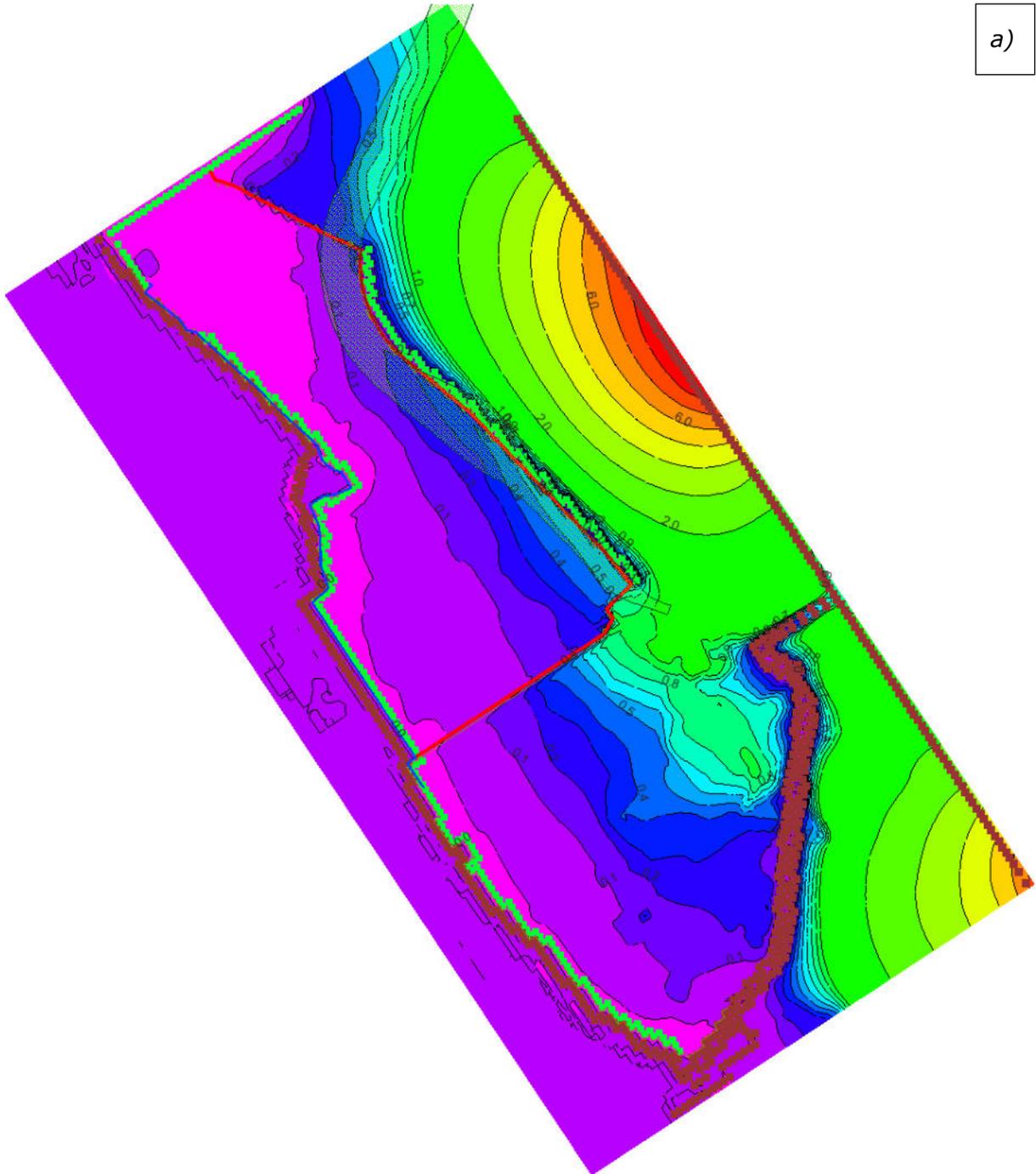


Figura 5-2. Modello "di base" con permeabilità calibrata secondo il modello cosiddetto "Rio Primario" del progetto INVITALIA. Le curve di livello della falda sono indicate come segue: da -0.1 m a 1 m s.m.m. l'equidistanza è di 0.1 m, da 1.0 a 9.0 m l'equidistanza è di 1.0 m. a) Vista planimetrica della falda freatica. b) Sezione SO-NE a 790 m dall'origine, esagerazione verticale 10 volte; notare l'influenza del drenaggio di monte.

a)



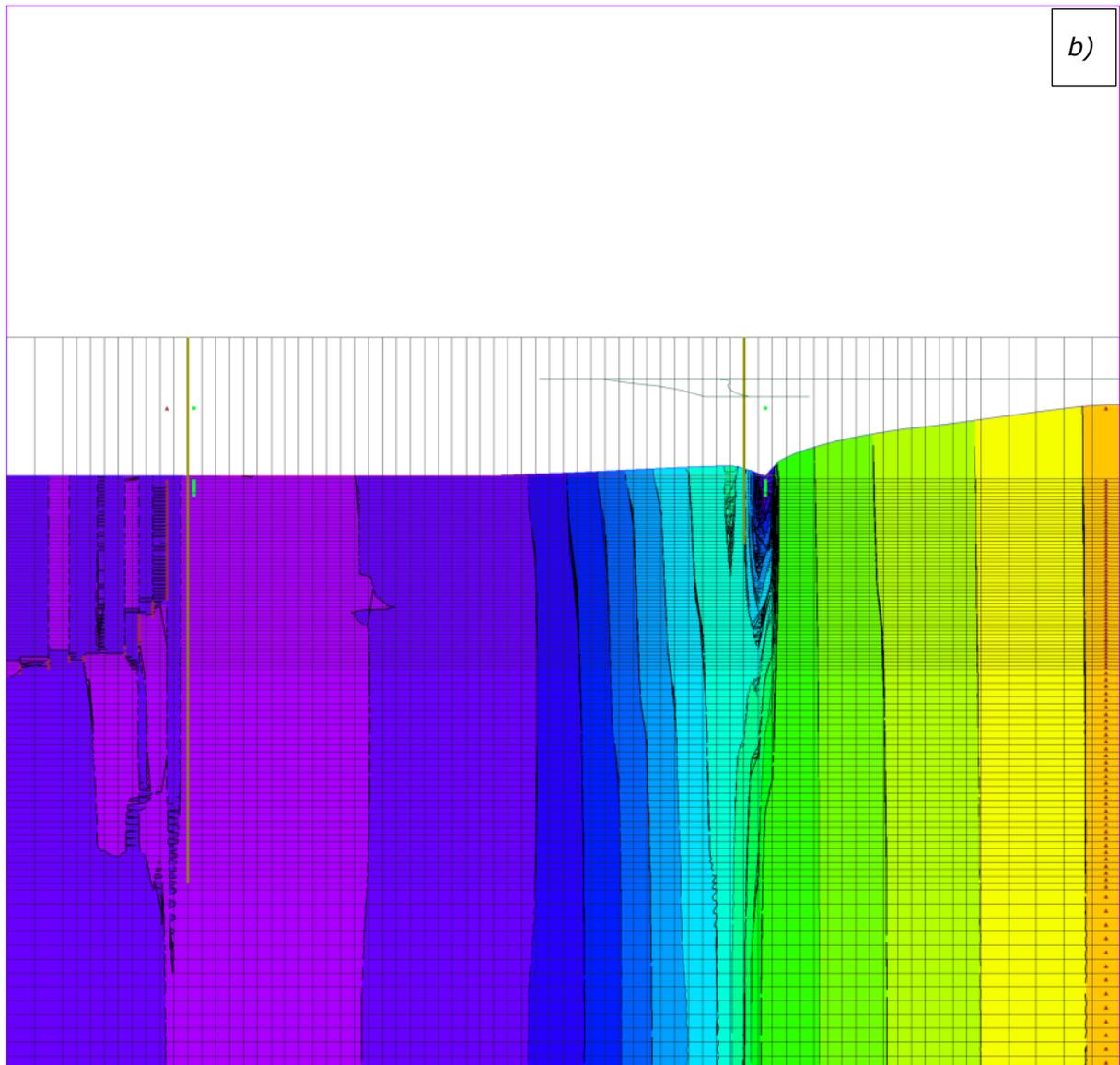


Figura 5-3. Questo modello è identico al modello "di base" (vedi Fig. 4.1.1) se non nelle permeabilità delle unità idrogeologiche Flysch e "Crostello" che hanno valori di un ordine di grandezza superiori. Le curve di livello della falda sono indicate come segue: da -0.1 m a 1 m s.m.m. l'equidistanza è di 0.1 m, da 1.0 a 9.0 m l'equidistanza è di 1.0 m. a) Vista planimetrica della falda freatica. b) Sezione SO-NE a 790 m dall'origine, esagerazione verticale 10 volte; notare come i gradienti siano leggermente minori lontano dai drenaggi.

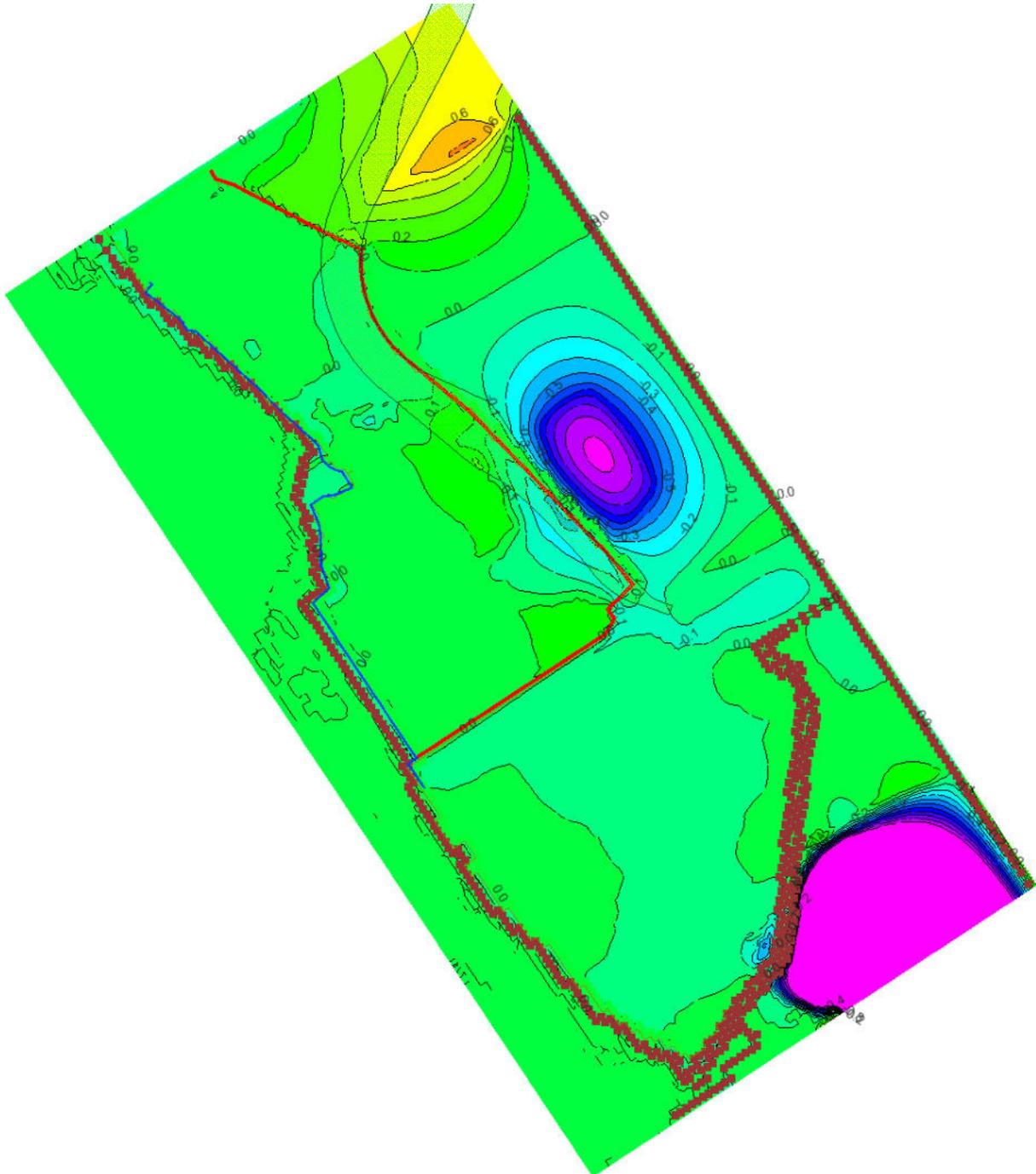


Figura 5-4. Differenza tra il modello ad alta permeabilità ed il modello "di base". Notare come a monte della barriera il livello di falda scenda apprezzabilmente (-1.0 m s.m.m.), mentre nella collina San Pantaleo, la diminuzione del livello di falda è fuoriscala. Nella zona a nord, invece, dove è localizzata la parte più vecchia del depuratore di Servola, la falda sale significativamente (+0.7 m). Internamente all'area "a caldo" della ex Ferriera la falda diminuisce di -0.3 m. L'equidistanza tra le isolinee è di 0.1 m con un rango da -1.0 m a +1.0 m s.m.m..

Internamente alla ex Ferriera la falda diminuisce di -0.3 m nella zona vicina all'angolo SE del nuovo setto impermeabile mentre tende a risalire di 0.1 m vicino a questa.

A parte queste piccole variazioni, si deve ritenere che il progetto di barrieramento verso monte (setto impermeabile + drenaggio) così come previsti nel progetto preliminare sono

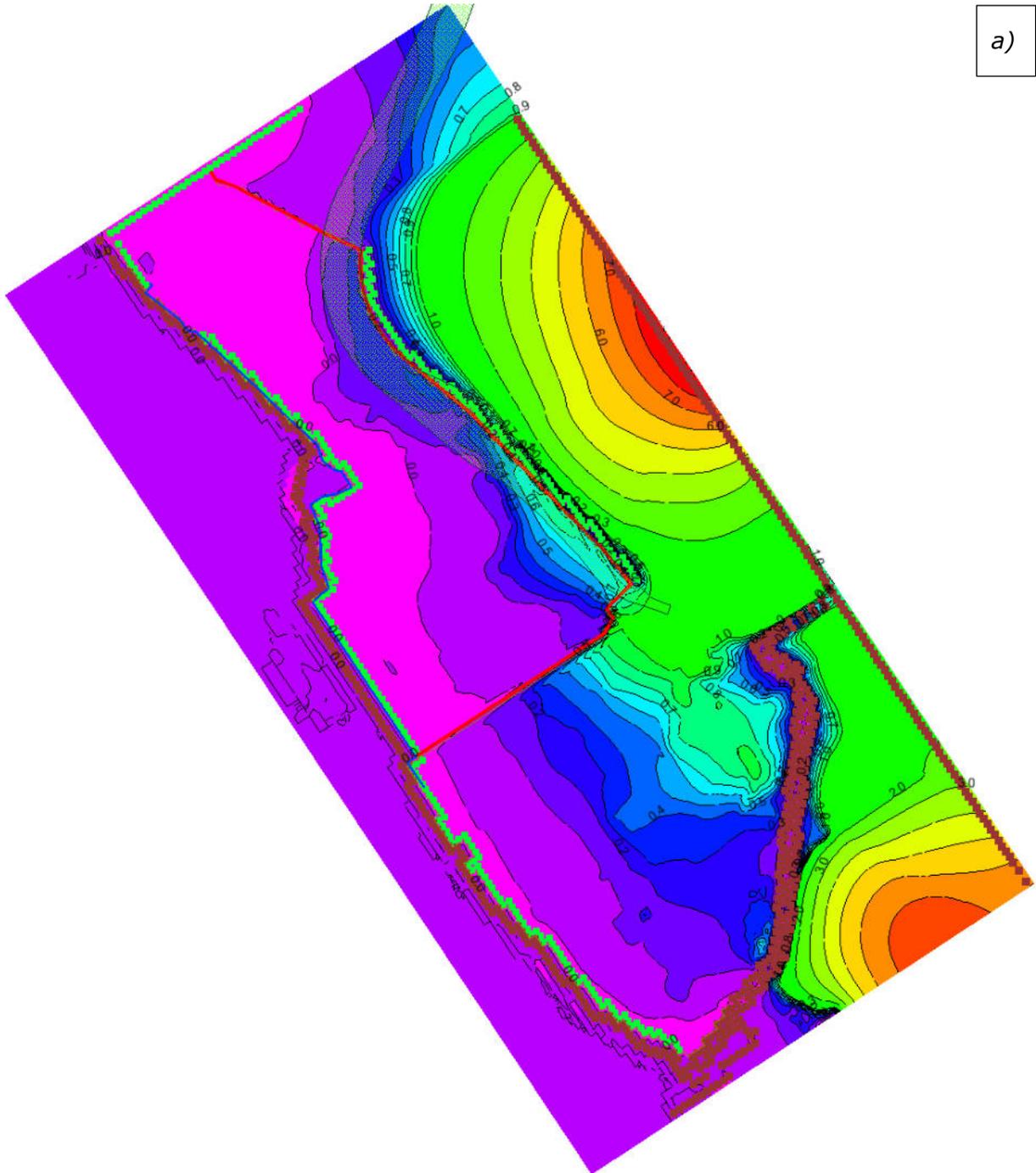
sufficientemente cautelativi da rimanere validi anche nell'eventualità che le unità idrogeologiche del Flysch e del Crostello abbiano permeabilità più elevate rispetto a quanto conosciuto fino ad ora e riportato nel progetto INVITALIA.

7.2.3 Modello con barriera profonda.

Il modello "di base" è stato testato anche in relazione alla ipotesi di collocare il setto impermeabile per tutta la sua estensione alla profondità di -29.5 m s.m.m.. Il risultato del modello (Figura 5-5) e la differenza tra questo modello ed il modello "di base" (Figura 5-6) mostrano che non vi sono sostanziali differenze tra le due geometrie. Soltanto in prossimità dell'angolo SE del setto impermeabile lungo la Collina di Servola il livello di falda si abbassa di 0.025 m verso monte e di 0.1 m all'interno dell'area perimetrata (ex area "a caldo").

Da questa analisi preliminare si deduce la non necessità di approfondire ulteriormente, rispetto a quanto in progetto, il setto impermeabile. Durante la progettazione esecutiva potrà essere verificata l'opportunità di ridurre ulteriormente la profondità del setto impermeabile, anche se la profondità scelta di -5.0 m s.m.m. sembra essere un buon compromesso a fini di ridurre ad un minimo la percolazione di acqua di falda all'interno dell'area perimetrata, area "a caldo" della ex Ferriera, e di mantenere la profondità di costruzione del setto entro altezze che garantiscano un'esecuzione a "regola d'arte" ai fini dell'impermeabilità.

a)



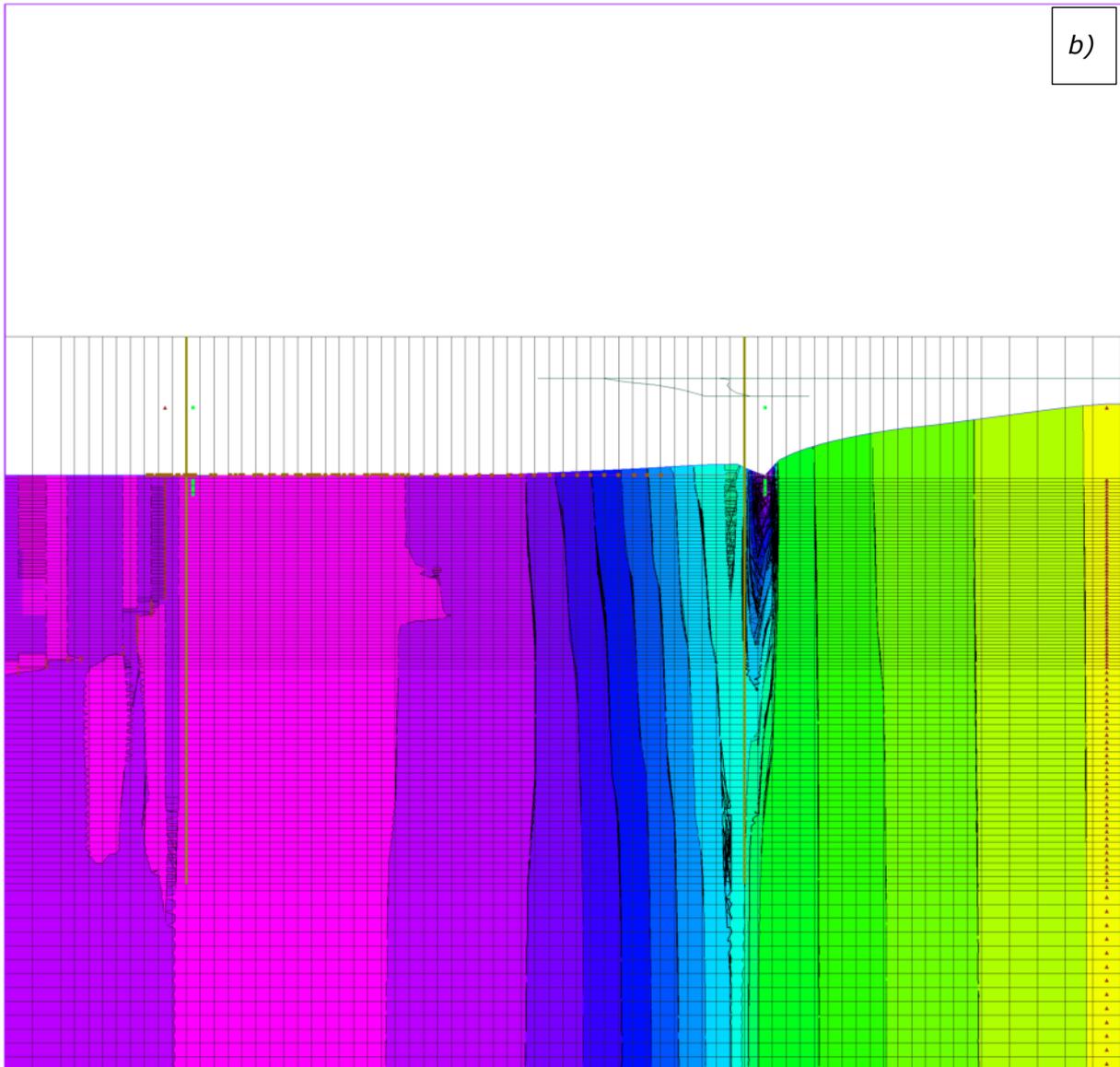


Figura 5-5. Modello identico al modello "di base" (vedi Fig. 4.1.1) se non nella profondità del setto impermeabile di monte che è ipoteticamente posto alla profondità di -29.5 m s.m.m.. Le curve di livello della falda sono indicate come segue: da -0.1 m a 1 m s.m.m. l'equidistanza è di 0.1 m, da 1.0 a 9.0 m l'equidistanza è di 1.0 m. a) Vista planimetrica della falda freatica. b) Sezione SO-NE a 790 m dall'origine, esagerazione verticale 10 volte; notare la similitudine nel drenaggio di monte sulla profondità dell'anomalia di pressione generata.

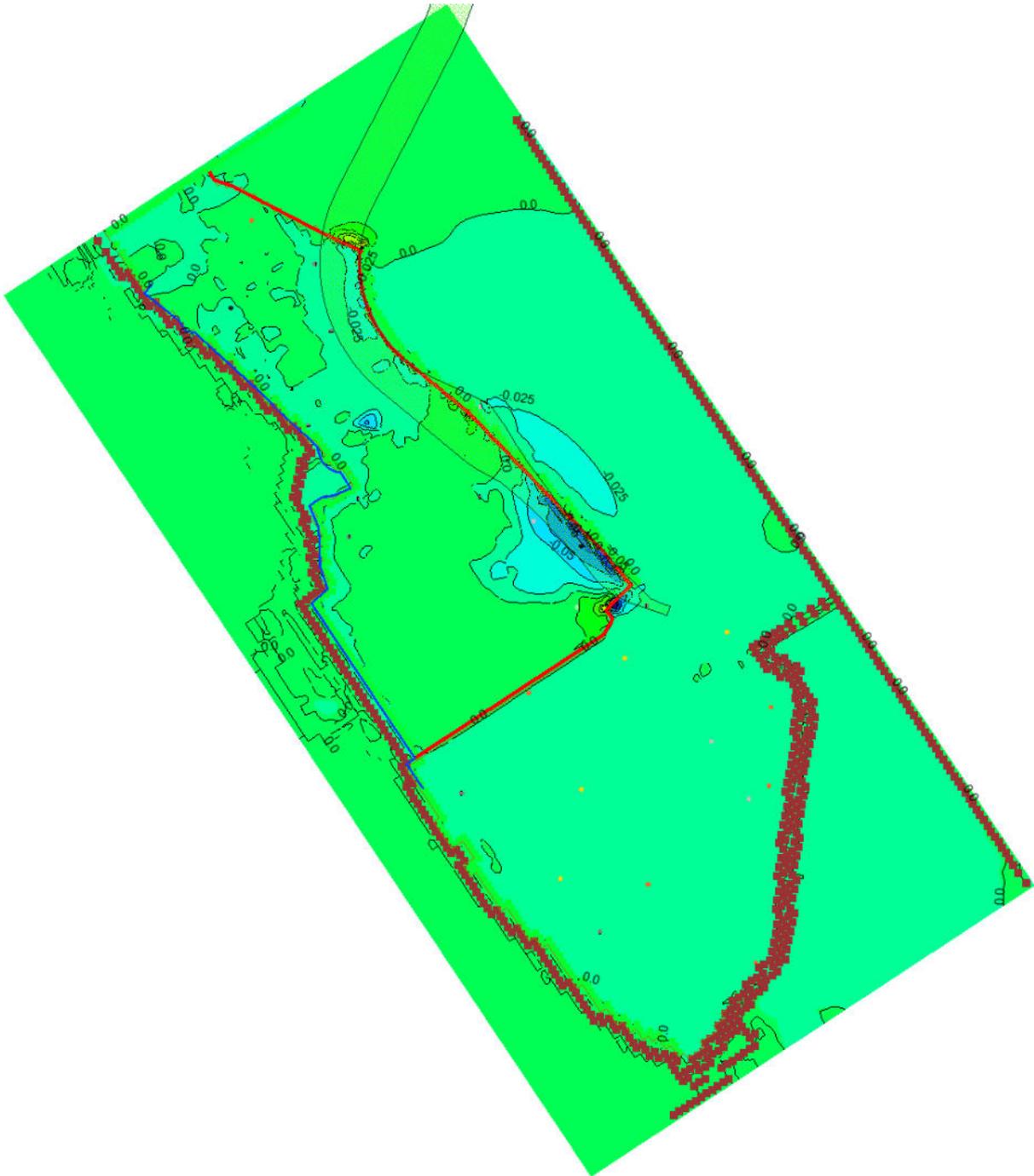


Figura 5-6. Differenza tra il modello con barriera profonda e posta a -29.5 m s.m.m. ed il modello "di base".
 Notare come a monte della barriera la differenza dei livelli di falda sia di soli 0.025 cm (quantità che è da considerare nei limiti di risoluzione del modello), mentre a sud ovest del setto impermeabile in progetto (cioè internamente all'area "a caldo" della ex Ferriera la falda differisca di una quantità inferiore a -0.1 m. L'equidistanza tra le isolinee è di 0.025 m con un rango da -0.1 m a +0.1 m s.m.m..

7.3 Secondo modello, cosiddetto “con pozzi drenanti”

Per ridurre il livello di falda all'interno dell'area perimetrata dal setto impermeabile in progetto è stata aggiunta al modello una batteria di 42 pozzi drenanti immediatamente a SO (lato mare) del muro di sostegno della nuova Stazione di Servola secondo il tracciato già indicato in Fig. 3-5. Tali pozzi hanno tra di loro una spaziatura di 20 m ed il drenaggio di ognuno è stato impostato, come nella barriera drenante esterna, a 0.0 m s.m.m..

Il risultato della modellistica (Figura 5-7) mostra un notevole miglioramento della condizione “di base” con un abbassamento del livello di falda significativo (Figura 5-8) e sufficiente per quasi tutto il perimetro del barrieramento a meno della sezione vicino all'angolo SE, dove pur verificandosi una riduzione, il livello di falda (+0.2 m s.m.m.) non sembra sufficientemente vicino allo zero per garantire, in questa fase di progetto preliminare, che non vi possano essere percolazioni locali di inquinanti dai terreni di riporto alla falda sottostante contenuta all'interno dell'unità idrogeologica del Flysch.

7.4 Terzo modello, cosiddetto “completo”

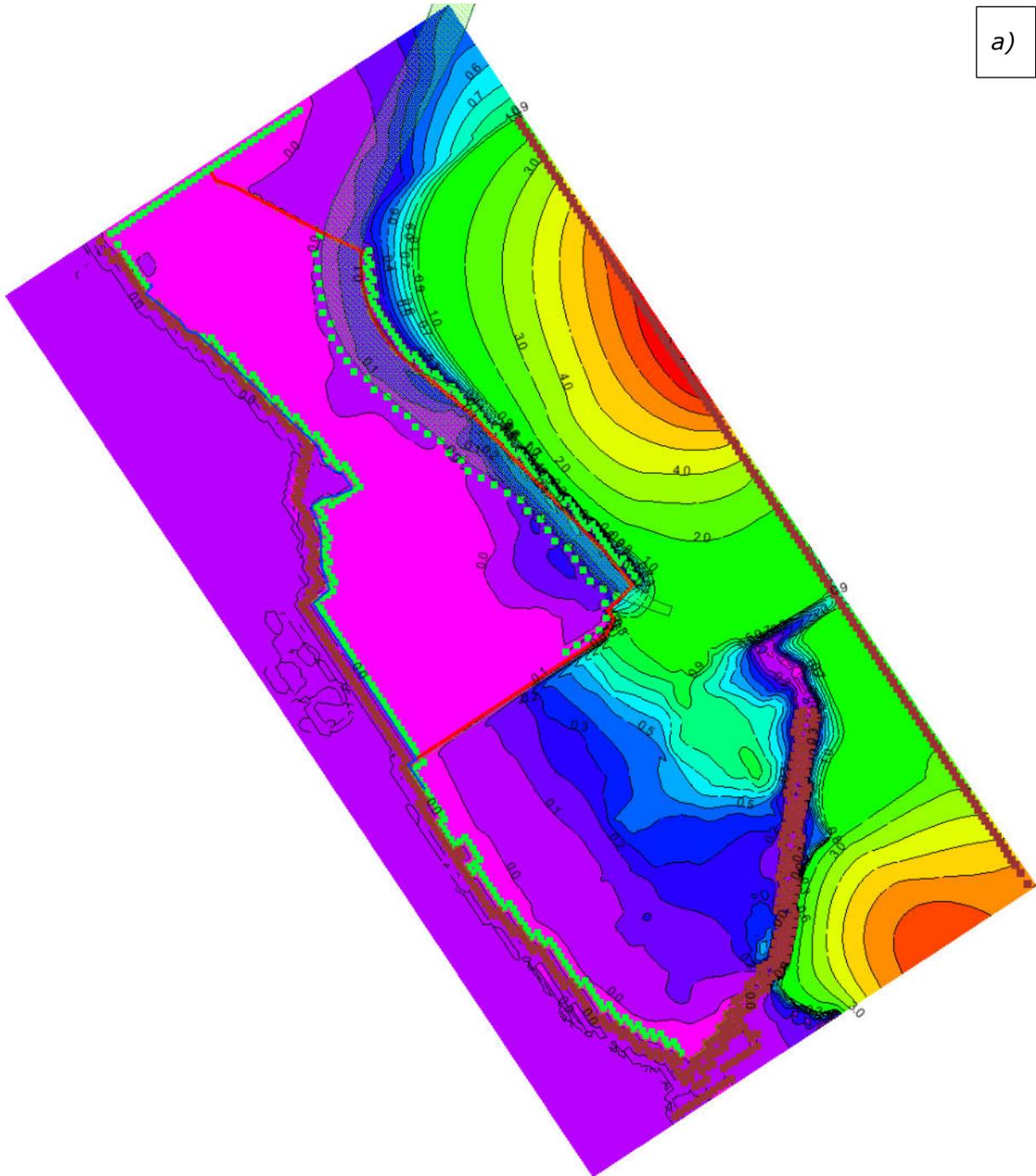
Nella necessità di ridurre ulteriormente la falda all'interno dell'area “a caldo” della ex Ferriera, lungo la terminazione SE del muro di sostegno lato mare della nuova Stazione di Servola è stata ulteriormente ridotta, dimezzandola, la spaziatura tra i pozzi drenanti e quindi portandola a 10 m. Questo comporta un incremento di 13 pozzi drenanti in aggiunta ai 42 già previsti al paragrafo precedente per un totale complessivo di 55 pozzi drenanti.

Non va escluso che, anche in relazione alle modalità esecutive delle opere strutturali, si possa optare per la costruzione di drenaggi lineari (con tecnologia TOC o simili oppure con trincee drenanti) in sostituzione dei pozzi o di gruppi di pozzi, con risultato da verificare, ma certamente non peggiorativo.

In fase di progetto esecutivo l'analisi idrogeologica che potrà essere fatta tramite un modello in cui saranno inclusi i nuovi dati, permetterà eventualmente di ridurre il numero dei pozzi drenanti qua proposti, qualora si verifichi che la loro riduzione non comporti significative variazioni alle ipotesi di messa in sicurezza della falda da parte dei contaminanti presenti all'interno dei riporti dell'area “a caldo” della ex Ferriera.

Viene in primo luogo presentata la simulazione relativa al modello “completo” (Figura 5-9) e successivamente due ulteriori simulazioni che si riferiscono alla condizione di alta permeabilità delle unità idrogeologiche del Flysch e del “Crostello”, ed alla ipotesi di approfondimento della barriera a -29.5 m s.m.m.. Come si potrà osservare dai risultati, la condizione proposta per il cosiddetto modello “completo” risulta essere sufficientemente cautelativa, in questa fase di progettazione preliminare, anche rispetto all'eventualità di permeabilità più alta delle unità del Flysch e del “Crostello” ed a un setto impermeabile molto più profondo.

a)



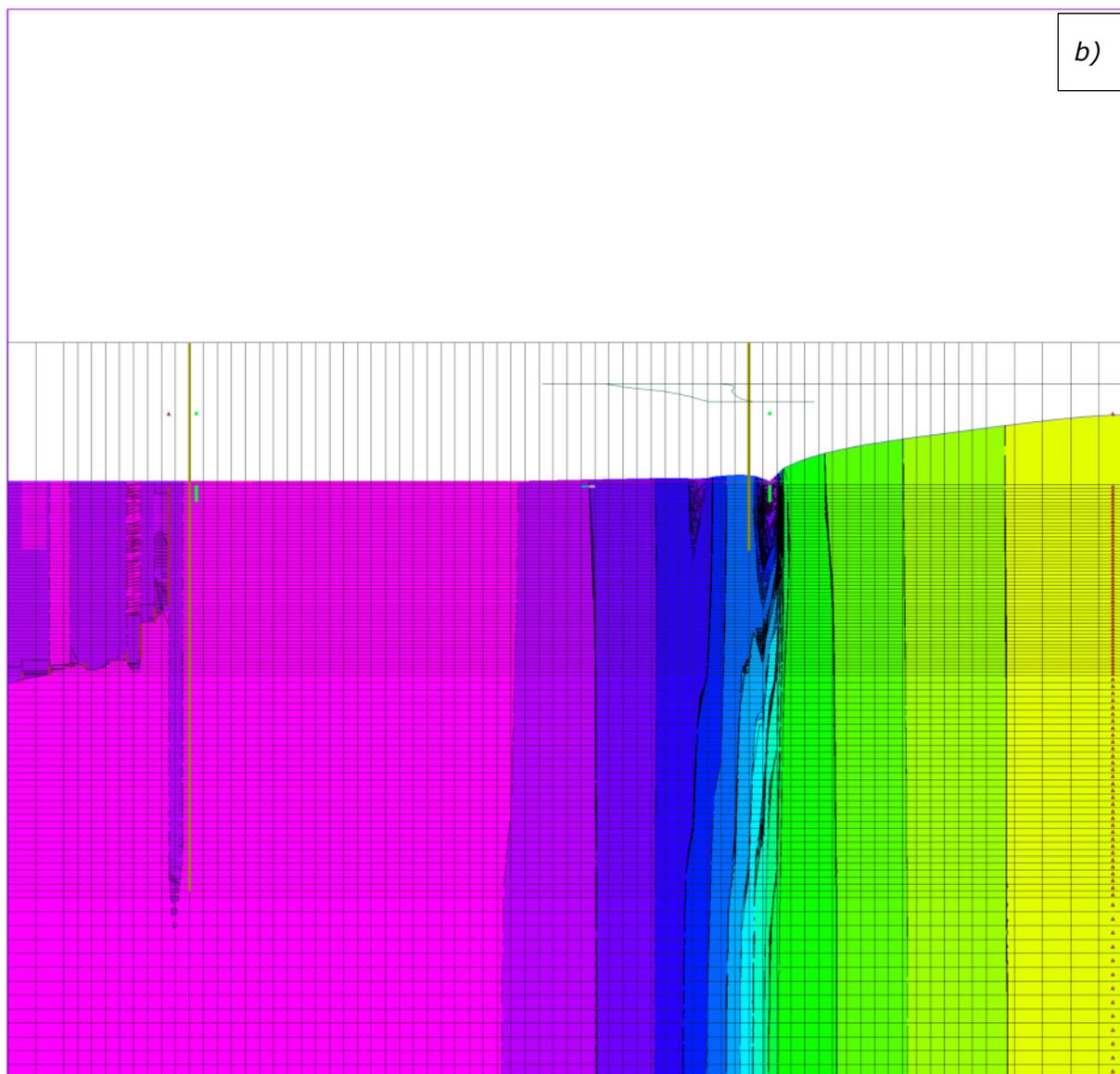


Figura 5-7. Modello identico al modello "di base" (vedi Fig. 4.1-1) con l'aggiunta di 42 pozzi drenanti equispaziati di 20 m e con drenaggio mantenuto costante a 0.0 m s.m.m.. Le curve di livello della falda sono indicate come segue: da -0.1 m a 1 m s.m.m. l'equidistanza è di 0.1 m, da 1.0 a 9.0 m l'equidistanza è di 1.0 m. a) Vista planimetrica della falda freatica; notare come sull'angolo SE del setto impermeabile di monte il livello di falda si mantenga tuttavia a quote superiori ai 0.1 m s.m.m. b) Sezione SO-NE a 790 m dall'origine, esagerazione verticale 10 volte; notare l'effetto dei pozzi drenanti.

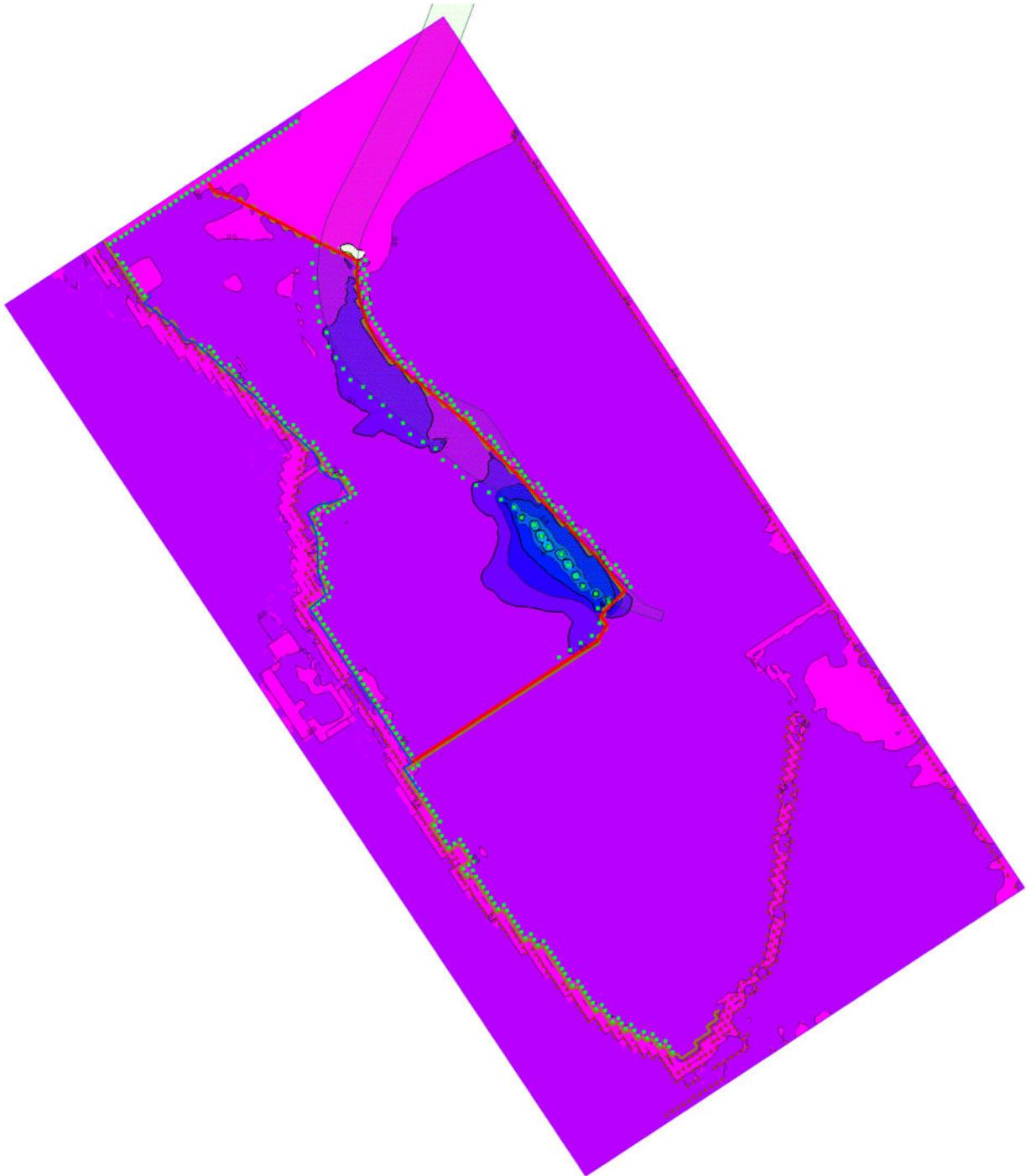


Figura 5-8. Differenza tra il modello "di base" e quello "con pozzi drenanti". Notare come lungo tutto il setto impermeabile (e particolarmente verso l'angolo SE dello stesso) lato mare la differenza dei livelli di falda sia superiore 0.4 cm, indicando come i pozzi drenanti possano migliorare significativamente la situazione rispetto al modello "di base" senza pozzi. L'equidistanza tra le isolinee è di 0.1 m.

7.4.1 *Modello "completo"*

I risultati di questa simulazione sono ottimali e mostrano come si riesca a mantenere il livello di falda all'interno dell'area "a caldo" della ex Ferriera ad una quota inferiore a 0.2 m s.m.m. (Figura 5-9). La differenza tra il modello con pozzi drenanti precedentemente illustrato e quest'ultimo modello che definiamo "completo" è illustrata in Figura 5-10 e mostra come anche nell'area critica di SE possano essere ottenute ulteriori riduzioni del livello di falda che raggiungono i 0.5 m, risolvendo così il problema di un livello di falda potenzialmente troppo elevato all'interno dell'area "a caldo" della ex Ferriera.

7.4.2 *Modello "completo" con permeabilità elevate*

Il modello con permeabilità elevate delle unità idrogeologiche Flysch e "Crostello" parte in questo caso dal modello "completo" incrementando le permeabilità di queste due formazioni di un ordine di grandezza. I risultati sono visualizzati in Fig. 5-11 in cui può essere facilmente notato come la falda, nell'area "a caldo" della ex Ferriera, rimanga ad una quota inferiore a 0.1 m s.m.m.. Questo risultato significa che anche in condizioni di maggior permeabilità di quelle utilizzate nel modello calibrato utilizzato come base per le simulazioni attuali (progetto INVITALIA modello "Rio Primario"), eventuali errori nella misura della permeabilità non influiscono negativamente nelle scelte progettuali adottate.

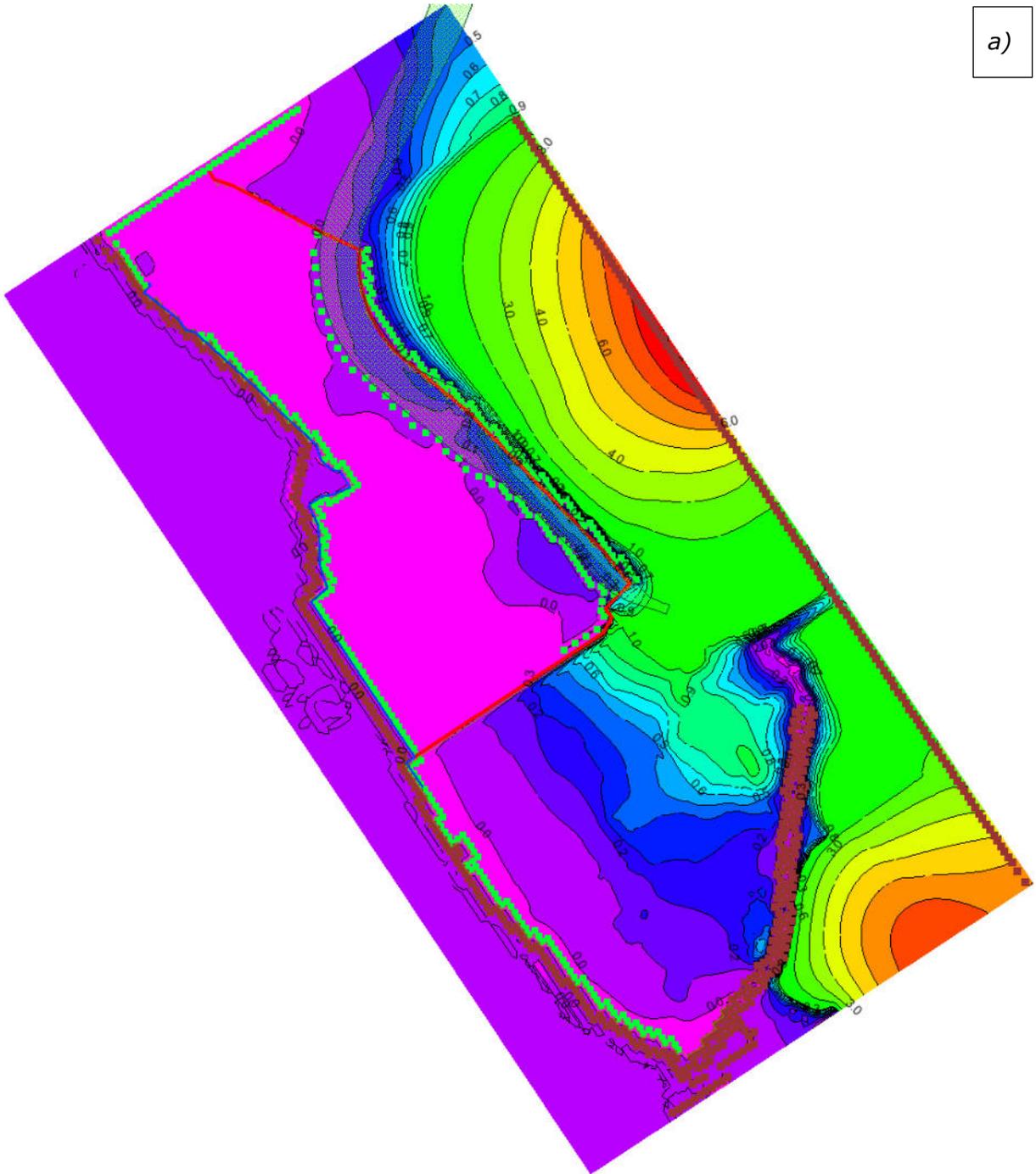
Infatti, la differenza tra il modello cosiddetto "completo" ed il modello con alte permeabilità (Figura 5-12) mette in evidenza che le anomalie siano praticamente limitate alle zone esterne all'area perimetrata dal setto impermeabile in progetto.

7.4.3 *Modello "completo" con setto impermeabile profondo*

Un'ulteriore verifica è stata fatta anche riguardo alla possibilità di approfondire il setto impermeabile lungo tutto il tracciato fino alla profondità di -29.5 m s.m.m.. I risultati sono nei limiti di errore del modello sostanzialmente identici ai precedenti (Figura 5-13).

Infatti, la differenza tra il modello cosiddetto "completo" e quest'ultima simulazione (Figura 5-14) rimane per tutta l'area perimetrata dai setti impermeabili che andranno a delimitare tutta l'area "a caldo" della ex Ferriera inferiore a ± 0.1 m.

a)



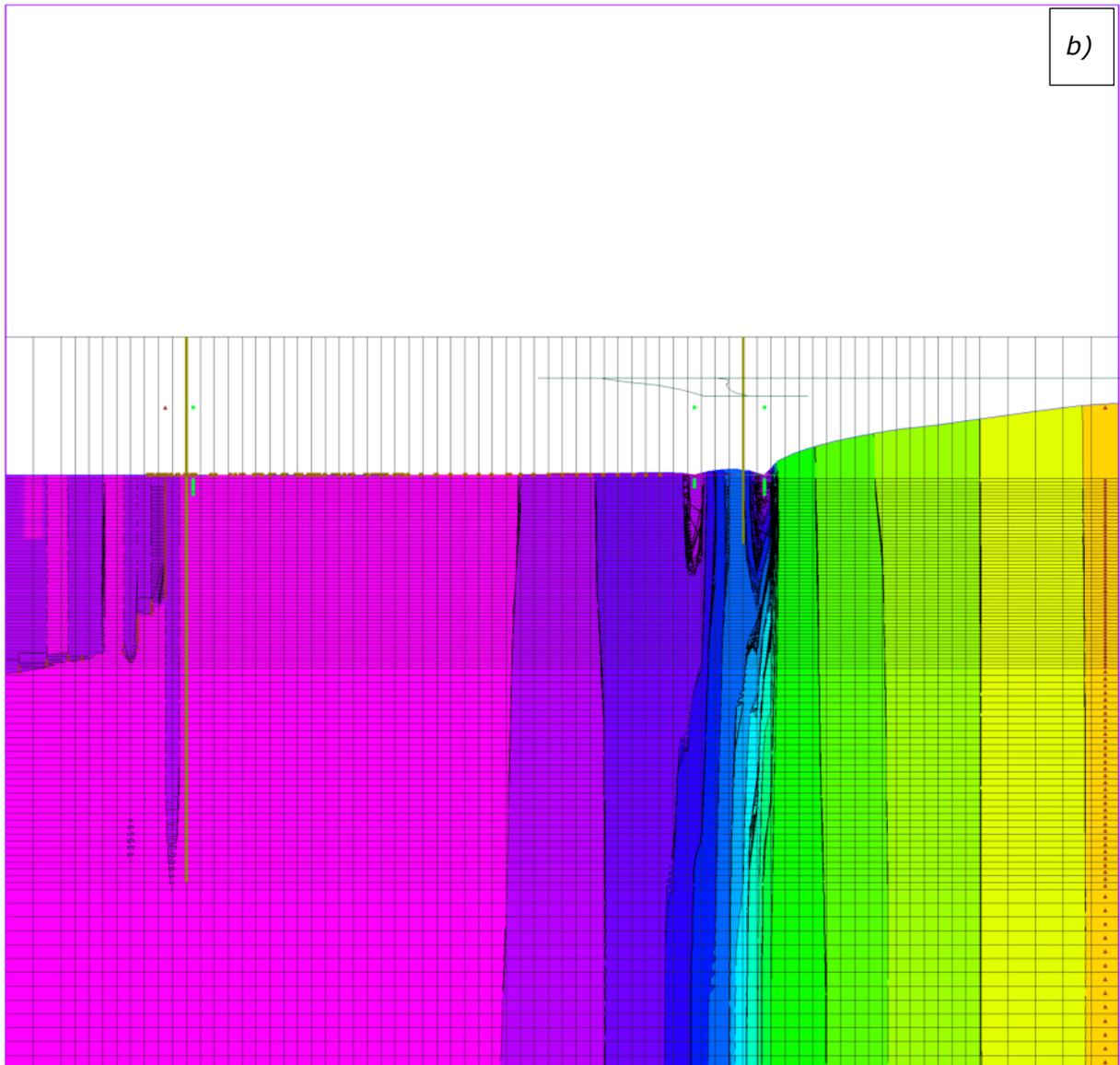


Figura 5-9. Modello "completo" identico al modello "con pozzi drenanti" (vedi Figura 5-8) ma con ulteriori 13 pozzi drenanti verso l'angolo SE del setto impermeabile (lato interno all'area "a caldo" della ex Ferriera) che riducono l'equidistanza tra i pozzi a 10 m, il drenaggio è ugualmente mantenuto costante a 0.0 m s.m.m.. Le curve di livello della falda sono indicate come segue: da -0.1 m a 1 m s.m.m. l'equidistanza è di 0.1 m, da 1.0 a 9.0 m l'equidistanza è di 1.0 m. a) Vista planimetrica della falda freatica; notare come sull'angolo SE del setto impermeabile di monte il livello di falda si riduca tuttavia a quote inferiori a 0.2 m s.m.m.. b) Sezione SO-NE a 790 m dall'origine, esagerazione verticale 10 volte; notare l'effetto dei pozzi drenanti.

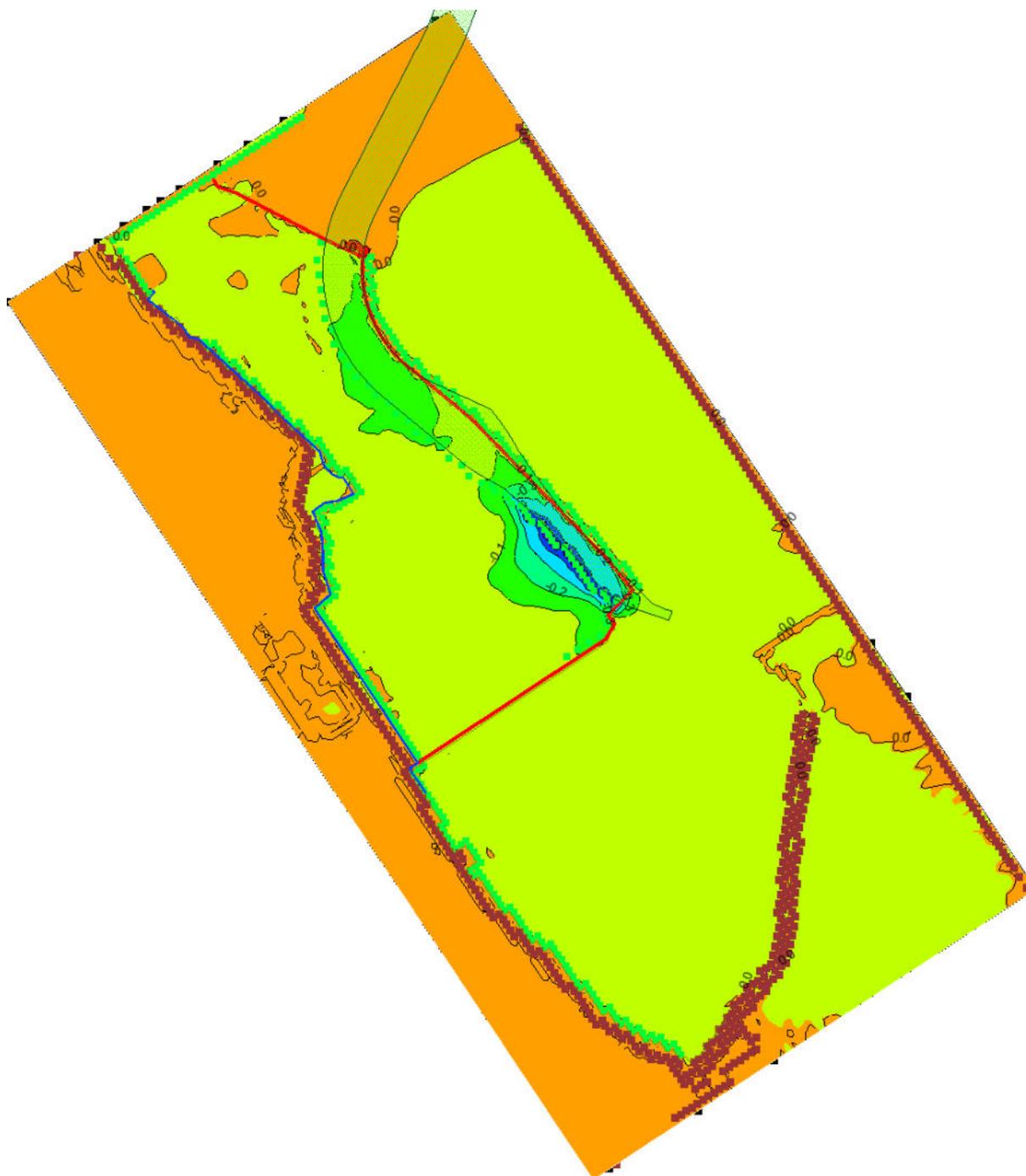
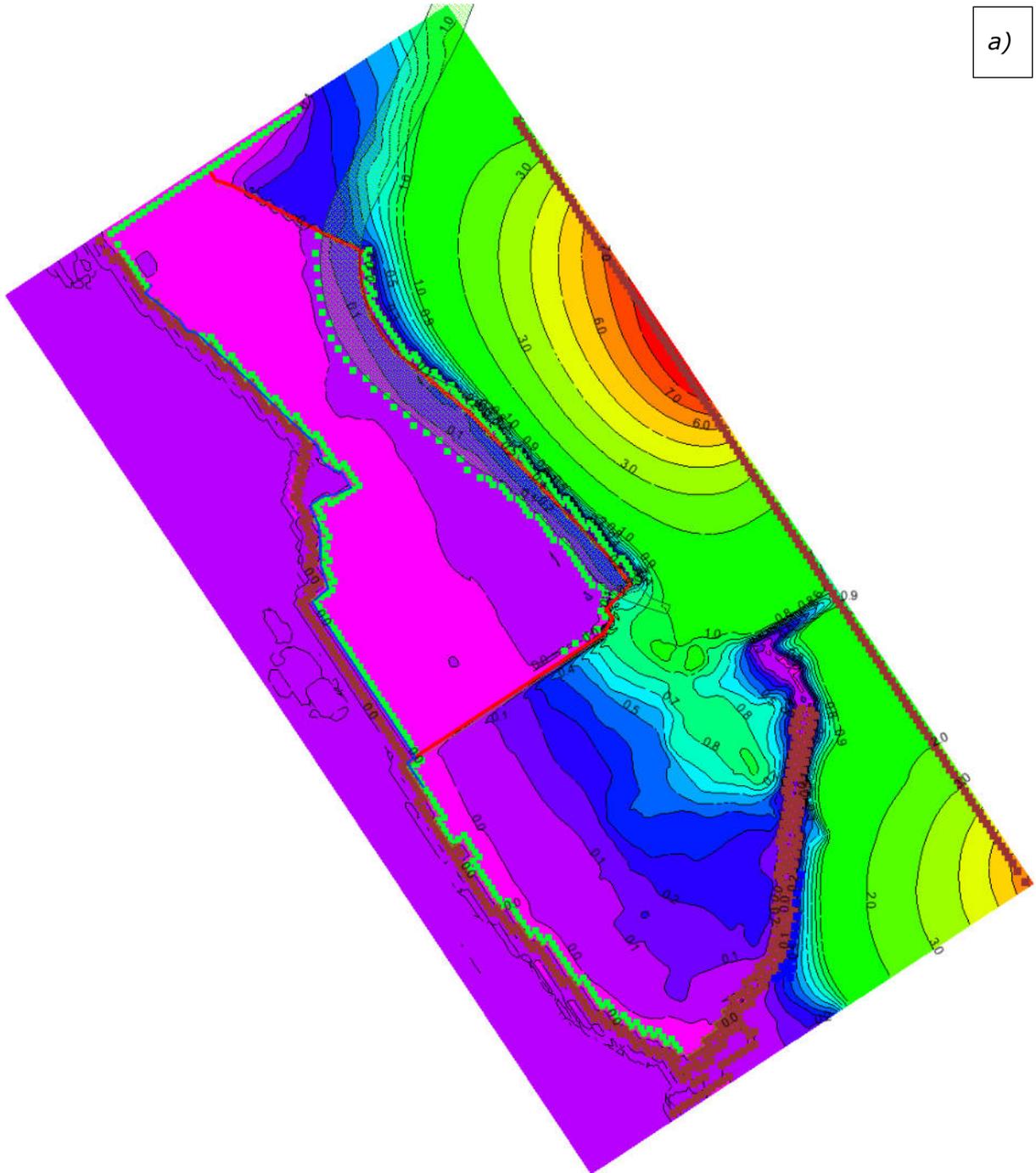


Figura 5-10. Differenza tra il modello "con pozzi drenanti" e quello "completo". Notare come lungo tutto il setto impermeabile ma particolarmente verso l'angolo SE dello stesso la differenza dei livelli di falda sia superiore 0.4 cm, indicando come la scelta di ridurre l'equidistanza tra i pozzi comporti un sicuro miglioramento nel drenaggio della falda all'interno dell'area perimetrata dai setti impermeabili. L'equidistanza tra le isolinee è di 0.1 m.

a)



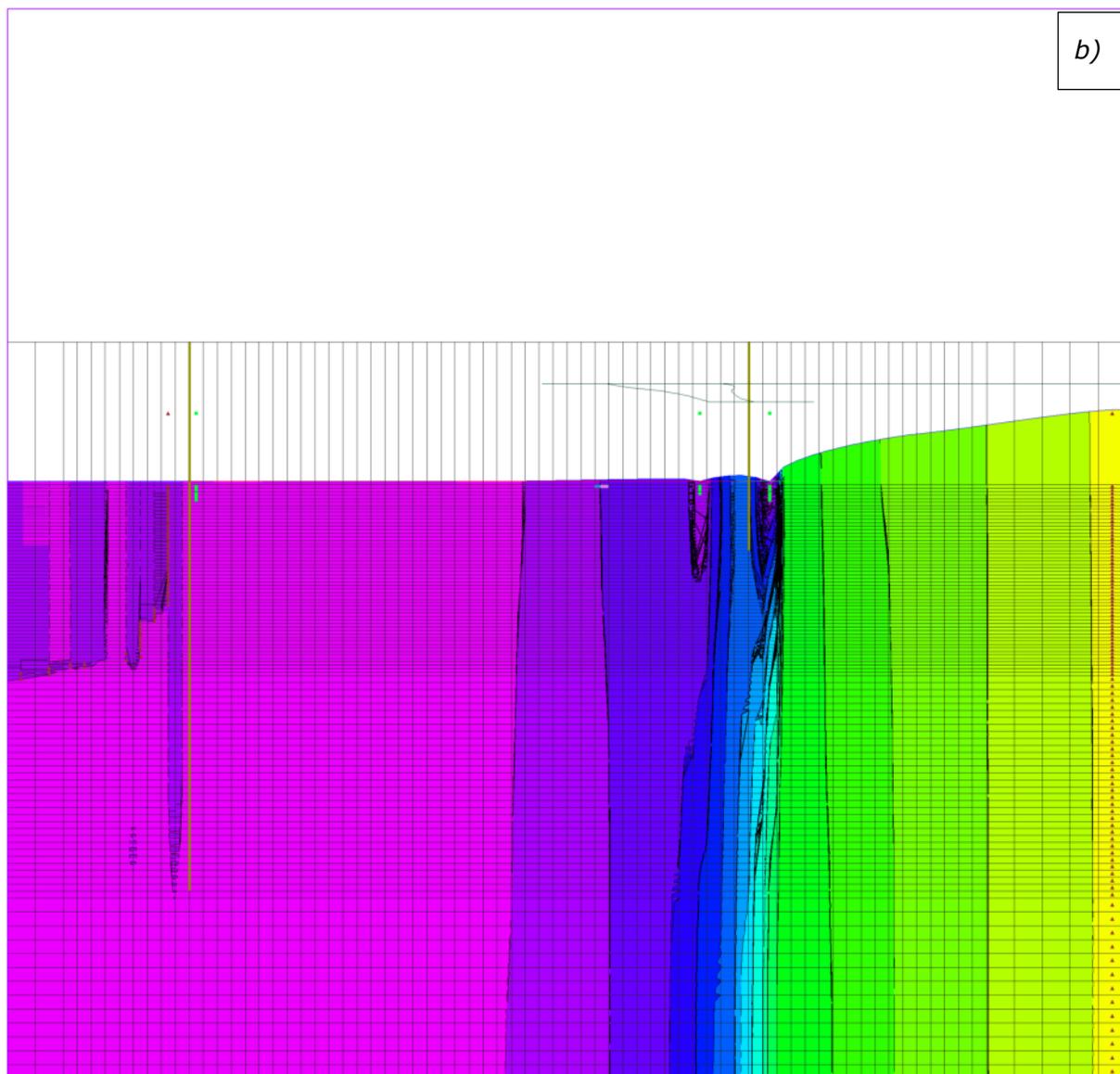


Figura 5-11. Modello identico al modello "completo" (vedi Fig. 5-9), ma con permeabilità delle unità idrogeologiche Flysch e "Crostello" aumentate di un ordine di grandezza. Le curve di livello della falda sono indicate come segue: da -0.1 m a 1 m s.m.m. l'equidistanza è di 0.1 m, da 1.0 a 9.0 m l'equidistanza è di 1.0 m. a) Vista planimetrica della falda freatica; notare come le variazioni rispetto al modello "completo" possano essere ritenute ininfluenti. b) Sezione SO-NE a 790 m dall'origine, esagerazione verticale 10 volte; notare l'effetto dei pozzi drenanti.

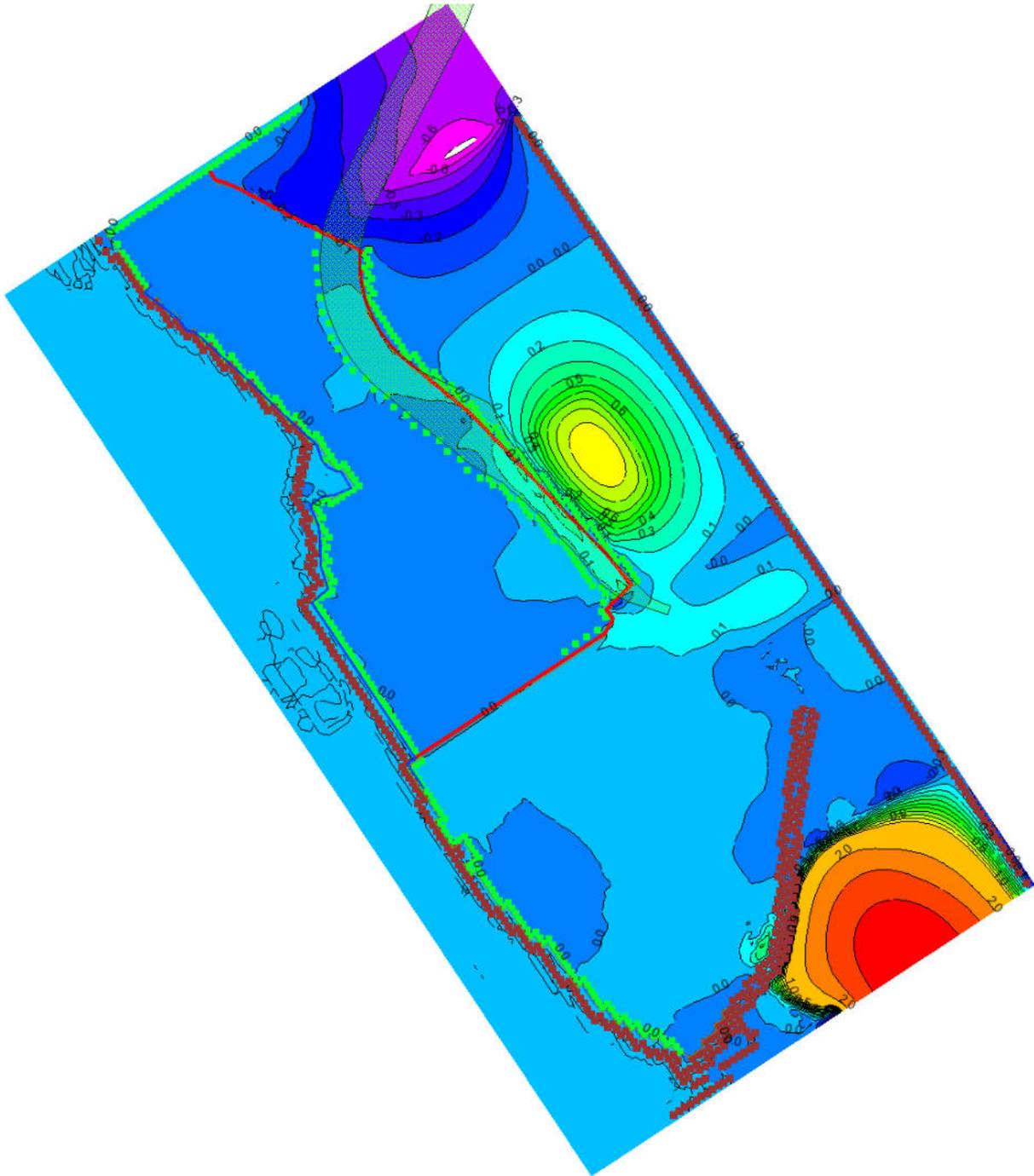
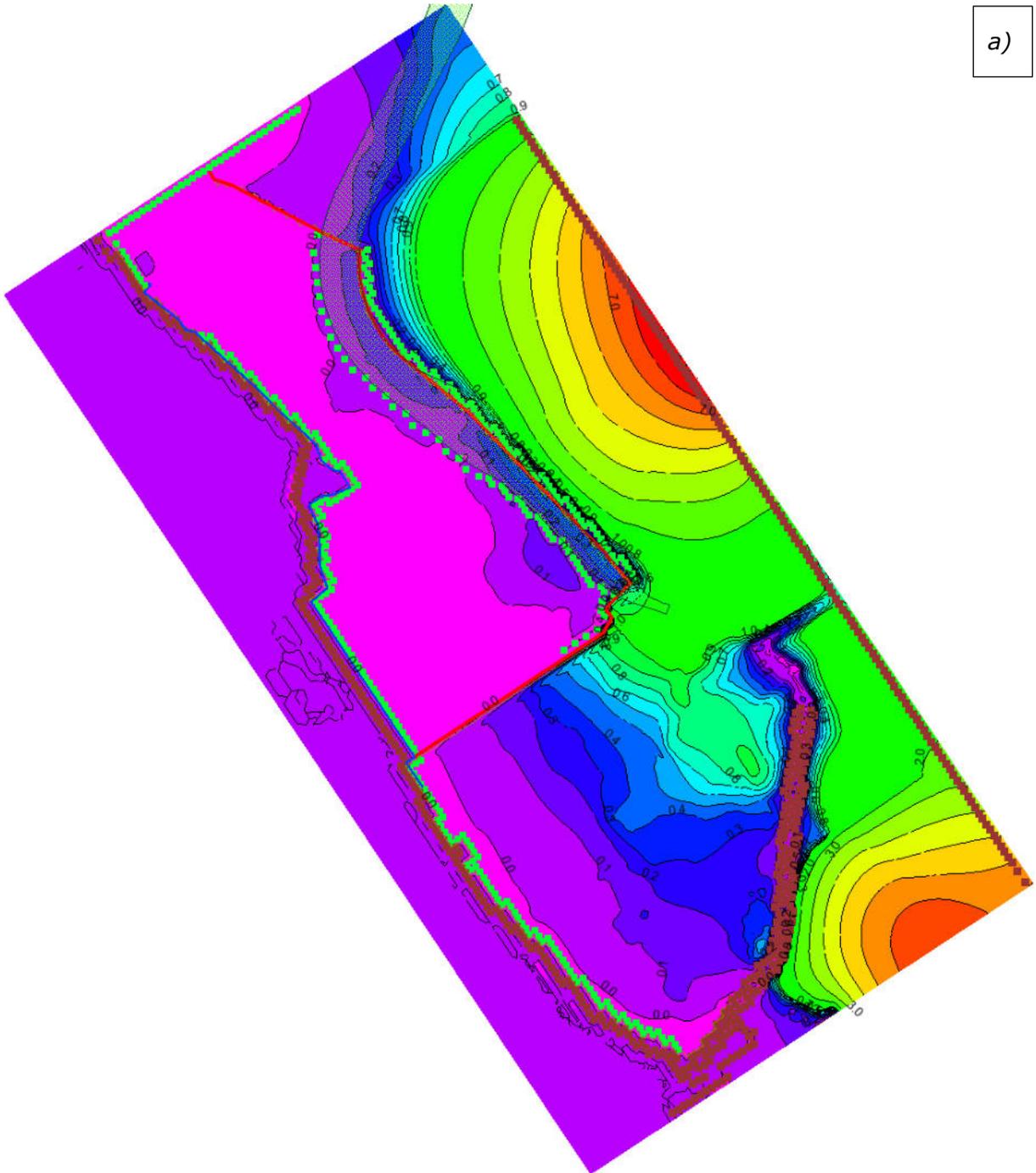


Figura 5-12. Differenza tra il modello "completo" e quello ad alta permeabilità. Notare come non vi siano sostanziali discostamenti tra i due modelli all'interno dell'area perimetrata dai setti impermeabili. L'equidistanza tra le isolinee è di 0.1 m.

a)



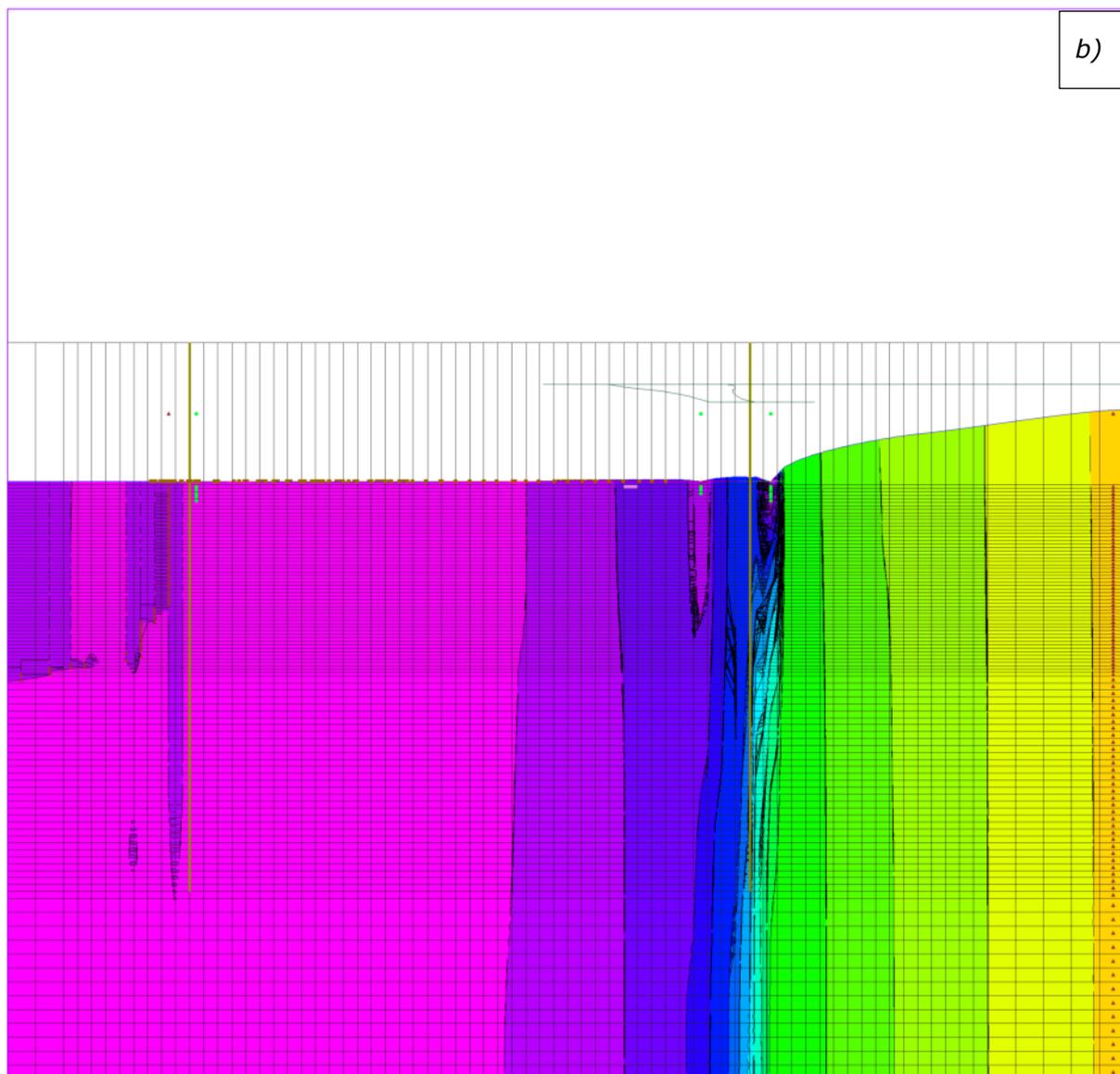


Figura 5-13. Modello identico al modello "completo" (vedi Fig. 5-9), ma con il setto impermeabile posto alla profondità costante di -29.5 m s.m.m.. Le curve di livello della falda sono indicate come segue: da -0.1 m a 1 m s.m.m. l'equidistanza è di 0.1 m, da 1.0 a 9.0 m l'equidistanza è di 1.0 m. a) Vista planimetrica della falda freatica; notare come le variazioni rispetto al modello "completo" possano essere ritenute influenti. b) Sezione SO-NE a 790 m dall'origine, esagerazione verticale 10 volte.

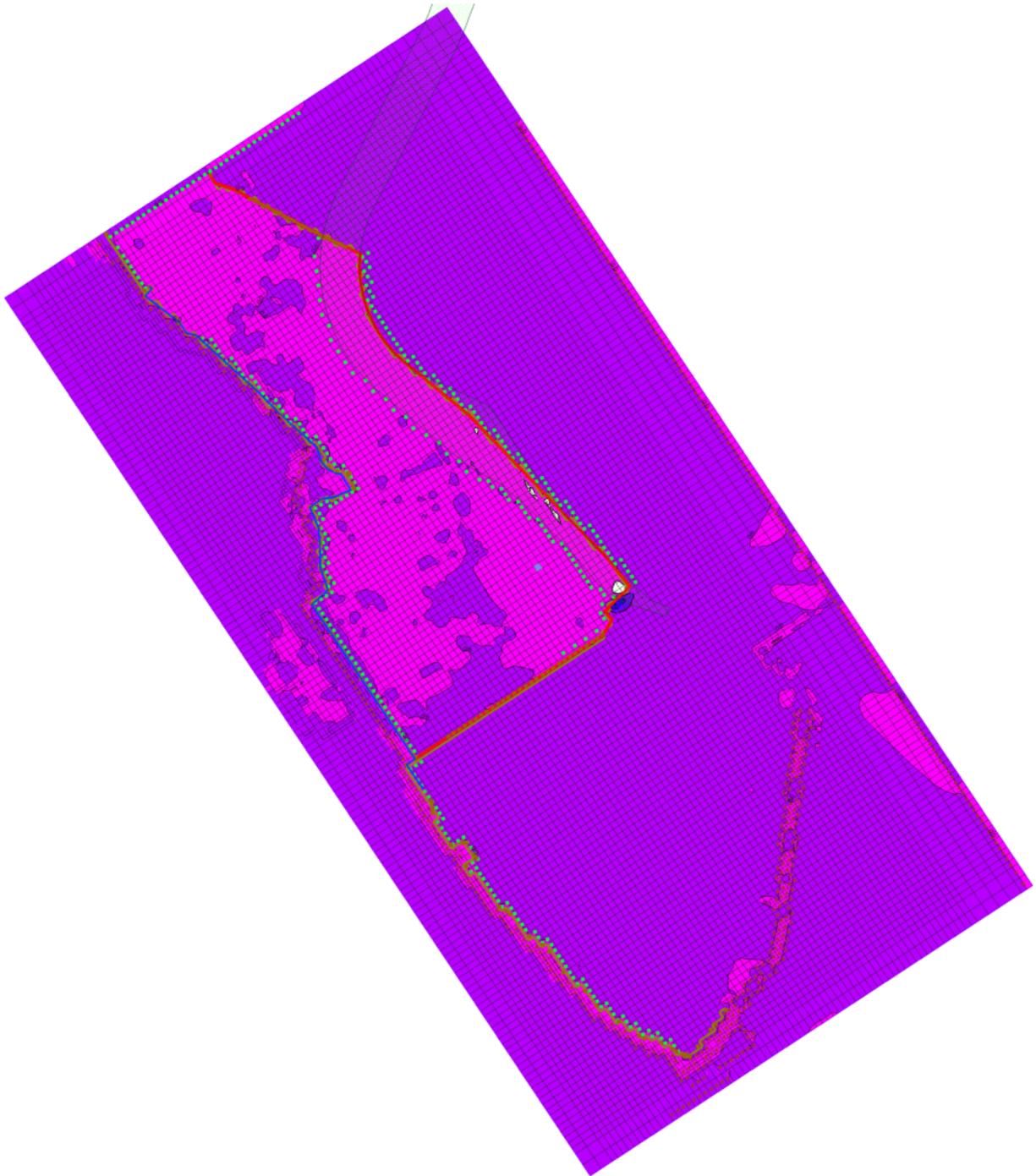


Figura 5-14. Differenza tra il modello "completo" con setto impermeabile profondo e quello completo. Notare come non vi siano sostanziali discostamenti tra i due modelli. L'equidistanza tra le isolinee è di 0.1 m.

8 I POZZI DRENANTI

Si deve da subito rimarcare che la progettazione dei pozzi drenanti deve necessariamente tenere conto della stratigrafia specifica che sarà attraversata da ciascun pozzo (Fig. 3-5). Essi dovranno in prima approssimazione essere perforati fino a -2 m s.m.m. e qualora il pozzo sia perforato:

- 1) esclusivamente all'interno del "Crostello" o del Flysch, esso potrà essere fenestrato lungo tutto il tratto inferiore di 2 m;
- 2) in un primo tratto nei terreni di riporto della ex Ferriera ed in un secondo tratto all'interno del "Crostello" o del Flysch, esso dovrebbe essere fenestrato solo nella parte superiore al livello del mare, intasando di argilla tutta la corona esterna al pozzo dal livello del mare fino a fondo pozzo.
- 3) esclusivamente all'interno dei terreni di riporto della ex Ferriera esso potrà essere fenestrato lungo tutto il tratto inferiore di 2 m.

Ulteriori prescrizioni potrebbero essere date anche in variante a quanto appena esposto in fase di progetto esecutivo al fine di garantire la massima sicurezza per l'acquifero contenuto all'interno dell'unità idrogeologica del "Crostello" o del Flysch.

Come detto in precedenza, potrebbe verificarsi che, a parità di prestazione idrogeologica i pozzi o gruppi di pozzi possano essere sostituiti da sistemi lineari di drenaggio.

9 VERIFICA DELLE AREE DI RICARICA ECCESSIVA PER IL LORO EVENTUALE CONTROLLO

Il modello "Rio Primario" del progetto INVITALIA ha messo in evidenza una serie di aree di ricarica della falda che sembrava provenire dalle molteplici attività antropiche presenti in Ferriera piuttosto che direttamente dalla piovosità stagionale. Tali aree sono mostrate con colorazione da gialla ad arancione a rossa in Figura 7-1.

Con probabilità, a seguito della dismissione dell'area "a caldo" della ex Ferriera di Servola e della futura realizzazione della nuova pavimentazione di MISP su tutta la superficie dell'area perimetrata dal setto impermeabile in progetto, tali aree di ricarica eccessiva cesseranno di esistere.

Si deve, però, far presente che le aree di alta ricarica collocate lungo la fascia NE potrebbero continuare ad avere dei contributi di ricarica provenienti dalle acque di infiltrazione e di ruscellamento in tutta l'area della Collina di Servola anche al di fuori del sedime specifico della ex Ferriera. Si ritiene che tutte le acque di ruscellamento e d'infiltrazione dovrebbero essere regimate in modo da ridurre al minimo possibile la ricarica efficace dell'acquifero, non solo nell'area "a caldo" della ex Ferriera ma anche su tutta l'area della Collina di Servola prospiciente la stessa ex Ferriera almeno sino al tracciato della galleria ferroviaria.

A questo riguardo si ritiene utile poter approfondire se vi siano scarichi civili ed industriali in falda sulla Collina di Servola almeno fino all'altezza delle gallerie autostradali che sembrano, in ultima analisi, poter limitare il livello di falda all'interno della Collina stessa particolarmente, come detto in condizioni di morbida.

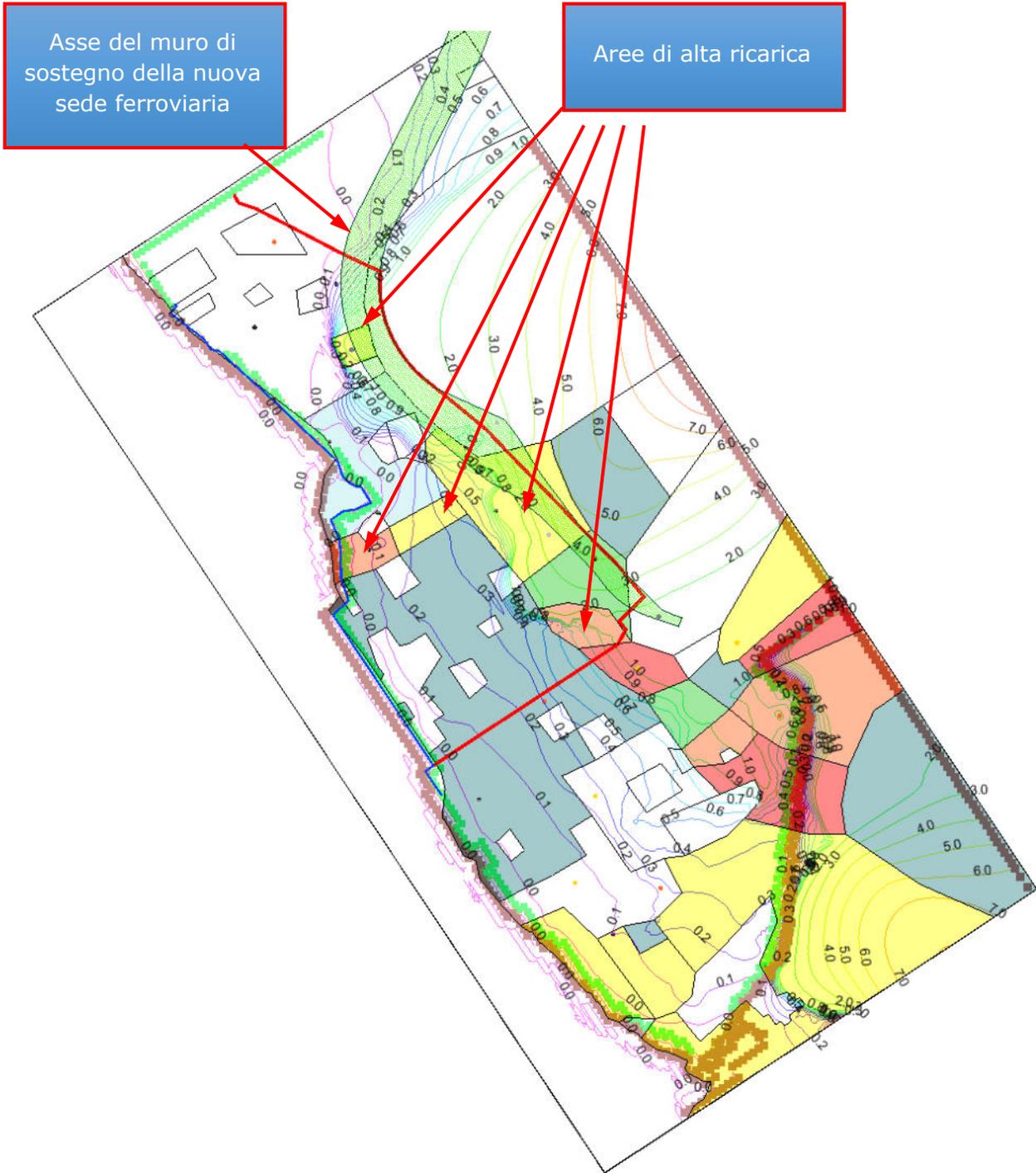


Figura 7-1. Ricarica applicata al modello "Rio Primario". Le aree in bianco hanno ricarica zero. Le aree di colore hanno i seguenti intervalli di ricarica: celeste (10-10-10-9 m/s), blu-verde (1*10-9-5*10-9 m/s), verde (5*10-9-1*10-8 m/s), giallo (1*10-8-5*10-8 m/s), arancione (5*10-8-1*10-7 m/s) e rosso (>1*10-7 m/s). In pratica, i colori giallo, arancione e rosso indicano ricariche molto superiori alla normale infiltrazione efficace legata alla piovosità. L'equidistanza delle curve di livello della piezometria è di 0.1 m tra 0.0 m ed 1.0 m s.m.m. e di 1.0 m tra 1.0 m e 9.0 m s.m.m..

10 VALUTAZIONE DELLE PORTATE

In questa sezione sono valutate le portate di acqua di falda che potrebbero provenire dal drenaggio immediatamente a monte del setto impermeabile in progetto (Figure 8-1 e 8-2, area 34) e dagli altri drenaggi presenti nell'area (pozzi drenanti e drenaggi del progetto INVITALIA).

È plausibile che le portate dalla barriera drenante di monte non risentano della contaminazione dei riporti nelle aree della ex Ferriera essendo provenienti da un mezzo poroso distinto (non antropico) posto a quote topografiche maggiori dell'area dello stabilimento siderurgico; si ritiene quindi che esse possano essere direttamente utilizzate per scopi industriali all'interno delle attività portuali o ipoteticamente, se nei limiti di legge, anche recapitate direttamente a mare.

Le portate di acqua di falda derivanti dai drenaggi simulati in questa modellazione (55 pozzi drenanti, divisi tra i pozzi lungo il muro di sostegno della nuova Stazione di Servola visibili nelle Figure 8-1 e 8-2, area 36, ed i pozzi lungo il setto impermeabile tra le aree "a caldo" ed "a freddo" della ex Ferriera di Servola nell'area 37) potrebbero essere inquinate, in particolare laddove i pozzi drenanti debbano essere realizzati all'interno dei terreni di riporto della ex Ferriera.

Si ritiene pertanto opportuno poter sezionare i pozzi per gruppi in modo da separare le acque inquinate da inviare agli impianti di trattamento da quelle non inquinate da poter utilizzare all'interno delle attività portuali o da recapitare direttamente a mare. Si suppone che tali acque, anche se inquinate nei primi anni di estrazione, possano nel tempo migliorare le qualità chimiche fino a non risultare più inquinate.

Sono, infine, valutate le riduzioni di portata nelle varie sezioni del marginamento del Progetto INVITALIA (Figure 8-1 e 8-2, aree da 1 a 12 e da 30 a 32), per le quali si può già anticipare che esse non sono sostanziali, particolarmente quando si consideri che a tali portate devono essere sommate le portate provenienti dai pozzi drenanti da realizzare in questo progetto.

- Dal drenaggio lungo la Collina di Servola, a monte del setto impermeabile (Figure 8-1 e 8-2, area 34) potrebbero essere recuperate portate che nell'ordine di grandezza sono pari a 0.3 (l/s) cioè circa 25 (m³/d). Tali portate non sono destinate al TAF.
- Dai pozzi drenanti lungo il muro di sostegno della nuova Stazione di Servola (area 36) le portate complessive assommano ad una quantità paragonabile a quella del drenaggio di monte (area 34), dunque pari a circa 25 (m³/d).
- Dai pozzi drenanti lungo il setto di separazione tra l'area "a caldo" e quella "a freddo", le portate recuperate dovrebbero essere dell'ordine di 6 (m³/d).
- **Il totale delle acque da inviare a trattamento (in aggiunta a quelle recuperate dal marginamento INVITALIA) è quindi dell'ordine di 31 (m³/d).**

Come si può osservare dalla Figura 8-2 le uniche riduzioni significative sono riferite all'area 12, in quanto la sua superficie è stata ridotta a favore dell'area 13 che adesso si trova totalmente internamente all'area perimetrata, ed appunto all'area 13, in quanto vi sono i pozzi drenanti lungo il setto impermeabile tra le aree "a caldo" ed "a freddo" (area 37) la cui portata se sommata a quella della stessa area 13 produce una portata solo leggermente inferiore a quella precedente.

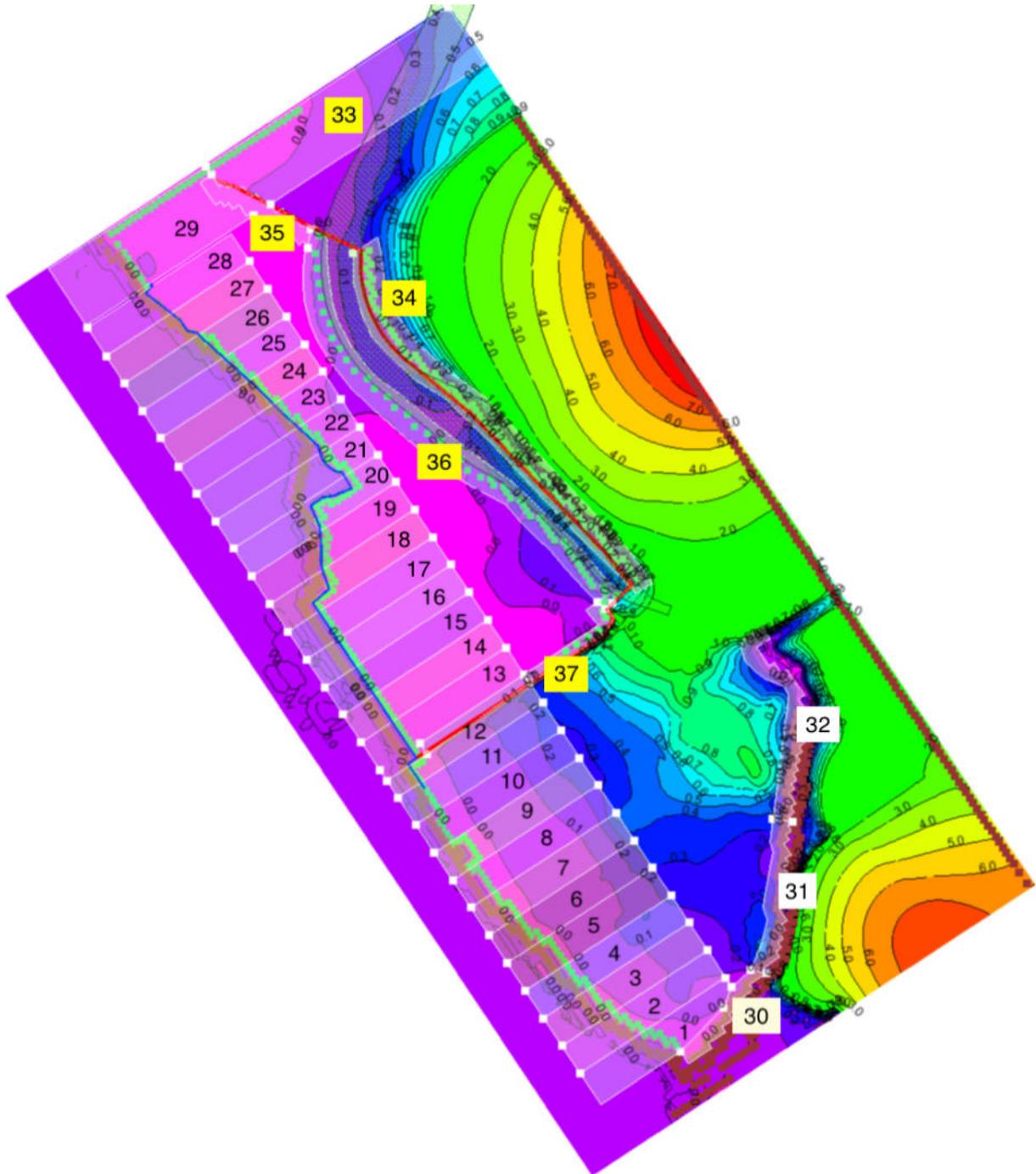


Figura 8-1. Aree di computo dei flussi di massa attraverso i drenaggi. La numerazione delle aree rispecchia quella del Progetto INVITALIA in modo che le portate di ciascun'area possano essere più facilmente paragonate. Le aree nuove introdotte sono la 34, 35, 36 e 37 (evidenziate in giallo). L'area 12 è stata ridotta di superficie per far posto all'area 37 con i nuovi pozzi drenanti. L'area 13 è stata ingrandita fino al confine dell'area perimetrata dal nuovo setto impermeabile previsto tra l'area "a caldo" e l'area "a freddo". L'area 29 è stata ridotta per far posto all'area 35. Quindi l'area 29 originale è la somma delle aree 29 e 33.

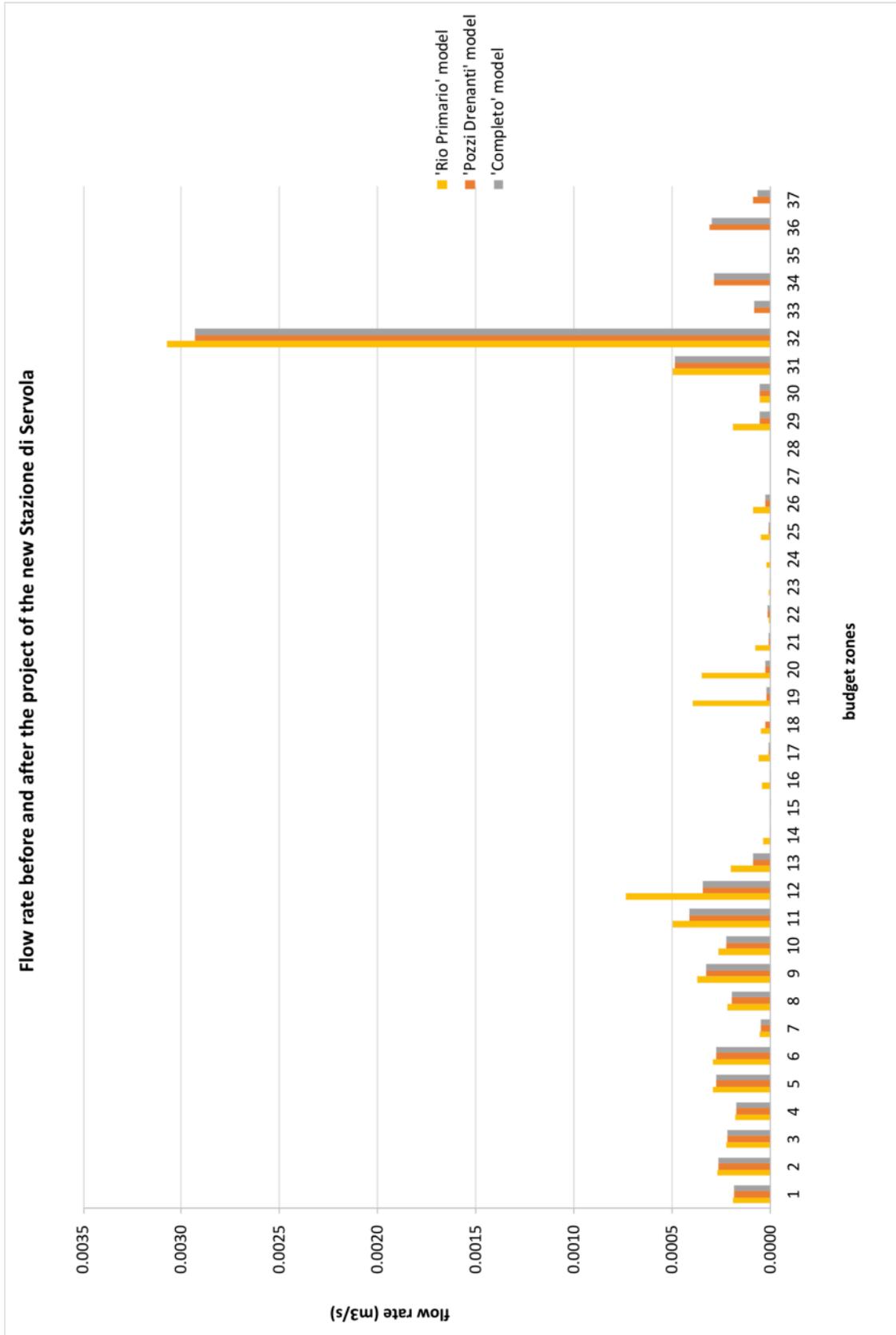


Figura 8-2. Grafico dei flussi di massa attraverso i drenaggi nelle aree di computo indicate in Fig. 8-1.

Le aree 19 e 20 (Figura 8-2) che hanno portate significativamente meno elevate di quelle del Progetto INVITALIA, corrispondono ad aree di ricarica anormalmente elevata nel modello originario "Rio Primario" (vedi Figura 7-1). Tale ricarica avrebbe dovuto comunque essere ridotta in seguito alla previsione dello stesso Progetto INVITALIA di una futura corretta impermeabilizzazione dell'area della Ferriera.

Si rimarca, come peraltro era già stato evidenziato nel Progetto INVITALIA, che le aree di drenaggio maggiore sono quelle relative all'area "a freddo", e particolarmente lungo il Rio Primario. Tali acque, come ipoteticamente suggerito da alcuni elementi provenienti dalla realizzazione del setto impermeabile del progetto INVITALIA, potrebbero risultare inquinate quanto quelle all'interno dell'area "a caldo". A tutti gli effetti, la messa in opera delle nuove barriere drenanti (il drenaggio a monte del setto impermeabile lungo il versante della Collina di Servola, ed i pozzi drenanti) sembrerebbe ridurre di poco le portate al di fuori dell'area "a caldo" della ex Ferriera.

Pertanto, è ragionevole affermare che la messa in opera delle barriere e dei drenaggi previsti per la nuova Stazione di Servola comporti un miglioramento al sistema di messa in sicurezza di tutta l'area della ex Ferriera di Servola. Una definizione più accurata di tali miglioramenti potrebbe eventualmente essere verificata dal modello idrogeologico che accompagnerà il progetto esecutivo.

11 ULTERIORI SONDAGGI E PIEZOMETRI DI MONITORAGGIO

Per l'affinamento del modello idrogeologico utile a verificare il comportamento effettivo della falda acquifera nell'area della Collina di Servola e di tutta l'area portuale prospiciente ad essa, cioè per garantire un monitoraggio dei livelli di falda di almeno 1 anno, si ritiene che debbano essere realizzati una serie di ulteriori sondaggi geognostici da attrezzare anche come piezometri.

Uno degli aspetti da indagare in tali sondaggi oltre alla stratigrafia è la struttura del Flysch per evidenziare, se possibile, la giacitura degli strati, le eventuali fratture e faglie, la densità di fratturazione e se vi siano o meno direzioni preferenziali di fratturazione.

Come detto, tali sondaggi dovrebbero essere attrezzati come piezometri da rilevare indicativamente una volta al mese nell'arco di un anno da scegliere in modo da coinvolgere periodi secchi e di pioggia (Fig. 9-1). La posizione dei piezometri può essere spostata nell'intorno di circa 50-100 m al fine di facilitare la loro localizzazione in aree al di fuori di quelle di proprietà.



Fig. 9-1. Proposta per gli ulteriori 3 piezometri (quadrati neri; quelli con sovrapposta croce azzurra sono già stati indagati nelle vicinanze e non vanno nuovamente sondati, ma possibilmente solo monitorati): il loro numero e l'esatta posizione potrebbero variare in ragione delle informazioni che potranno rendersi disponibili e sulla base dell'accessibilità alle aree. I cerchi colorati indicano i sondaggi utilizzati nel progetto INVITALIA e in questo modello. La linea spezzata blu è il marginamento del progetto INVITALIA, mentre la linea rossa è il setto impermeabile di monte in progetto per la MISP e per la nuova stazione ferroviaria di Servola (area verde chiaro)

12 APPROFONDIMENTI MODELLISTICI E LA VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI CUMULATIVI

Ai fini di una più accurata verifica degli effetti che le nuove opere avranno sull'acquifero sia interno che esterno alla Ferriera, si ritiene necessario sviluppare un modello completo più generale che includa almeno i tre interventi che interessano l'area:

- (1) il marginamento già realizzato con la Piattaforma Logistica,
- (2) il progetto approvato di marginamento INVITALIA,
- (3) il progetto relativo alle installazioni previste:
 - a. dalla MISP dell'area ex a caldo,
 - b. dal prog. AdSPMAO 1951 (nuova Stazione di Servola in primis).

Si deve rimarcare che le sezioni di acquifero che interessano i progetti citati sono tutti parte dello stesso acquifero di Servola che è per la maggior parte ricaricato proprio dalla Collina di Servola e potenzialmente anche da aree più lontane a monte. Parte della ricarica dell'area, anche se piccola, proviene dal basso, visto che la ricarica meteorica è sostanzialmente nulla, così come è da considerare ininfluenza la ricarica che proviene lateralmente dalle zone limitrofe. Dal basso, invece, in tutta l'area non vi sono elementi strutturali che interrompano il flusso naturale. La questione è facilmente mostrabile tramite l'equazione di Darcy, che nella sua forma più semplice può essere scritta come:

$$Q = v \cdot A = -A \frac{k}{\mu} \frac{dp}{dx} = -AK \frac{dh}{dx} \quad (1)$$

Dove Q è la portata, v è la velocità di Darcy, A è la sezione di flusso, k è la permeabilità, μ è la viscosità dell'acqua, x è la direzione di flusso, P è la pressione, K è la conducibilità idraulica ed H è l'altezza del livello di falda rispetto al minimo piezometrico. Il gradiente idraulico della falda è nell'ordine di grandezza pari a 0.04 (vedi sezione 2), $K = k \text{ (m}^2\text{)} \cdot 10^7 \text{ (m}^{-1} \text{ s}^{-1}\text{)} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ (m}^{-1} \text{ s}^{-1}\text{)}$; vedi tabella 4.1-1), A è nell'ordine di grandezza pari a $5 \cdot 10^5 \text{ (m}^2\text{)}$ la superficie di tutti e tre i progetti citati, pertanto $Q = 10^{-2} \text{ (m}^3\text{/s)}$, cioè 10 (l/s) o 864 (m³/d).

Date le approssimazioni fatte, questa quantità potrebbe non essere definitiva. D'altronde si ritiene problematico poter conoscere gli effettivi parametri idrogeologici del Flysch, su tutto il volume di interesse, meglio di quanto siano allo stato conosciuti.

Gli acquiferi presenti nelle rocce carbonatiche al di sotto del Flysch pur risultando in pressione ed alimentando anche lungo faglie e fratture alcune risorgive anche a mare nel golfo di Trieste (Busetti et al., 2020) non sembrano al momento influenzare significativamente il flusso sotterraneo all'interno dei terreni di riporto della Ferriera.

Infine, nella modellistica, particolare attenzione andrebbe posta anche ad individuare la ricarica efficace, particolarmente nella Collina di Servola, e l'effetto drenante delle gallerie ferroviaria e autostradali. In riferimento a queste ultime, i dati di calibrazione del modello fanno ritenere che i livelli della falda permanente permangano ad una quota inferiore alla base delle citate gallerie che a tutti gli effetti regolano il livello massimo della falda. Soltanto in condizioni di periodi particolarmente piovosi o di perdite consistenti dai sistemi di

drenaggio e fognari della Collina di Servola si potrebbero formare lembi di acquiferi pensili all'interno della stessa.

13 CONCLUSIONI

Le opere di MISP (progetto generale di Logistica Giuliana) e del PFTE di cui al prog. AdSPMAO n. 1951 insistono sull'area "a caldo" della ex Ferriera di Servola a ridosso della omonima collina di cui è previsto il parziale sbancamento.

Ai fini della valutazione delle interferenze idrogeologiche delle nuove opere ingegneristiche previste, è stato realizzato un modello geologico costruito su criteri statistici e basato su tutti i sondaggi geognostici a disposizione provenienti dalle campagne geognostiche che si sono succedute nel tempo dal 1967 al 2018. Tale modello si fonda su una ricostruzione per superfici orizzontali della complessità litostratigrafica dei terreni di riporto, che costituiscono i piazzali della Ferriera di Servola, oltre che dei sedimenti già presenti al di sotto di questo e delle unità del Flysch più antiche. Tale modello può essere considerato una interpretazione coerente e statisticamente significativa della realtà geologica della Ferriera di Servola.

Utilizzando questo modello geologico, è stato fatto un modello idrogeologico calibrato con i dati piezometrici di monitoraggio dello stato attuale del flusso sotterraneo della falda nella Ferriera di Servola. Successivamente, sono stati inseriti il barriera fisico lato mare e l'associata trincea drenante, progettata immediatamente verso monte rispetto alla barriera. I risultati mostrano che tale trincea dovrebbe drenare, nelle condizioni peggiori, un massimo di circa 10 l/s mantenendo un livello piezometrico medio di -0.05 m s.l.m.m.. Tale quantità di acqua drenata, che corrisponde alla quantità da trattare, potrebbe essere sovrastimata nel caso in cui il Flysch e le unità litologiche soprastanti abbiano una permeabilità minore di quella cautelativamente al momento utilizzata.

L'accuratezza della modellistica sviluppata e dei risultati ottenuti è funzione diretta della affidabilità dei dati di monitoraggio in continuo della falda. Pertanto, si ritiene che gli errori nei valori delle portate calcolate possano essere ragionevolmente contenuti entro un fattore di circa due.

Nel caso di portate istantanee maggiori rispetto a quanto in questa sede modellato, come ad esempio in periodi di piogge di intensità anomala o rotture degli apparati fognari, è ragionevole ipotizzare che l'acqua possa essere "laminata" all'interno dell'acquifero per essere poi sollevata e portata al trattamento nei periodi di magra. L'intervallo di laminazione ottimale può essere al momento stimato tra -0.10 a 0.00 m s.l.m.m.

È opportuno considerare che nella attuale fase di realizzazione del progetto di marginamento INVITALIA, sarà approfondita, tramite il previsto monitoraggio specifico da svolgersi durante il primo anno dei lavori, la funzione più o meno drenante del paleo alveo del Rio Primario oltre che del suo canale di deviazione realizzato nel 1962. A questo riguardo ai due potenziali modelli del Progetto INVITALIA è associato un progetto di barriera dinamica (una batteria di circa 10 pozzi) che dovrà essere dimensionata nelle portate di ciascun pozzo e nella spaziatura in base al suddetto monitoraggio ed all'applicazione di uno specifico modello idrogeologico calibrato e validato di riferimento. Allo stato, come meglio esemplificato nel testo, si ritiene comunque più probabile il modello Rio Primario, cioè quello con un forte effetto drenante di tale Rio – quest'affermazione è anche confortata dalle risultanze dei lavori di esecuzione del setto impermeabile attualmente in corso. Ad ogni buon conto, la precisazione di quale dei due modelli sia quello più vicino alla realtà, trovandosi il Rio Primario a distanza significativa, risulta essere ininfluente ai fini del progetto in oggetto.

Infine, il modello idrogeologico al momento realizzato è in grado, tramite un monitoraggio in continuo *in operam* e *post operam* su una serie di sezioni piezometriche (NO, Centrale,

SE oltre alle sezioni di monitoraggio sul Rio Primario), di essere raffinato per ottimizzare nel tempo le operazioni di raccolta e trattamento delle acque drenate anche in condizioni che eventualmente possano discostarsi rispetto a quelle fino ad ora modellate.

Da quanto discusso e modellato si ritiene preferibile non utilizzare il Rio Primario come recapito delle acque dei drenaggi. L'acqua raccolta dovrà piuttosto essere invasata per riuso (p.es. lavaggi, antincendio, ecc.) prima del recapito finale a mare dell'eccesso, posto che sia di idonea qualità.

Ai fini della realizzazione del setto impermeabile di monte che perimetra l'area "a caldo" della ex Ferriera di Servola, è stata prodotta una sezione geologica "srotolata" lungo il tracciato della stessa, in modo da poter ancorare il setto impermeabile almeno 1.0 m all'interno del Flysch, mantenendo la scarpa ad una quota, comunque non superiore ai -5.0 m s.m.m. e partendo ai due estremi del setto a quota -29.5 m s.m.m. (vedi Fig. 3-3). È stata, inoltre, presentata una sezione geologica "srotolata" lungo il perimetro del nuovo asse ferroviario lungo del muro di sostegno dello stesso, in modo da poter posizionare correttamente i pozzi drenanti previsti al fine di ridurre il livello di falda all'interno dell'area perimetrata.

Utilizzando come base il modello idrogeologico calibrato del Progetto INVITALIA ed inserendo i nuovi elementi relativi al progetto in oggetto, e cioè il setto impermeabile ed il drenaggio di monte oltre ai pozzi drenanti, è stato realizzato un nuovo modello idrogeologico preliminare per valutare l'influenza del progetto sul sistema acquifero e l'efficienza delle nuove opere anche in relazione alle opere di marginamento e trattamento acque del progetto INVITALIA.

Il modello cosiddetto "completo" prevede oltre al setto impermeabile con l'associato drenaggio, anche la realizzazione di 55 pozzi drenanti, che permettano di controllare la falda all'interno dell'area "a caldo" della ex Ferriera perimetrata dalle nuove opere intercettando le acque di falda provenienti dal Flysch prima del loro ingresso nei terreni di riporto della ex-Ferriera. La riduzione del livello di falda all'interno dell'area perimetrata diminuisce il flusso di acqua alla trincea drenante del progetto INVITALIA e aumenta il flusso che dalla falda acquifera contenuta nel Flysch viene verso l'alto ai pozzi drenanti.

Fermo restando, quindi, che soltanto in fase di progetto esecutivo si potrà fare un modello idrogeologico atto a quantificare con più precisione le portate dei vari setti drenanti e pozzi integrandoli nel sistema di bonifica delle acque drenate, si ritiene che globalmente non vi siano variazioni sostanziali delle acque che almeno inizialmente dovranno essere recapitate agli impianti di trattamento, se non una frazione drenata direttamente dalla Collina di Servola (circa 25 m³/d) che dovrebbe essere utilizzabile direttamente a scopi industriali o, se nei limiti di legge, eventualmente recapitata in mare.

Il modello idrogeologico da realizzare così perfezionato dovrebbe consentire di ottimizzare la portata emunta dai pozzi drenanti e di mantenere un livello di falda a quota più alta di quanto simulato in questa fase, senza ridurre l'efficacia ambientale complessiva. Tale modello di fase esecutiva potrebbe inoltre verificare la fattibilità di ridurre ulteriormente la profondità della scarpa del setto impermeabile di monte nella sezione del tracciato che attualmente si localizza a -5.0 m s.m.m..

Si ritiene in questa fase che il progetto preliminare indichi gli interventi atti a raccogliere e gestire le acque di prima e seconda pioggia cercando di ridurre ad un minimo le perdite della rete attuale al fine di limitare per quanto possibile la ricarica dell'acquifero presente nei terreni di riporto della ex Ferriera.

In prima approssimazione si ritiene che il drenaggio del setto impermeabile di monte possa portare nell'ordine di grandezza 25 (m³/d), mentre 31 (m³/d) dovrebbero essere drenati dai pozzi interni al sedime dell'area "a caldo" della ex Ferriera da inviare potenzialmente a trattamento. Si ritiene che le acque provenienti da parte, forse anche significativa, di questi pozzi drenanti, provenendo direttamente dall'acquifero contenuto nel Flysch, potrebbero essere non inquinate. Pertanto, in questa fase si dovrebbe prevedere il loro sezionamento in modo da poter separare le acque pulite da quelle inquinate. Nel tempo si prevede che la qualità delle acque inquinate possa migliorare. Il modello idrogeologico ulteriormente raffinato e alimentato dai dati di monitoraggio potrebbe affrontare anche questo tema.

Per affinare il quadro conoscitivo e costituire il presupposto dell'affinamento del modello idrogeologico, si ritiene di dover implementare a piezometri una serie di otto pozzi, di cui tre da terebrare ex novo. Tali piezometri andrebbero monitorati per almeno un anno con misure mensili in modo da quantificare i periodi di magra e di morbida dell'acquifero della Collina di Servola.

In tal modo si potrà, quindi, valutare complessivamente le opere d'interferenza con la falda (setti impermeabili e drenaggi) dei vari progetti in essere ed in divenire presenti ai piedi della Collina di Servola. Questo con lo scopo principale di ottimizzare, integrando e coordinando, tutte le varie azioni di bonifica dell'acquifero che al momento sono tenute distinte.

14 **RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI**

Modello idrogeologico dell'area dello stabilimento Ferriera di Servola (TS) -relazione finale
– Prof. ing. Bevilacqua 27/11/2015)

Borgia A., 2019. Modello idrogeologico. Messa in Sicurezza della Ferriera di Servola (Trieste) attraverso interventi di marginamento fisico dell'area demaniale in concessione e di trattamento delle acque di falda contaminate. Progetto Definitivo, INVITALIA.

Busetti M., Babich A., Del Ben A., 2020. Evidenze geofisiche di emissioni di fluidi nel Golfo di Trieste (Nord Adriatico). *Mem. Descr. Carta Geol. d'It.*, v. 105, p. 11-16.