



Autostrada Asti-Cuneo




TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)
LOTTO 6 RODDI-DIGA ENEL

STRALCIO a
TRA IL LOTTO II.7 E LA PK. 5+000

PROGETTO DEFINITIVO

STUDI E INDAGINI

Geologia e idrogeologia
Studio idrogeologico dell'area

IMPRESA 	PROGETTISTA 	INTEGRATORE ATTIVITA' SPECIALISTICHE Dott. Ing. Salvatore Sguazzo Albo degli Ingegneri provincia di Salerno n. 5031 	COMMITTENTE Autostrada Asti-Cuneo S.p.A. Direzione e Coordinamento: S.A.L.T. p.A. (Gruppo ASTM) Via XX Settembre, 98/E 00187 Roma
--	--	--	---

REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	CONTR.	APPROV.	RIESAME	DATA	SCALA
A	05-2021	EMISSIONE	E.Lombardo	P.Mazzoni	Ing. Sguazzo	Ing. Sguazzo	MAGGIO 2021	-
							N. Progr.	
							02.01.10	

CODIFICA	PROGETTO	LIV	DOCUMENTO	REV	WBS
	P017	D	GEO SD 003	A	A33126A000
					CUP
					G31B20001080005

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO	VISTO DELLA COMMITTENTE

Il presente documento non potrà essere copiato, riprodotto o altrimenti pubblicato, in tutto od in parte, senza il consenso scritto dell' Autostrada ASTI - CUNEO S.p.A.. Ogni utilizzo non autorizzato sarà perseguito a norma di legge. This document may not be copied, reproduced or published, either in part or in its entirety, without the written permission of Autostrada Asti - Cuneo S.p.A.. Unauthorized use will be persecute by law.

INDICE

1. PREMESSA	4
2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	5
2.1 DOCUMENTI DI PROGETTO	5
2.2 BIBLIOGRAFIA.....	6
3. DESCRIZIONE DELLE OPERE IN PROGETTO	8
4. DATI GEOGNOSTICI DISPONIBILI	10
4.1 CAMPAGNE GEOGNOSTICHE.....	10
4.1.1. <i>Campagne di indagini del Progetto Preliminare della variante della S. S. n. 231 Alba-Bra (1991-1996)</i>	<i>10</i>
4.1.2. <i>Campagne di indagini del Progetto Definitivo (1998)</i>	<i>10</i>
4.1.3. <i>Campagne di indagini del Progetto Esecutivo (2001).....</i>	<i>11</i>
4.1.4. <i>Campagna di indagini integrative 2006.....</i>	<i>11</i>
4.1.5. <i>Campagna di indagini integrative 2011-2012</i>	<i>12</i>
4.1.6. <i>Campagna di indagini integrative 2018.....</i>	<i>13</i>
4.2 CAMPAGNE GEOFISICHE	13
4.3 ULTERIORI STUDI REALIZZATI NELL'AREA DI PROGETTO	14
5. DOMINIO DEL MODELLO: DESCRIZIONE, INQUADRAMENTO GEOLOGICO STRATIGRAFICO ED INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO	16
5.1 GENERALITÀ	16
5.2 CARATTERISTICHE GEOLOGICHE E STRATIGRAFICHE DELL'AREA	17
5.2.1. <i>Inquadramento geologico-strutturale</i>	<i>17</i>
5.2.2. <i>Inquadramento stratigrafico</i>	<i>20</i>
5.3 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO DELL'AREA	23
6. DATI PIEZOMETRICI ED IDROLOGICI	26
6.1 DESCRIZIONE DEI CORPI IDRICI	26
6.1.1. <i>Corpi idrici profondi (acquiferi)</i>	<i>26</i>
6.1.2. <i>Corpi idrici superficiali</i>	<i>27</i>
6.2 DATI PROVENIENTI DAL MONITORAGGIO PIEZOMETRICO.....	27
6.3 PIEZOMETRIA DI RIFERIMENTO DELLO STATO INDISTURBATO	30
6.4 DATI IDROMETRICI	34
6.5 PRECIPITAZIONI ED INFILTRAZIONE EFFICACE	37
6.6 CENSIMENTO DEI PUNTI D'ACQUA	40
7. COSTRUZIONE E CARATTERISTICHE DEL MODELLO NUMERICO TRIDIMENSIONALE	42
7.1 DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO	42
7.2 CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL MODELLO NUMERICO DI FLUSSO.....	42

7.3	DISTRIBUZIONE DEI PARAMETRI IDROGEOLOGICI	50
7.3.1.	<i>Orizzonte 1 – Depositi fini della valle del Tanaro e Coltri superficiali e detritiche di versante</i>	51
7.3.2.	<i>Orizzonte 2 – Depositi grossolani della valle del Tanaro e Coltri superficiali e detritiche di versante</i>	51
7.3.3.	<i>Orizzonte 3 – Argille di Lugagnano</i>	52
7.3.4.	<i>Orizzonte 4 – Formazione di Cassano - Spinola</i>	53
7.3.5.	<i>Orizzonte 5 – Formazione Gessoso – Solfifera (porzione microcristallina)</i>	54
7.3.6.	<i>Orizzonte 6 – Formazione Gessoso – Solfifera (porzione macrocristallina)</i>	55
7.3.7.	<i>Orizzonte 7 – Formazione delle Marne di Sant’Agata Fossili</i>	56
8.	CONDIZIONI AL CONTORNO DEL MODELLO NUMERICO ED ELEMENTI ANTROPICI DI RILIEVO	60
8.1	GENERALITÀ	60
8.2	CONDIZIONI AL CONTORNO DEL I TIPO (CONDIZIONE DI CARICO ASSEGNATO)	60
8.3	CONDIZIONI AL CONTORNO DEL II TIPO (CONDIZIONI DI FLUSSO ASSEGNATO)	62
8.4	CONDIZIONI AL CONTORNO DEL III TIPO (CONDIZIONI DI FLUSSO DIPENDENTE DAL CARICO)	63
8.5	ALTRE CONDIZIONI AL CONTORNO	65
8.5.1.	<i>Piogge efficaci</i>	65
8.5.2.	<i>Paratie di pali di grande diametro in corrispondenza delle trincee</i>	66
8.6	CONDIZIONI INIZIALI	67
9.	CALIBRAZIONE DEL MODELLO NUMERICO	68
9.1	CRITERIO DI CALIBRAZIONE DEL PARAMETRO CONDUCIBILITÀ IDRAULICA	68
9.2	CALIBRAZIONE DEL MODELLO IN STATO STAZIONARIO	69
10.	VALUTAZIONE DELL’IMPATTO DATO DALLE OPERE DI SOSTEGNO SUL SISTEMA ACQUIFERO IN CONDIZIONI STAZIONARIE	74
10.1	GENERALITÀ	74
10.2	RISULTATI DELLE SIMULAZIONI	74
11.	VALUTAZIONE DELL’IMPATTO DATO DALLE OPERE DI SOSTEGNO SUL SISTEMA ACQUIFERO IN CONDIZIONI TRANSITORIE (EVENTI METEORICI SINGOLI)	82
11.1	GENERALITÀ	82
11.2	PARAMETRIZZAZIONE DEL COMPORTAMENTO INSATURO DEI LAYER NUMERICI	86
11.2.1.	<i>Orizzonte 1 – Depositi fini della valle del Tanaro e Coltri superficiali e detritiche di versante</i>	86
11.2.2.	<i>Orizzonte 2 – Depositi grossolani della valle del Tanaro e Coltri superficiali e detritiche di versante</i>	87
11.2.3.	<i>Orizzonte 3 – Argille di Lugagnano</i>	88
11.2.4.	<i>Orizzonte 4 – Formazione di Cassano - Spinola</i>	89
11.2.5.	<i>Orizzonte 5 – Formazione Gessoso – Solfifera (porzione microcristallina)</i>	90
11.2.6.	<i>Orizzonte 6 – Formazione Gessoso – Solfifera (porzione macrocristallina)</i>	91
11.2.7.	<i>Orizzonte 7 – Formazione delle Marne di Sant’Agata Fossili</i>	91

11.3	EVENTO METEORICO	92
11.3.1.	<i>Evento di entità ordinaria</i>	93
11.3.2.	<i>Evento di entità eccezionale (24 e 25 novembre 2016)</i>	93
11.4	DESCRIZIONE DELL'ANALISI IMPLEMENTATE	96
11.5	CONDIZIONI AL CONTORNO.....	96
11.6	CONDIZIONI INIZIALI	96
11.7	RISULTATO DELLE SIMULAZIONI	97
11.7.1.	<i>Analisi #1: scenario ante operam – evento meteorico ordinario</i>	97
11.7.2.	<i>Analisi #2: scenario ante operam – evento meteorico eccezionale (24 e 25 novembre 2016)</i>	103
11.7.3.	<i>Analisi #3: scenario post operam – evento meteorico ordinario</i>	109
11.7.4.	<i>Analisi #4: scenario post operam – evento meteorico eccezionale</i>	117
12.	CONCLUSIONI	126

1. PREMESSA

Il presente documento descrive l'implementazione di un modello numerico tridimensionale delle acque sotterranee dell'area interessata dalla futura realizzazione dello Stralcio "a" del Lotto 6, Tronco 2, del collegamento autostradale A6-A21 (Asti-Cuneo).

Il progetto comprende il tratto di completamento del Lotto II.6, compreso tra la fine del Lotto II.7 e l'inizio del 1° stralcio funzionale. In particolare il tracciato si sviluppa inizialmente in direzione nord-est attestandosi al piede della collina di Verduno, attraversando il Rio dei Deglia e il Rio San Giacomo, prosegue fino alla località "due lanterne", interessando i Comuni di Cherasco e La Morra, supera in viadotto il canale Enel e la S.P.7 per poi proseguire all'interno della regione pianeggiante "Piana dei Molino", nei Comuni di Verduno e di Roddi. Superato il canale Enel (intorno alla progr. km 4+500 circa) la parte di tracciato in variante, oggetto della presente progettazione, si conclude ed il collegamento prosegue lungo il tracciato già autorizzato e individuato nel progetto esecutivo già sviluppato.

Da un punto di vista geotecnico e geomorfologico, il tracciato oggetto della progettazione, complessivamente di lunghezza pari a circa 4.9 km, può essere diviso in due macro-zone: la prima, a partire dall'inizio del Lotto II.6, si estende per i primi 2 km, e la seconda per i successivi 2.9 km. Le due zone hanno caratteristiche profondamente diverse. Il primo tratto, che corre a mezza costa lungo la collina di Verduno, interessa infatti la Formazione Gessoso – Solfifera e i sovrastanti depositi colluviali e depositi di frana. Il tratto successivo si sviluppa completamente nel fondo valle del Tanaro e interessa fondamentalmente i depositi alluvionali del fiume.

Il modello idrogeologico qui presentato, ricostruendo l'assetto idrogeologico dell'intera zona, ha pertanto la finalità specifica di verificare quelli che possono essere gli impatti, dati dalla realizzazione della strada, sul regime idrogeologico. Particolare attenzione è ovviamente dedicata ai tratti in trincea che per ragioni di stabilità richiedono la presenza di opere di sostegno (paratie di pali) di dimensioni tali da interferire potenzialmente con la falda.

Un'ulteriore applicazione del modello sopra citato è stata quella di valutare l'impatto sull'intero dominio di eventi meteo, di entità sia ordinaria sia eccezionale, al fine di valutare gli effetti sulla piezometria della zona, in assenza e in presenza delle opere di sostegno. In questo contesto, le analisi in assenza di opere hanno permesso di valutare l'effetto degli eventi meteorici, eccezionali e non, sul regime idraulico indisturbato precedentemente ricostruito, mentre le analisi che prevedono le opere di sostegno, considerando l'interferenza data da questi elementi quasi-impermeabili, hanno permesso di valutare eventuali criticità legate alla loro presenza.

Nel seguito verranno illustrate le attività di reperimento ed analisi dei dati disponibili per la definizione del dominio del modello numerico realizzato.

Successivamente verrà illustrata la struttura del modello, la sua implementazione mediante il software Feflow v. 7.1 (distribuito dal Danish Institute of Applied Hydraulics, DHI), la sua calibrazione in stato stazionario e, infine, verranno presentati i risultati delle simulazioni relative allo scenario di progetto.

2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

Nel seguito si riportano i documenti cui si è fatto riferimento per la redazione della presente relazione.

2.1 DOCUMENTI DI PROGETTO

- [1] Collegamento autostradale Asti–Cuneo – Tronco II Lotto 6 – Stralcio a - PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA - Censimento delle sorgenti-relazione – Doc. P001_P_GEO_RT_001_A
- [2] Collegamento autostradale Asti–Cuneo – Tronco II Lotto 6 – Stralcio a - PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA - Stato di conservazione della strumentazione esistente-relazione – Doc. P001_P_GEO_RT_002_A
- [3] Collegamento autostradale Asti–Cuneo – Tronco II Lotto 6 – Stralcio a - PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA - Stato di conservazione della strumentazione esistente-tavola – Doc. P001_P_GEO_PT_001_A
- [4] Collegamento autostradale Asti–Cuneo – Tronco II Lotto 6 – Stralcio a - PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA – Relazione geologia ed idrogeologica – Doc. P001_P_GEO_RA_001_B
- [5] Collegamento autostradale Asti–Cuneo – Tronco II Lotto 6 – Stralcio a - PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA – Carta geologica – Doc. P001_P_GEO_CG_001_B
- [6] Collegamento autostradale Asti–Cuneo – Tronco II Lotto 6 – Stralcio a - PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA – Carta idrogeologica – Doc. P001_P_GEO_CD_001_B
- [7] Collegamento autostradale Asti–Cuneo – Tronco II Lotto 6 – Stralcio a - PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA – Profili geologici – Doc. P001_P_GEO_RA_001_B
- [8] Collegamento autostradale Asti–Cuneo – Tronco II Lotto 6 – Stralcio a - PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA – Planimetria indagini as-built – Doc. P001_P_GEO_PG_002_A
- [9] Collegamento autostradale Asti–Cuneo – Tronco II Lotto 6 – Stralcio a - PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA – Relazione geotecnica – Doc. P001_P_GEO_RB_001_A
- [10] Collegamento autostradale Asti–Cuneo – Tronco II Lotto 6 – Stralcio a - PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA – Planimetria e sezioni intervento in trincea tra km0+340 e km0+390 – Doc. P001_P_GEO_PZ_001_A
- [11] Collegamento autostradale Asti–Cuneo – Tronco II Lotto 6 – Stralcio a - PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA – Planimetria e sezioni intervento in trincea tra km0+450 e km0+550 – Doc. P001_P_GEO_PZ_001_A
- [12] Collegamento autostradale Asti–Cuneo – Tronco II Lotto 6 – Stralcio a - PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA – Planimetria e sezioni intervento in trincea tra km0+850 e km1+100 – Doc. P001_P_GEO_PZ_001_A
- [13] Collegamento autostradale Asti–Cuneo – Tronco II Lotto 6 – Stralcio a - PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA – Planimetria e sezioni intervento in trincea tra km1+750 e km2+000 – Doc. P001_P_GEO_PZ_001_A

2.2 BIBLIOGRAFIA

- [14] Piano di Tutela delle Acque (PTA) della regione Piemonte – Dicembre 2018 (regione Piemonte - Direzione Ambiente, Governo e Tutela del Territorio).
- [15] Biancotti A. (1981) - Geomorfologia dell'Alta Langa (Piemonte Meridionale). Memorie della Società Italiana di Scienze Naturali e Museo Civico di Storia Naturale di Milano, XXII, 1981, pp. 58-104.
- [16] Boni A., Casnedi R., (1970) - Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100'000 Fogli 69 Asti e 70 Alessandria.
- [17] Dela Pierre F., Bernardi E., Cavagna S., Clari P., Gennari R., Irace A., Lozar F., Lugli S., Manzi V., Natalicchio M., Roveri M., Violanti D., (2010) - The record of the Messinian salinity crisis in the Tertiary Piedmont Basin (NW Italy): the Alba section revisited, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* – PALAEO 5875.
- [18] Ghibaudo G., Clari P., Perello M., (1985) - Litostratigrafia, sedimentologia ed evoluzione tettonicosedimentaria dei depositi miocenici del margine sud-orientale del Bacino Terziario ligurepiemontese (Valli Borbera, Scrivia e Lemme). *Bollettino della Società Geologica Italiana* 104, 349- 397.
- [19] Sardella, R., (2008) - Remarks on the Messinian carnivores (Mammalia) of Italy. *Bollettino della Società Paleontologica Italiana* 47, 195-202.
- [20] Fogli 68 – Carmagnola, 69 - Asti e 80 – Cuneo, Cartografia d'Italia dell'Istituto Geografico Militare (IGM) al scala 1:100.000.
- [21] Foglio 192 – Bra, Carta Geologica d'Italia a scala 1:50.000
- [22] Tavole n. 080 I-NE (Cherasco), 068 II SE (Bra) e 069 III SO (Alba), Carta Geologica d'Italia a scala 1:25.000.
- [23] Sezioni 192110 e 192120 della Carta Tecnica Regionale a scala 1:10.000 (CTR).
- [24] DHI –Feflow 7.1– Reference Manual
- [25] H.-J. G. Diersch – Feflow – Finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media – ed. Springer
- [26] C. Fitts - Groundwater Science, 2nd Edition – Academic Press
- [27] “Applied Groundwater modelling – simulation of flow and advective transport” M.P. Anderson, W.W. Woessner, 1992, Academic Press.
- [28] “Methods and guidelines for effective model calibration: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report”, 98-4005, 90 p., Hill, M.C., (1998).
- [29] “Modeling groundwater flow and pollution” J. Bear, A. Verruijt, 1990, D. Reidel Publishing Company
- [30] “FEFLOW – White Papers, Vol. 1”, WASY, 2002
- [31] “Dynamics of fluids in porous media” J. Bear, 1972, Elsevier

3. DESCRIZIONE DELLE OPERE IN PROGETTO

Come già anticipato, il presente documento si riferisce allo studio idrogeologico relativo alla realizzazione dello Stralcio “a” del Lotto 6, Tronco 2, del collegamento autostradale A6-A21 (Asti-Cuneo).

Il tracciato si sviluppa a partire dal ponte sul Tanaro a suo tempo realizzato nell’ambito dei lavori del lotto Il.7, prevalentemente lungo la direttrice est-ovest, collegandosi ad est, nella piana di Roddi, con il Lotto Il.6b, già sviluppato a livello esecutivo, con un’estesa complessiva di circa 4.9 km.

Il tracciato ha inizio, come già detto, dall’esistente ponte sul Tanaro, e piegando verso nord attraversa, con due ponti da 40 m di luce, il rio dei Deglia e il rio S. Giacomo. Prosegue con andamento rettilineo, per circa 1 Km, appoggiandosi al piede della zona collinare di Verduno, con una configurazione alternata fra tratti in rilevato, in trincea e a mezza costa. Dopo aver attraversato un impluvio naturale, sempre con un ponte da 40 m, piega verso est interessando i Comuni di Cherasco e La Morra, e con un viadotto da circa 555 metri, in località “Due lanterne”, scavalca il canale ENEL e la S.P. 7. Prosegue in rilevato, con un flesso, attraversando nuovamente il canale ENEL, per poi collegarsi al lotto Il.6b, il quale prosegue all’interno della regione pianeggiante “Piana dei Molino”, nei Comuni di Verduno e di Roddi.

L’infrastruttura in progetto presenta lungo la prima parte del tracciato diversi tratti in trincea, in particolare si individuano 4 tratti in cui l’altezza di scavo dal piano campagna risulta importante, ovvero compresa tra 4÷11 m. Di seguito si riporta un key plan della situazione appena descritta.

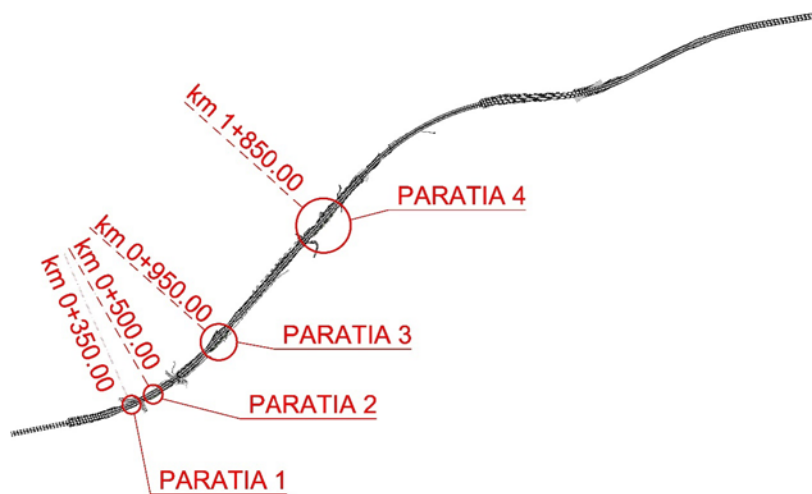


Figura 3.1 Key plan – Ubicazione opere di sostegno

In corrispondenza di tali tratti si prevede di realizzare delle di sostegno di controripa realizzate a circa 20÷25 m dall’asse di tracciamento stradale a contenimento del versante di monte. Le opere prevedono la realizzazione di paratie di pali di grande diametro con lunghezze dei pali comprese tra i 23 e i 30 m.

Nella seguente Tabella 3.1 sono riportati i dati principali delle paratie previste come opere di sostegno delle trincee.

Tabella 3.1: Dati opere di sostegno trincee

Opera	Quota testa paratia	Lunghezza pali	Quota base paratia	Sviluppo paratia
Paratia T1	~ +210m slm	25m	~ +185m slm	51m
Paratia T2	~ +216m slm	23m	~ +193m slm	65m
Paratia T3	~ +232m slm	30m	~ +202m slm	125m
Paratia T4	~ +228m slm	28m	~ +200m slm	152m

Infine sia a tergo delle opere di sostegno che a margine della sede stradale si prevede la realizzazione di trincee drenanti, da 2÷3 m, al fine di mantenere il livello di acqua al di sotto della sovrastruttura stradale in caso di innalzamento stagionale della falda.

Di seguito si riporta una sezione tipologica di intervento.

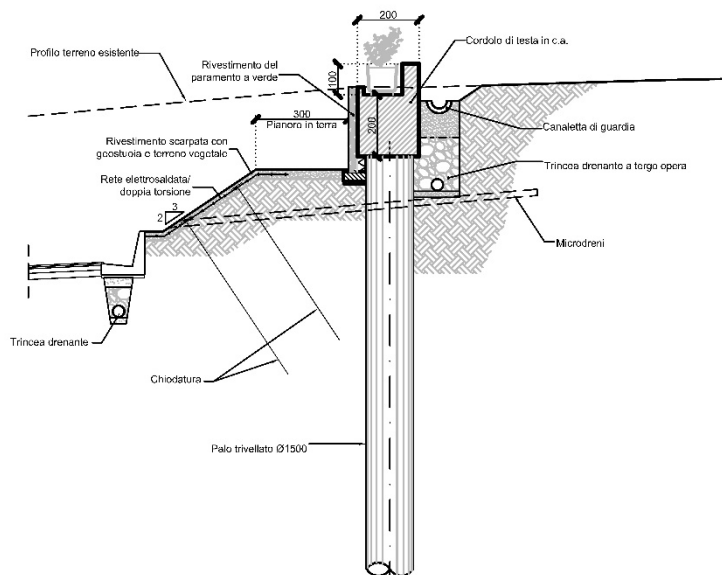


Figura 3.2 Sezione tipo paratia di pali

L'opera di sostegno prevista consta in una paratia di pali trivellati $\varnothing 1500$ mm disposti ad interasse longitudinale di 2 m collegati in sommità da una trave di coronamento in c.a. delle dimensioni 200x200 cm.

4. DATI GEOGNOSTICI DISPONIBILI

4.1 CAMPAGNE GEOGNOSTICHE

Nel corso degli ultimi 20 anni circa sono state eseguite numerose campagne geognostiche, realizzate nell'ambito delle diverse fasi di progettazione del lotto in esame dell'Autostrada Asti-Cuneo. Si riporta di seguito una sintesi delle indagini realizzate nelle varie fasi di progettazione.

4.1.1. Campagne di indagini del Progetto Preliminare della variante della S. S. n. 231 Alba-Bra (1991-1996)

Nella campagna di indagini geognostiche del Progetto Preliminare della variante della S.S. n. 231 Alba-Bra sono stati eseguiti 31 sondaggi a carotaggio in continuo, di cui 3 attrezzati a piezometro. L'ubicazione dei sondaggi realizzati nell'ambito di questa fase di progetto è riportata in Figura 4.1.

4.1.2. Campagne di indagini del Progetto Definitivo (1998)

Nella campagna geotecnica per il Progetto Definitivo (1998) sono stati eseguiti sondaggi a carotaggio continuo spinti fino a profondità di 40 m dal p.c. (codice SPD). Nel corso delle perforazioni, oltre al recupero integrale del terreno attraversato, al prelevamento di campioni indisturbati e campioni rimaneggiati e all'esecuzione di prove penetrometriche dinamiche SPT, sono state effettuate prove di permeabilità Lefranc e Lugeon. Tutti i sondaggi realizzati sono stati attrezzati come piezometro a tubo aperto.

L'ubicazione dei sondaggi realizzati nell'ambito di questa fase di progetto è riportata in Figura 4.1.

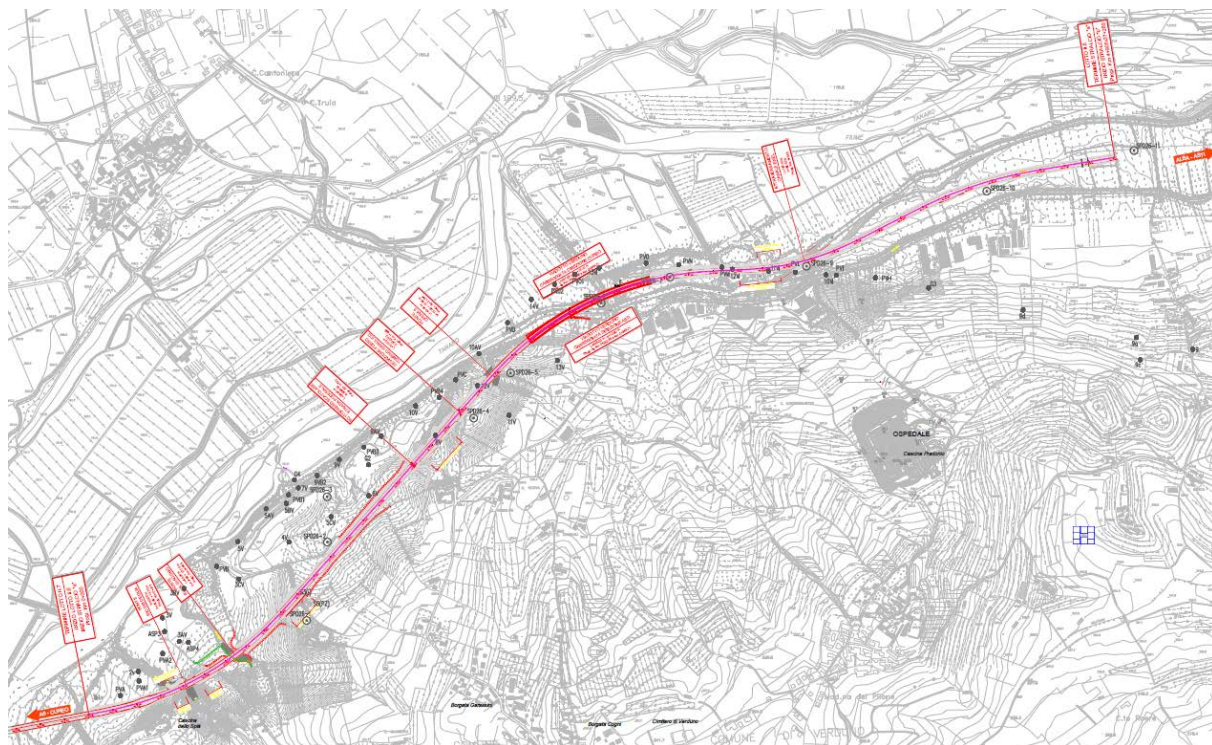


Figura 4.1 Ubicazione dei sondaggi delle campagne del Progetto Preliminare (1991-1996) e del Progetto Definitivo (1998).

4.1.3. Campagne di indagini del Progetto Esecutivo (2001)

Nel 2001 sono stati effettuati ulteriori sondaggi ad integrazione di quelli già presenti per tenere conto della modifica di tracciato che prevedeva la realizzazione della Galleria di Verduno. Sono stati realizzati 61 sondaggi (codice SFG e SPE) a rotazione con carotaggio continuo, con profondità comprese tra 25 m e 125 m da p.c. Le perforazioni denominate con la sigla SFG sono state eseguite nel tratto di lotto interessato dallo scavo della galleria Verduno, mentre le altre perforazioni, indicate con la sigle SPE sono state eseguite nelle restanti parti del Lotto 6. Per valutare il livello della falda, sono stati realizzati 71 piezometri, 65 dei quali sono a tubo aperto semplice, i rimanenti a tubo aperto con cella di Casagrande; in alcuni sondaggi il tratto fenestrato interessa la formazione dei gessi della Formazione Gessoso-Solfifera, in altri le marne della Formazione delle Marne di S. Agata Fossili. L'ubicazione dei sondaggi è mostrata in Figura 4.2.

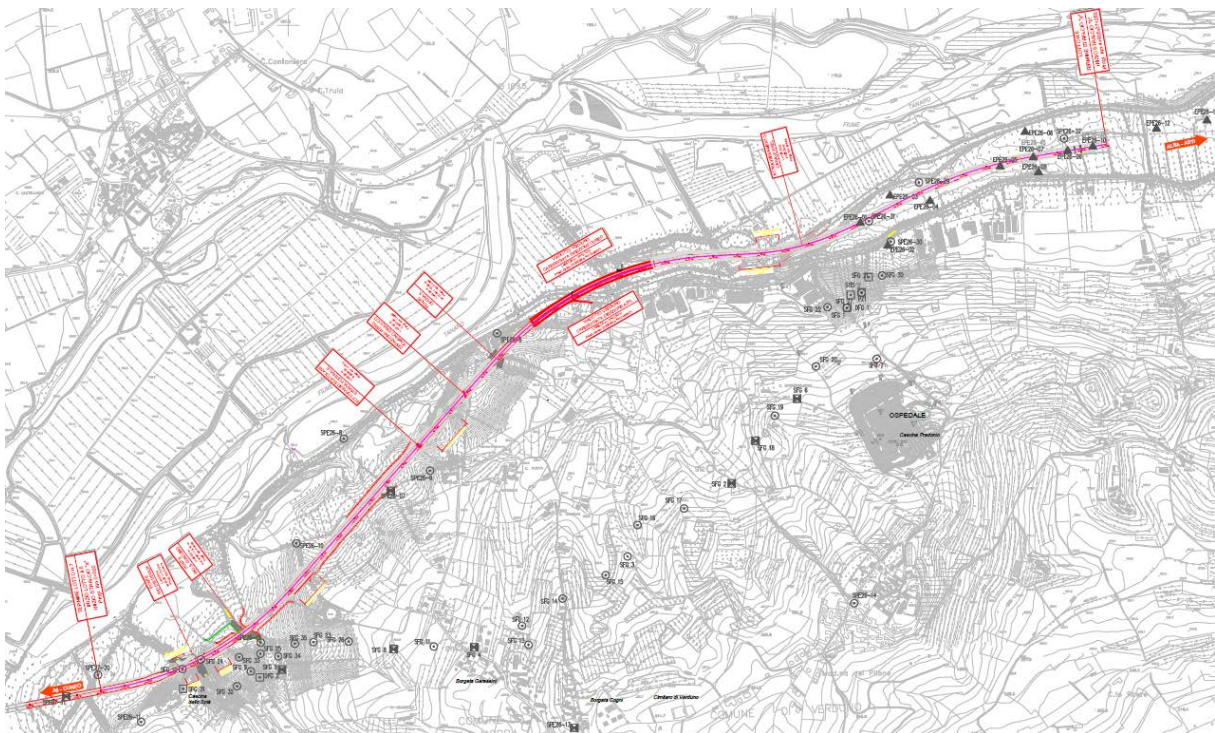


Figura 4.2 Ubicazione delle indagini eseguite durante la campagna per il Progetto Esecutivo, 2001.

4.1.4. Campagna di indagini integrative 2006

Nel 2006 è stata realizzata una campagna di indagini integrative finalizzata all'approfondimento delle conoscenze relative ai livelli sabbioso-ghiaiosi intercalati nelle argille-marnose, la cui presenza era stata rilevata dalle indagini del progetto esecutivo nella zona di galleria adiacente all'imbocco lato Alba. In particolare l'obiettivo è stato quello di valutare la continuità sia in direzione longitudinale che trasversale all'asse della galleria dei livelli più permeabili e conseguentemente di valutarne le potenzialità idriche in termini di volumi d'acqua mobilizzabili. L'indagine è consistita nella realizzazione di quattro sondaggi integrativi (SIV1÷SIV4) in corrispondenza dei settori lungo il tracciato della galleria in cui è stata evidenziata una carenza di dati. Per valutare il livello della falda, i fori sono stati attrezzati con piezometri a tubo aperto (tutti) e/o tipo Casagrande (SIV1 e SIV2).

4.1.5. Campagna di indagini integrative 2011-2012

Sempre nell'ambito della progettazione della Galleria di Verduno, tra Settembre 2011 e Luglio 2012, sono stati realizzati ulteriori sondaggi con profondità variabili tra 20 e 70 metri. Tali sondaggi hanno consentito sia di ottemperare alle prescrizioni del DEC VIA 576/2011, sia di predisporre sulla collina di Verduno una rete di monitoraggio ambientale inclinometrica e piezometrica. Le indagini effettuate (Figura 4.3) hanno permesso di realizzare un approfondimento delle condizioni geologiche, idrogeologiche e idrauliche del sottosuolo.

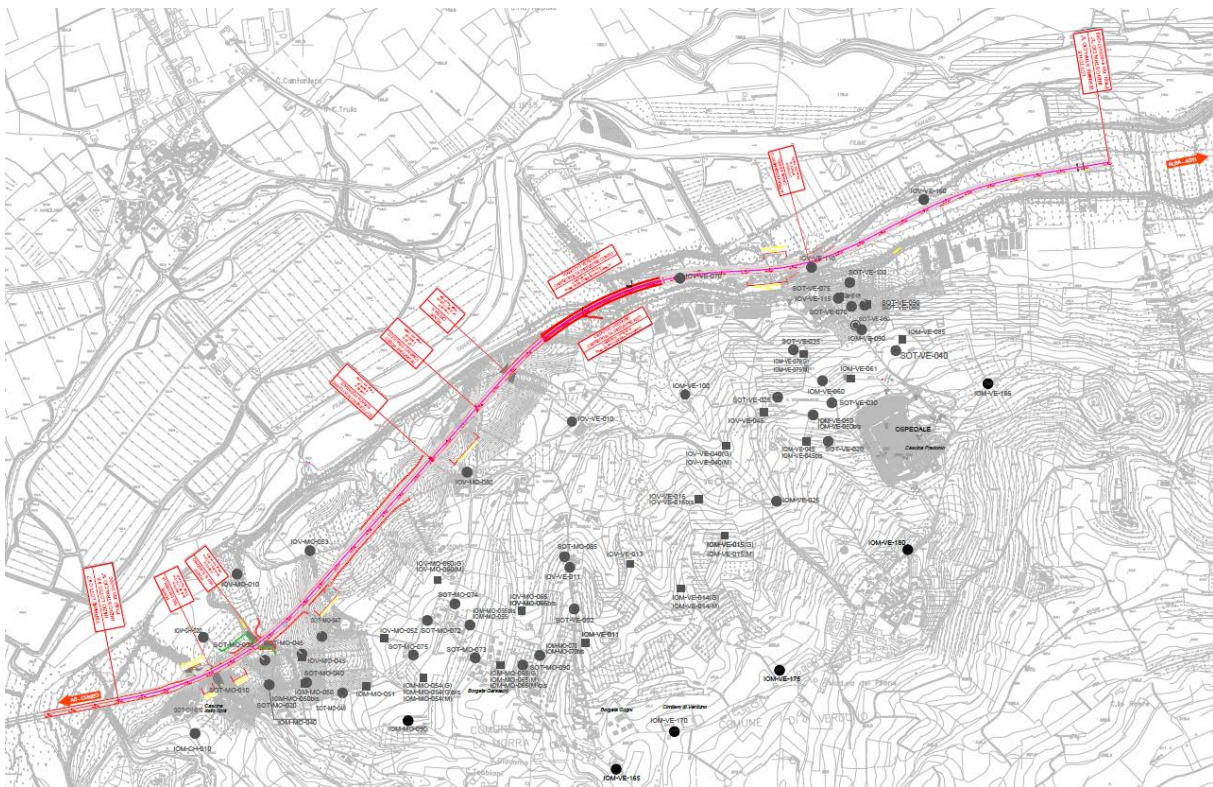


Figura 4.3 Ubicazioni delle indagini integrative eseguite negli anni 2011-2012.

Nel dettaglio sono state eseguite:

- n. 66 perforazioni a carotaggio continuo per l'installazione di piezometri a tubo aperto, per il monitoraggio lungo il tracciato della galleria e lungo tutto il versante ai fini di ercettare la superficie della zona saturata all'interno dei terreni gessiferi e all'interno dei livelli a grana fine meno permeabili (codice *IOM*, *IOV*).
- n. 25 perforazioni a carotaggio continuo per l'installazione di inclinometri al fine di monitorare eventuali movimenti di versante in fase anteoperam, nel corso degli scavi della galleria e postoperam (codice *SOT*).

L'ubicazione dei sondaggi è riportata in Figura 4.3; i sondaggi eseguiti hanno una profondità variabile da un minimo di 20 metri circa fino ad un massimo di 80 metri. E' importante specificare che i piezometri eseguiti in questa campagna geognostica sono stati realizzati applicando in alcuni casi una superficie filtrante nelle sole marne ed in altri casi nei soli gessi, al fine di valutare un eventuale diverso comportamento idrodinamico nei due corpi. Le indagini hanno consentito un ulteriore approfondimento della caratterizzazione geologico-stratigrafica, lungo il tracciato della galleria e, più in generale, di tutto il

versante in cui si inserisce l'opera, consentendo un affinamento del modello geologico ed idrogeologico di riferimento.

4.1.6. Campagna di indagini integrative 2018

A partire da Ottobre 2018 una nuova campagna di indagini integrative volte all'approfondimento delle conoscenze stratigrafiche, geotecniche ed idrogeologiche sul nuovo tracciato previsto per l'opera. La campagna è suddivisa in 2 fasi che prevedono l'esecuzione di sondaggi a carotaggio continuo con prelievo di campioni e analisi di laboratorio, profondi tra i 20 ed i 50m, in 30 punti differenti lungo il tracciato, di cui 8 verranno raddoppiati da perforazioni a distruzione di nucleo per poter avere più strumenti nella stessa area. In totale si prevede di attivare 18 piezometri sia a tubo aperto, sia con cella di Casagrande e 8 inclinometri.

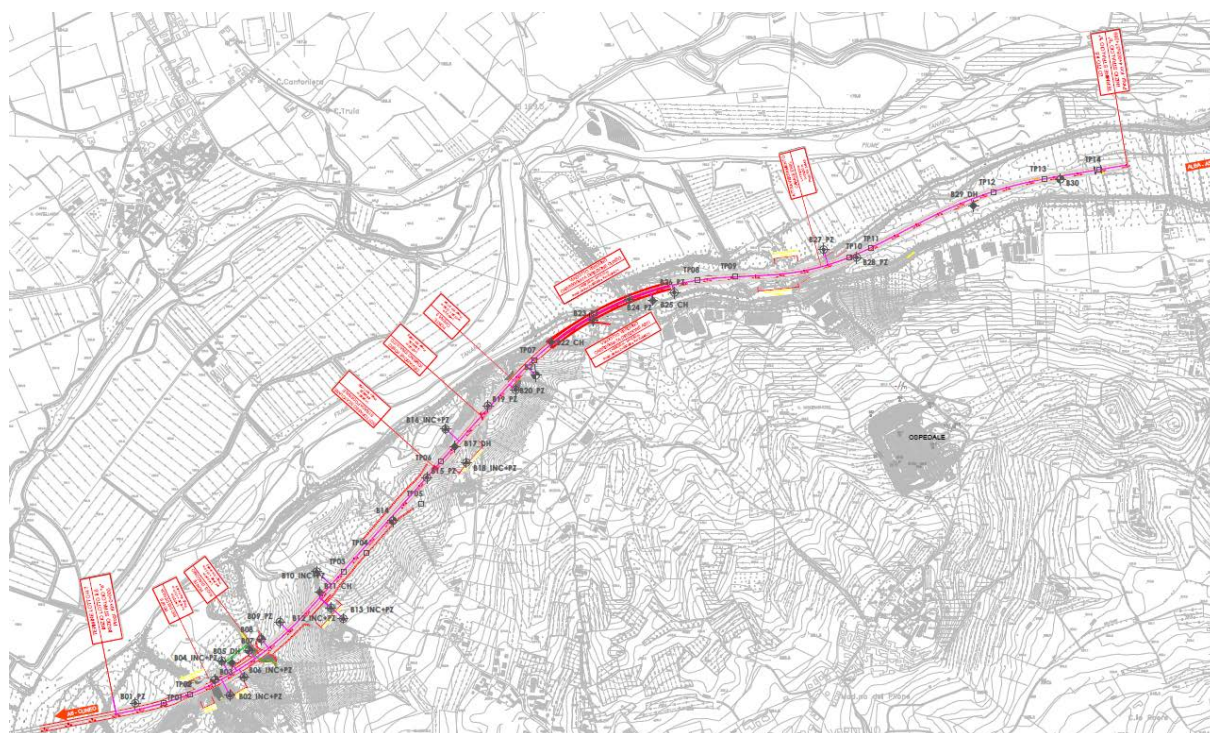


Figura 4.4 Stralcio di cartografia indicante le indagini integrative 2018 riferite al nuovo tracciato.

4.2 CAMPAGNE GEOFISICHE

Una prima campagna di indagini geofisiche è stata realizzata nell'ambito degli studi per il Progetto Definitivo (1998) e ha riguardato l'esecuzione di:

- sondaggi elettrici con elaborazioni tomografiche;
- sezioni elettrostratigrafiche;
- profili elettrici tripotenziale;
- sondaggi elettrici verticali.

Una seconda campagna è stata realizzata nell'ambito del Progetto Esecutivo (2011-2012), ed è stata finalizzata sia alla verifica di eventuali interferenze tra lo scavo della galleria di Verduno e le cavità

carsiche presenti in prossimità dell'area oggetto di studio sia alla caratterizzazione dei settori in frana posti nel settore prossimo all'imbocco lato Alba della Galleria di Verduno.

L'indagine geofisica è consistita nella realizzazione delle seguenti tipologie di indagine:

- indagini elettriche, volte alla determinazione dei valori di resistività e ad una modellizzazione 2D/3D in continuo nel sottosuolo;
- indagini sismiche a rifrazione. Le indagini in rifrazione sono state realizzate al fine di evidenziare la presenza di eventuali dissesti, condizioni di instabilità, aree carsiche o zone caratterizzate dalla possibile presenza di fluidi che interessino le unità più superficiali;
- indagini sismiche a riflessione.

L'ultima campagna è stata realizzata nel 2018 nell'ambito della presente fase progettuale e ha compreso alcuni stendimenti di indagine geoelettrica. Le stese di indagine hanno coperto la porzione di tracciato in corrispondenza della collina di Verduno. In particolare si sono previsti due stendimenti longitudinali posizionati in corrispondenza delle due carreggiate dell'autostrada, con una lunghezza complessiva pari a circa 3.7 Km e tre allineamenti ad esso perpendicolari, in corrispondenza delle tre trincee maggiori.

L'indagine è stata finalizzata sia alla verifica di eventuali interferenze tra lo scavo dei tratti in trincea e le possibili cavità carsiche presenti in prossimità dell'area oggetto di studio.

Per quanto riguarda le opere di captazione si tratta di opere di utilizzo strettamente locale, generalmente di limitate potenzialità e, almeno in alcuni casi, abbandonate da tempo.

4.3 ULTERIORI STUDI REALIZZATI NELL'AREA DI PROGETTO

Per l'implementazione del modello idrogeologico oggetto del presente studio, si è fatto riferimento anche ad altri studi specifici svolti nell'area. Gli studi che, in aggiunta alle indagini ed agli elaborati prodotti in questa e nelle precedenti fasi progettuali, forniscono un supporto interpretativo delle condizioni geologico-idrogeologiche dell'area sono rappresentati da:

- Studio delle doline eseguito dal comune di Verduno (Marzo 2011). Tale studio risulta di notevole interesse anche al fine di meglio identificare le caratteristiche dell'acquifero carsico. Lo studio svolto (realizzato da SEA Consulting s.r.l.) è consistito nella mappatura e catalogazione delle forme carsiche. Tale studio ha permesso di migliorare la conoscenza del territorio, verificare lo stato di conservazione delle forme naturali utili allo smaltimento delle acque superficiali e stimare una possibile interconnessione all'interno del reticolo idrografico sotterraneo. L'area oggetto di studio è riportata nella successiva Figura 4.5. In aggiunta a questo studio nuovi sopralluoghi sono stati eseguiti allo scopo di confermare i dati pubblicati ed eventualmente integrare il dettaglio dei rilievi. Sono state inseriti a valle di tali rilievi alcuni elementi geomorfologici integrativi relativamente alla morfogenesi pseudo carsica con particolare riferimento ad alcune scarpate perimetrali di forme depresse antiche. È stata inoltre valutata l'interazione di grande rilevanza tra gli elementi tettonici e lo sviluppo di fenomeni di dissoluzione che trovano una coincidenza lungo specifici allineamenti strutturali. Dall'analisi di tutti questi studi si può ragionevolmente affermare che al di fuori dell'area di affioramento della formazione dei gessi e lontano dai condizionamenti strutturali le forme di dissoluzione risultano assai scarse o assenti.
- Studio strada di accesso ospedale (lato Alba) eseguito dalla Provincia di Cuneo. Nell'ambito dell'indagine condotta nel 2011 sono stati eseguiti 5 sondaggi geognostici a carotaggio continuo con profondità massima di 25 m, n°1 sondaggio a distruzione di nucleo e n°4 prove

penetrometriche pesanti. Ai fini del monitoraggio dei livelli idrici nel sottosuolo, 3 sondaggi sono stati attrezzati con piezometri a tubo aperto.

- Studi per il progetto di consolidamento del versante collinare del Nuovo Ospedale Alba-Bra. Nell'ambito delle diverse fasi progettuali sono stati eseguiti diversi sondaggi, attrezzati a piezometro a tubo aperto, che hanno messo in luce sia evidenze di antichi movimenti gravitativi profondi, sia l'esistenza di una coltre di depositi sciolti superficiali sede di una circolazione idrica non trascurabile.

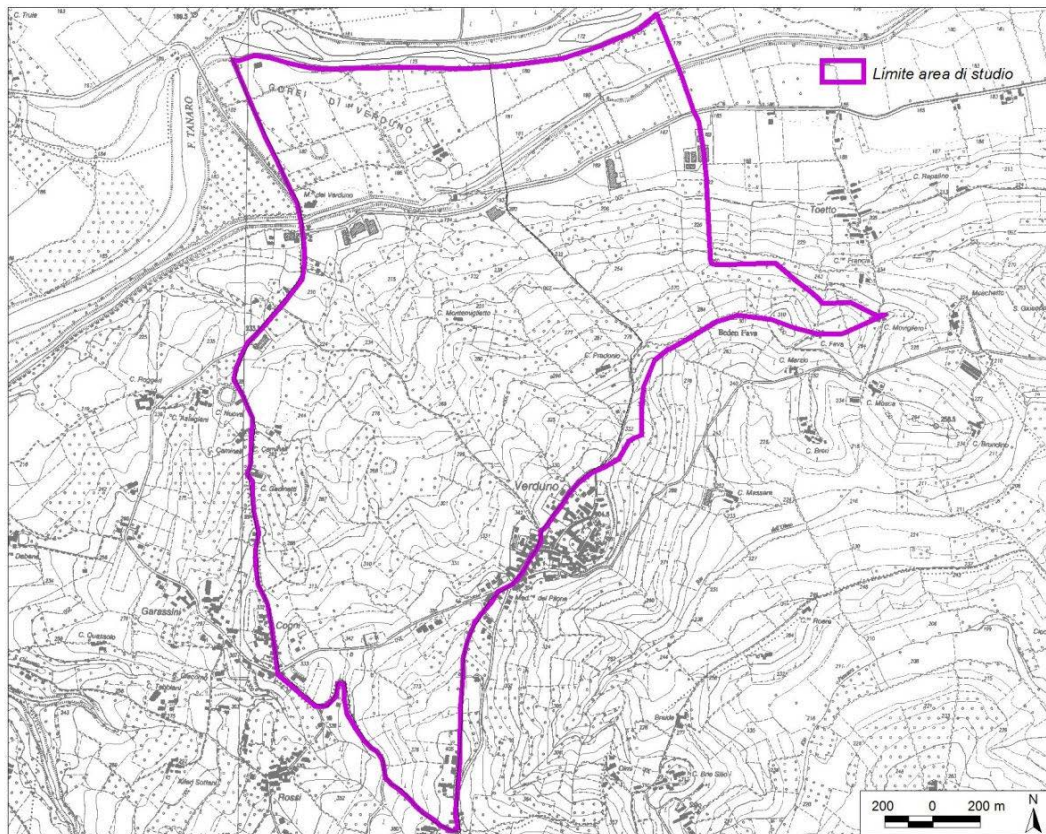


Figura 4.5. Area di studio delle forme carsiche del Comune di Verduno.

5. DOMINIO DEL MODELLO: DESCRIZIONE, INQUADRAMENTO GEOLOGICO STRATIGRAFICO ED INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

5.1 GENERALITÀ

Nel presente capitolo vengono richiamati ed illustrati gli elementi idrogeologici, idrologici ed antropici di base utilizzati per la strutturazione e caratterizzazione del modello numerico tridimensionale implementato.

Come anticipato nella Premessa, il modello numerico è stato implementato con la finalità di valutare le possibili interferenze tra le opere in progetto e il regime idrogeologico dell'area.

Nel presente capitolo vengono illustrati in maggior dettaglio:

- l'inquadramento idrogeologico del dominio di modellazione
- alcuni degli elementi antropici rilevanti per il deflusso dell'acquifero principale.
- dati di riferimento relativi alla piezometria ed all'idrologia.

In Figura 5.1 si riportano, con riferimento ad una recente fotogrammetria, i limiti fisici dell'area oggetto di studio corrispondenti a quelli del modello numerico implementato.

L'estensione areale del dominio di calcolo è tale da comprendere il tracciato autostradale di interesse che corre all'interno della valle del Tanaro, in direzione da ovest/sud-ovest a est/nord-est, mediamente parallelo al fiume, e le zone ad esso circostanti. In particolare, il dominio è stato individuato isolando la porzione della valle che comprende il tratto di autostrada di interesse ed estendendosi sia a monte che a valle in modo da contenere i principali elementi idrogeologici necessari per una corretta descrizione delle modalità di deflusso delle acque sotterranee nell'area.

I limiti di tale area sono stati posti: a valle dell'autostrada in corrispondenza del fiume Tanaro, che costituisce la condizione idrologica caratterizzante dell'intera valle, e a monte dell'autostrada alla sommità della collina di Verduno, che costituisce lo spartiacque idrografico naturale della valle stessa. Tali confini sono poi stati connessi tra loro seguendo le linee di massima pendenza topografica, tagliando trasversalmente la valle.

L'area individuata presenta una superficie di circa 1227 ha, tipicamente con dimensioni longitudinale (parallela all'autostrada) pari a circa 5.2 km e trasversale variabile tra 2 e 3 km.

Inoltre, l'estensione del dominio di modellazione è stata determinata anche dall'effettiva disponibilità di dati utili alla modellazione per le porzioni di territorio al di fuori delle aree oggetto di indagine nell'ambito delle diverse fasi di progetto dell'Autostrada Asti-Cuneo.

In ogni caso, dal punto di vista idrogeologico (cfr. Paragrafi successivi), i confini del dominio di modellazione includono gli elementi determinanti il deflusso delle acque sotterranee, ossia la collina di Verduno ed il corso d'acqua del fiume Tanaro.

Rimangono inclusi, in tale perimetro, elementi locali antropici, anch'essi rilevanti da un punto di vista idrologico, quali le briglie lungo il corso del fiume Tanaro e il canale ENEL di Verduno, derivato dal fiume, con tutte le sue forzanti (centrale Enel). Tali elementi antropici e le loro caratteristiche sono stati inseriti all'interno della modellazione numerica, come illustrato nei Capitoli successivi, dove saranno fornite in merito ulteriori informazioni.



Figura 5.1 – Delimitazione dell'area fisica che costituisce il dominio del modello numerico implementato

5.2 CARATTERISTICHE GEOLOGICHE E STRATIGRAFICHE DELL'AREA

5.2.1. Inquadramento geologico-strutturale

Nel presente paragrafo si riporta un inquadramento generale sintetico degli aspetti geologico-strutturali e idrogeologici per l'area di studio relativa al dominio del modello numerico implementato (cfr. Par. 5.1).

L'area di studio si trova in una zona interessata dalla presenza di terreni mio-pliocenici facenti parte della successione del Bacino di Alba e di depositi alluvionali di fondovalle di età pleistocenico – olocenica.

La cartografia geologica ufficiale disponibile per l'area è piuttosto incompleta non essendo stati realizzati i corrispettivi Fogli geologici della Carta d'Italia a scala 1:50.000 (CARG). Risulta disponibile soltanto la seconda edizione della Carta Geologica d'Italia a scala 1:100.000 del 1970 relativa ai fogli 68, 69 e 80 (Figura 5.2).

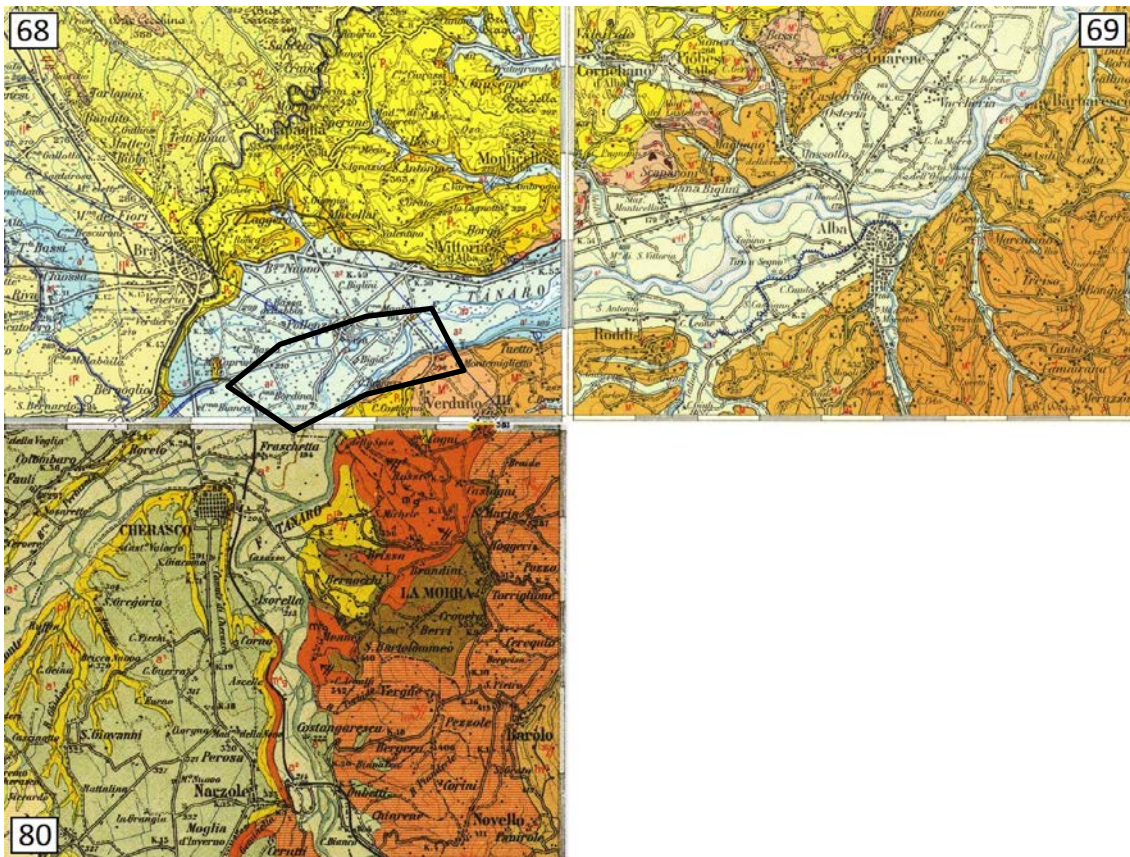


Figura 5.2 – Composizione dei fogli della Carta Geologica d'Italia del 1970, in scala 1:100.000, che coprono l'area di studio (poligono nero)

Da tali elaborati emerge la presenza, lungo i versanti della sponda destra del fiume Tanaro, dei terreni miocenici e pliocenici rappresentati dalle sigle M4, M5 e P1 corrispondenti rispettivamente a:

- M4: Marne argillose cenerognole, con microfaune marine caratteristiche (*Tortoniano*);
- M5: Argille lacustri ("Strati a Congerie"); marne gessifere fogliettate con filliti, Cheloni, Pesci e larve di *Libellula*; banchi a lenti di gesso cristallino, intercalati a vari livelli nelle precedenti (*Messiniano*);
- P1: Argille e marne argillose grigio-azzurrognole con abbondanti fossili marini (*Pleurotome*, *Amussium*) (*Pliocene con facies di "Piacenziano"*)

La Regione Piemonte con ARPA e IGG ha realizzato un database geologico alla scala nominale di 1:250.000 che rappresenta il documento tecnico conoscitivo geologico più recente a disposizione. Si tratta di una banca dati consultabile come servizio web

<https://webgis.arpa.piemonte.it/ags101free/services> (Figura 5.3).

Il database nell'area di interesse individua la presenza delle seguenti unità geologiche:

- SAF: Marne di Sant'Agata Fossili (*Tortoniano*)
- VGSa: Formazione Gessoso Solfifera (*Messiniano*)
- CCS: Conglomerati di Cassano Spinola (*Messiniano sup. – Pliocene inf.*);

- fl2: depositi fluviali terrazzati (Pleistocene – Olocene)
- fl1: depositi fluviali recenti (Olocene).

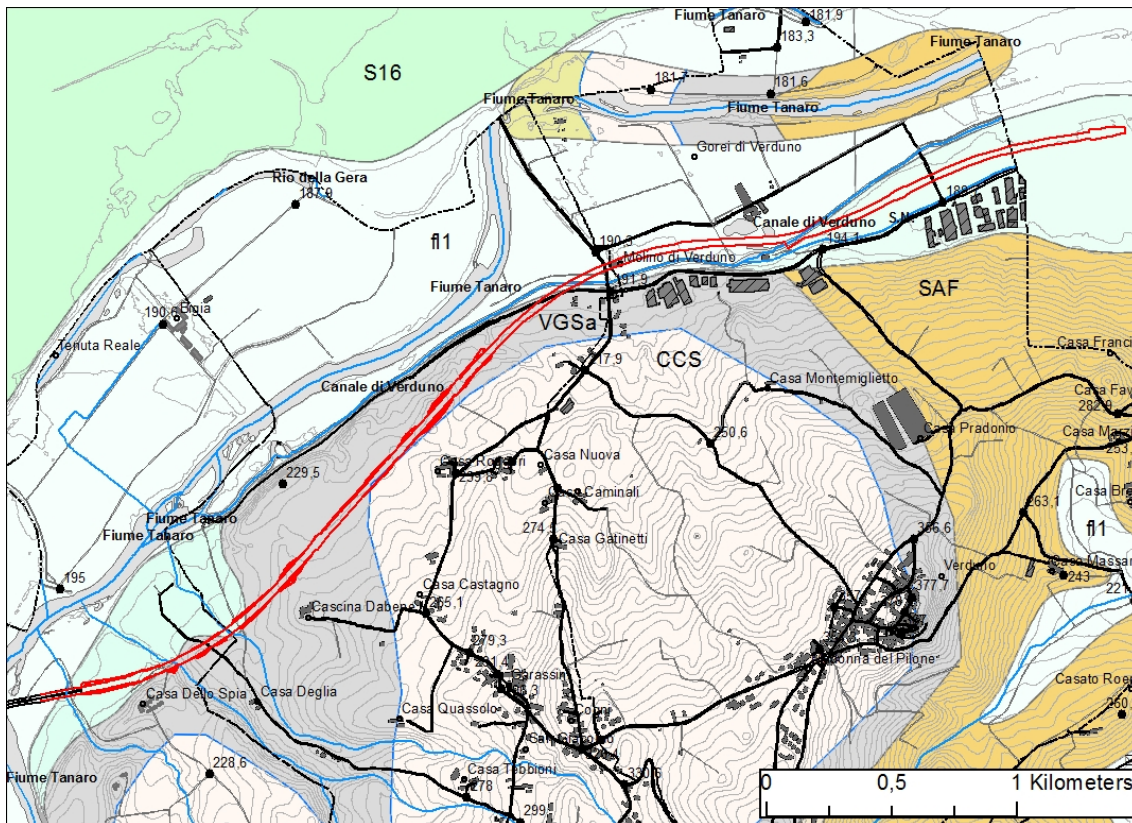


Figura 5.3 – Database geologico della Regione Piemonte/ARPA/IGG. La linea rossa indica il tracciato di progetto

Uno studio di Dela Pierre et al. (2010) riguardante i sedimenti depositi durante la “Crisi di Salinità Messiniana” (MSC) e conservati all’interno del Bacino Terziario Ligure-Piemontese (TPB), descrive in dettaglio 6 sezioni stratigrafiche appartenenti alla sponda meridionale del “Bacino di Alba”, approfondendo gli aspetti riguardanti la stratigrafia ed il contenuto fossilifero dei depositi, e fornendo un contributo essenziale alla conoscenza delle caratteristiche del substrato nell’area di studio.

Dela Pierre et al. (2010) illustrano, come la deposizione dei sedimenti all’interno del Bacino di Alba sia avvenuta in 3 fasi principali:

- la prima fase deposizionale (5.96-5.60 Ma), indicata come “Primary Lower Gypsum” (PLG), vede la deposizione di livelli evaporitici a composizione prevalentemente gessosa nelle porzioni meno profonde ed isolate del bacino, mentre nei bacini distali, più profondi, si ha deposizione di livelli evaporitici a composizione dolomitica alternati a livelli pelitici ricchi di sostanza organica;
- nella seconda fase (erosiva e deposizionale, 5.60-5.53 Ma, fase di acme della MCS) si verifica un ulteriore abbassamento del livello marino con conseguente regressione che porta i le porzioni marginali e meno profonde dei bacini in condizioni di emersione in ambiente subaereo con conseguente sviluppo di importanti fenomeni di erosione. “Resedimented Lower Gypsum” (RLG);
- durante la terza fase (deposizionale, 5.53-5.33 Ma) si ha una nuova ingressione marina che porta in condizione di sommersione ampie porzioni di territori ormai continentalizzati e l’aumento di profondità nelle porzioni distali dei bacini con sedimentazione di nuovi livelli evaporitici alternati a

livelli pelitici (“Upper evaporites”) contenenti fossili di ambienti salmastri. A tale fase segue una progressiva diminuzione di salinità delle acque con l’instaurazione dell’ambiente di “Lago Mare”.

La sezione tipo del bacino deposizionale di Alba descrive la transizione tra le porzioni profonde più profonde del bacino, caratterizzate dalla presenza delle unità risedimentate e caotiche (RLG), e le porzioni di mare basso, dove una superficie di discordanza semplice separa i depositi PLG dalle “Upper evaporites”.

La sequenza deposizionale inizia con i depositi marini della Formazione delle Marne di Sant’Agata Fossili (Tortoniano) cui segue la successione gessifera messiniana rappresentata dalla Formazione Gessoso Solfifera suddivisibile nei 3 livelli principali: il “Primary Lower Gypsum”, il “Resedimented Lower Gypsum” e gli “Upper cycles”. Alla crisi di salinità messiniana, come detto sopra, segue una nuova ingressione marina documentata dalla successione trasgressiva di Lago Mare costituita da depositi transizionali deltizi della Formazione di Cassano Spinola del Messiniano sup.-Pliocene, seguiti da unità francamente marine (Argille Azzurre o Argille di Lugagnano, Pliocene inf.).

I depositi quaternari che ricoprono le formazioni mio-plioceniche sono ubicati quasi esclusivamente lungo i fondovalle e sono costituiti da sedimenti di origine fluviale recenti o in evoluzione, nonché da depositi del paleo Tanaro e i suoi affluenti secondari abbandonati nel corso di successive diversioni.

Lungo i versanti le unità quaternarie sono rappresentate da depositi eluvio-colluviali e depositi di frana per lo più a tessitura limoso sabbiosa o limoso argillosa di età olocenica.

Dal punto di vista geologico-strutturale il Bacino terziario Ligure-Piemontese, come detto, si è formato dalla collisione delle Placche Adria ed Alpina. Il substrato di questo bacino è composto da un complesso di cunei tettonici che, con i loro movimenti relativi hanno portato alla formazione di vari depocentri, bacini di Savigliano, Alessandria e Alba, quest’ultimo dovuto alla formazione di una struttura chiamata “Sinclinale Astigiana”, con direzione assiale prevalentemente SO-NE. La zona più depressa risulta essere in corrispondenza della città di Asti, da cui prende il nome. Nella zona di interesse questa struttura si traduce nell’assetto con blanda inclinazione degli strati verso NO.

Le faglie riportate nella zona di studio non mostrano evidenze dirette se non indizi di natura geomorfologica, e la loro presenza è stata dedotta principalmente dal confronto dei dati stratigrafici di sondaggio, di affioramento e dall’orientazione del reticolo idrografico.

5.2.2. Inquadramento stratigrafico

Da un punto di vista stratigrafico si è fatto riferimento al citato studio del 2010 di Dela Pierre che attraverso la descrizione di 6 sezioni stratigrafiche distribuite tra Arnulfi e Monticello d’Alba, lungo una direzione più o meno assiale alla geometria del bacino (Figura 5.4) fornisce un quadro completo dell’area.

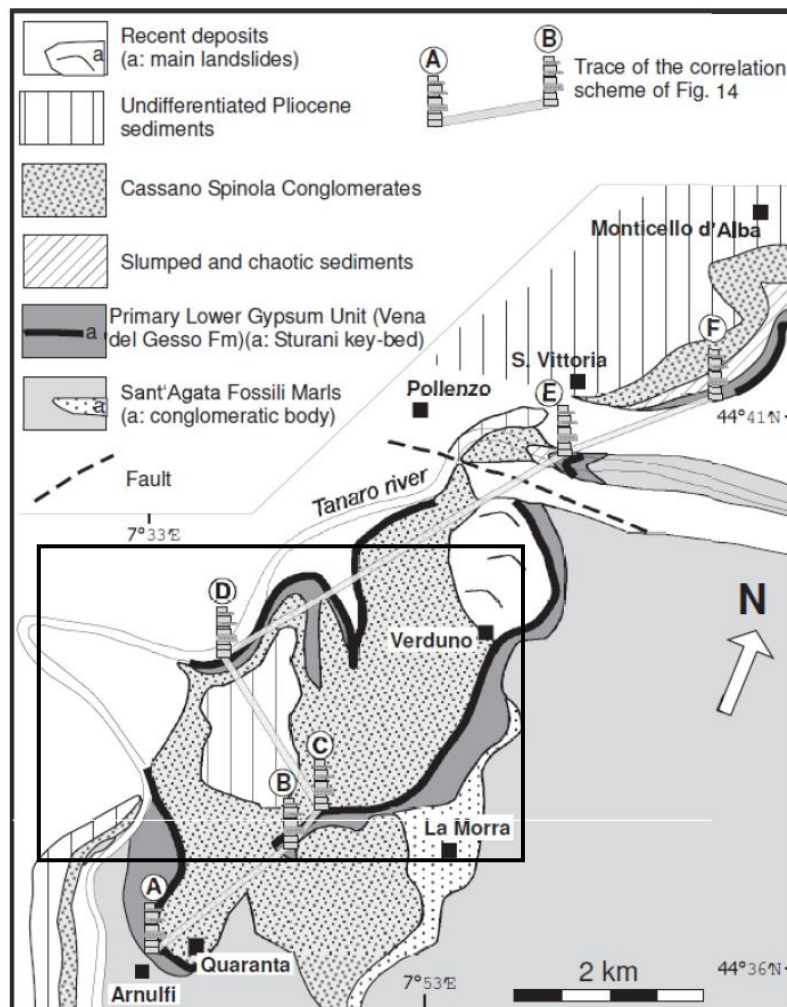


Figura 5.4 – Posizionamento in carta delle "sezioni tipo" analizzate da Dela Pierre et al. (2010); per l'area di interesse del presente progetto il riferimento è la sezione D – Rocca del Campione

La stratigrafia di dettaglio delle sezioni tipo, seguendo l'ordine cronologico di deposizione, inizia con la Formazione delle Marne di Sant'Agata Fossili (Tortoniano) con sequenze di più cicli deposizionali di peliti alternate a marne (5, 6, 7, ...) prima di intercettare il primo livello gessoso. Dopodichè si hanno diversi cicli deposizionali di alternanza peliti-gessi. Al di sopra di queste alternanze, in tutte le sezioni, due livelli di gessi spessi 10 m circa, caratterizzati da una struttura a coni orizzontali immersi in una matrice argillosa e notevole continuità laterale, sono stati recentemente nominati come "Sturani Key Bed" (SKB) e sono considerati importanti livelli guida.

Al di sopra della superficie di discordanza semplice che si ritrova al top di tutte le sezioni studiate si trovano i depositi della Formazione di Cassano Spinola, costituiti da sedimenti terrigeni di origine sia continentale che salmastra, deposti in letti fangosi e canali conglomeratici tipici dei sistemi di delta e delta conoide. Detti depositi presentano, nella parte inferiore della formazione, resti di vertebrati terrestri mentre, nella parte sommitale, sono presenti Molluschi e Ostracodi di acque salmastre tipici della biofacies di Lago Mare. Le successioni descritte e le correlazioni tra queste sono mostrate nella Figura 5.5.

La sezione tipo studiata in dettaglio da Dela Pierre et al. (2010) più prossima e che meglio descrive la stratigrafia dell'area di interesse per il progetto risulta essere la sezione D - Rocca del Campione

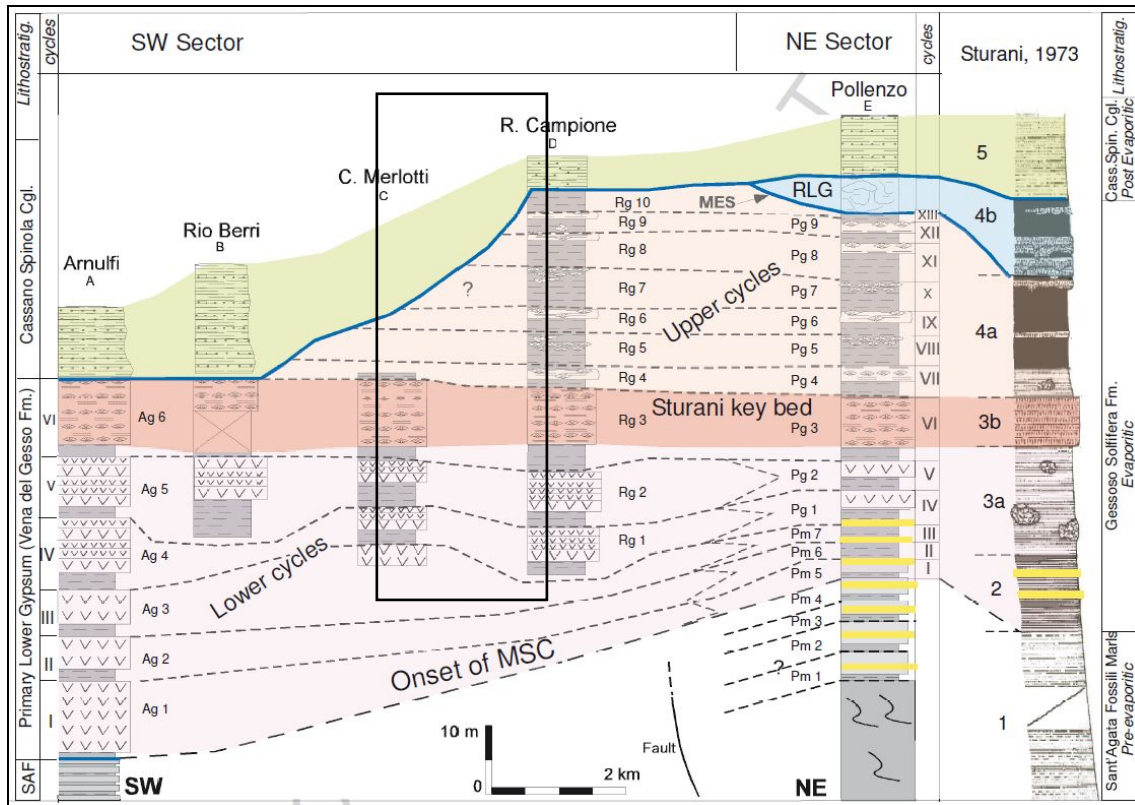
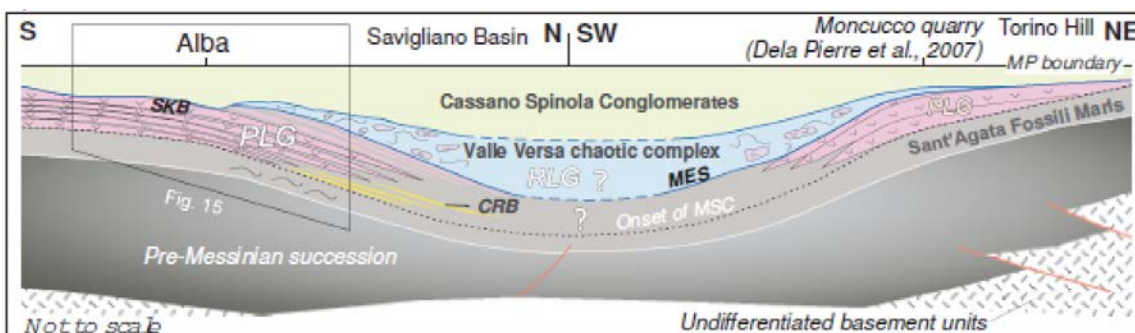


Figura 5.5 – Correlazione tra diverse colonne stratigrafiche tipo (Dela Pierre 2010), la zona di nostro interesse può essere riferita alla stratigrafia di R. Campione.



Questa successione è stata tradotta, nell'ambito dell'area interessata dal modello idrogeologico, nella sequenza di seguito riportata, partendo dai depositi di base più antichi:

- Marne di Sant'Agata Fossili (SAF);
- Formazione Gessoso – Solifera (GES1 e GES2);

- Formazione di Cassano – Spinola (CSC);
- Argille di Lugagnano (AAF);
- Depositi eluvio – colluviali di versante (db, fr);
- Depositi Alluvionali di fondovalle del Tanaro (b, b1).

5.3 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO DELL'AREA

Dalle numerose prove di permeabilità eseguite durante le diverse campagne di sondaggio realizzate, mettendo in relazione i dati relativi alle formazioni geologiche individuate nell'area di studio, è stato possibile raggruppare le formazioni geologiche in una serie di unità idrogeologiche a comportamento uniforme.

- *Complesso 1a*: composto dalla formazione delle Marne di Sant'Agata Fossili, formazione alla base della successione oggetto di studio, ha una permeabilità primaria per porosità, molto bassa ($1 \cdot 10^{-8} < K < 1 \cdot 10^{-11}$) e funge acquiclude basale, è possibile comunque trovare piccole zone, di limitata estensione laterale, a permeabilità maggiore a causa della eterogeneità dei depositi, specialmente nel settore ovest dove la formazione è affiorante.
- *Complesso 1b*: composto dalle formazioni delle Argille Azzurre (o di Lugagnano), dai Conglomerati Di Cassano Spinola e dalla porzione della Formazione Gessoso Solfifera rinominata GES2. Questa unità ha una permeabilità primaria per porosità variabile da bassa a molto bassa ($1 \cdot 10^{-8} < K < 1 \cdot 10^{-10}$). Costituisce un orizzonte semi-impermeabile che limita fortemente sia l'infiltrazione delle acque di superficie sia l'emersione delle acque di circolazione profonda, costituendo pertanto un livello di confinamento l'acquifero sottostante (quello contenuto nella formazione GES1). Localmente sono comunque presenti zone a permeabilità più elevata che permettono limitati scambi idraulici tra i circuiti idrici superficiali e quelli più profondi.
- *Complesso 2*: composto dalla porzione di Formazione Gessoso Solfifera rinominata GES1. Ha una permeabilità primaria per porosità estremamente limitata, ma possiede una permeabilità secondaria, per fratturazione o carsismo, da molto elevata a medio bassa ($1 \cdot 10^{-4} < K < 1 \cdot 10^{-7}$). Dalle indagini geofisiche non sembrano essere presenti fratture di grosse dimensioni (al massimo di ordine centimetrico), ma sembra più probabile una forte alterazione che abbia lasciato residui di granulometria pari a ghiaia o sabbia. Questa unità rappresenta l'acquifero principale che interessa l'intero versante della collina di Verduno.
- *Complesso 3a*: composto da coperture eluvio colluviali, accumuli di frana e terreni sciolti, presenta una permeabilità per porosità estremamente variabile, da elevata a bassa ($1 \cdot 10^{-4} < K < 1 \cdot 10^{-7}$); si caratterizza per la presenza sottostante di un substrato a minore permeabilità (*Complesso 1b*).
- *Complesso 3b*: composto da coperture eluvio colluviali, accumuli di frana e terreni sciolti, presenta una permeabilità per porosità estremamente variabile, da elevata a bassa ($1 \cdot 10^{-4} < K < 1 \cdot 10^{-7}$); si caratterizza per la presenza sottostante di un substrato a maggiore permeabilità (*Complesso 2*).
- *Complesso 4*: composto da depositi alluvionali recenti del fiume Tanaro o dei suoi affluenti, presenta una permeabilità generalmente molto alta, ma che localmente, in aree con lenti argillose può ridursi molto ($1 \cdot 10^{-3} < K < 1 \cdot 10^{-4}$). Questo complesso costituisce un acquifero a falda libera, il cui sistema di circolazione dipende dall'equilibrio idrodinamico che si instaura tra la circolazione della falda acquifera dei gessi (*Complesso 2*) e il regime di deflusso del Fiume Tanaro.

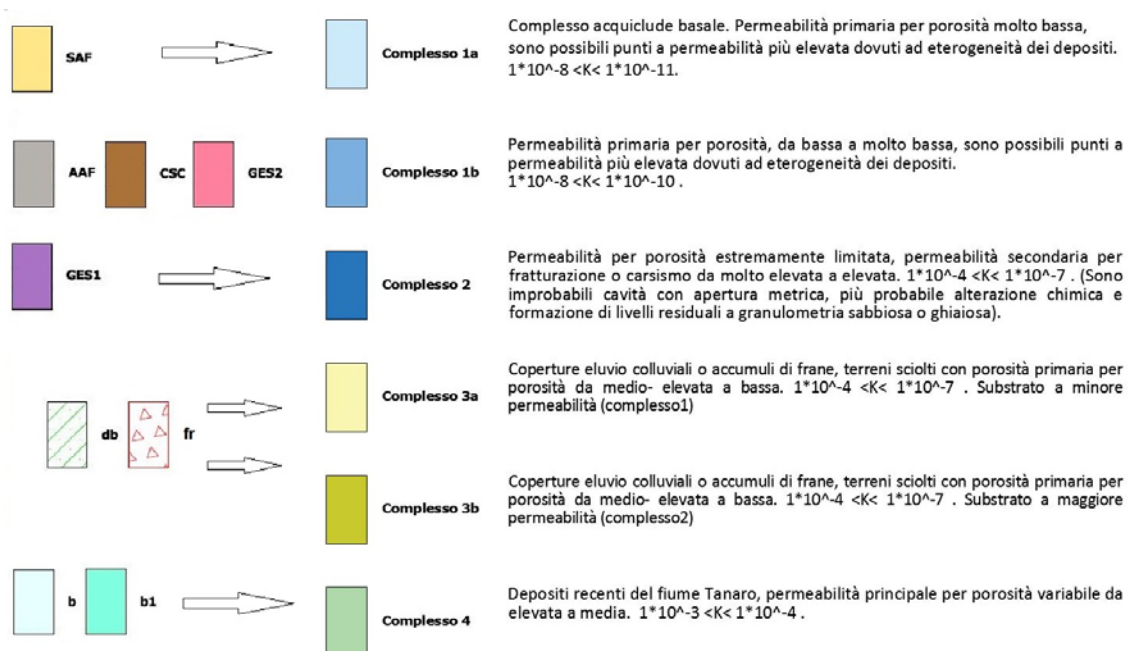
All'interno del *Complesso 1a* delle Marne di Sant'Agata Fossili si ha la presenza anche di orizzonti grossolani, costituiti generalmente da sabbie e sabbie ghiaiose, che hanno una continuità spaziale

discreta e spessore anche di qualche metro. All'interno di tali depositi si trova un acquifero, con falda in pressione, che localmente, laddove la formazione delle marne è affiorante o più superficiale, sono in contatto con altri corpi permeabili affioranti (es. *Complessi 3a e 3b*). Tale complesso non è stato inserito nella modello idrogeologico qui presentata in quanto non interferente con le opere in esame.

Lo schema di classificazione che traduce le unità litostratigrafiche in unità idrogeologiche è mostrato in Figura 5.6.

Il nuovo tracciato interessa sostanzialmente due ambiti idrogeologici ben distinti: l'ambito della collina di Verduno dove l'opera sarà prevalentemente in trincea attraversando terreni a granulometria limoso sabbiosa e limoso argillosa con bassa permeabilità primaria che poggiano su un substrato argilloso ed evaporitico a bassissima a permeabilità primaria ma permeabile per fratturazione e soggetto localmente a fenomeni di carsismo come evidenziato nella carta idrogeologica e dalla distribuzione delle doline. Le indagini geofisiche eseguite portano ad escludere la presenza di cavità e condotti di grandi dimensioni mentre la forte alterazione chimica dei materiali di superficie ha lasciato residui materiale sabbioso che può aumentare sensibilmente, anche se solo localmente, la permeabilità primaria del substrato.

L'altro ambito che interessa l'opera, si trova nei tratti in fondo valle dove sono presenti terreni di origine alluvionale che presentano una granulometria eterogenea che va da ciottolami deposti a formare barre fluviali e depositi di alveo, ad argille deposte per decantazione in tratti di canali abbandonati o nelle aree di alluvionamento. Si tratta di terreni poco compatti che nel complesso manifestano una permeabilità primaria da media ad elevata.



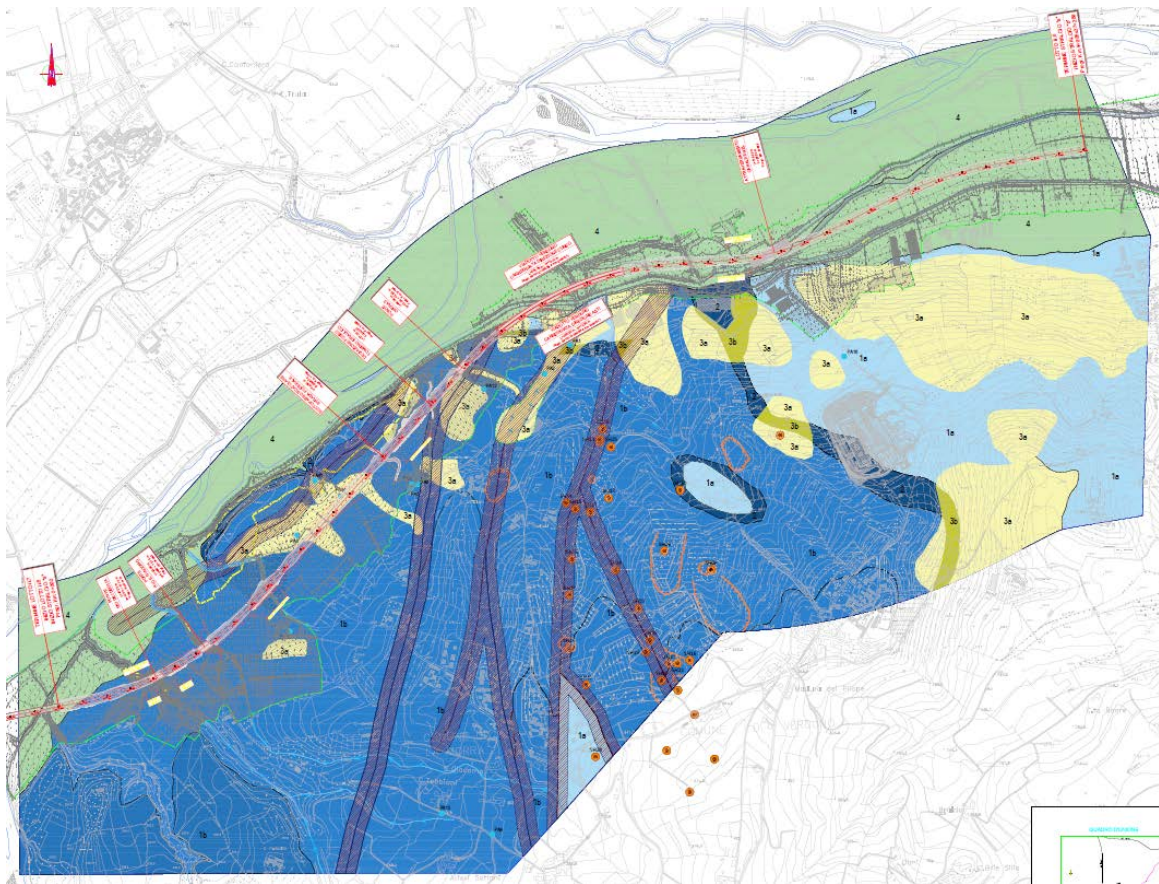


Figura 5.6 – Schema dei rapporti tra formazioni geologiche e unità idrogeologiche a comportamento uniforme e distribuzione planimetrica.

6. DATI PIEZOMETRICI ED IDROLOGICI

6.1 DESCRIZIONE DEI CORPI IDRICI

6.1.1. Corpi idrici profondi (acquiferi)

Come già anticipato al precedente par. 5.3, in base all'inquadramento idrogeologico dell'area, la circolazione idrica sotterranea della zona è localizzata nei seguenti acquiferi:

- Acquifero dei gessi (*Complesso 2*);
- Acquifero delle intercalazioni ghiaioso-sabbiose presenti all'interno delle marne;
- Acquifero dei depositi colluviali e di frana (*Complessi 3a e 3b*);
- Acquifero dei depositi alluvionali del Tanaro (*Complesso 4*).

In relazione ai diversi corpi acquiferi valgono le seguenti considerazioni:

- l'Acquifero dei Gessi GES1 (*Complesso 2*) costituisce l'acquifero principale. Si tratta di un acquifero solo localmente affiorante. La base dell'acquifero è rappresentata dalle marne di Sant'Agata SAF (*Complesso 1a*), mentre il tetto è costituito in parte dalle formazioni delle Argille Azzurre (o di Lugagnano) AAF, in parte dai Conglomerati Di Cassano Spinola CSC e in parte dalla porzione della Formazione Gessoso Solfifera rinominata GES2 (*Complesso 1b*). Come detto i gessi affiorano in superficie in maniera sporadica, in zone con estensione massima da decametrica a ettometrica, mentre in profondità sono estesi con continuità nella porzione centro-occidentale dell'area di interesse.

Malgrado l'elevata variabilità spaziale dello spessore e la permeabilità fortemente eterogenea della formazione GES1 è possibile assumere che tale complesso, laddove presente, rappresenti a grande scala un unico acquifero a comportamento pseudo-poroso. E' tuttavia probabile che a piccola scala vi sia la presenza anche di limitati circuiti carsici che generano sistemi di circolazione solo parzialmente connessi, o persino indipendenti dal sistema di circolazione principale. Tale condizione pare essere testimoniata dai dati di monitoraggio piezometrico che mostrano come alcuni piezometri limitrofi siano soggetti a variazioni di diversa entità nel corso di uno stesso periodo di osservazione.

- L'acquifero localizzato nei depositi grossolani all'interno delle Marne non è affiorante nell'area di studio. Seppure significativo da un punto di vista idrogeologico, tale acquifero non è di interesse per la modellazione in esame.
- I *complessi 3a e 3b* rappresentano degli acquiferi superficiali di estensione relativamente limitata, sebbene connessi a circolazioni sotterranee di carattere permanente; essi sono presenti principalmente nel settore Est e, seppur con minore rilevanza, anche nel settore Ovest del lotto, nonché nell'area di fondovalle. In particolare nella parte orientale dell'area in esame, in prossimità della zona dell'Ospedale di Alba-Bra, verso Alba, si ha la presenza di un acquifero che, oltre ai complessi 3a e 3b coinvolge probabilmente anche parte del substrato marnoso, in linea di principio non acquifero (*Complesso 1a*), ma che in questo settore è maggiormente permeabile per fratturazione. Comunque, le misure piezometriche realizzate nella zona indicano che questo acquifero risulta essere almeno localmente distinto dai corpi acquiferi sottostanti e quindi caratterizzato da sistemi di circolazione superficiali non connessi (oppure lo sono solo in parte) con quelli profondi.

- Il *complesso 4* dei depositi del Tanaro borda in maniera omogenea la base del versante collinare di Verduno e rappresenta un acquifero a falda libera. Il limite inferiore dell'acquifero è rappresentato dalla superficie sommitale delle successioni argilloso marnose del substrato (Formazione Gessoso-Solfifera GES2 e Marne di S. Agata SAF), il cui assetto deriva dagli intensi processi erosivi conseguenti alla diversione del corso del Tanaro. Nel settore di fondovalle la circolazione idrica sotterranea si svolge nell'ambito dei depositi alluvionali recenti e medio-recenti. La falda superficiale, libera, è alimentata dai contributi provenienti dal margine del rilievo, dalle piccole sorgenti al piede della collina e, in misura minore, dalle perdite dei canali. Le caratteristiche della falda freatica sono determinate pertanto dall'equilibrio che si instaura tra il Fiume Tanaro e le acque provenienti dagli acquiferi profondi presenti in corrispondenza del versante collinare.

6.1.2. Corpi idrici superficiali

Relativamente all'idrografia superficiale, il corpo idrico superficiali principale è il Fiume Tanaro, mentre sul settore collinare è presente un reticolo idrico secondario a sviluppo limitato. In particolare questo reticolo secondario è costituito da incisioni sia naturali che artificiali, di lunghezza limitata e talvolta non in continuità con il fondovalle.

Nella porzione ovest/sud-ovest della zona si ha la presenza di due corsi d'acqua (Rio Deglia e San Michele) di una certa lunghezza e con deflussi a carattere semi-permanente, di modesta entità. Altri rii (es. San Giacomo) hanno invece solo brevi periodi di attività durante l'anno.

Nella porzione est/nord-est non si hanno invece corsi d'acqua di una qualche rilevanza ma solo incisioni e fossi, spesso realizzati dall'uomo a servizio delle attività di coltivazione presenti sulla collina. In questa zona (vedasi a tal proposito lo Studio sulle doline fatto eseguire dal comune di Verduno, cfr par. 4.3) sono presenti numerose forme epicarsiche, specialmente degli inghiottitoi, che determinano le condizioni per un'infiltrazione rapida da parte delle acque di scorrimento superficiale.

In generale, lo scorrimento idrico superficiale, sia incanalato in alveo che libero lungo i versanti, assume un'importanza rilevante solo in occasione di precipitazioni intense e prolungate.

6.2 DATI PROVENIENTI DAL MONITORAGGIO PIEZOMETRICO

Nel corso delle varie fasi progettuali sono state condotte le seguenti campagne di misura della piezometria della falda acquifera:

- Campagna 2001-2002;
- Campagna Marzo 2009;
- Campagna di Monitoraggio Ambientale (2011-2013);
- Campagna Studio di Fattibilità 2018.

Dal confronto dei valori misurati è possibile osservare che i vari piezometri mostrano comportamenti diversi tra loro. Questo dipende dal fatto che i vari piezometri hanno caratteristiche spesso molto differenti tra loro per profondità di installazione, per diversa lunghezza dei tratti filtranti, e perché sono rappresentativi di zone diverse del versante per stratigrafia e morfologia. Queste diverse caratteristiche fanno sì che non sia possibile, e non risulti soprattutto rappresentativa, una sintesi univoca dei dati. Per questo motivo i dati sono stati analizzati separatamente, effettuando delle selezioni rappresentative delle diverse condizioni stratigrafiche e di acquifero monitorato.

In particolare, tenendo conto che per i piezometri delle campagne del 2001-2002 e del 2009 non si avevano a disposizione letture lungo un arco temporale ma solo le letture iniziali di installazione, sono

stati analizzati separatamente i dati relativi ai piezometri del Monitoraggio Ambientale 2011-2012, distinguendo tra quelli fenestrati nelle marne e quelli fenestrati nei gessi, e quelli relativi alla campagna 2018 che si riferiscono in tutti i casi ai gessi.

Nelle successive figure è riportato l'andamento delle letture piezometriche nei punti di misura installati nell'ambito del monitoraggio ambientale della campagna di indagini integrative 2011-2012. In particolare nella Figura 6.1 sono mostrate le misure relative ai piezometri fenestrati nei gessi, mentre nella Figura 6.2 sono mostrate le misure relative ai piezometri fenestrati nelle marne. Le misure sono comprese tra ottobre 2011 e marzo 2013 per i gessi e tra marzo 2012 e marzo 2013 per le marne.

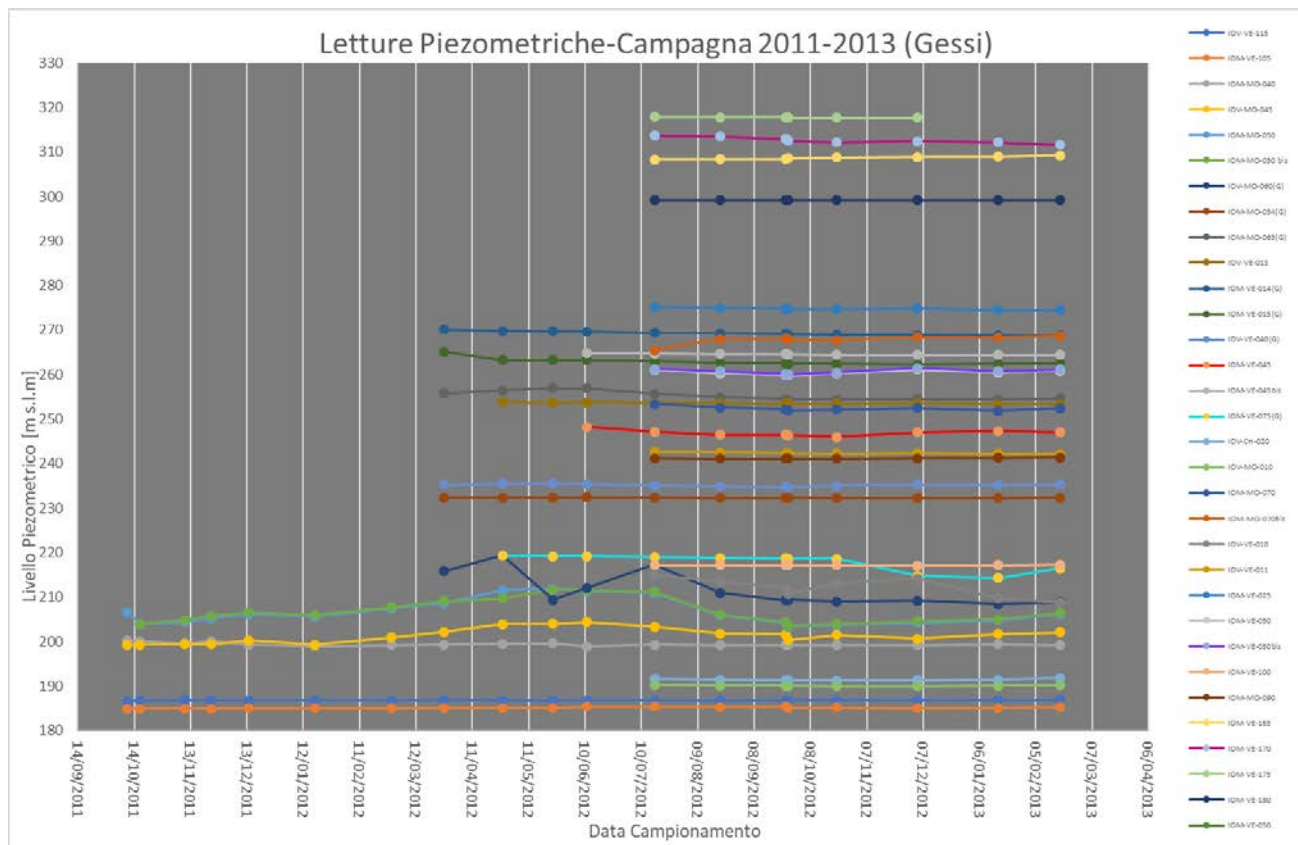


Figura 6.1 – Andamento delle letture nei piezometri fenestrati nei gessi della campagna 2011 - 2013

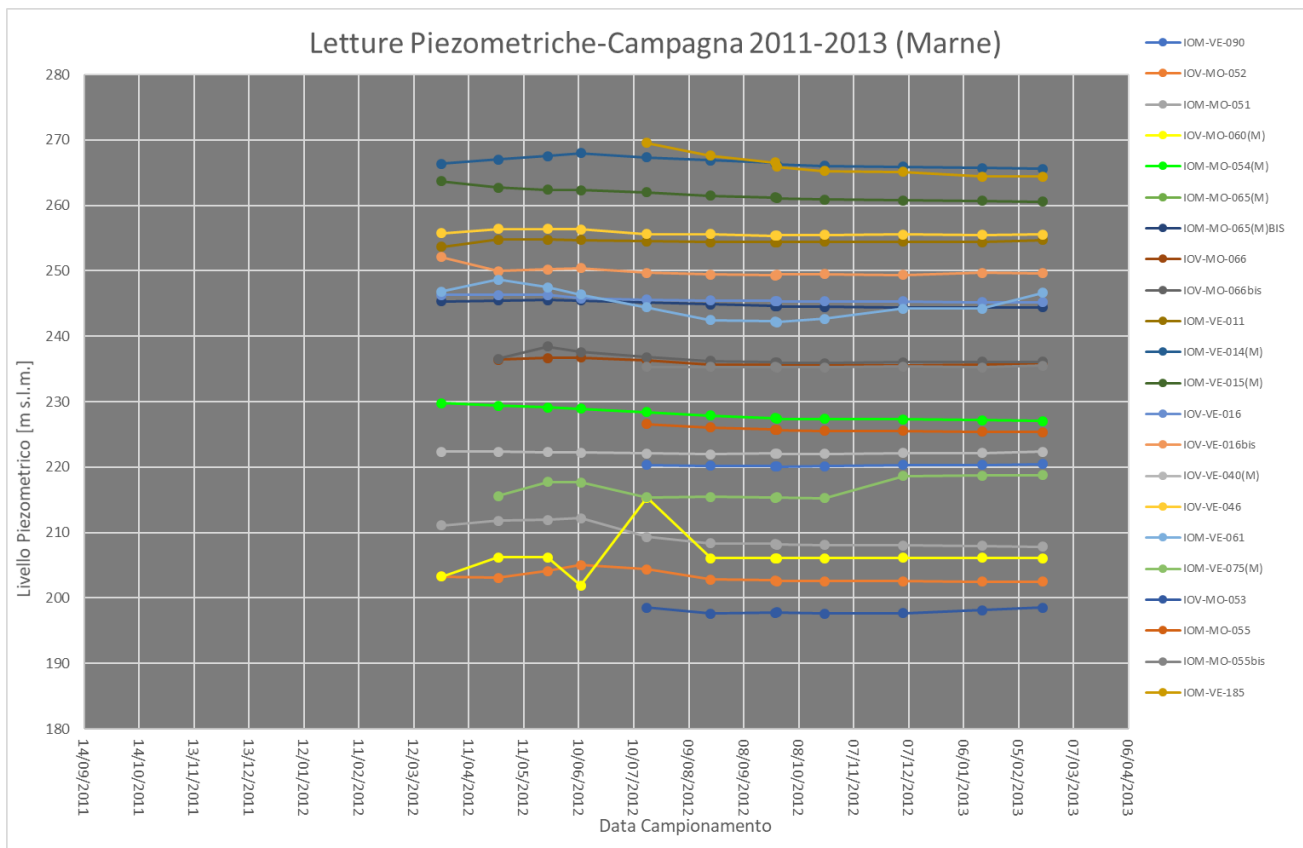


Figura 6.2 – Andamento delle letture nei piezometri fenestrati nelle marne della campagna 2011 - 2013

Dall'analisi di queste letture si possono fare le seguenti osservazioni:

- Le letture mostrano una tendenza dei livelli piezometrici globalmente congruente e compatibile con delle variazioni stagionali in cui si ha una generalmente una riduzione dei livelli nel periodo autunnale – invernale, seguita da un aumento dei valori in corrispondenza del periodo primaverile - estivo;
- le variazioni osservate nei piezometri, sia in quelli che misurano il livello della falda nei gessi sia in quelli nelle marne, sono mediamente al di sotto dei 2 m, ma vi sono localmente dei punti, in entrambi gli acquiferi, che hanno oscillazione dell'ordine dei 5-6 m fino a punte localizzate di 12 m. Si tratta di piezometri fenestrati in entrambi i materiali e spesso in punti in cui si ha una coppia di piezometri relativi uno ai gessi (G) e uno alle marne (M). Questo comportamento sembra indicare che, almeno localmente, i due acquiferi risentono delle variazioni dovute alla piovosità, probabilmente i gessi a causa del carsismo e le marne per fratturazione. Dall'analisi delle misure complessive realizzate per il Monitoraggio Ambientale si può concludere che le oscillazioni maggiori di livello avvengono nel settore Lato Cuneo, mentre nel resto dell'area le oscillazioni sono di minore entità.

Essendo la finalità del modello numerico quella di rappresentare il deflusso delle acque sotterranee nell'acquifero principale, ossia quello ospitato all'interno dal complesso 2 dei Gessi (GES1) non sono stati presi in considerazione i dati relativi a piezometri intercettanti altre formazioni (in particolare quelli all'interno delle marne SAF).

Nella Tabella 6.1 si riportano, per ciascun piezometro, l'elevazione e le misure di soggiacenza misurate da bocca pozzo e il livello piezometrico in m s.l.m.

Tabella 6.1: Dati piezometrici utilizzati per ricostruire la falda di riferimento

Piezometro	Q_{PC} [m s.l.m.]	Soggiacenza da b.p. [m]	Livello piezometrico [m s.l.m.]
IOM-CH-010	220.973	4.84	215.2
IOM-MO-050	218.348	6.48	206.6
IOM-MO-050bis	218.282	6.53	206.7
IOM-MO-054(G)	268.336	34.9	232.4
IOM-MO-055	262.11	35.5	225.8
IOM-MO-065(G)	283.648	26.7	255.3
IOM-MO-070	287.146	33.7	252.5
IOM-MO-090	269.262	27.96	241.2
IOM-VE-014(G)	297.579	27.47	269.3
IOM-VE-015(G)	288.037	22.95	263.0
IOM-VE-045bis	282.108	17.3	264.6
IOM-VE-050	266.063	4.68	260.5
IOM-VE-060	247.552	20.7	226.0
IOM-VE-061	254.959	6.3	244.9
IOM-VE-075(G)	231.495	12.27	218.0
IOM-VE-100	224.28	7.1	217.2
IOM-VE-105	211.886	26.5	185.2
IOM-VE-170	349.621	35.9	312.7
IOM-VE-175	353.405	35.3	317.9
IOM-VE-180	359.2	34	325.2
IOV-MO-060(G)	251.877	32.5	211.7
IOV-VE-010	224.408	9.44	212.2
IOV-VE-011	274.458	31.86	242.4
IOV-VE-013	276.137	22.3	253.6
IOV-VE-040(G)	245.033	9.5	235.2
B02 INCL	213.45	10	203.4
B04	207.6	10	197.0
B06	216.64	11.6	205.1
B12	230.92	13.8	215.9
B13 INCL	234.599	5.25	225.3

Piezometro	Q_{PC} [m s.l.m.]	Soggiacenza da b.p. [m]	Livello piezometrico [m s.l.m.]
B09 PZ	212.861	7.74	204.6
B10	221.92	9.9	210.9
B16	210.88	10.8	196.5
B19 PZ	208.9	5.3	200.5
B20 PZ	205.36	8.9	192.3
B23	189.17	2.25	185.7
B24	185.25	0	183.6
B26	187.31	1.25	185.6
B27_PZ	181.1	1.1	179.2
B28	187.9	4.9	182.9

Sulla base dei dati di soggiacenza misurati in campo per i piezometri fenestrati all'interno dell'acquifero principale è stato ricostruito l'andamento piezometrico della falda nell'area in esame. In Figura 6.4 è riportata la piezometria in questione elaborata mediante il software Surfer di Golden Software.

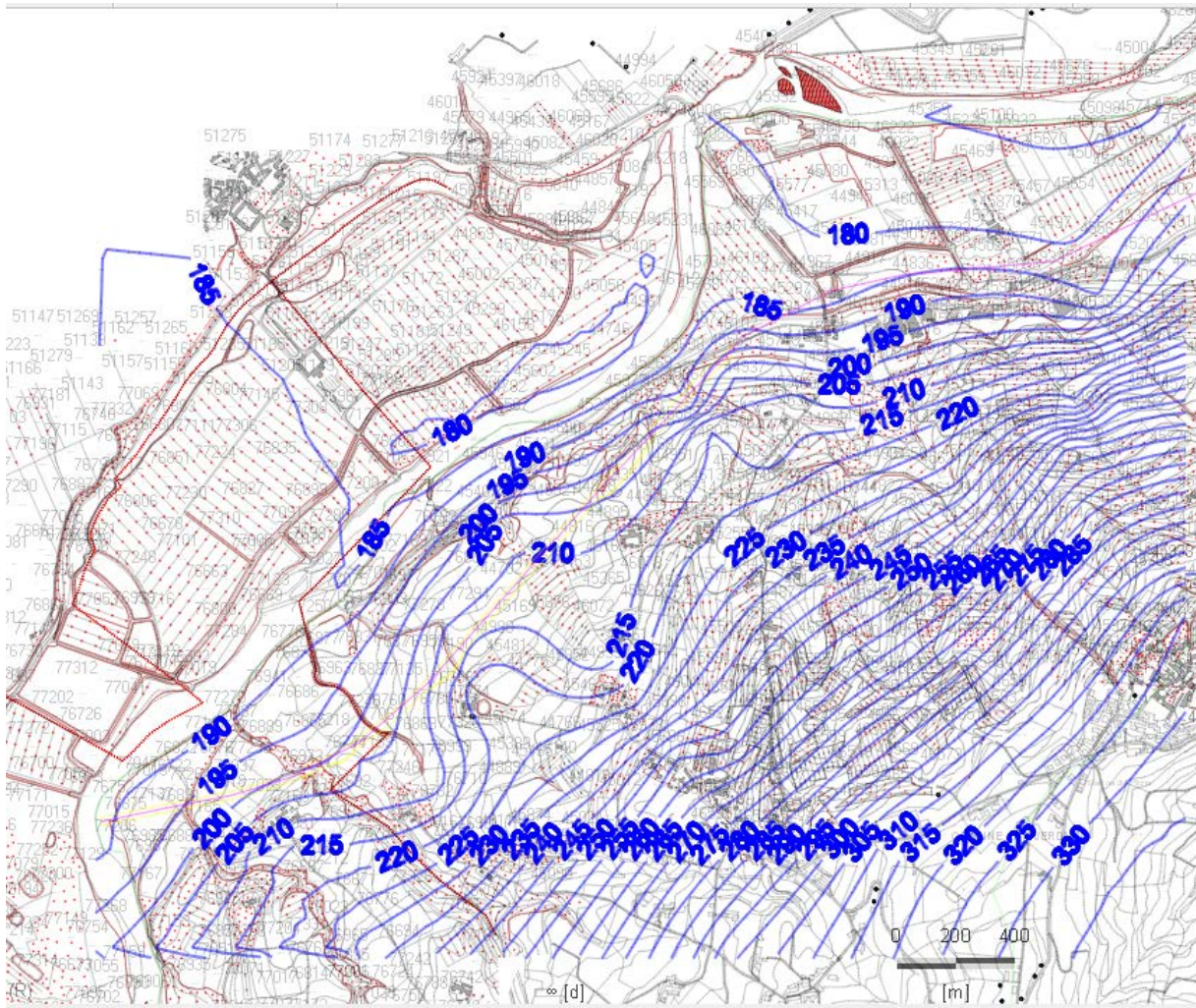


Figura 6.4 - Piezometria relativa all'acquifero principale (piezometri fenestrati all'interno dei gessi e formazioni superficiali).

Dall'interpretazione dei dati piezometrici emergono le seguenti considerazioni:

- la ricostruzione mostra come nel complesso la falda sembri essere caratterizzata da una continuità spaziale che è tipica degli acquiferi porosi. Non risultano infatti particolari eterogeneità spaziali possano far supporre che l'acquifero sia frammentato in diversi sistemi di circolazione tra loro idraulicamente indipendenti (quali per esempio, condotti carsici separati). Al contrario, la ricostruzione piezometrica mostra una falda la cui morfologia ricalca sostanzialmente la topografia del versante e che può essere pertanto attribuita ad un unico sistema acquifero interconnesso.
- la presenza di acquiferi locali sospesi, parzialmente o completamente indipendenti, è sicuramente possibile a scala locale ma non ricostruibile a livello della modellazione idrogeologica qui presentata. Una possibile evidenza di questo tipo di acquiferi si ha in corrispondenza di alcuni piezometri (si vedano ad esempio i punti SFG-33, SFG-35, SFG-25 e SFG-19 non inseriti nella ricostruzione della piezometria di riferimento) in cui le misure eseguite in fori di sondaggio attigui, con fenestrature posizionate a profondità confrontabili, mostrano valori sensibilmente diversi. Tuttavia tali letture sono relative alle campagne geognostiche più vecchie e di cui non si dispone di uno storico, pertanto potrebbero non essere rappresentative di una condizione di alto piezometrico come quello che si è scelto come riferimento. Risulta quindi

difficile una loro interpretazione e pertanto non sono stati considerati nella ricostruzione della falda di riferimento.

- le modeste variazioni di gradiente idraulico osservabili lungo il versante si ritiene siano attribuibili a variazioni di trasmissività dell'acquifero. Tali variazioni sono riconducibili sia ad un aumento o riduzione dello spessore dell'acquifero dei gessi sia alle eterogeneità spaziali delle permeabilità all'interno della formazione;
- in condizioni piezometriche "medie" il *Complesso 2* risulta essere un acquifero generalmente a falda libera che sono localmente risulta confinato dal sovrastante *Complesso 1b* (GES2, CSC) con la cui base localmente il livello d'acqua viene a contatto. Questa situazione corrisponde ad uno stato medio della falda, da riferire a periodi in cui sono assenti fenomeni piovosi di particolare intensità. In concomitanza di fenomeni meteorici intensi il regime idrodinamico può mutare e in alcuni settori, specialmente quelli della parte bassa del versante, a causa di bruschi incrementi del livello d'acqua, la falda va in pressione in risposta al brusco incremento del tasso di alimentazione delle acque meteoriche percolanti direttamente nell'acquifero attraverso cavità carsiche superficiali.
- per quanto riguarda la zona di fondovalle del Tanaro, la piezometria ricostruita è stata confrontata con quella fornita dall'Arpa Piemonte sul proprio sito, che mostra altezze piezometriche assolutamente sovrapponibili.

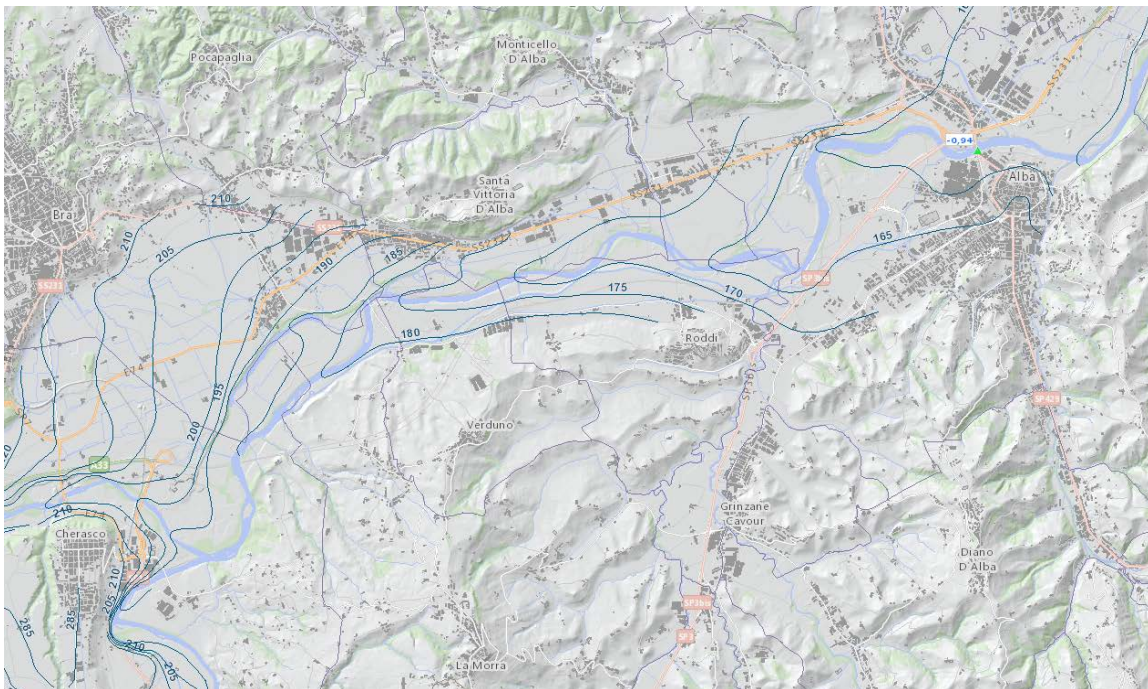


Figura 6.5 – Ricostruzione della piezometria nella zona della valle del Tanaro (da ARPA Piemonte www.arpa.piemonte.it).

6.4 DATI IDROMETRICI

Per quanto riguarda il rilievo altimetrico della quota del pelo libero del fiume Tanaro si è fatto riferimento ai seguenti dati:

- I dati idrometrici della stazione di monitoraggio di Alba, la più vicina alla zona di interesse. I dati sono resi disponibili in tempo reale sul sito dell'ARPA Piemonte. In particolare sono stati analizzati i dati storici delle letture in modo da definire un valore medio di riferimento da adottare per il Fiume Tanaro in corrispondenza di Alba. Si sottolinea che la stazione di Alba è posizionata lungo il corso del fiume, più a valle rispetto alla zona di interesse e pertanto è stata utilizzata solo come dato di confronto e per valutare le oscillazioni nei livelli del fiume.

ANAGRAFICA STAZIONE : ALBA TANARO


Denominazione	ALBA TANARO
Località	PONTE S.S. 29
Comune	ALBA
Provincia	PROVINCIA DI CUNEO
Regione	PIEMONTE
Quota sito (m s.l.m.)	172.00
UTM X - WGS84 (m)	422964
UTM Y - WGS84 (m)	4950665
Lat. - WGS84 (G.sess)	444219
Long. - WGS84 (G.sess)	080139
Data attivazione	2001-01-01
Sensori presenti *	HIPRTV *
Bacino idrografico	TANARO
Zero idrometrico	157.21

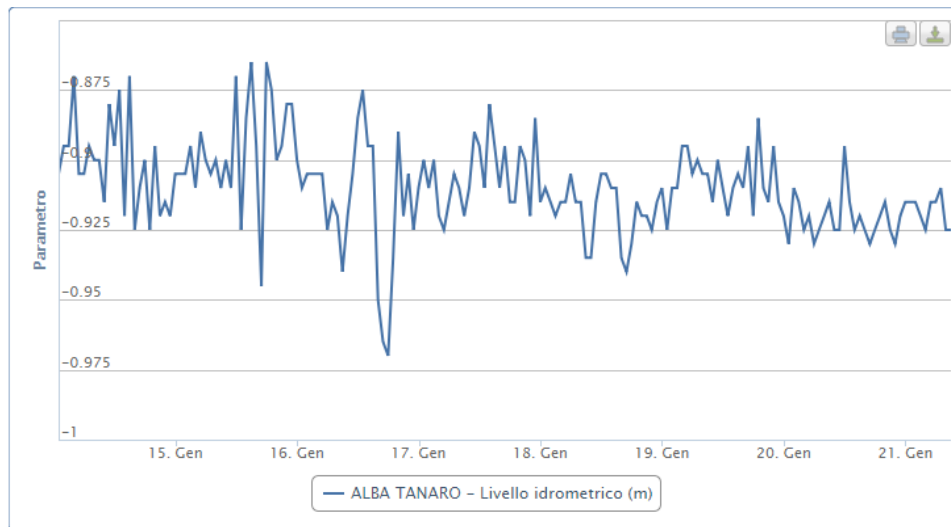

 Figura 6.6 – Dati della stazione Idrometrica Alba Tanaro (da ARPA Piemonte www.arpa.piemonte.it).

 Tabella 6.2 – Annali del livello idrometrico del Tanaro dal 1994 al 2010 (da banca dati idrologia di ARPA Piemonte www.arpa.piemonte.it).

Tanaro ad Alba								
Anno	Q_{colmo} [m ³ /s]	Q_{giorn} [m ³ /s]	Anno	Q_{colmo} [m ³ /s]	Q_{giorn} [m ³ /s]	Anno	Q_{colmo} [m ³ /s]	Q_{giorn} [m ³ /s]
1921	-	-	1951	-	-	1981	-	-
2	-	-	2	-	-	2	-	-
3	-	-	3	-	-	3	-	-
4	-	-	4	-	-	4	-	-
1925	-	-	1955	-	-	1985	-	-
6	-	-	6	-	-	6	-	-
7	-	-	7	-	-	7	-	-
8	-	-	8	-	-	8	-	-
9	-	-	9	-	-	9	-	-
1930	-	-	1960	-	-	1990	-	-
1	-	-	1	-	-	1	-	-
2	-	-	2	-	-	2	-	-
3	-	-	3	-	-	3	-	-
4	-	-	4	-	-	4	4200	-
1935	-	-	1965	-	-	1995	-	-
6	-	-	6	-	-	6	1840	1327.78
7	-	-	7	-	-	7	780	392.01
8	-	-	8	-	-	8	460	339.7
9	-	-	9	-	-	9	1320	774.4
1940	-	-	1970	-	-	2000	1620	1145.1
1	-	-	1	-	-	1	360	289.0
2	-	-	2	-	-	2	1730	915.6
3	-	-	3	-	-	3	780	692.0
4	-	-	4	-	-	4	740	523.1
1945	-	-	1975	-	-	2005	540	446.9
6	-	-	6	-	-	6	480	400.4
7	-	-	7	-	-	7	770	504.5
8	-	-	8	-	-	8	690	625.5
9	-	-	9	-	-	9	1820	1076.0
1950	-	-	1980	-	-	2010	970	864.5

Note:

- Il rilievo topografico della zona (effettuato a partire da una prima stesura del 1998 e poi successivamente aggiornato negli anni 2007 e 2009, fino ad arrivare alla versione finale del 2018)

reso disponibile per la redazione del progetto nel quale sono stati rilevate anche le quote del pelo libero del fiume Tanaro e del canale ENEL di Verduno.

Dalla sintesi di questi dati e confrontandosi con la piezometria della Valle del Tanaro fornita sempre dal sito dell'ARPA Piemonte (si veda la Figura 6.5), si sono definiti i livelli idrometrici di riferimento del fiume che nel tratto di nostro interesse variano da +189.4 m slm a +173.1 m slm.

6.5 PRECIPITAZIONI ED INFILTRAZIONE EFFICACE

Le informazioni in merito alle precipitazioni e, in particolare, all'infiltrazione efficace delle acque meteoriche, provengono dal Piano di Tutela delle Acque (PTA) redatto dalla Regione Piemonte nel 2018 per i corpi idrici superficiali e sotterranei ricadenti nel territorio regionale (cfr. Doc. [14]).

In Figura 6.7 sono riportati i bacini idrologici oggetto dell'analisi di bilancio idrologico condotta nel PTA. I dati di base per l'analisi idrologica condotta nel PTA sono costituiti dalle serie storiche dei valori medi mensili di precipitazione e temperatura registrati tramite la rete del Servizio Idrografico in diverse stazioni distribuite sul territorio regionale per gli anni dal 1961 al 1990 e dal 1981 al 2010.

Bacino	Area [Km ²]	PMA 1961-1990 [mm]	PMA 1981-2010 [mm]
ALTO PO	717	916	949
PELLICE	975	913	1017
VARAITA	601	820	836
MAIRA	1214	854	846
RESIDUO PO CONFLUENZA DORA RIPARIA	1778	772	800
DORA RIPARIA	1337	812	852
STURA DI LANZO	886	1040	1193
ORCO	913	1024	1200
RESIDUO PO CONFLUENZA DORA BALTEA	781	869	936
DORA BALTEA	3939	813	1002
CERVO	1019	1225	1230
SESIA	1132	1283	1574
RESIDUO PO CONFLUENZA TANARO	2021	783	740
STURA DI DEMONTE	1472	1011	1023
TANARO	1812	1002	976
BORMIDA	1733	807	855
ORBA	776	915	1179
ASTA TANARO	2403	715	663
SCRIVIA - CURONE	1364	945	961
AGOGNA - TERDOPPIO	1598	979	913
TOCE	1784	1244	1552

Tabella 6.3 – Piogge medie annue confronto tra serie 1961-1990 e 1981-2010.

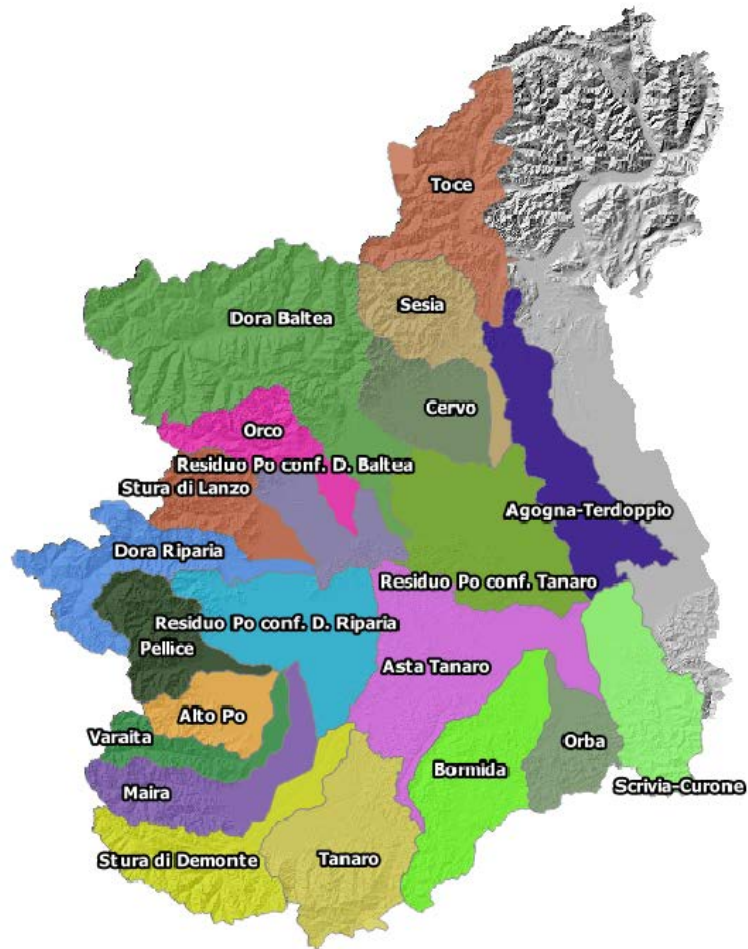


Figura 6.7–Bacini idrologici individuati dal Piano di Tutela delle Acque della regione Piemonte

Stazione Idrometrica / Bacino	Storico			Anni di riferimento
	Afflusso medio annuo [mm]	Deflusso medio annuo [mm]	Coefficiente di deflusso medio	
PELLICE A VILLAFRANCA	1022	427	0,41	15
CHISONE A SAN MARTINO	953	734	0,77	14
SANGONE A TRANA	1163	659	0,59	15
DORA RIPARIA A SUSÀ	793	540	0,68	11
DORA RIPARIA A TORINO	841	556	0,67	15
STURA DI LANZO A LANZO	1225	1017	0,84	15
STURA DI LANZO A TORINO	1226	836	0,67	15
MALONE A FRONT	1384	779	0,58	16
SOANA A PONT	1261	1031	0,81	14
ORCO A SAN BENIGNO	1229	757	0,59	14
CHIUSELLA A PARELLA	1516	1129	0,74	15
CERVO A QUINTO VERCELLESE	1189	899	0,77	13
SESIA A BORGOSIESA	1667	1443	0,87	11
SESIA A PALESTRO	1285	1051	0,76	21
AGOGNA A MOMO	1407	578	0,37	14
TOCE A CANDOGLIA	1500	1387	0,91	17
VARAITA A POLONGHERA	875	335	0,36	13
MAIRA A RACCONIGI	873	349	0,39	15
BANNA A SANTENA	746	160	0,20	16
STURA DI DEMONTE A GAIOLA	1063	976	0,90	14
PESIO A CARRU'	1118	805	0,75	14
BELBO A CASTELNUOVO	715	231	0,31	14
BORMIDA DI MILLESIMO A CAMERANA	1012	340	0,35	22
BORMIDA DI SPIGNO A MOMBALDONE	977	709	0,71	22
BORMIDA A CASSINE	903	453	0,50	22
ORBA A BASALUZZO	1261	736	0,57	15
TANARO A FARIGLIANO	1026	792	0,77	14
TANARO AD ALBA	1008	653	0,64	22
TANARO A MONTECASTELLO	922	504	0,52	22
SCRIVIA A SERRAVALLE	1286	598	0,46	15
SCRIVIA A GUAZZORA	1045	474	0,45	16
PO A VILLAFRANCA PIEMONTE	1111	797	0,80	7
PO A TORINO MURAZZI	953	503	0,53	22
PO A SAN SEBASTIANO	1017	524	0,50	10
PO A CASALE MONFERRATO	997	476	0,48	7
PO A VALENZA	984	580	0,59	12
PO A ISOLA SANTANTONIO	963	547	0,56	19

Tabella 6.4 – Afflussi e deflussi medi annui per i diversi bacini (da PTA).

Alla luce dei valori riportati nel Piano di Tutela delle Acque per il valore medio annuo di afflusso per il bacino del Tanaro che corrisponde a 1008 mm/anno e il valore medio annuo di deflusso per il medesimo bacino che corrisponde a 653 mm/anno si ottiene un disavanzo di 355 mm/anno. In base all'equazione di continuità dei volumi entranti, uscenti ed invasati nel bacino superficiale in un intervallo di tempo Δt prefissato di seguito riportata:

$$P - ETR = I + R + \Delta V$$

dove:

- P = volume di acqua di precipitazione affluita al bacino
- ETR = volume di acqua sottratta al bacino per evapotraspirazione
- R = volume di acqua di origine meteorica che contribuisce al deflusso superficiale (o ruscellamento)
- I = volume di acqua che si infiltra nel sottosuolo
- ΔV = variazione del volume degli invasi nel bacino imbrifero.

Si ha che la differenza tra afflussi e deflussi riportati nel PTA pari a 355 mm/anno corrisponde alla somma del volume di acqua che si infiltra e di quello che evapotraspira.

Per il bacino del fiume Tanaro è stato pertanto ipotizzato un valore di infiltrazione efficace pari a circa 300 mm/anno. Tale valore, ritenuto ragionevole e corrispondente a circa il 30% del valore medio annuo di precipitazione. In questa prima serie di analisi, la cui finalità è quella di valutare l'impatto sui livelli piezometrici dato dall'introduzione delle opere di sostegno delle trincee, tale valore medio annuo non è tuttavia stato inserito all'interno del modello di flusso implementato e si è proceduto ad una ricostruzione della piezometria in condizioni indisturbate che tiene già implicitamente conto anche delle precipitazioni medie annue.

6.6 CENSIMENTO DEI PUNTI D'ACQUA

I dati idrogeologici di base che hanno permesso la definizione del modello concettuale dell'area del tracciato derivano anche dall'analisi dei punti d'acqua (sorgenti, pozzi) censiti nei comuni di Cherasco, Verduno e La Morra, dei sondaggi realizzati attraverso le diverse campagne di indagine geognostiche e dalle indagini geofisiche che sono state eseguite nell'ambito del diverse fasi progettuali di questo tratto dell'autostrada AT-CN.

Si segnala che nella fase attuale di progettazione si è provveduto non solo ad eseguire una estensiva campagna di indagini geognostiche e geofisiche volte ad indagare la zona del tracciato che è variata rispetto alle precedenti fasi di progetto, ma anche ad effettuare un censimento delle sorgenti presenti in zona e a verificare la funzionalità della strumentazione piezometrica ed inclinometrica storica per poterne usufruire anche nella fase di progetto attuale.

Come riportato nel documento ad esso dedicato (Doc. Rif. [1]), i risultati del censimento dei punti d'acqua (sorgenti e pozzi d'acqua) è riportato nella successiva Tabella 6.5, mentre la loro ubicazione è mostrata in Figura 6.8.

Tenendo conto che nel periodo di svolgimento della campagna 2018 il fenomeno dell'evapotraspirazione risulta nel periodo di maggiore intensità, sono stati rinvenuti un totale di 17 punti d'acqua di cui 6 pozzi ad uso domestico o irriguo e 9 sorgenti di varia tipologia, comprendenti fontanili e zone in cui si ha umidità diffusa nel terreno per emergenza di falda e 1 piccolo lago presso una cascina.

Tabella 6.5 Tabella riportante i punti d'acqua rinvenuti nella campagna 2018 e la loro tipologia

N	Codice punto	Tipo
1	IOM-CH-010	pozzo
2	PA1	sorgente

N	Codice punto	Tipo
3	PA2	pozzo
4	PA3	sorgente
5	PA4	sorgente
6	PA5	pozzo
7	PA6	pozzo
8	PA7	pozzo
9	PA8	ristagno
10	PA9	sorgente
11	PA10	pozzo
12	PA11	sorgente
13	PA12	sorgente
14	PA13	ristagno
15	PA14	ristagno
16	PA15	lago
17	PA16	sorgente

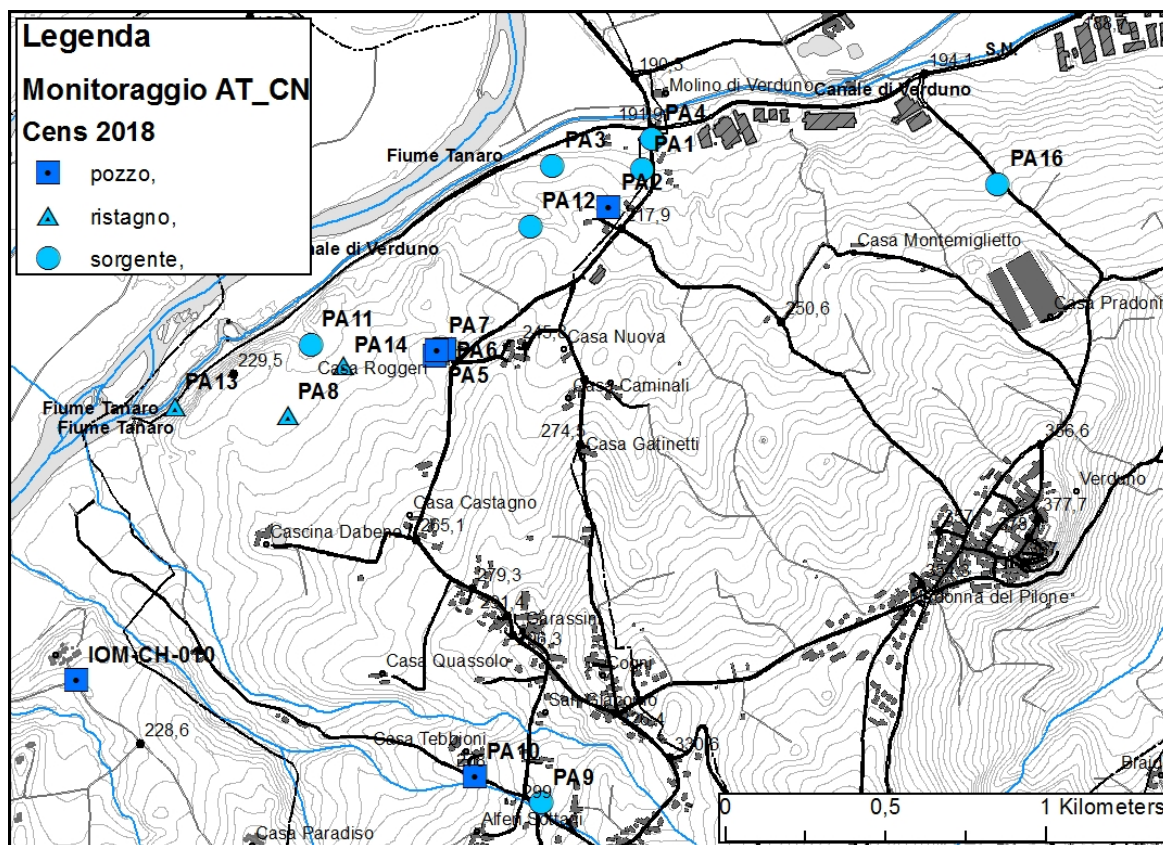


Figura 6.8 Planimetria indicante la posizione dei punti d'acqua rilevati

7. COSTRUZIONE E CARATTERISTICHE DEL MODELLO NUMERICO TRIDIMENSIONALE

Nel presente Capitolo viene illustrata la fase di costruzione del modello numerico in cui si riduce la complessità del sistema idrogeologico reale avvalendosi alcune semplificazioni per giungere alla definizione di uno “schema” contenente tutti gli elementi del mondo reale ritenuti fondamentali per gli obiettivi della modellazione. Nei paragrafi che seguono si descrive quanto fatto nella “costruzione” del modello numerico in oggetto. In modello numerico implementato è un modello tridimensionale, capace cioè di considerare i reciproci rapporti verticali esistenti tra i diversi orizzonti sovrapposti che costituiscono il sistema fisico reale.

7.1 DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO

Il modello numerico è stato implementato attraverso il programma FEFLOW® (Finite-Element Symulation System for Subsurface Flow and Transport Processes) versione 7.1, aggiornata al primo semestre del 2018. Si tratta di un codice di calcolo agli elementi finiti distribuito da DHI, utilizzabile per la soluzione di problemi complessi di filtrazione, di trasporto di agenti inquinanti e di trasporto del calore.

Il programma permette la modellazione bidimensionale e tridimensionale del dominio di studio, l’analisi in regime stazionario e transitorio, la simulazione di acquiferi confinati e non confinati, l’analisi in mezzi porosi saturi e insaturi, la riproduzione di fenomeni di diffusione e dispersione degli agenti inquinanti in falda, tenendo conto degli effetti dovuti sia ai processi chimici (adsorbimento, decadimento, biodegradazione) sia ai processi governati dalla densità dei fluidi (es. cuneo salino). Come principali risultati della simulazione, FEFLOW® fornisce i valori del carico idraulico, le linee di flusso e le concentrazioni delle specie chimiche implementate in tutti i punti del dominio spaziale considerato e a differenti istanti di tempo. È possibile ricostruire il percorso delle particelle di flusso (particle tracking backward) o riprodurre la propagazione (particle tracking forward).

7.2 CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL MODELLO NUMERICO DI FLUSSO

Come anticipato nel Paragrafo 5.1, l’estensione areale del modello numerico implementato è di circa 1227ha.

L’estensione è stata definita prendendo in considerazione l’esigenza di avere dei limiti, dove assegnare le condizioni al contorno, che fossero il più possibile lontani dal tracciato autostradale, obiettivo della modellazione, in considerazione della effettiva base di dati disponibile. Infatti, la lontananza permette ragionevolmente di ritenere trascurabili gli effetti delle semplificazioni necessariamente introdotte nell’attribuzione delle condizioni al contorno lungo i confini stessi.

Per quanto concerne l’estensione verticale del modello, si è scelto di rappresentare mediamente, nella zona del tracciato autostradale, i primi 60 - 70 m di spessore del sottosuolo investigato. In tale spessore di sedimenti, infatti, si riescono a rappresentare con il necessario dettaglio sia l’estensione dei depositi alluvionali che colmano la valle del Tanaro, sia i depositi collinari (coltri detritiche, Argille di Lugagnano e Formazione di Cassano Spinola), sia la sottostante Formazione Gessoso-Solfifera, fino alla Formazione delle Marne di Sant’Agata che costituiscono per il modello idrogeologico costruito, il substrato di base. Complessivamente il modello ha un’estensione verticale che varia da circa 50 m in fondovalle a circa 320 m alla sommità della collina di Verduno.

Il modello si è concentrato sulla ricostruzione e simulazione dell’acquifero principale che satura il sistema investigato, la cui variabilità verticale e areale è stata rappresentata attraverso una schematizzazione a più orizzonti sovrapposti a conducibilità idraulica differente. Ciascun orizzonte fisico reale (“strato geologico”) potrà poi essere rappresentato nel modello numerico da uno o più “strati (layer) numerici in base alle proprie caratteristiche e alle esigenze di modellazione.

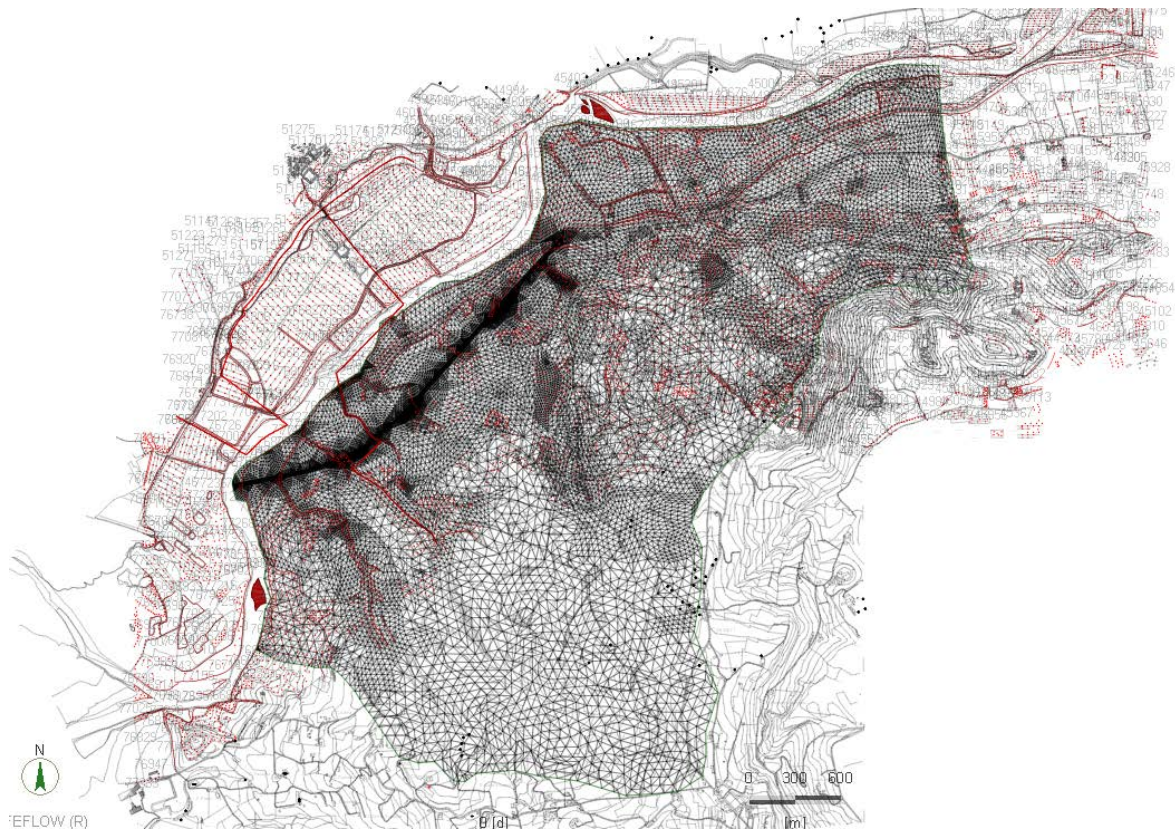


Figura 7.1 - Mesh del modello numerico di flusso (reticolo di elementi triangolari) con sovrapposizione cartografica

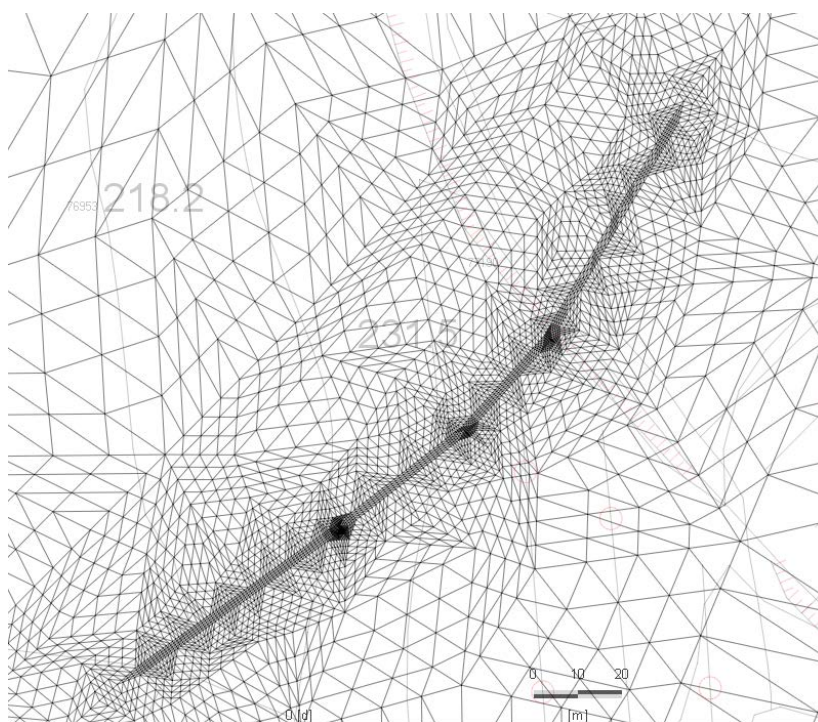
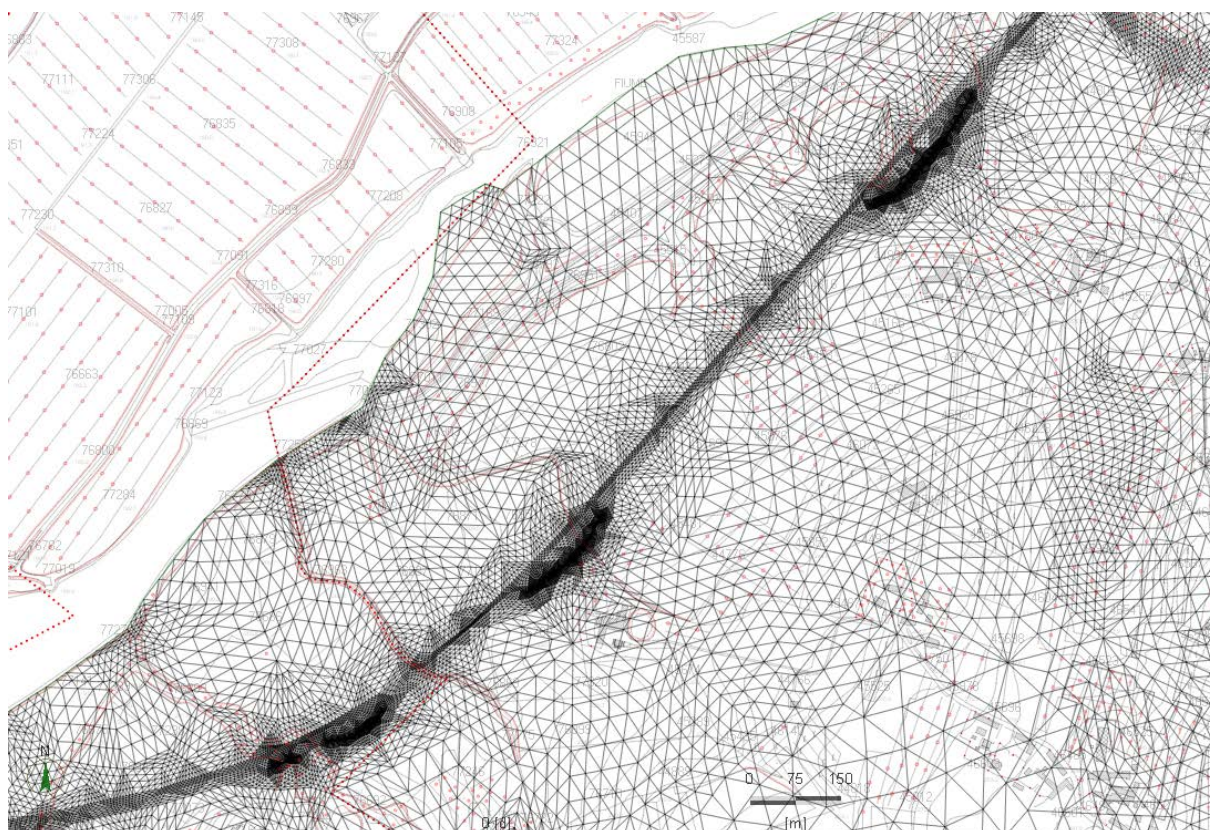


Figura 7.2 - Zoom della mesh del modello numerico di flusso nella zona delle trincee e relativa cartografia e particolare di una delle zone con infiltrazione locale per modellazione delle paratie

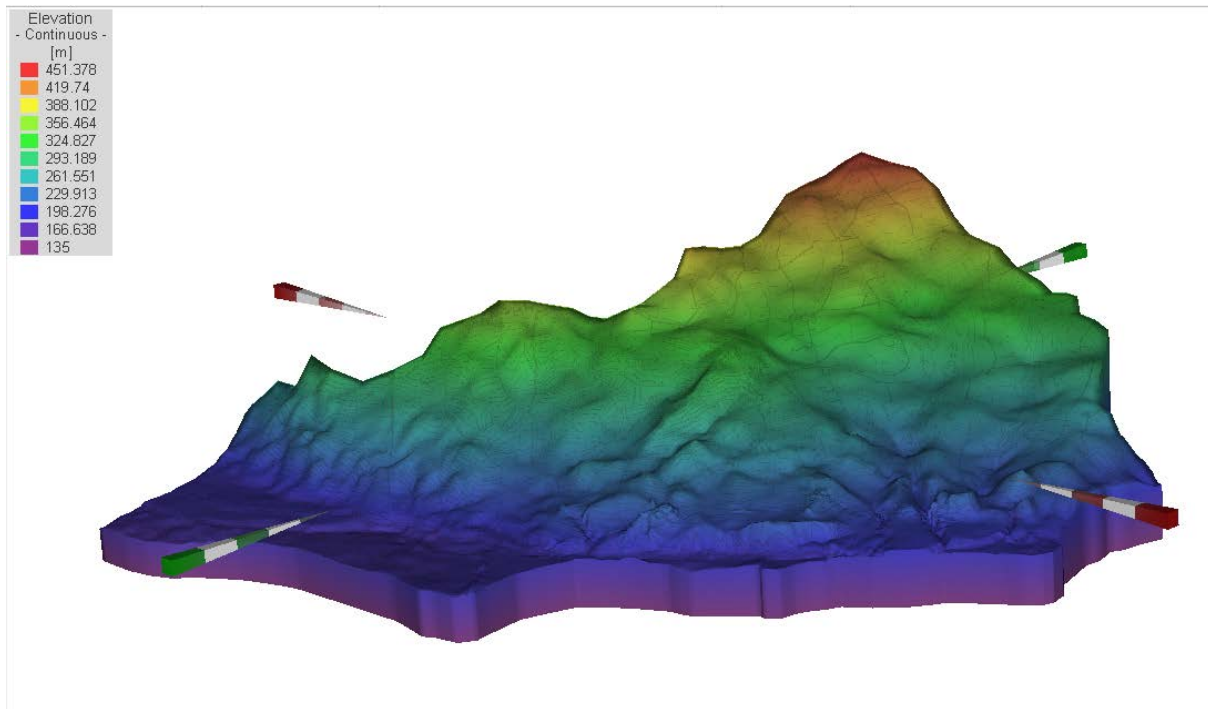


Figura 7.3 - Rappresentazione tridimensionale del modello numerico implementato

Nell'implementazione del modello numerico tridimensionale di flusso gli orizzonti considerati sono sette e in particolare, con riferimento all'assetto idrogeologico dell'area oggetto di studio, approfonditamente descritto nel Paragrafo 5.2, essi sono:

Orizzonte 1: l'orizzonte 1 comprende laddove presenti i depositi fini della valle del Tanaro e le coltri superficiali e detritiche sul versante. E' costituito, a seconda delle zone, da sabbie limose e limi sabbiosi. Da un punto di vista idrogeologico esso rappresenta i depositi dei complessi 3a, 3b e parte del complesso 4. Nel modello numerico l'orizzonte fisico reale 1 è stato discretizzato mediante n.3 layer numerici (Lyr 1 – Lyr 3).

Orizzonte 2: l'orizzonte 2 comprende i depositi grossolani della valle del Tanaro e nuovamente le coltri superficiali e detritiche sul versante. È costituito, a seconda delle zone, da ghiaie e sabbie ghiaiose o da sabbie limose e limi sabbiosi. Da un punto di vista idrogeologico esso rappresenta ancora i depositi dei complessi 3a, 3b e la parte più profonda del complesso 4. Nel modello numerico l'orizzonte fisico reale 2 è stato discretizzato mediante n.3 layer numerici (Lyr 4 – Lyr 6).

Orizzonte 3 : l'orizzonte 3 rappresenta, dove presenti, le Argille di Lugagnano. È costituito da argille e argille limose a bassa permeabilità. Da un punto di vista idrogeologico esso rappresenta parte del complesso 1b. Nel modello numerico l'orizzonte fisico reale 3 è stato discretizzato mediante n.3 layer numerici (Lyr 7 – Lyr 9).

Orizzonte 4: l'orizzonte 4 rappresenta, dove presente, la Formazione di Cassano - Spinola. È costituito da argille limose, limi argillosi e limi sabbiosi a medio - bassa permeabilità. Da un punto di vista idrogeologico esso rappresenta parte del complesso 1b. Nel modello numerico l'orizzonte fisico reale 4 è stato discretizzato mediante n.2 layer numerici (Lyr 10 – Lyr 11).

Orizzonte 5: l'orizzonte 5 rappresenta, la porzione più superficiale, micro-cristallina, della Formazione Gessoso – Solfifera. È costituito da argille limose e limi argillosi caratterizzate da una permeabilità da bassa a molto bassa. Da un punto di vista idrogeologico esso rappresenta parte del complesso 1b. Nel

modello numerico l'orizzonte fisico reale 5 è stato discretizzato mediante n.2 layer numerici (Lyr 12 – Lyr 13).

Orizzonte 6: l'orizzonte 6 rappresenta la porzione più profonda, macro-cristallina, della Formazione Gessoso – Solfifera. È costituito da limi argillosi e gessi, la cui dissoluzione ha modificato la permeabilità complessiva del materiale. Ha una permeabilità primaria per porosità estremamente limitata, ma possiede una permeabilità secondaria, per fratturazione o carsismo, da molto elevata a medio bassa, a seconda delle zone. Da un punto di vista idrogeologico esso rappresenta parte del complesso 2. Nel modello numerico l'orizzonte fisico reale 6 è stato discretizzato mediante n.5 layer numerici (Lyr 14 – Lyr 18).

Orizzonte 7: l'orizzonte 7 rappresenta il substrato marnoso, della Formazione delle Marne di Sant'Agata Fossili. È costituito da argille marnose e marne a permeabilità molto bassa e funge acquiclude basale. Tuttavia laddove le marne sono affioranti tale formazione ha permeabilità per fratturazione abbastanza elevata. Da un punto di vista idrogeologico esso rappresenta parte del complesso 1a. Nel modello numerico l'orizzonte fisico reale 7 è stato discretizzato mediante n.20 layer numerici (Lyr 19 – Lyr 38).

In Figura 7.4 è riportato lo schema concettuale sopra proposto.

Dove gli orizzonti sopra descritti non risultano presenti nel sottosuolo, ai relativi layer numerici che, per natura stessa del modello numerico, devono essere continui per tutta l'estensione del modello, sono state attribuite le caratteristiche idro-stratigrafiche dei layer soprastanti o sottostanti. Ciò risulta, per esempio, evidente per le aree di collina, esterne al fondo valle, dove si ha l'affioramento delle marne.

Orizzonte 1	Depositi fini della valle del Tanaro e Coltri superficiali e detritiche di versante	Layer 1
		Layer 2
		Layer 3
Orizzonte 2	Depositi grossolani della valle del Tanaro e Coltri superficiali e detritiche di versante	Layer 4
		Layer 5
		Layer 6
Orizzonte 3	Argille di Lugagnano	Layer 7
		Layer 8
		Layer 9
Orizzonte 4	Formazione di Cassano - Spinola	Layer 10
		Layer 11
Orizzonte 5	Formazione Gessoso – Solfifera (porzione superficiale, micro-cristallina)	Layer 12
		Layer 13
Orizzonte 6	Formazione Gessoso – Solfifera (porzione profonda, macro-cristallina)	Layer 14
		Layer 15
		Layer 16
		Layer 17
		Layer 18
Orizzonte 7	Formazione delle Marne di Sant'Agata Fossili	Layer 19
		Layer 20
		Layer 21
		Layer 22
		Layer 23
		Layer 24
		Layer 25
		Layer 26
		Layer 27
		Layer 28
		Layer 29
		Layer 30
		Layer 31
		Layer 32
		Layer 33
		Layer 34
		Layer 35
		Layer 36
		Layer 37
		Layer 38

Figura 7.4 - Distribuzione verticale dei layer numerici discretizzati.

Operativamente, la struttura del modello numerico di flusso è stata realizzata mediante i seguenti step successivi:

- 1) Predisposizione di una planimetria vettoriale contenente gli elementi planimetrici di interesse (il tracciato dell'autostrada, il tracciato delle opere di sostegno, i corsi d'acqua, gli elementi morfologici di interesse, ecc.). Mediante il software Feflow è stata generata in modo automatico una superficie della stessa forma del dominio di modellazione (cfr. Figura 5.1) e costituita da un reticolo a maglia triangolare, finemente adattato alle geometrie degli elementi rappresentati in planimetria (cfr. Figura 7.1 e Figura 7.2)
- 2) Creazione del volume tridimensionale definitivo mediante sovrapposizione, alla prima, di altre sette superfici orizzontali equidistanti (slice) creando così sette layer indifferenziati corrispondenti ai sette orizzonti individuati nella schematizzazione del sistema reale.

3) A ciascuna delle superfici create nello step precedente è stata quindi attribuita una topografia interpolando per ciascuna un differente dataset di triplette georeferenziate (x, y, z) estrapolate dall'analisi delle stratigrafie e delle sezioni stratigrafiche disponibili per le aree oggetto di modellazione. In questo modo ciascun layer ha assunto forma e spessori corrispondenti a quelli dell'orizzonte del sistema reale che il layer simula.

4) Infine i sette layer di base ottenuti, per le esigenze di modellazione, sono stati ulteriormente suddivisi in più "sottolayer" ciascuno avente identiche caratteristiche idrogeologiche del layer di partenza. In tal modo il modello numerico ha acquisito la sua configurazione finale

Quale risultato di tali operazioni si è ottenuto un dominio di modellazione tridimensionale, con mesh triangolare, i cui piani (slices) definiscono le topografie dei layer nella maniera il più possibile aderente al sistema reale sopra schematizzato ed alla ricostruzione stratigrafica effettuata sulla base delle indagini svolte (cfr. tavole la Planimetria ubicazione indagini, le Carte geologica ed Idrogeologica, i Profili geologico e geotecnico e le Sezioni geologiche e geotecniche realizzate nell'ambito del presente progetto) e della bibliografia disponibile.

La mesh generata, come detto, è composta da elementi tridimensionali prismatici a base triangolare. Il modello numerico tridimensionale di flusso implementato, al termine del processo di raffinamento della mesh, è composto da 1.900.000 elementi di calcolo.

A titolo di esempio in Figura 7.5 si riporta per una delle opere di sostegno di interesse, il confronto tra la sezione stratigrafica di progetto elaborata sulla base della caratterizzazione geotecnica (cfr. Doc. [10]) e la corrispondente sezione estratta dal modello numerico implementato. Come è possibile osservare, la sezione estratta dal modello numerico rappresenta, nei limiti delle interpolazioni effettuate, una buona approssimazione della sezione stratigrafica di progetto.

Sezione A-A - km 0+370.85
 Scala 1:500

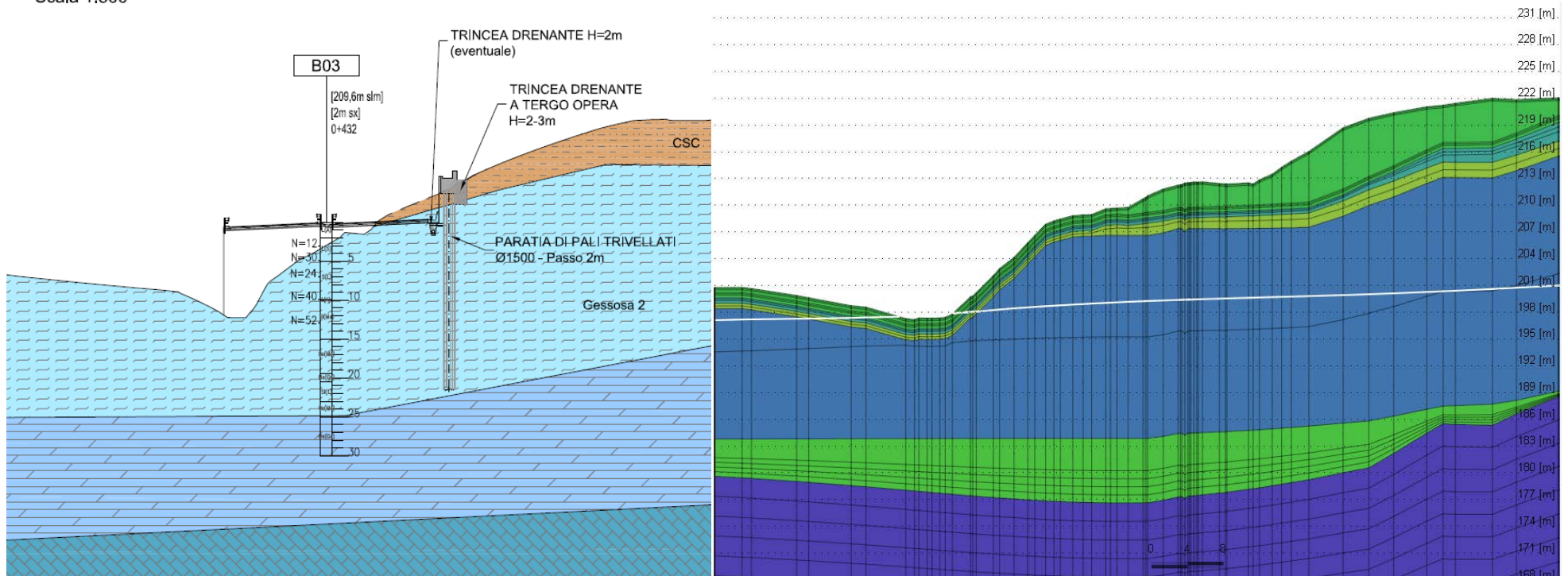


Figura 7.5–Confronto tra la sezione stratigrafica di progetto (cfr. Doc. [10]) e la corrispondente sezione estratta dal modello numerico.

7.3 DISTRIBUZIONE DEI PARAMETRI IDROGEOLOGICI

Ad ognuno dei layer costituenti il modello numerico è stata assegnata la distribuzione areale della conducibilità idraulica. I valori assegnati sono stati stabiliti sulla base dei valori sperimentali disponibili e parzialmente revisionati durante la fase di “taratura” del modello stesso, illustrata nel successivo Capitolo 9.

I parametri idrogeologici (tra i quali principalmente la conducibilità idraulica) possono variare entro dei range di accettabilità prestabiliti definiti in base alla tipologia dei terreni discretizzati fino a che, con un meccanismo del tipo “trial&error”, si arriva ad ottenere i valori di tale parametro che minimizzano la differenza tra la piezometria calcolata mediante il modello numerico di flusso a quella misurata sul campo.

Quando l'errore tra “calcolato” e “misurato” scende sotto una soglia di accettabilità definita a priori, il modello si definisce tarato e la distribuzione di conducibilità assegnate ad ognuno dei livelli numerici vengono considerate definitive.

In generale il valore assegnato alla componente verticale della conducibilità idraulica, k_{zz} , è stato posto pari a quello assegnato alle componenti lungo il piano orizzontale (componenti k_{xx} e k_{yy}). Tale assunzione è stata fatta in ragione del tipo di depositi acquiferi presenti in sito in cui si hanno i gessi che sono permeabili sia per porosità che per carsismo e per i quali è pertanto difficile definire una direzione preferenziale di drenaggio. Parallelamente per i depositi alluvionali costituiti da sabbie da fini a grossolane e ghiaie, vista la granulometria, la componente verticale della permeabilità è generalmente pari, o comunque confrontabile, con l'orizzontale.

Nei paragrafi seguenti viene sinteticamente descritta la distribuzione delle conducibilità idraulica assegnata ai layer numerici per ciascuno degli orizzonti del sistema reale schematizzato nel Paragrafo 7.2

7.3.1. Orizzonte 1 – Depositi fini della valle del Tanaro e Coltri superficiali e detritiche di versante

In Figura 7.6 si riporta la distribuzione delle conducibilità idrauliche assegnate ai layer n. 1 ÷ 3.

Sono stati assegnati i seguenti valori di conducibilità idraulica:

- Depositi fini della valle del Tanaro porzione più fine ($k=1 \cdot 10^{-6}$ m/s, colore verde chiaro) e porzione più grossolana ($k=1 \cdot 10^{-5}$ m/s, colore giallo arancio).
- Coltri superficiali e detritiche a granulometria variabile da fine ($k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s, colore verde) a medie ($k \approx 10^{-6} \div 10^{-5}$ m/s, colore giallo) a medio/grossolane ($k \approx 10^{-5} \div 10^{-4}$ m/s, colori rosso/arancio).
- Substrato marnoso nella sua porzione affiorante più alterata: $k=1 \cdot 10^{-7}$ m/s (indicato in verde acqua). Localmente nella zona di emersione delle marne è rappresentata una fascia localizzata a permeabilità più bassa caratteristica della formazione intatta ($k \approx 10^{-9} \div 10^{-10}$ m/s (indicato in blu);

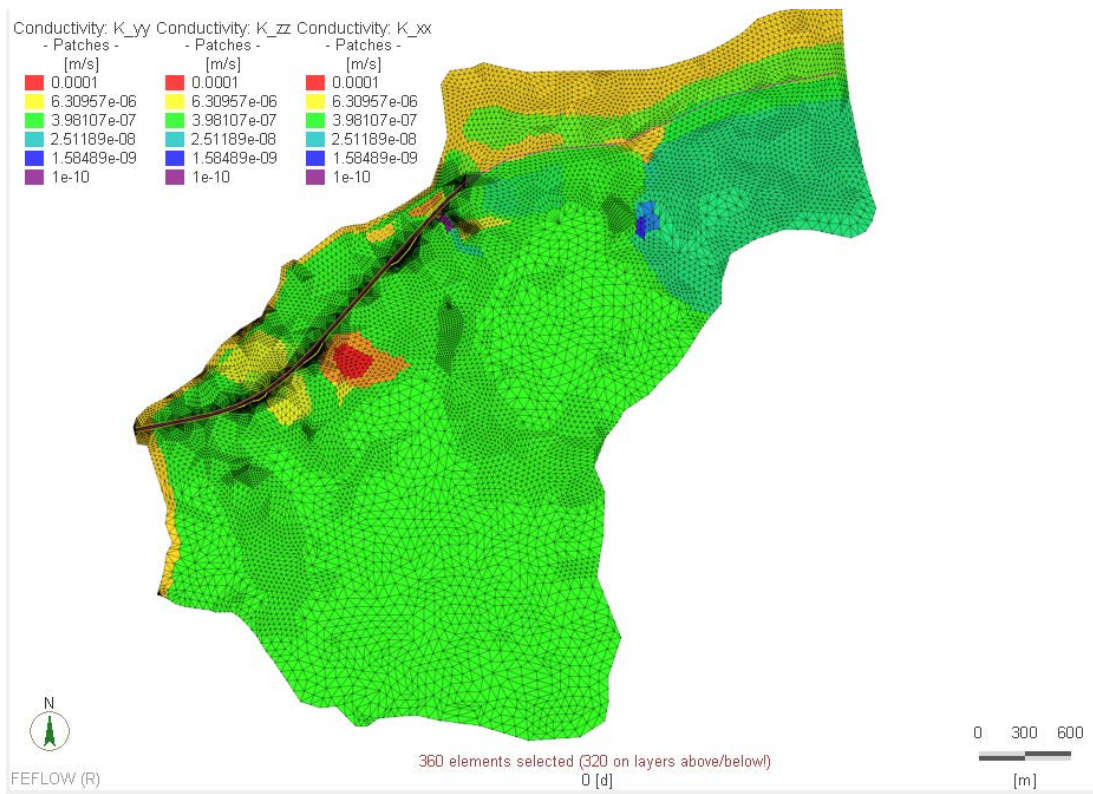


Figura 7.6 - Orizzonte 1. Distribuzione delle conducibilità idrauliche assegnate ai Layer n. 1 – 3

7.3.2. Orizzonte 2 – Depositi grossolani della valle del Tanaro e Coltri superficiali e detritiche di versante

In Figura 7.7 si riporta la distribuzione delle conducibilità idrauliche assegnate ai layer n. 4 ÷ 6.

Sono stati assegnati i seguenti valori di conducibilità idraulica:

- Depositi grossolani della valle del Tanaro porzione più fine ($k=1 \cdot 10^{-6}$ m/s, colore verde chiaro) e porzione più grossolana ($k=3 \cdot 10^{-4}$ m/s, colore rosso).

- Coltri superficiali e detritiche a granulometria variabile da fine ($k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s, colore verde) a medie ($k \approx 10^{-6} \div 10^{-5}$ m/s, colore verde chiaro) a medio/grossolane ($k \approx 10^{-5} \div 10^{-4}$ m/s, colori giallo/arancio).
- Substrato marnoso nella sua porzione affiorante più alterata: $k=1 \cdot 10^{-7}$ m/s (indicato in verde acqua). Localmente nella zona di emersione delle marne è rappresentata una fascia localizzata a permeabilità più bassa caratteristica della formazione intatta ($k \approx 10^{-9} \div 10^{-10}$ m/s (indicato in blu);

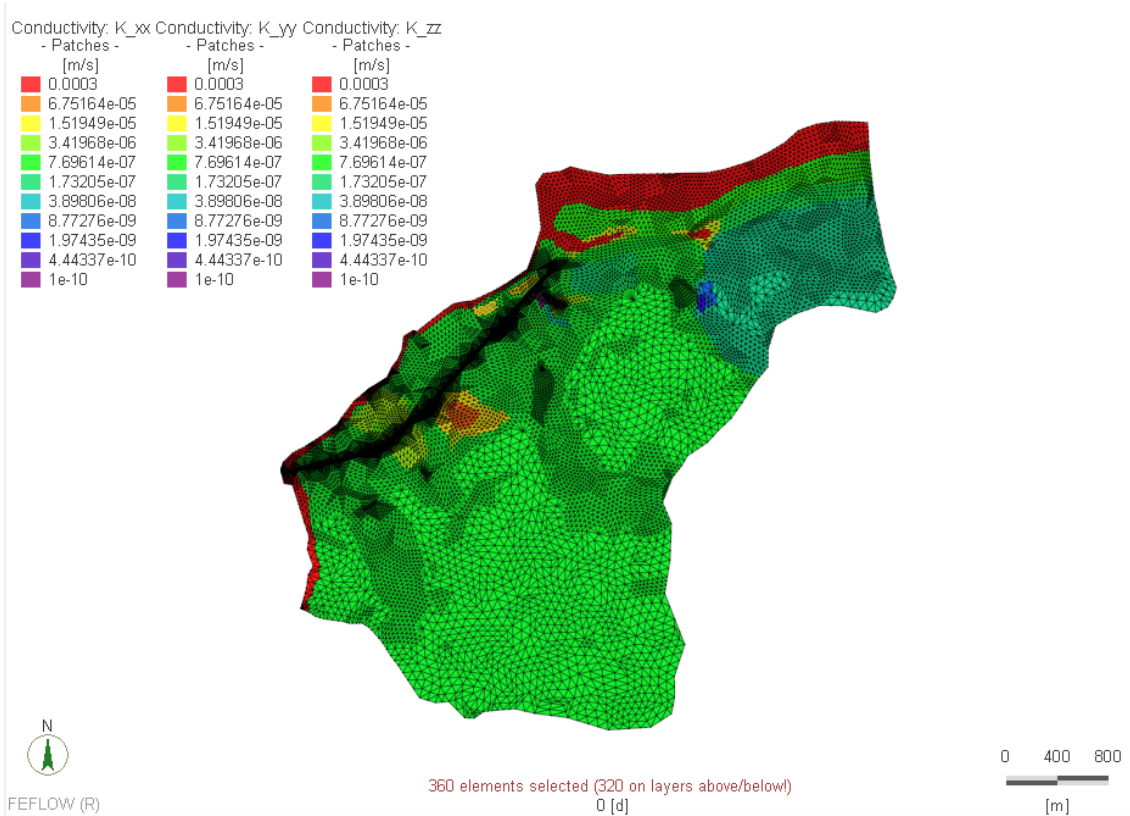


Figura 7.7- Orizzonte 2. Distribuzione delle conducibilità idrauliche assegnate ai Layer n. 4 – 6

7.3.3. Orizzonte 3 – Argille di Lugagnano

In Figura 7.8 si riporta la distribuzione delle conducibilità idraulica assegnate ai layer n. 7 ÷ 9.

Sono stati assegnati i seguenti valori di conducibilità idraulica:

- Argille di Lugagnano: laddove presenti con spessori significativi $k=5 \cdot 10^{-8}$ m/s, colore celeste
- Substrato marnoso nella sua porzione affiorante più alterata: $k=1 \cdot 10^{-7}$ m/s (indicato in verde acqua). Localmente nella zona di emersione delle marne è rappresentata una fascia localizzata a permeabilità più bassa caratteristica della formazione intatta ($k \approx 10^{-9} \div 10^{-10}$ m/s (indicato in blu);
- Formazione Gessoso-Solfifera: in corrispondenza della valle del Tanaro è stato inserito un materiale di transizione a permeabilità ridotta rappresentativo di questa unità ($k=1 \cdot 10^{-6}$ m/s, colore verde chiaro).

- Coltri superficiali e detritiche a granulometria medio/grossolane presenti localmente ($k=1 \cdot 10^{-4}$ m/s, colore rosso).

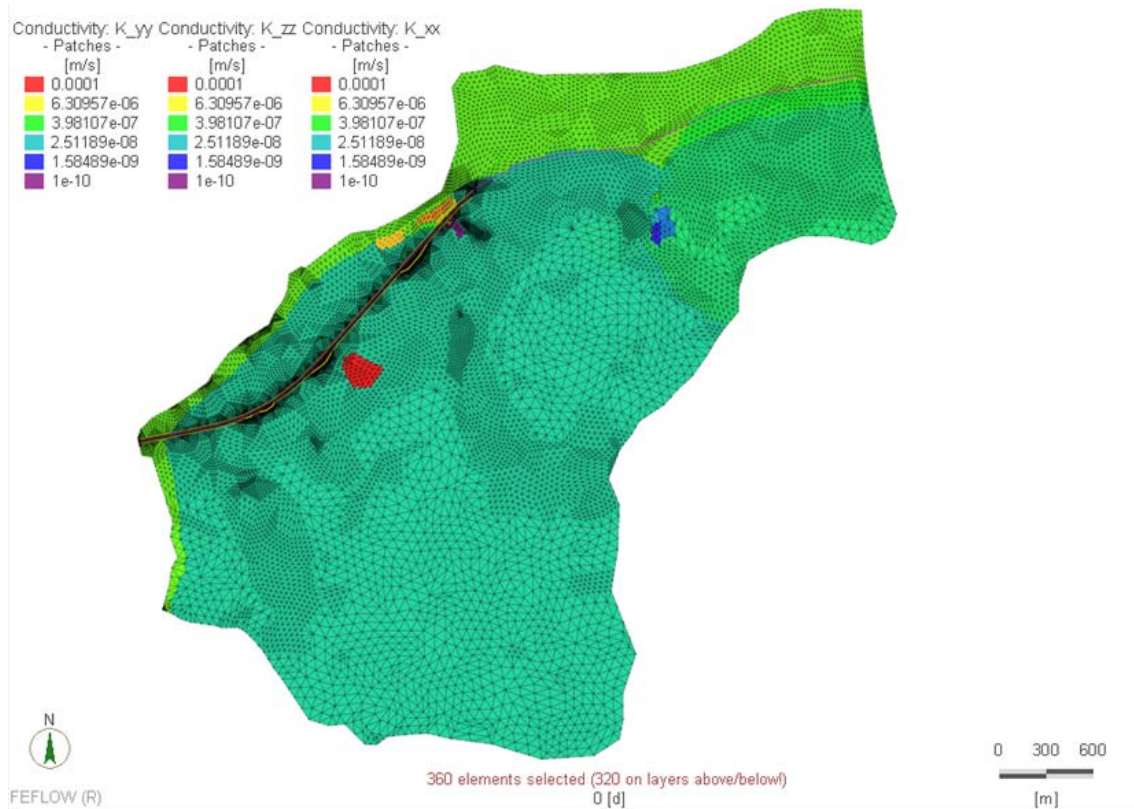


Figura 7.8- Orizzonte 3. Distribuzione delle conducibilità idrauliche assegnate ai layer dal n. 7 al n. 9.

7.3.4. Orizzonte 4 – Formazione di Cassano - Spinola

In Figura 7.9 si riporta la distribuzione delle conducibilità idraulica assegnate ai layer n. 10 e n. 11

Sono stati assegnati i seguenti valori di conducibilità idraulica:

- Formazione di Cassano – Spinola $k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s (indicato in verde chiaro)
- Substrato marnoso nella sua porzione affiorante più alterata: $k=1 \cdot 10^{-7}$ m/s (indicato in verde acqua). Localmente nella zona di emersione delle marne è rappresentata una fascia localizzata a permeabilità più bassa caratteristica della formazione intatta ($k \approx 10^{-9} \div 10^{-10}$ m/s (indicato in blu);
- Formazione Gessoso-Solfifera: in corrispondenza della valle del Tanaro è stato inserito un materiale di transizione a permeabilità ridotta rappresentativo di questa unità ($k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s, colore verde chiaro).
- Coltri superficiali e detritiche a granulometria medio/grossolane presenti localmente ($k \approx 10^{-5} \div 10^{-4}$ m/s, colori rosso/arancio).

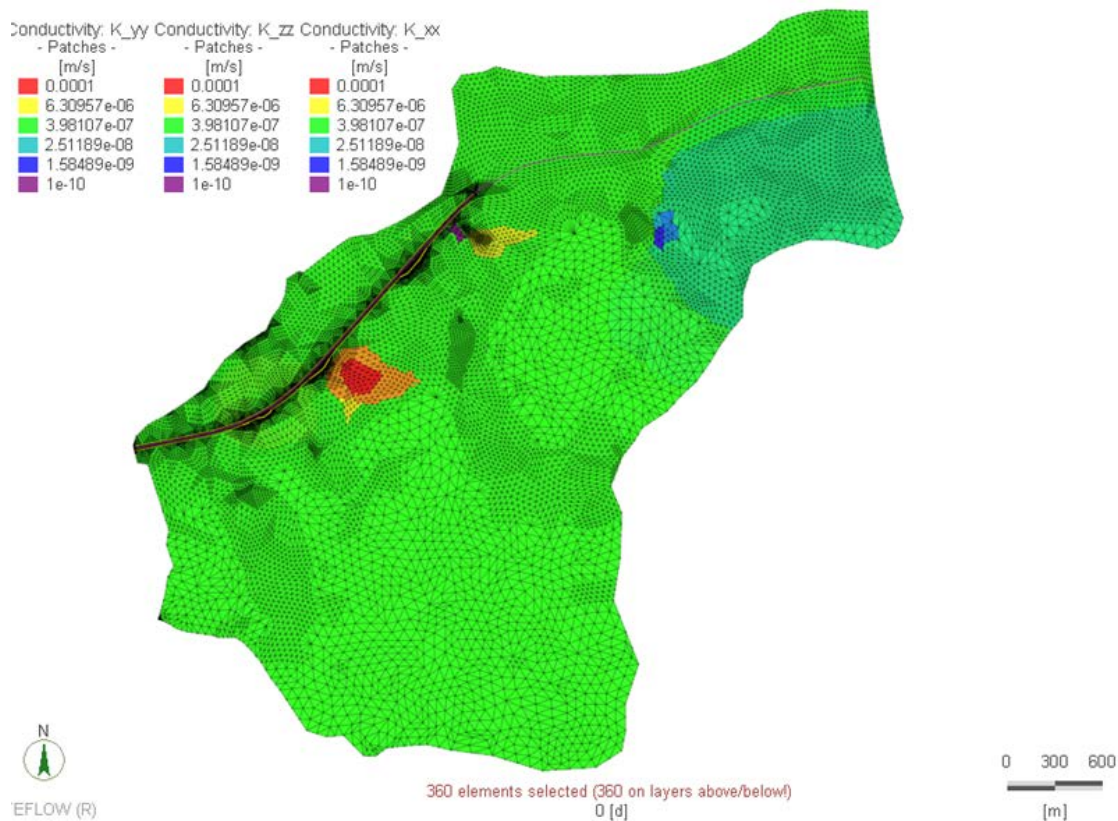


Figura 7.9- Orizzonte 4. Distribuzione delle conducibilità idrauliche assegnate ai layer n. 10 - 11

7.3.5. Orizzonte 5 – Formazione Gessoso – Solifera (porzione microcristallina)

In Figura 7.10 si riporta distribuzione delle conducibilità idraulica assegnate ai layer n. 12 e n. 13

Sono stati assegnati i seguenti valori di conducibilità idraulica:

- Formazione Gessoso-Solifera microcristallina: $k=1 \cdot 10^{-8}$ m/s (indicato in azzurro). Localmente in corrispondenza della valle del Tanaro è stato inserito un materiale di transizione a permeabilità ridotta rappresentativo di questa unità ($k=5 \cdot 10^{-7}$ m/s, colore verde chiaro).
- Substrato marnoso nella sua porzione affiorante più alterata: $k=1 \cdot 10^{-7}$ m/s (indicato in verde acqua). Localmente nella zona di emersione delle marne è rappresentata una fascia localizzata a permeabilità più bassa caratteristica della formazione intatta ($k \approx 10^{-9} \div 10^{-10}$ m/s (indicato in blu);
- Coltri superficiali e detritiche a granulometria da media ($k \approx 10^{-6} \div 10^{-5}$ m/s, colore giallo) a medio/grossolane presenti localmente ($k \approx 10^{-5} \div 10^{-4}$ m/s, colori rosso/arancio).

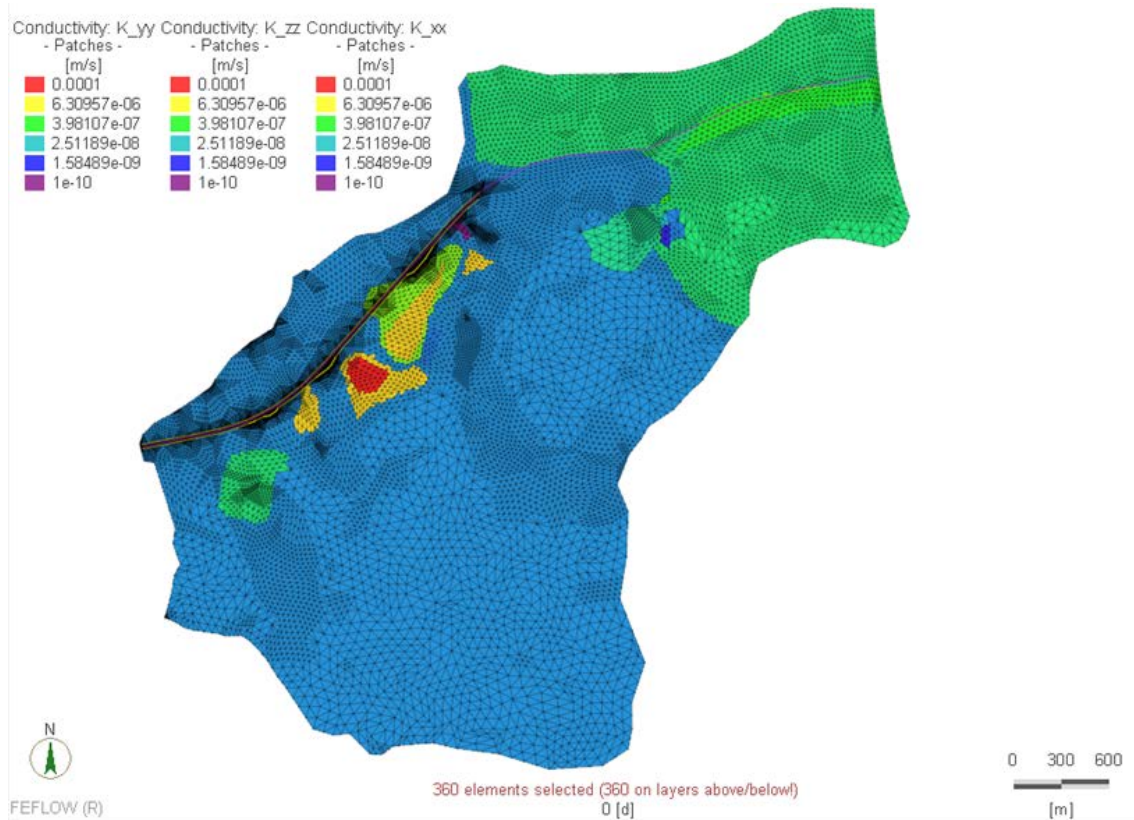


Figura 7.10 -Orizzonte 5. Distribuzione delle conducibilità idrauliche assegnate ai layer 12 - 13.

7.3.6. Orizzonte 6 – Formazione Gessoso – Solfifera (porzione macrocristallina)

In Figura 7.11 si riporta la distribuzione delle conducibilità idrauliche assegnate ai layer dal n. 14 al n. 18.

Sono stati assegnati i seguenti valori di conducibilità idraulica:

- Formazione Gessoso-Solfifera macrocristallina: $k \approx 10^{-6}$ m/s (indicato in verde chiaro/giallo limone).
- Substrato marnoso nella sua porzione affiorante più alterata: $k = 1 \cdot 10^{-7}$ m/s (indicato in verde acqua). Localmente nella zona di emersione delle marne è rappresentata una fascia localizzata a permeabilità più bassa caratteristica della formazione intatta ($k \approx 10^{-9} \div 10^{-10}$ m/s (indicato in blu);
- Coltri superficiali e detritiche a granulometria da media ($k \approx 10^{-6} \div 10^{-5}$ m/s, colore giallo) a medio/grossolane presenti localmente ($k \approx 10^{-5} \div 10^{-4}$ m/s, colori rosso/arancio).

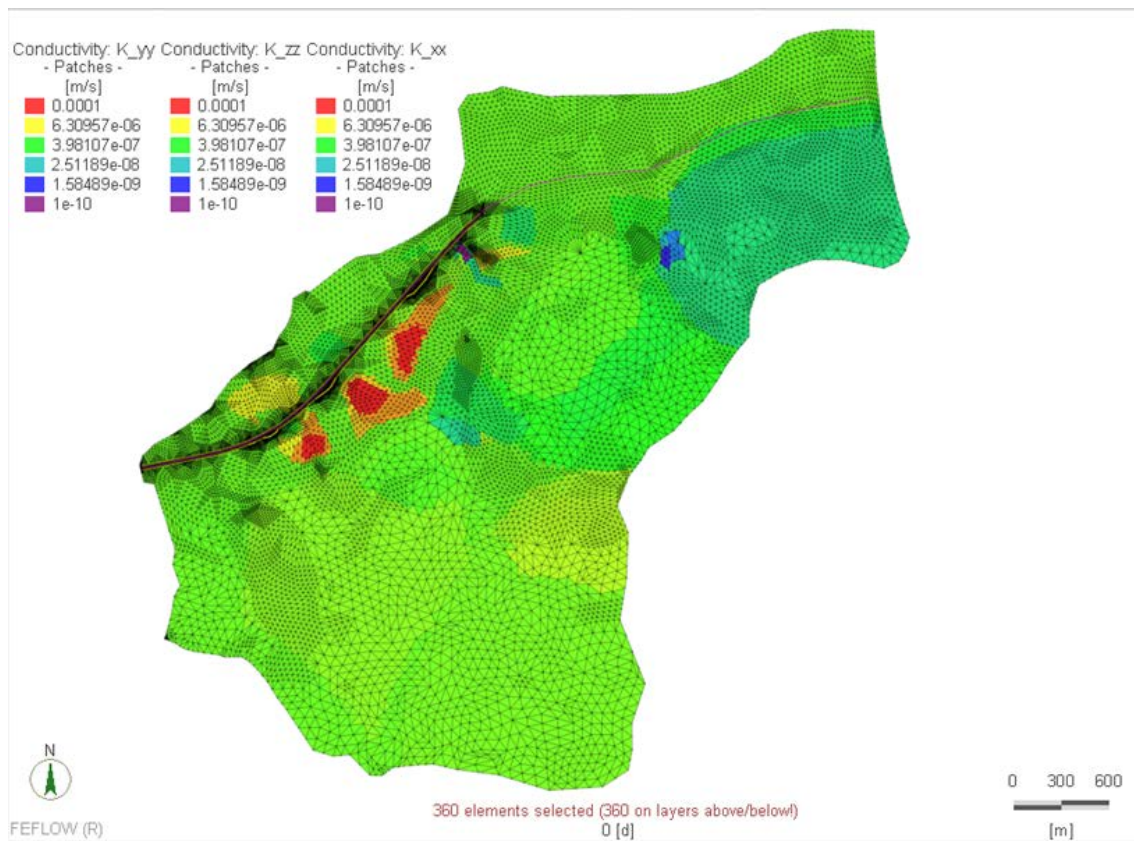


Figura 7.11 - Orizzonte 6. Distribuzione delle conducibilità idrauliche assegnate ai layer 14 – 18

7.3.7. Orizzonte 7 – Formazione delle Marne di Sant'Agata Fossili

In Figura 7.12 si riporta la distribuzione delle conducibilità idrauliche assegnate ai layer dal n. 19 al n. 23.

Sono stati assegnati i seguenti valori di conducibilità idraulica:

- Marne di Sant'Agata Fossili ($k \approx 10^{-9} \div 10^{-10}$ m/s (indicate in blu/viola). Localmente in corrispondenza della fascia di emersione della formazione in superficie e in corrispondenza del fondo valle del Tanaro, si ha una zona a conducibilità maggiore caratteristica della maggiore alterazione del materiale ($k \approx 10^{-7} \div 10^{-8}$ m/s indicato in rosso/arancio/giallo)

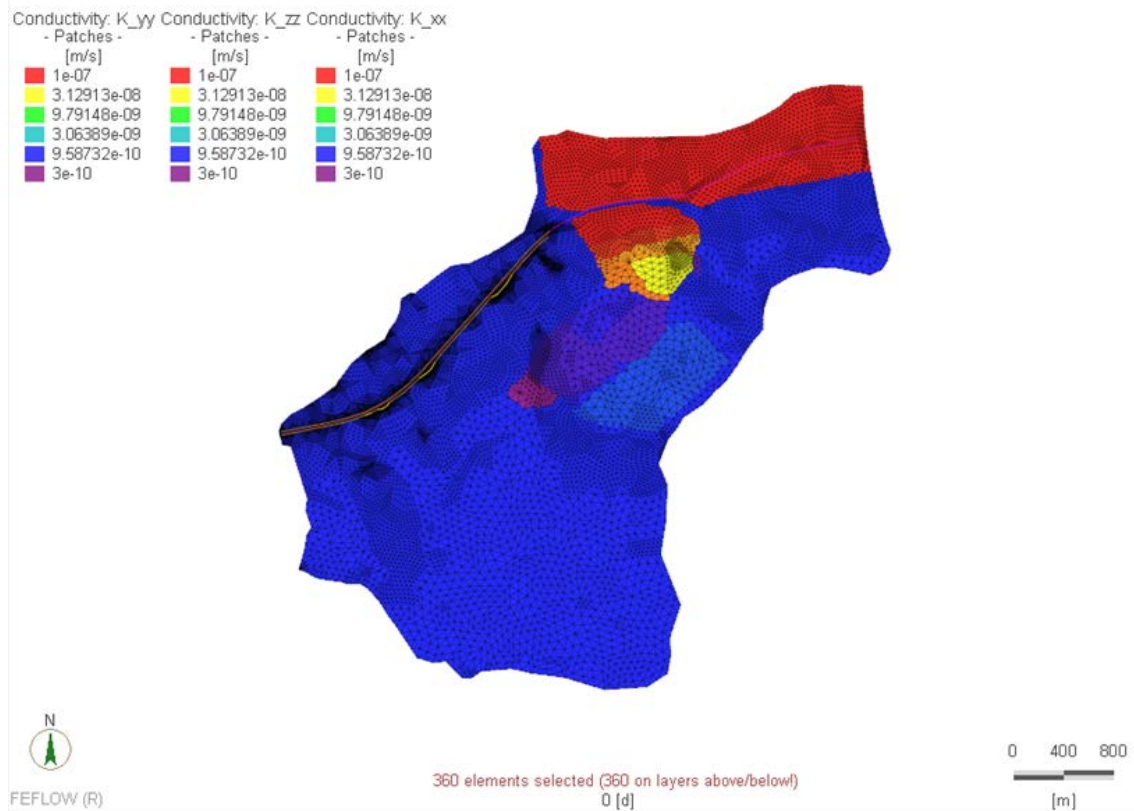


Figura 7.12 - Orizzonte 7. Distribuzione delle conducibilità idrauliche assegnate ai layer 19 – 23

In Figura 7.13 si riporta la distribuzione delle conducibilità idrauliche assegnate ai layer dal n. 24 al n. 38.

Sono stati assegnati i seguenti valori di conducibilità idraulica:

- Marne di Sant'Agata Fossili intatte $k=1 \cdot 10^{-9}$ m/s (indicato in blu).

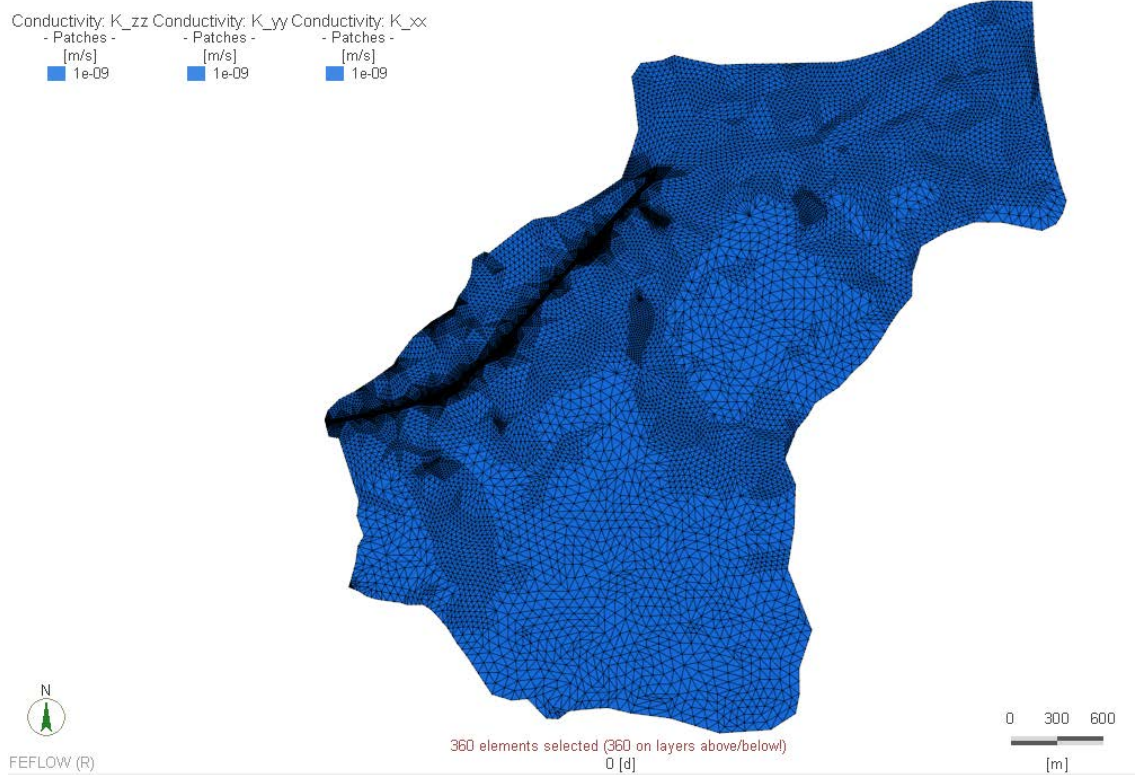


Figura 7.13 - Orizzonte 7. Distribuzione delle conducibilità idrauliche assegnate ai layer 24 – 38

Le seguenti figure forniscono, a titolo di esempio, una visione tridimensionale in sezione della distribuzione verticale delle diverse classi di conducibilità idraulica assegnate ai diversi layer numerici.

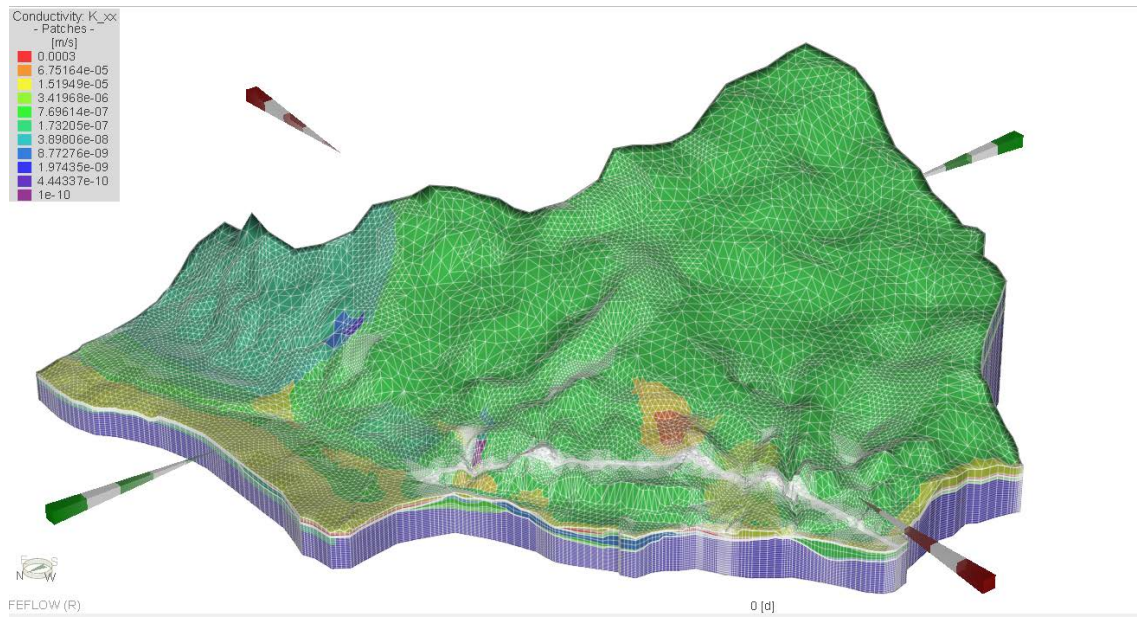


Figura 7.14 -Vista tridimensionale del dominio del modello numerico implementato.

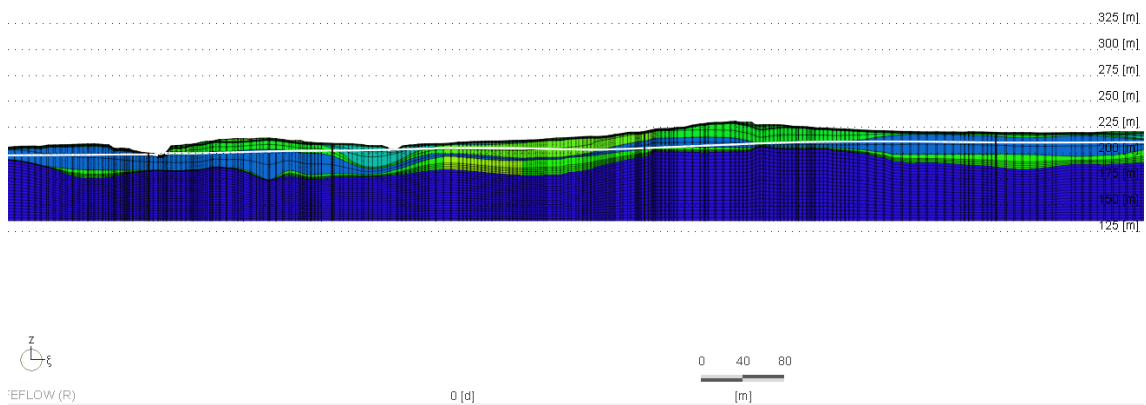


Figura 7.15 – Sezione verticale del modello numerico implementato. Il piano della sezione è passante in asse all'Autostrada A33.

8. CONDIZIONI AL CONTORNO DEL MODELLO NUMERICO ED ELEMENTI ANTROPICI DI RILIEVO

8.1 GENERALITÀ

Nel presente capitolo sono illustrate le condizioni al contorno applicate al dominio del modello numerico implementato.

Le condizioni al contorno (di differenti tipologie) rappresentano un valore noto delle grandezze fisiche che si vogliono calcolare mediante la risoluzione delle equazioni differenziali che descrivono il flusso di un fluido in un mezzo poroso. Essendo tali valori noti in determinate posizioni del dominio di modellazione non occorre calcolarle mediante il codice numerico ma è sufficiente imporle.

Nei punti ove ciò avviene la soluzione del modello numerico (in ultima analisi la piezometria che si intende riprodurre per l'area in studio) risulta già determinata ed il codice di calcolo (il software Feflow nel caso in specie) si appoggia a tali valori per il calcolo delle quote piezometriche nella restante parte del modello.

Dal punto di vista matematico le condizioni al contorno possono essere, come anticipato, di vario tipo e riguardare un valore specifico del carico idraulico oppure un valore noto del flusso nel mezzo poroso in un dato punto. Ancora, una condizione al contorno può rappresentare un punto sorgente o pozzo di cui sia nota la portata.

Nei paragrafi successivi, per ciascuna tipologia di condizione al contorno adottata nel modello numerico implementato, sono illustrati la funzione svolta (simulazione di carichi di monte/valle, corsi d'acqua, infiltrazione efficace, ecc.) ed i valori adottati.

Infine, saranno descritte le modalità di implementazione, all'interno del modello numerico di alcuni elementi antropici quali le paratie di pali che costituiscono gli interventi di stabilizzazione che devono essere realizzati per lo scavo delle trincee (cfr. Capitolo 3).

8.2 CONDIZIONI AL CONTORNO DEL I TIPO (CONDIZIONE DI CARICO ASSEGNATO)

In corrispondenza dei limiti esterni del dominio del modello numerico sono state applicate condizioni di carico idraulico totale imposto (condizioni di Dirichlet o del I tipo).

Gli unici riferimenti bibliografici disponibili che riportino una ricostruzione piezometrica della zona sono le carte idrogeologiche e della pianura piemontese rese disponibili da Arpa Piemonte (si veda la Figura 6.5) in cui però la piezometria ricostruita a partire dai dati di monitoraggio della falda è solo quella delle zone pianeggianti e quindi del fondo valle del Tanaro.

I livelli piezometrici da adottare quali condizioni al contorno per il confine nord-ovest del modello lungo il tracciato del Tanaro sono pertanto state ricavate direttamente da questa piezometria di riferimento, confrontati con i dati idrometrici disponibili per il tratto di fiume in esame.

Una volta verificato che le letture nei piezometri a nostra disposizione installati a fondovalle presentassero valori compatibili con tale piezometria di riferimento, vista anche la sostanziale uniformità nell'andamento piezometrico ricostruito a partire dalle nostre letture, non avendo a disposizione dati da Arpa, per le condizioni al contorno da applicare lungo il confine sud-est, alla sommità della collina di Verduno, in assenza di dati di riferimento ufficiali e vista la lontananza dalle opere in esame, si è fatto riferimento ai livelli piezometrici misurati nei punti più vicini al bordo ed estrapolando i valori da adottare lungo tutto il tratto considerando il medesimo gradiente.

Sono stati assegnati i seguenti valori (cfr. Figura 8.1):

- Limite nord-ovest del modello numerico (fondovalle Tanaro): carico variabile da 173.1 m s.l.m. a 189.3 m s.l.m.
- Limite sud-est del modello numerico (sommità collina di Verduno): carico variabile da 270 m s.l.m. a 375 m s.l.m.

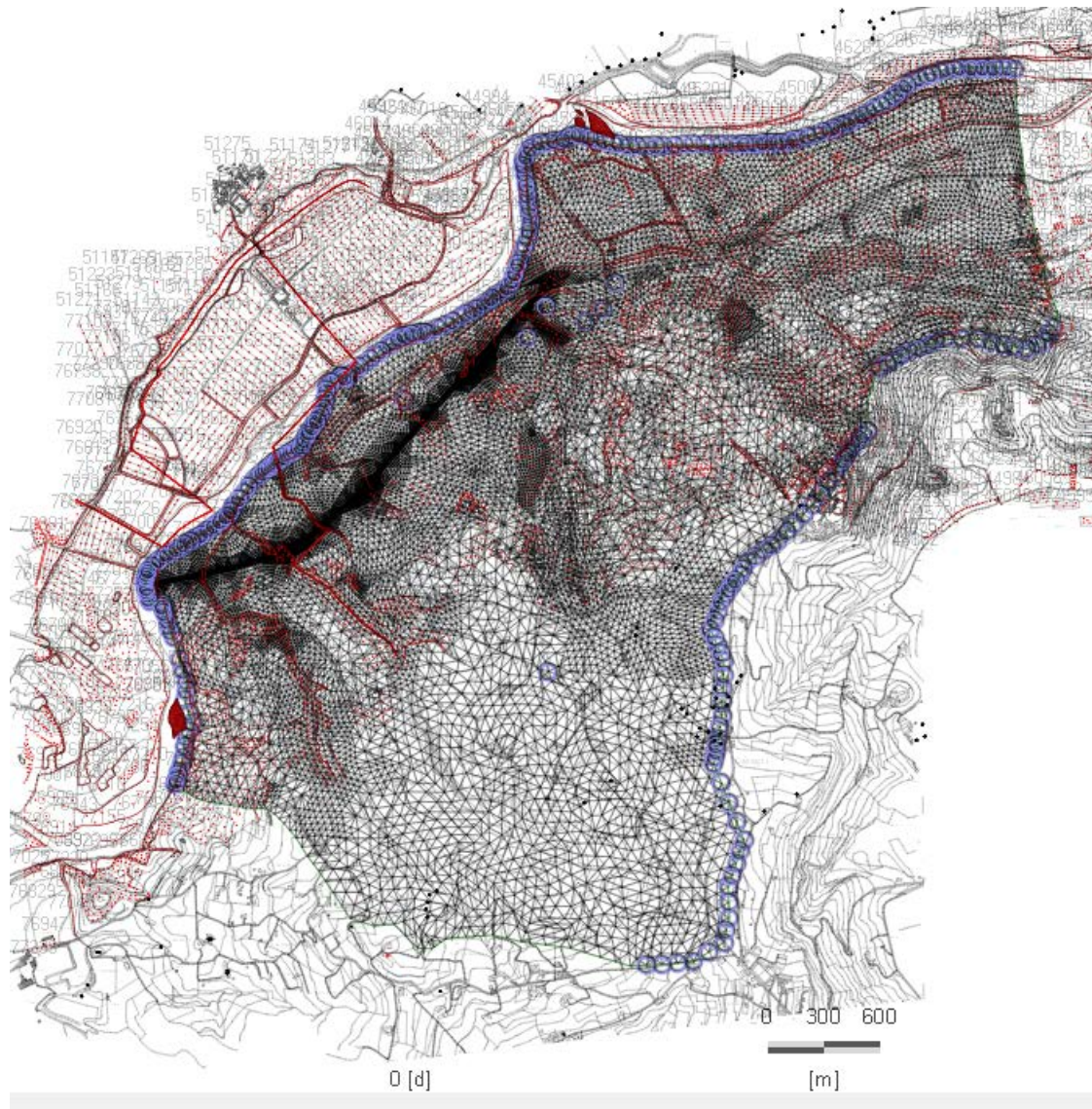


Figura 8.1–Ubicazione delle condizioni al contorno del I tipo assegnate sui nodi dei limiti nord-ovest e sud-est del dominio del modello numerico implementato. (circoletti blu)

Tali condizioni al contorno sono state imposte ai limiti nord-ovest e sud-est su tutti i layer costituenti il modello numerico (cfr. Figura 8.2).

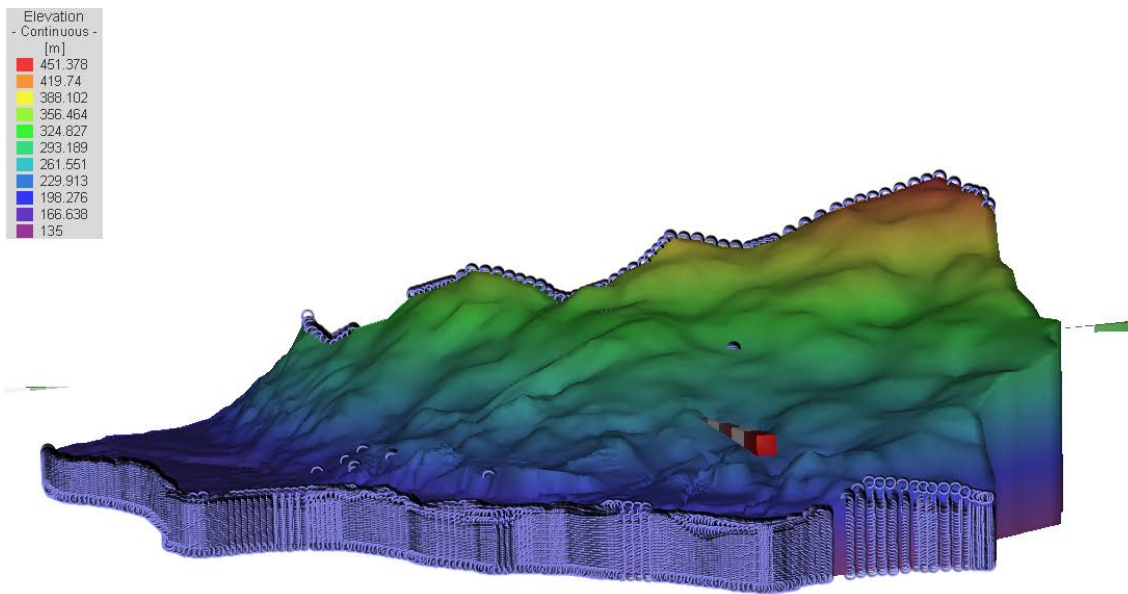


Figura 8.2–Ubicazione delle condizioni al contorno del I tipo assegnate ai limiti nord e sud del dominio del modello numerico implementato. Vista tridimensionale del dominio di modellazione.

8.3 CONDIZIONI AL CONTORNO DEL II TIPO (CONDIZIONI DI FLUSSO ASSEGNATO)

In corrispondenza degli altri bordi del modello sono invece state assegnate condizioni al contorno di flusso assegnato (condizione del II tipo o di Neumann). In particolare sono state fissate condizioni di flusso nullo in quanto i confini del modello in quei tratti rappresentano effettivamente delle linee di flusso perpendicolari alle isopieze e morfologicamente posizionate su linee di massima pendenza.

Il posizionamento di queste condizioni al contorno è mostrato nella successiva Figura 8.3. Anche in questo caso le condizioni sono state imposte su tutti i layer costituenti il modello numerico.

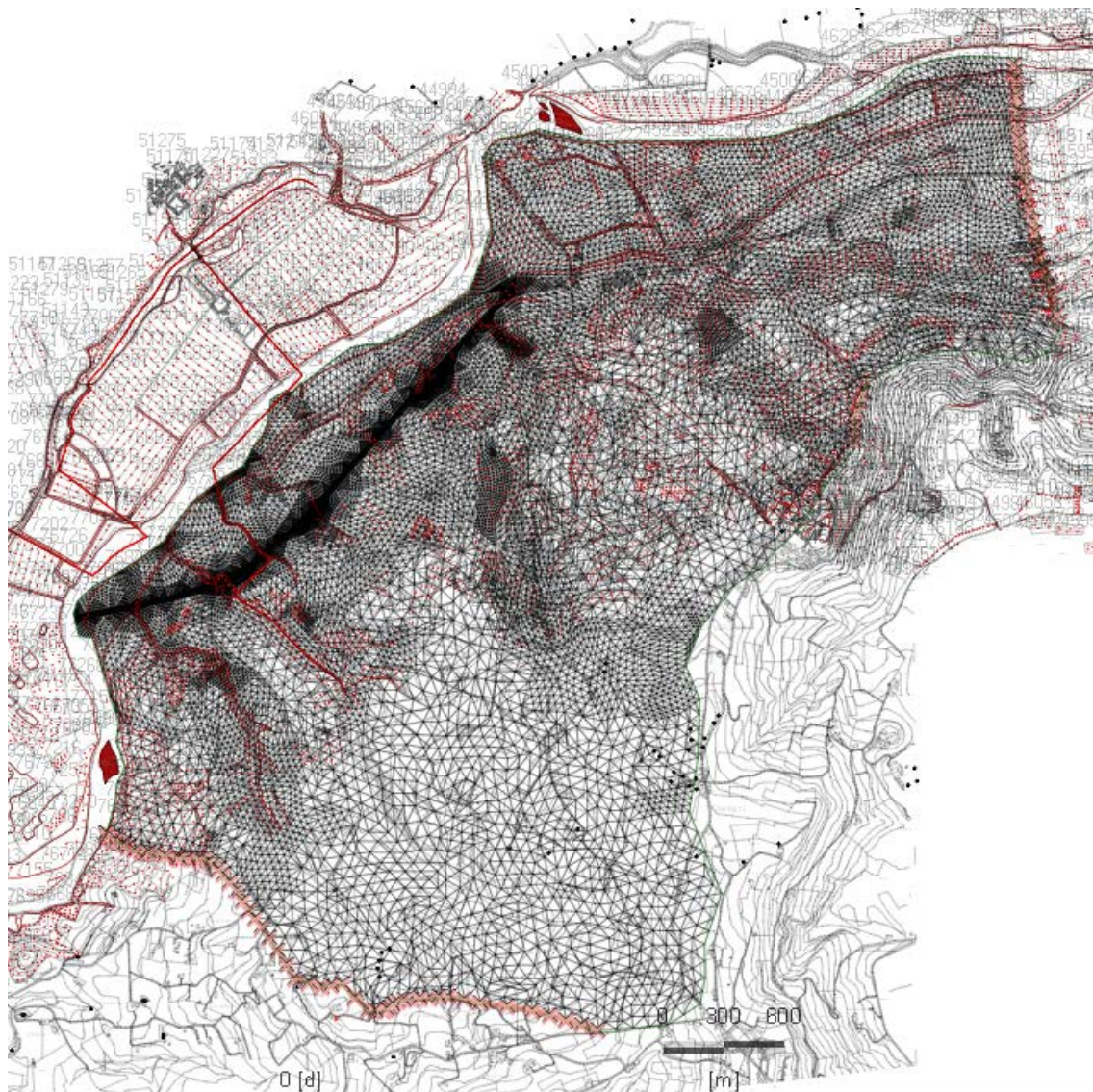


Figura 8.3–Ubicazione delle condizioni al contorno del II tipo assegnate sui nodi dei limiti sud ed est del dominio del modello numerico implementato. (crocette rosa)

8.4 CONDIZIONI AL CONTORNO DEL III TIPO (CONDIZIONI DI FLUSSO DIPENDENTE DAL CARICO)

In corrispondenza dei rii ubicati sul versante della collina di Verduno sono state assegnate delle condizioni di flusso dipendenti dal carico attraverso una funzione di trasferimento (condizione del III tipo o di Cauchy).

In tal caso si assegna un carico idraulico corrispondente alla quota del pelo libero del fiume e si definisce una conduttanza degli elementi su cui tali condizioni vengono assegnate. In sostanza la conduttanza (espressa come $[L]/[T]$), rappresenta la resistenza al flusso tra il corpo idrico e la falda e dipende dalle caratteristiche geometriche del fiume e di conducibilità idraulica del letto dello stesso. Essa regola il flusso tra il corpo d'acqua superficiale e la falda in rapporto al valore di carico assegnato in un punto.

Si ricorda che tale condizione al contorno, per come è stata assegnata nel modello, impone il carico idraulico definito laddove il livello freatico raggiunge quell'elevazione e lo fa secondo la funzione di trasferimento del flusso tra la falda e il corpo d'acqua superficiale, mentre laddove il livello freatico è inferiore al carico idraulico assegnato la condizione al contorno rimane inattiva.

Nel caso in studio i valori di carico assegnati sono stati determinati per quanto riguarda il canale Enel sulla base dei rilievi della quota del canale eseguiti all'interno del rilevamento topografico dell'area, mentre per quanto riguarda i rii sul versante, visto il regime torrentizio che li caratterizza, si è fatto riferimento direttamente alle quote topografiche lungo il loro tracciato.

In particolare, i valori di quota idrometrica sono stati assegnati interpolando o estrapolando le quote note a partire quindi dal rilievo topografico della zona.

A titolo di esempio lungo il rio San Michele sono state assegnate quote del pelo libero variabili tra 189.8 m s.l.m. e 259.1 m s.l.m, mentre lungo il rio Deglia sono state assegnate quote del pelo libero variabili tra 190.8 m s.l.m. e 244.8 m s.l.m.

Condizioni al contorno di questo tipo sono poi state assegnate ad altri rii minori presenti sul versante e alle sorgenti stagionali.

Tutte le condizioni al contorno del III tipo sono state assegnate solo ai primi 6 layer numerici rappresentativi nella zona della collina delle coltri e dei depositi di versante (*Complessi 3a/3b*).

Per quanto riguarda il Canale di derivazione Enel non è stato inserito tra gli elementi vincolanti in quanto, dalle verifiche fatte, risulta pensile nella parte di tracciato all'interno del modello e pertanto senza interazione con la falda.

Quanto sopra riportato è graficamente rappresentato in Figura 8.4.

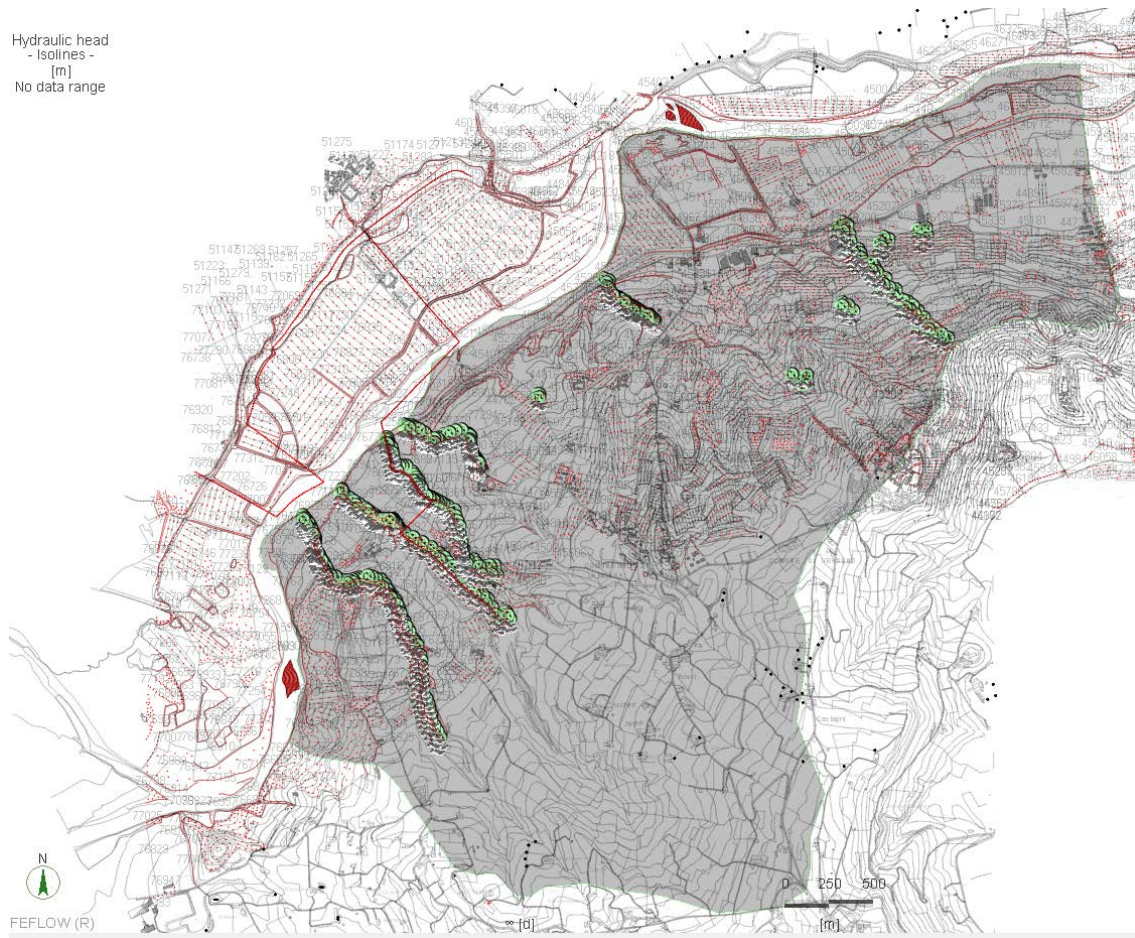


Figura 8.4- Distribuzione delle condizioni al contorno del III tipo lungo i corsi dei rii.

8.5 ALTRE CONDIZIONI AL CONTORNO

Oltre alle condizioni al contorno sopra menzionate sono stati rappresentati, all'interno del dominio del modello numerico, ulteriori elementi che hanno influenza sul deflusso delle acque sotterranee. Tali elementi sono di seguito illustrati.

8.5.1. Piogge efficaci

Come anticipato nel Paragrafo 6.5, il valore di pioggia efficace media annua, ossia la quota parte di precipitazioni che si infiltra nel sottosuolo, ammonta, per l'area di studio a circa 300 mm/anno.

In questa prima serie di analisi, la cui finalità è quella di valutare l'impatto sui livelli piezometrici dato dall'introduzione delle opere di sostegno delle trincee, tale valore medio annuo non è tuttavia stato inserito all'interno del modello di flusso implementato e si è proceduto ad una ricostruzione della piezometria in condizioni indisturbate che tiene già implicitamente conto anche delle precipitazioni medie annue.

Nelle analisi oggetto del Capitolo 11 sono invece stati implementati degli eventi meteorici singoli, di entità media e di entità eccezionale. Per maggiori dettagli, sugli eventi e sulla loro implementazione all'interno del modello, si rimanda al capitolo di riferimento.

8.5.2. Paratie di pali di grande diametro in corrispondenza delle trincee

Come descritto al precedente Capitolo 3, per garantire la stabilità delle trincee previste lungo la prima parte del tracciato stradale, si prevede di realizzare quattro paratie di pali di grande diametro (D 1500 mm) ad interasse 2 m l'uno dall'altro.

In base a dati di letteratura e all'esperienza degli scriventi per il calcestruzzo dei pali si può considerare, per un calcestruzzo con un rapporto acqua/cemento dell'ordine di 0.5, una conducibilità idraulica dell'ordine di 10^{-11} m/s. Considerando che i pali sono posti ad un interasse pari a 2 m l'uno dall'altro, si è considerata per la paratia di pali una permeabilità equivalente valutata considerando una permeabilità media conservativa dei terreni attraversati nello spazio compreso tra i pali e la permeabilità del calcestruzzo. Il valore ottenuto risulta pari a 2.5×10^{-9} m/s e nei calcoli è stato adottato applicandolo conservativamente ad un volume di elementi di larghezza totale 2 m.

Quanto sopra è rappresentato nella sezione riportata in Figura 8.5.

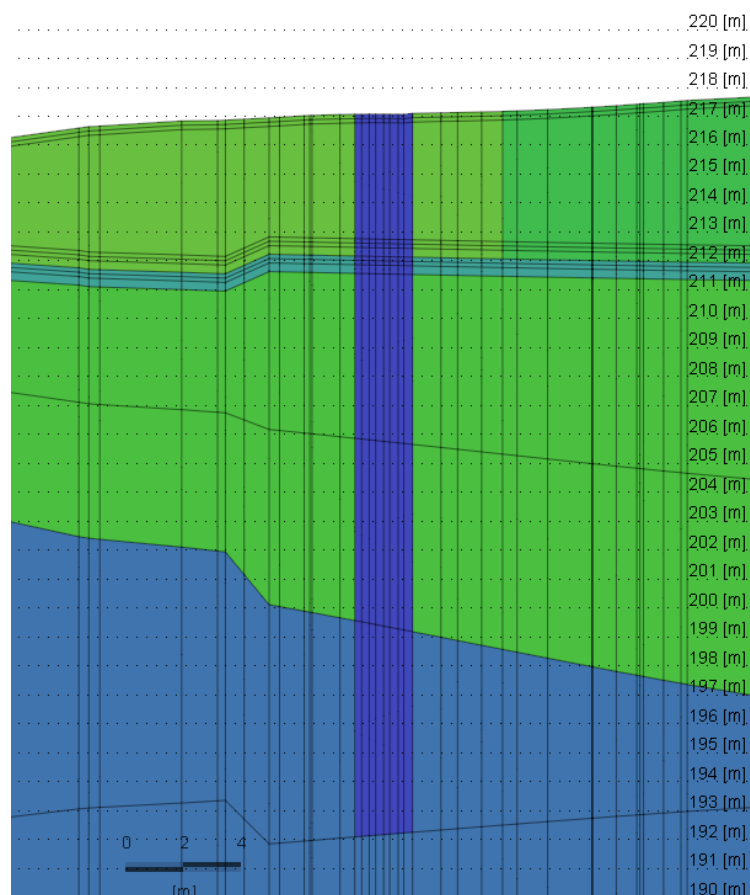


Figura 8.5 – Rappresentazione della paratia di pali D1500mm a interasse 2 m, mediante elementi a bassa permeabilità (conducibilità idraulica pari a $2.5 \cdot 10^{-9}$ m/s).

8.6 CONDIZIONI INIZIALI

Quale set di condizioni iniziali è stato inizialmente assegnato un arbitrario valore del carico idraulico identico sull'intera superficie del dominio di modellazione e pari a 140 m s.l.m.

9. CALIBRAZIONE DEL MODELLO NUMERICO

Una volta strutturato il modello numerico come indicato nei capitoli precedenti si è proceduto alla sua calibrazione in stato stazionario variando la distribuzione della conducibilità idraulica dei vari layer numerici in quanto tale parametro può essere considerato quello determinante nella definizione del campo di moto delle acque di falda.

La calibrazione è consistita nel tentativo di replicare, fissate le condizioni al contorno e quelle iniziali, i valori di quota piezometrica di riferimento in corrispondenza dei piezometri relativi all'acquifero principale per l'area del tracciato autostradale (obiettivo primario della modellazione numerica).

La calibrazione del modello numerico implementato è stata realizzata procedendo per tentativi, variando i valori di conducibilità idraulica all'interno di range compatibili con la descrizione idrostratigrafica emersa dalla bibliografia e dalle indagini in campo. Tale procedura (procedura Trial&Error) ha determinato infine la distribuzione di conducibilità descritta, per ciascun orizzonte, nel Capitolo 7.

9.1 CRITERIO DI CALIBRAZIONE DEL PARAMETRO CONDUCIBILITÀ IDRAULICA

Con criterio di calibrazione si intende l'indicatore con cui esprimere la differenza tra "reale e simulato" e il valore soglia che tale parametro non deve superare per considerare il modello sufficientemente tarato.

Lo scostamento che le altezze piezometriche calcolate mediante il codice Feflow (soluzione del sistema di equazioni differenziali che regola il flusso nel mezzo poroso) hanno dai livelli piezometrici misurati in campo costituisce "l'errore della simulazione", quando tale errore ricade entro una soglia di accettabilità il modello si ritiene calibrato. La soglia di accettabilità è definita prima delle simulazioni sulla base della qualità delle misure di campo a disposizione, delle semplificazioni effettuate, degli obiettivi del modello.

Da un punto di vista qualitativo si procede ad un confronto tra la piezometria simulata e quella calcolata verificando che siano congruenti in termini di andamento e di quote piezometriche mentre dal punto di vista quantitativo occorre effettuare delle ulteriori verifiche di tipo numerico (come esposto di seguito)

Il criterio di calibrazione comunemente applicato nel campo delle simulazioni idrogeologiche è la deviazione standard dei residui, RMS (radice della somma dei quadrati residui). Il parametro è basato sulla differenza tra l'altezza piezometrica misurata in campo e l'altezza calcolata dal modello:

$$RMS \equiv \left[\frac{1}{n} * \sum_n (Hm_i - Hc_i)^2 \right]^{0.5}$$

dove n è il numero di punti in cui si attua il confronto tra altezze piezometriche misurate in campo, Hm, e calcolate dal modello, Hc.

Secondo Anderson e Woessner (cfr. Doc. [27]), se il rapporto tra la deviazione standard dei residui e l'intervallo dei livelli piezometrici misurati in campo è sufficientemente piccolo, gli errori nella simulazione sono solo una piccola parte dell'intera risposta del modello.

La deviazione standard dei residui costituisce per tutte le simulazioni il criterio di calibrazione con cui si è attuata la procedura di calibrazione "trial&error": I parametri idrogeologici (la conducibilità idraulica nel caso in oggetto) sono stati di volta in volta variati fino a ottenere la migliore simulazione, quella cioè che riproduce i carichi di campo con un margine di errore che soddisfa il criterio di calibrazione.

Oltre al parametro RMS è stato calcolato anche il valore di NRMS ossia il valore di RMS normalizzato sull'intervallo di variazione dei valori misurati in campo presi come riferimento.

Ossia:

$$\text{NRMS} = \frac{\text{RMS}}{[H_{m1}; H_{m2}; \dots]_{\max} - [H_{m1}; H_{m2}; \dots]_{\min}}$$

Tale parametro permette anch'esso di valutare la bontà della calibrazione ed in particolare si ritiene che valori al di sotto del 10%, come anche stabilito nelle linee guida del U.S. Geological Survey (cfr. Doc. [28]), possano ritenersi accettabili e caratteristici di una simulazione che ben riproduce la situazione reale misurata.

9.2 CALIBRAZIONE DEL MODELLO IN STATO STAZIONARIO

Come già anticipato, le misure piezometriche prese in considerazione per la ricostruzione della superficie piezometrica di riferimento sono i valori medi misurati nelle due campagne di indagine 2011-2012 e 2018. Le considerazioni che hanno portato a tale scelta sono riportate nel precedente paragrafo 6.3 e la piezometria così ricostruita è mostrata nella Figura 6.4.

In rapporto all'estensione del modello numerico ed alle limitate conoscenze alcune delle aree, specialmente nella seconda parte del tracciato e nella parte più alta della collina, si è ritenuto che il numero di dati a disposizione consentisse di pervenire ad una calibrazione del modello numerico affetta da un errore indicativamente compreso tra il 5% ed il 10%. Inoltre, vista proprio l'estensione del modello e la relativa importanza ricoperta dalla ricostruzione nella parte più alta della collina, si è deciso di verificare due calibrazioni separate: una considerando tutti i dati piezometrici disponibili ed una limitando la valutazione ad una fascia di terreno più ristretta e centrata sull'asse autostradale.

Con la usuale procedura per tentativi, si è ottenuto per la calibrazione con il set completo dei punti di misura un errore normalizzato dei residui (NRMS) pari al 4%, ed un RMS pari a 5.56 m, mentre considerando il set parziale centrato su A33 dei punti di misura si è ottenuto un errore normalizzato dei residui (NRMS) pari al 4.4%, ed un RMS pari a 1.69 m.

Nella Figura 9.1 è riportata una visualizzazione dei punti di monitoraggio selezionati quale set ridotto di punti di misura usato per la calibrazione del modello.

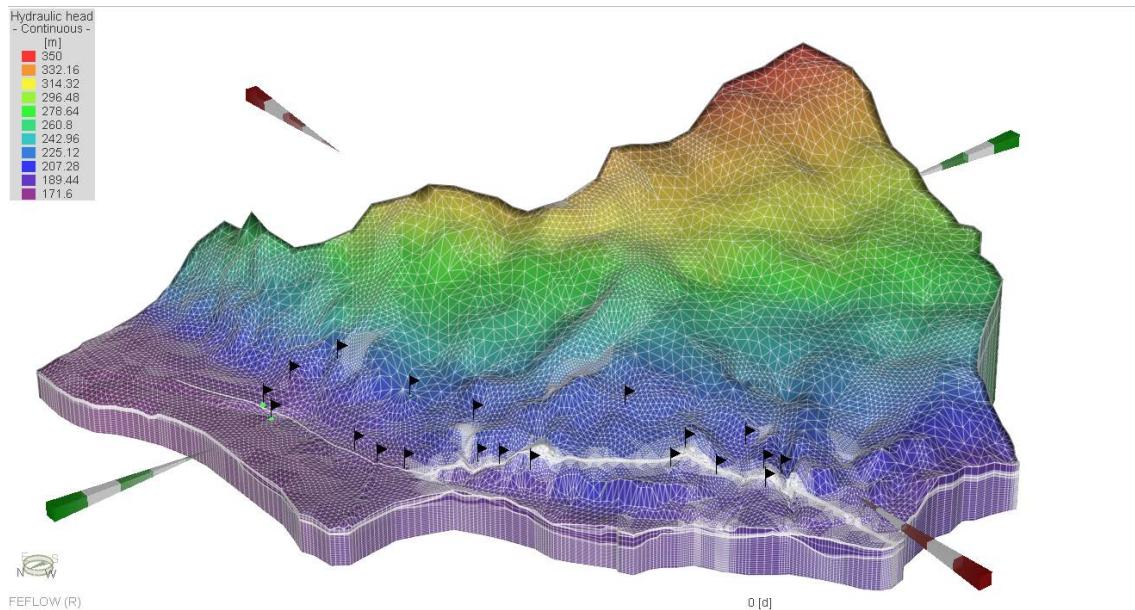


Figura 9.1-Vista 3D del modello con posizione dei punti di monitoraggio del set ridotto per la calibrazione

Nella successiva tabella Tabella 9.1, per il set parziale dei punti di misura sono riportati i valori misurati in campo ed i valori calcolati nei medesimi punti del modello numerico.

Come si può vedere il valore medio dei residui assoluti è pari a 1.3 m. Tale valore, vista la differenza di quote piezometriche ricostruite nel modello idrogeologico è ritenuta assolutamente accettabile.

ID	Quota piezom. misurata	Quota piezom. calcolata	Residuo	Residuo Assoluto
	(m s.l.m.)	(m s.l.m.)	(m)	(m)
IOM-MO-050	206.6	208.4	-1.8	1.8
IOM-VE-075(G)	218	217.4	0.6	0.6
IOM-VE-100	217.2	216.9	0.3	0.3
IOM-VE-105	185.2	186.0	-0.8	0.8
IOV-MO-060(G)	211.7	213.8	-2.1	2.1
IOV-VE-010	212.2	212.4	-0.2	0.2
B02 INCL	203.4	206.2	-2.8	2.8
B04	197	197.9	-0.9	0.9
B06	205.1	205.9	-0.8	0.8
B12	215.9	214.0	1.9	1.9
B09	204.6	202.9	1.7	1.7
B10	210.9	206.5	4.4	4.4
B16	196.5	197.6	-1.1	1.1
B19	200.5	197.5	3.0	3.0
B20	192.3	191.6	0.7	0.7
B23	185.7	185.4	0.3	0.3
B24	183.6	183.5	0.1	0.1
B26	185.6	185.1	0.5	0.5
B27	179.2	180.6	-1.4	1.4
B28	182.9	183.4	-0.5	0.5
Conteggio			20	
Ampiezza dell'intervallo dei dati misurati (m)			I	38.8
Deviazione standard dei residui (m)			RMS	1.69
Media dei residui (m)			Δ medio	0.1
Media dei residui assoluti (m)			Δ medio abs	1.3
Deviazione standard dei residui normalizzata (m)			NRMS	4.4%

Tabella 9.1- Calibratura del modello numerico. In tabella sono riportati le altezze piezometriche rilevate in campo e quelle calcolate dal modello numerico nelle medesime posizioni dei punti di controllo fisici. L'errore normalizzato, per la distribuzione di conducibilità idrauliche assegnata, è risultato inferiore al 5%.

In Figura 9.2 si riporta la retta di taratura del modello (generata in automatico dal software Feflow). Come è possibile osservare vi è un discreto accordo tra i valori misurati e quelli calcolati (che giacciono a cavallo della bisettrice del I° quadrante).

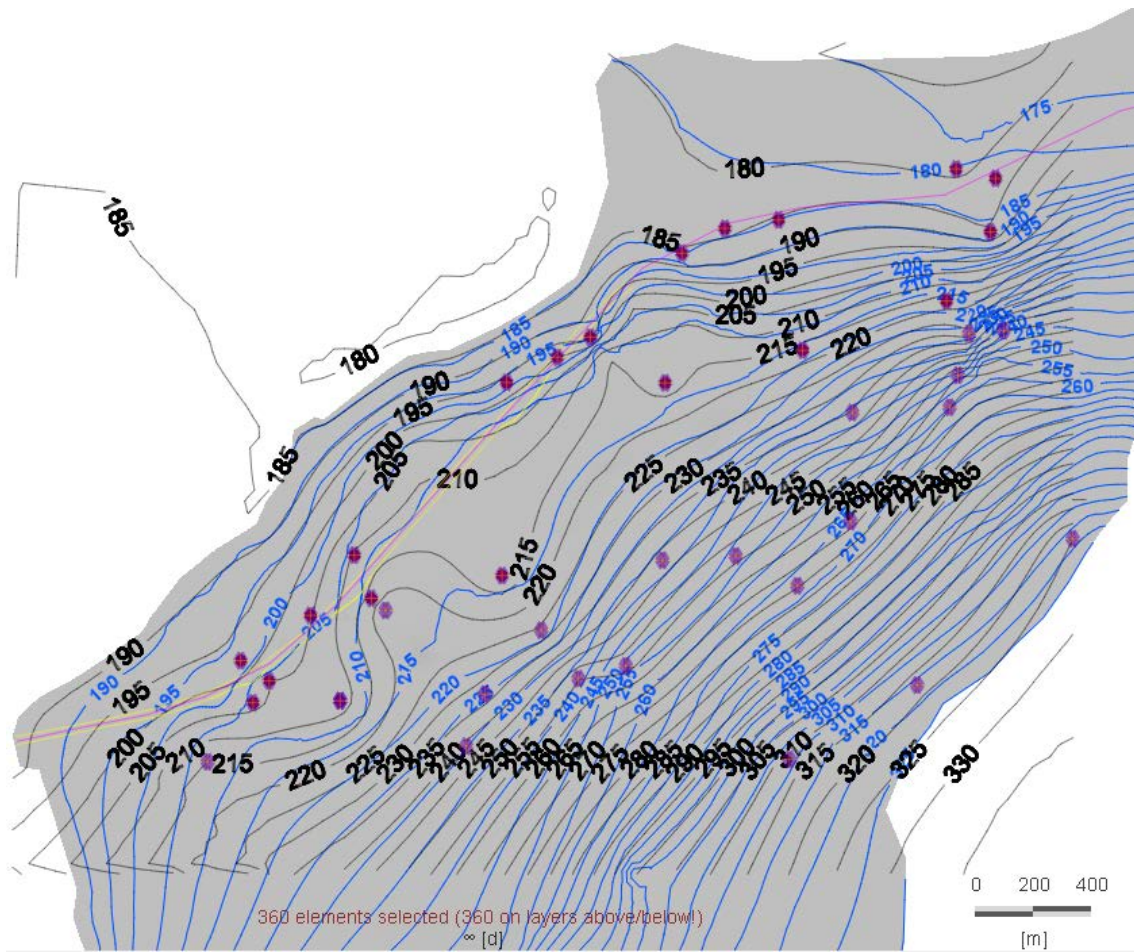


Figura 9.3- Soluzione del modello numerico in stato stazionario

10. VALUTAZIONE DELL'IMPATTO DATO DALLE OPERE DI SOSTEGNO SUL SISTEMA ACQUIFERO IN CONDIZIONI STAZIONARIE

10.1 GENERALITÀ

Come precedentemente illustrato, la finalità della modellazione numerica eseguita è quella di fornire un supporto tecnico al progetto delle opere di sostegno previste nei tratti in trincea, valutando gli effetti sul sistema acquifero dovuti alla realizzazione delle paratie di pali previste.

In particolare, sono stati valutati gli effetti dati dall'inserimento delle paratie di pali in termini di:

- innalzamento a monte delle opere e abbassamento a valle rispetto alla configurazione di falda indisturbata;
- estensione, sia a monte che a valle, della perturbazione data dall'elemento strutturale a bassa permeabilità rispetto alla configurazione di falda indisturbata.

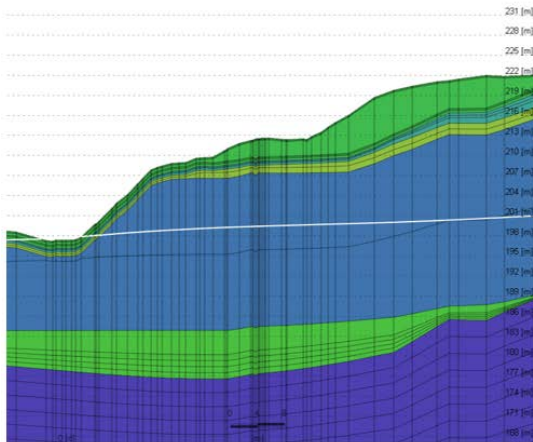
10.2 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

Nelle successive figure sono riportate a confronto, per le sezioni significative di ciascuna paratia di pali, l'andamento della superficie piezometrica in condizioni iniziali indisturbate ed in condizioni finali dopo l'inserimento dell'opera in condizioni stazionarie a regime.

In particolare:

- La Figura 10.1 mostra la soluzione del modello numerico di flusso per la sezione tipologica della Paratia per la Trincea T1 nelle due configurazioni ante e post operam, mentre la Figura 10.3 e la Figura 10.4 mostrano il medesimo confronto in planimetria;
- La Figura 10.2 mostra la soluzione del modello numerico di flusso per la sezione tipologica della Paratia per la Trincea T2 nelle due configurazioni ante e post operam, mentre la Figura 10.3 e la Figura 10.4 mostrano il medesimo confronto in planimetria;
- La Figura 10.5, la Figura 10.6 e la Figura 10.7 mostrano le soluzioni del modello numerico di flusso per le sezioni tipologiche 1, 2 e 3 della Paratia per la Trincea T3 nelle due configurazioni ante e post operam;
- La Figura 10.10 e la Figura 10.11 mostrano le soluzioni del modello numerico di flusso per le sezioni tipologiche 1 e 2 della Paratia per la Trincea T4 nelle due configurazioni ante e post operam;

Come è possibile osservare gli innalzamenti a monte delle paratie e gli abbassamenti a valle massimi sono dell'ordine dei 2-3 m ma in nessun caso portano a delle situazioni in cui il livello di falda a regime si avvicini al piano campagna.

Paratia Trincea T1 - Sezione
 Indisturbata ante - operam


Quota falda asse paratia +199.5m slm

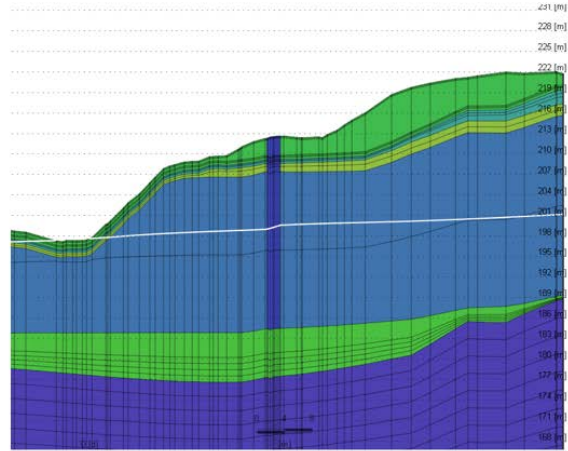
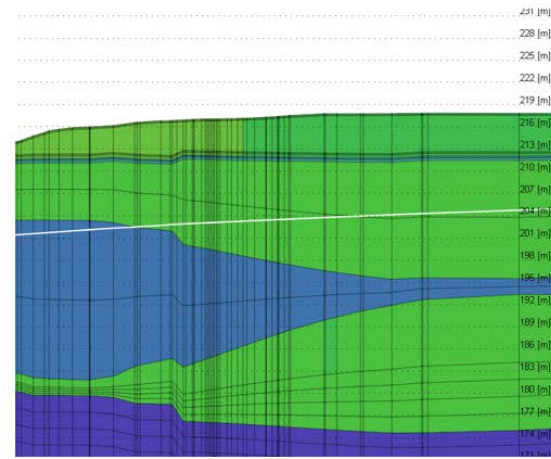
Post - operam

 Quota falda monte paratia +199.5m slm
 Quota falda valle paratia +198.8m slm

 Figura 10.1 – Soluzione del modello numerico di flusso per la Paratia Trincea T1
 Confronto Ante-operam – Post-operam

Paratia Trincea T2 - Sezione
 Indisturbata ante - operam


Quota falda asse paratia +203.0m slm

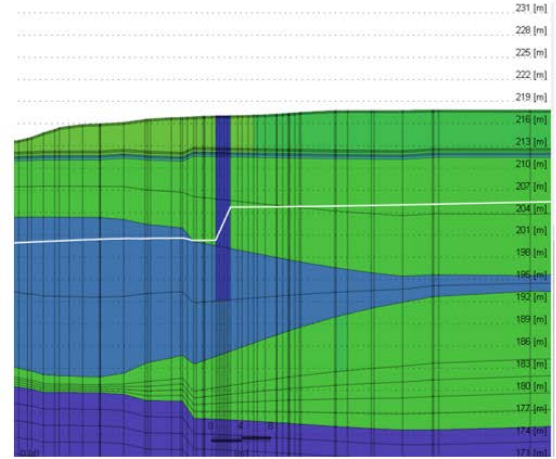
Post - operam

 Quota falda monte paratia +204.2m slm
 Quota falda valle paratia +200.2m slm

 Figura 10.2 – Soluzione del modello numerico di flusso per la Paratia Trincea T2
 Confronto Ante-operam – Post-operam

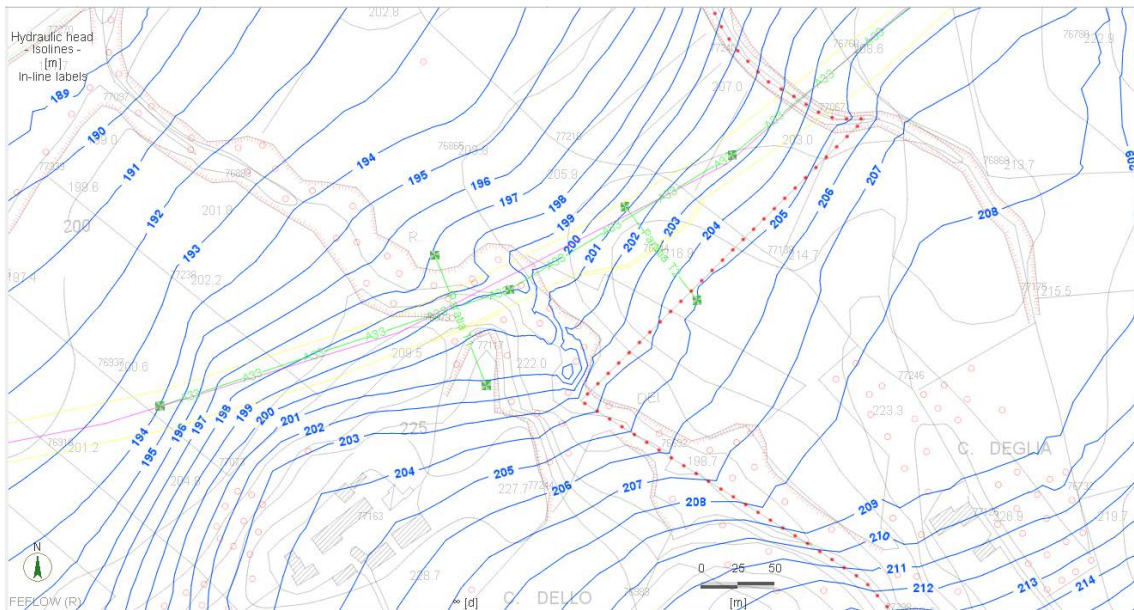


Figura 10.3 – Soluzione del modello numerico di flusso per le Paratie Trincee T1 e T2
Planimetria Ante-operam

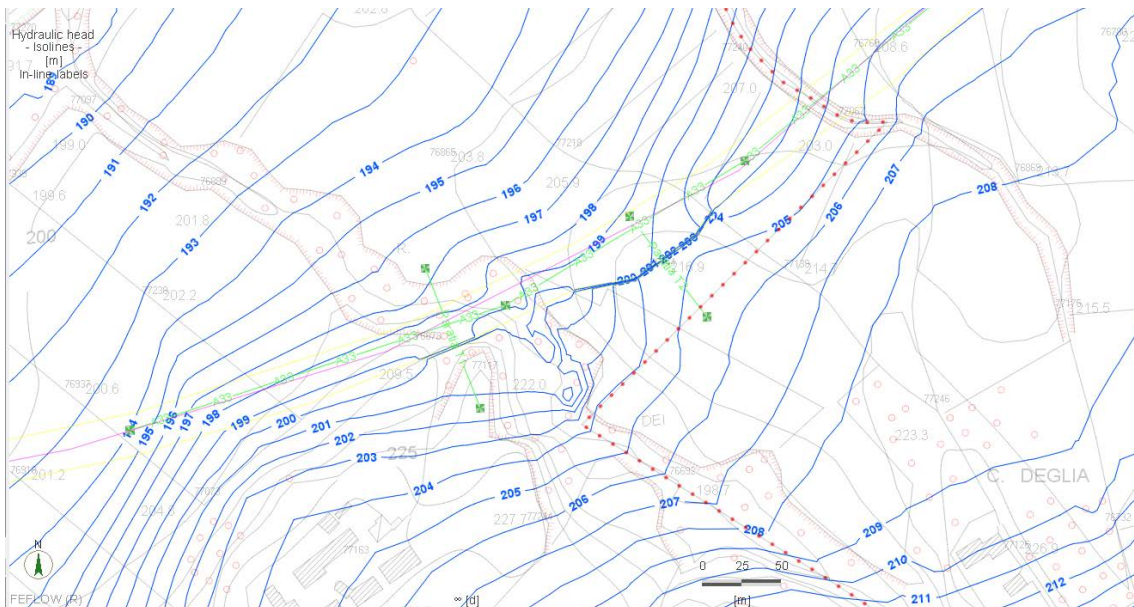
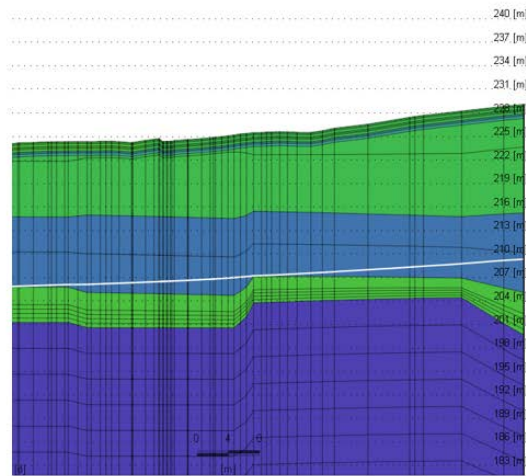


Figura 10.4 – Soluzione del modello numerico di flusso per le Paratie Trincee T1 e T2
Planimetria Post-operam

Paratia Trincea T3 – Sezione 1
 Indisturbata ante - operam


Quota falda asse paratia +206.6m slm

Post - operam

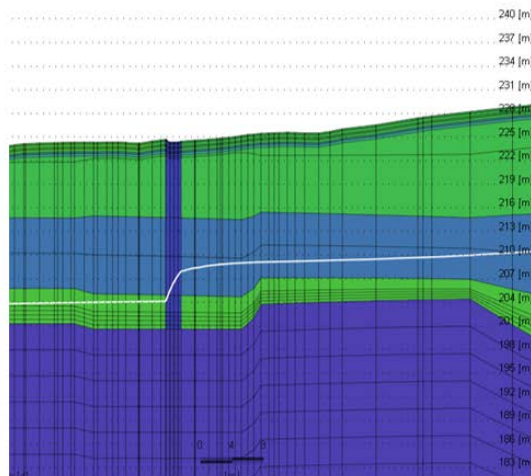
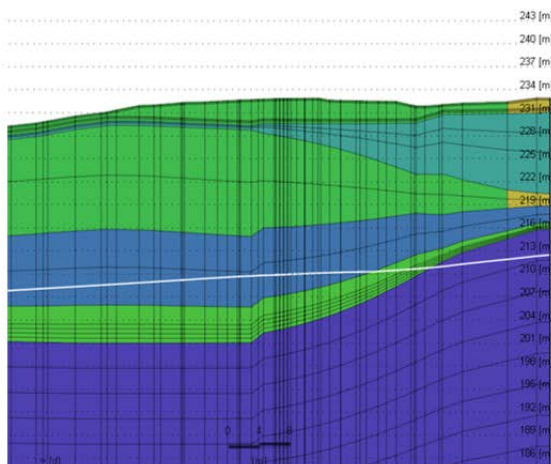

 Quota falda monte paratia +208.0m slm
 Quota falda valle paratia +204.0m slm

 Figura 10.5 – Soluzione del modello numerico di flusso per la Paratia Trincea T3-Sez1
 Confronto Ante-operam – Post-operam

Paratia Trincea T3 – Sezione 2
 Indisturbata ante - operam


Quota falda asse paratia +210.0m slm

Post - operam

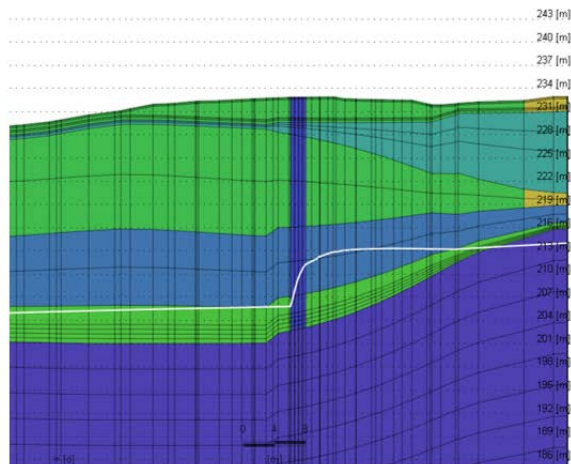
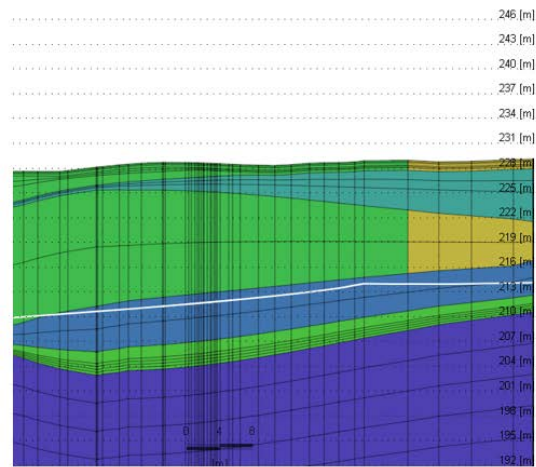

 Quota falda monte paratia +213.0m slm
 Quota falda valle paratia +205.7m slm

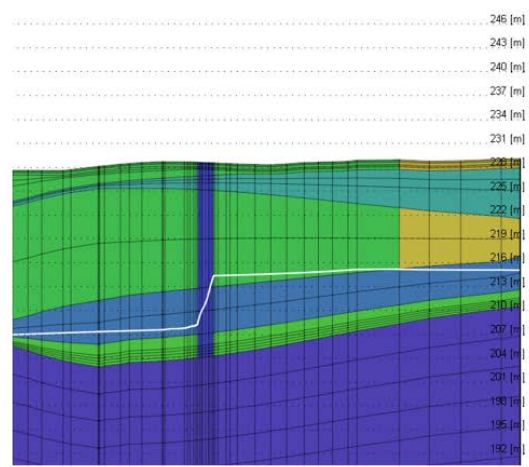
 Figura 10.6 – Soluzione del modello numerico di flusso per la Paratia Trincea T3-Sez2
 Confronto Ante-operam – Post-operam

Paratia Trincea T3 – Sezione 3
 Indisturbata ante - operam



Quota falda asse paratia +211.5m slm

Post - operam



Quota falda monte paratia +214.5m slm
 Quota falda valle paratia +208.0m slm

Figura 10.7 – Soluzione del modello numerico di flusso per la Paratia Trincea T3-Sez3
 Confronto Ante-operam – Post-operam

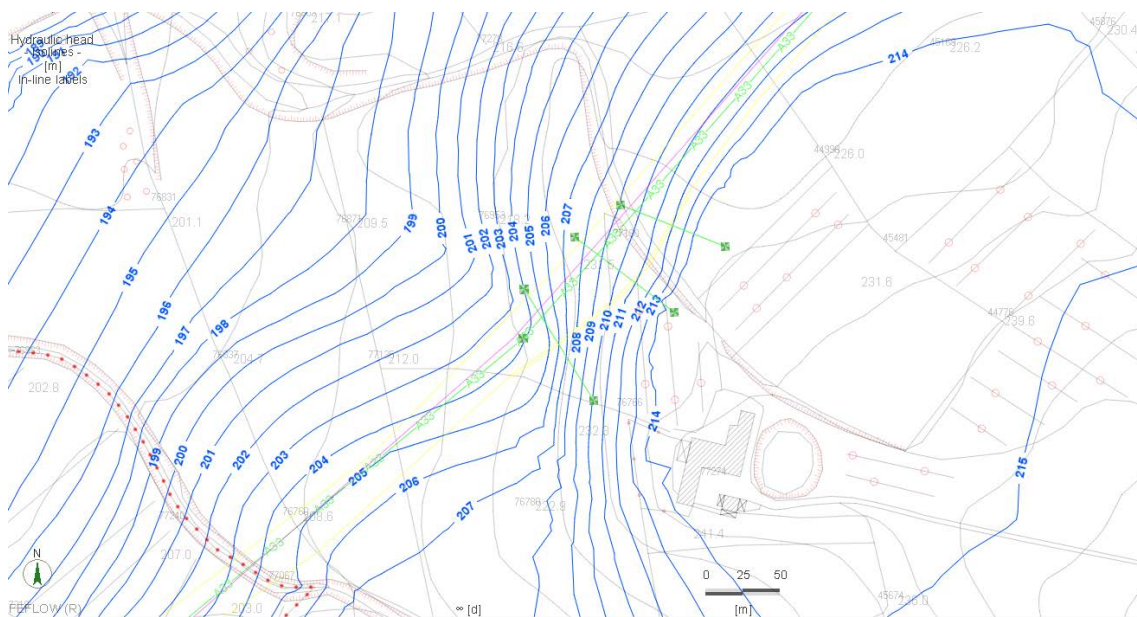


Figura 10.8 – Soluzione del modello numerico di flusso per le Paratia Trincea T3
 Planimetria Ante-operam

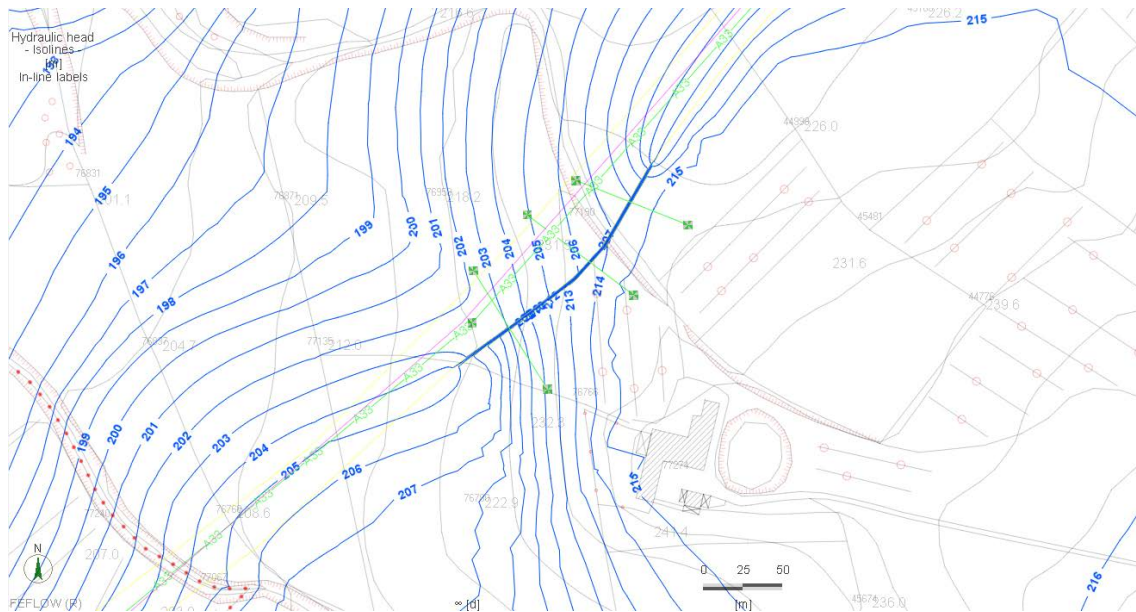


Figura 10.9 – Soluzione del modello numerico di flusso per le Paratia Trincea T3
 Planimetria Post-operam

Paratia Trincea T4 – Sezione 1
 Indisturbata ante - operam

Post - operam

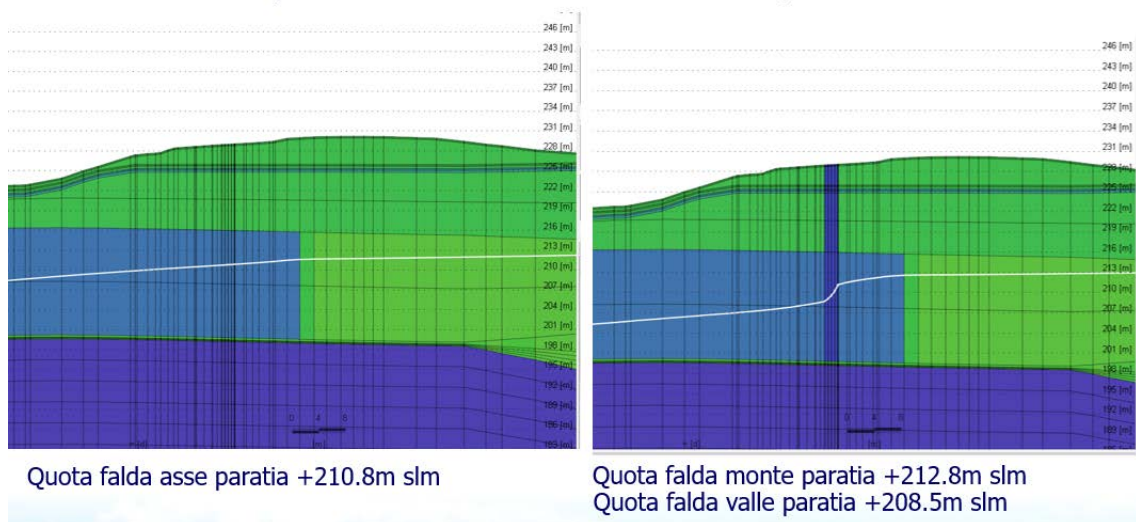
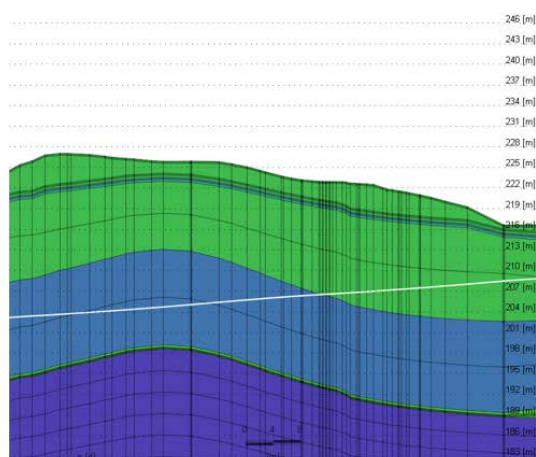


Figura 10.10 – Soluzione del modello numerico di flusso per la Paratia Trincea T4-Sez1
 Confronto Ante-operam – Post-operam

Paratia Trincea T4 – Sezione 2
 Indisturbata ante - operam


Quota falda asse paratia +206.6m slm

Post - operam

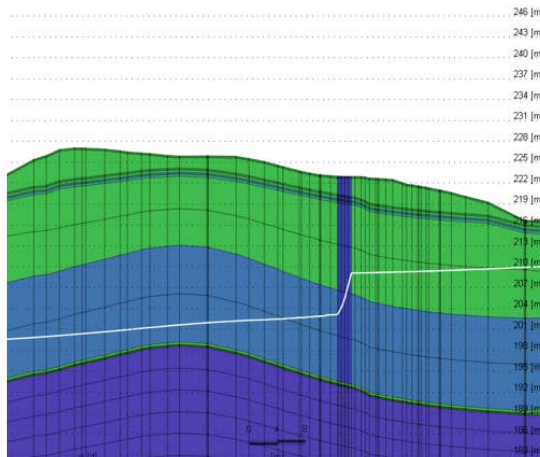
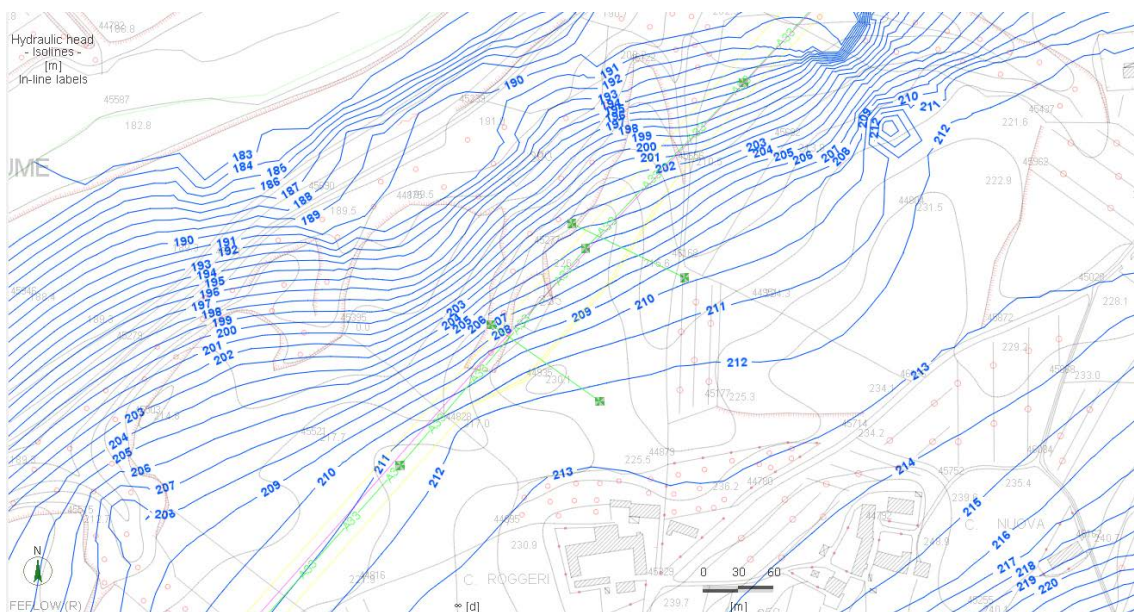

 Quota falda monte paratia +209.1m slm
 Quota falda valle paratia +203.1m slm

 Figura 10.11 – Soluzione del modello numerico di flusso per la Paratia Trincea T4-Sez2
 Confronto Ante-operam – Post-operam

 Figura 10.12 – Soluzione del modello numerico di flusso per le Paratia Trincea T4
 Planimetria Ante-operam

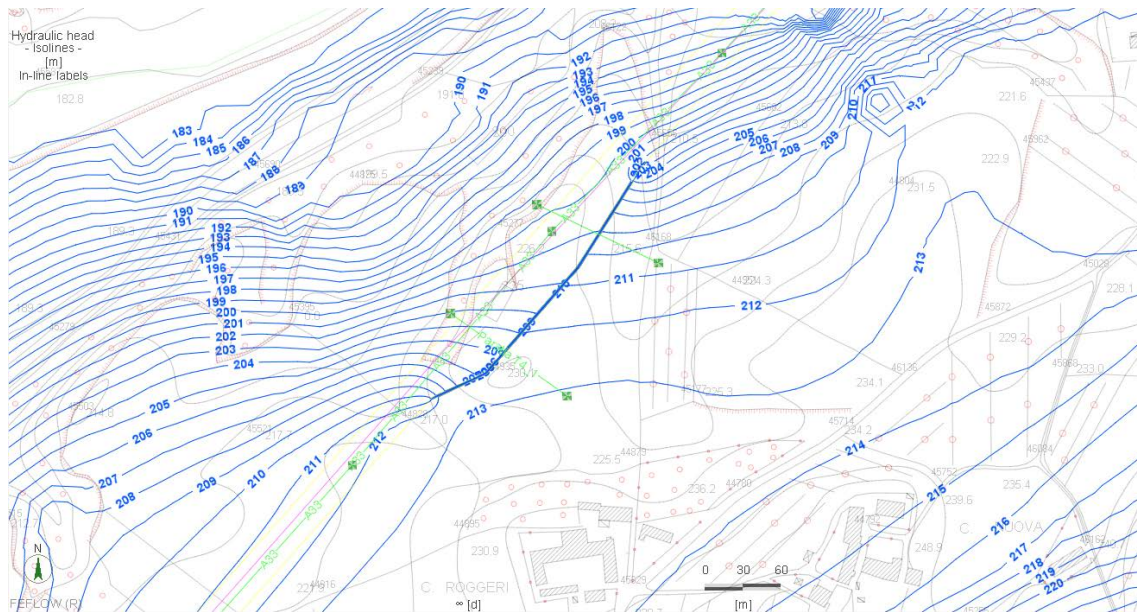


Figura 10.13 – Soluzione del modello numerico di flusso per le Paratia Trincea T4
 Planimetria Post-operam

Come si può vedere dalle rappresentazioni planimetriche gli effetti di perturbazione della falda dati dall'inserimento delle opere di sostegno delle trincee si avvertono sia a monte che a valle, in misura diversa in relazione alle diverse zone. Più in dettaglio:

- Per la paratia della Trincea T1 la perturbazione della piezometria rispetto alla condizione indisturbata si esaurisce entro una fascia di circa 20 – 30 m sia a monte che a valle;
- Per la paratia della Trincea T2 la perturbazione della piezometria rispetto alla condizione indisturbata si esaurisce entro una fascia di circa 50 – 60 m a monte ed entro una fascia di circa 40 – 50 m a valle;
- Per la paratia della Trincea T3 la perturbazione della piezometria rispetto alla condizione indisturbata si esaurisce entro una fascia di circa 300 – 350 m a monte ed entro una fascia di circa 150 – 200 m a valle;
- Per la paratia della Trincea T4 la perturbazione della piezometria rispetto alla condizione indisturbata si esaurisce entro una fascia di circa 350 – 400 m a monte ed entro una fascia di circa 200 – 250 m a valle;

11. VALUTAZIONE DELL'IMPATTO DATO DALLE OPERE DI SOSTEGNO SUL SISTEMA ACQUIFERO IN CONDIZIONI TRANSITORIE (EVENTI METEORICI SINGOLI)

11.1 GENERALITÀ

In questo capitolo vengono presentate le analisi, implementate utilizzando il modello Feflow sopra descritto, finalizzate alla valutazione delle risposte del sistema nei confronti di eventi meteorici singoli, quindi con durata limitata nel tempo, e di entità ordinaria o eccezionale.

Per poter effettuare questo tipo di analisi è necessaria la modellazione dei terreni quali mezzi porosi insaturi o con grado di saturazione variabile. Tale scelta di modellazione (adottata fin dalla fase di costruzione del modello proprio in previsione di questa applicazione) prevede che il terreno (mezzo poroso) possa variare le sue caratteristiche in termini di potenziale capillare ψ [m] e di permeabilità relativa k_r [-] in funzione del valore corrente di saturazione S .

La trattazione classica del moto dell'acqua in un mezzo non saturo è rappresentata dalla equazione di Richards, che descrive la dinamica del fenomeno applicando un'equazione di continuità ed un'equazione del moto; per risolvere tale equazione vengono introdotti i seguenti parametri quali caratteristiche dei materiali intesi come mezzi porosi con grado di saturazione variabile:

- **Potenziale capillare ψ [m].** L'equazione del carico piezometrico $h=z+p/\gamma$, che genericamente per un mezzo saturo è data dalla somma di un potenziale gravitazionale (z) e di un potenziale di pressione (p/γ con p pressione idrostatica e γ peso di volume del liquido), per un mezzo insaturo si può considerare in forma estesa includendo il fenomeno della capillarità; il potenziale di pressione, in questo caso assume un valore negativo a causa del lavoro che bisogna compiere contro le tensioni superficiali che contrastano il movimento dell'acqua. Tale grandezza, in questo specifico caso, viene definito potenziale capillare ψ . Il potenziale capillare ψ è legato oltre che alle caratteristiche del suolo anche al contenuto idrico del suolo insaturo che varia con la profondità. Per esprimere tale potenziale si ricorre all'altezza di colonna d'acqua equivalente, intesa come il carico di acqua necessario per produrre la stessa forza aspirante, pertanto questo parametro è espresso in unità di lunghezza (metri).
- **Permeabilità relativa k_r [-].** La permeabilità relativa è definita come rapporto tra la permeabilità effettiva e quella a saturazione unitaria: $k_r=k(s)/k(s=1)$

Generalmente è definito come saturo un mezzo poroso dove la fase liquida (tipicamente acqua) ha una saturazione pari al 100% e la fase gassosa (tipicamente aria) è definita stagnante. In termini idrologici, la differenza tra mezzo saturo e insaturo è schematizzata in Tabella 11.1 in funzione del valore corrente del grado di saturazione S , del potenziale capillare ψ e della permeabilità relativa k_r :

- un mezzo poroso insaturo è caratterizzato da valori di saturazione inferiori all'unità $S<1$, potenziale capillare negativa $\psi<0$ e valori di permeabilità relativa variabili k_r tra 0 e 1 in funzione di S .
- un mezzo poroso saturo è caratterizzato da grado di saturazione pari all'unità, potenziale capillare positiva $\psi>0$ e permeabilità relativa pari a $k_r=1$.

Esempi tipici di curve per le relazioni potenziale capillare e permeabilità relativa vs saturazione sono riportate in Figura 11.1.

	Mezzo insaturo	Mezzo saturo
--	-----------------------	---------------------

Saturazione	S	$S_r < S < 1$	$S = 1$
Pressione capillare	Ψ	$\psi < 0; \psi(S)$	$\psi \geq 0$
Permeabilità relativa	k_r	$0 < k_r(S) < 1$	$k_r = 1$

Tabella 11.1- Confronto tra mezzo saturo e mezzo insaturo in termini di pressione capillare e permeabilità relativa.

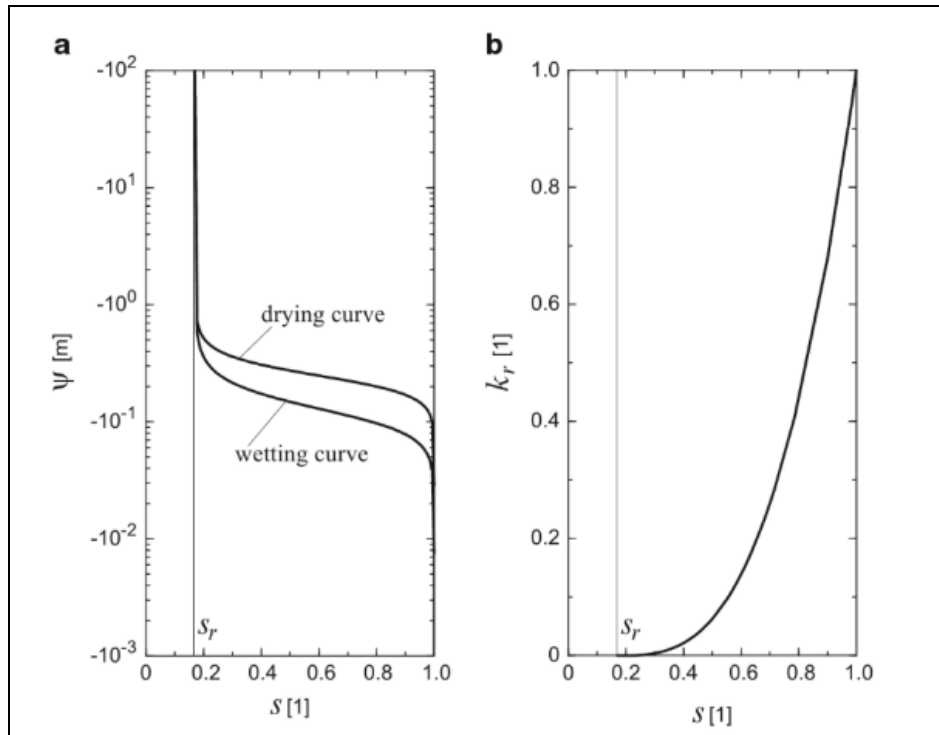


Figura 11.1 - Esempi di correlazioni tipiche tra grado di saturazione e capillarità (a) e permeabilità relativa (b)

A priori, non c'è differenza tra mezzi saturi o insaturi, la saturazione di un mezzo poroso rappresenta una variabile di stato dinamica che varia sia nello spazio che nel tempo.

Al fine di risolvere l'equazione di Richards sopra citata, Feflow prevede la possibilità per l'utente di scegliere due diverse possibilità per definire le relazioni di cui nella Figura 11.1: utilizzo di curve definite dall'utente (Spline) oppure utilizzo di curve definite per mezzo di modelli empirici.

Il metodo Spline (scelto in questa modellazione) costruisce le relazioni parametriche $\psi(S)$ e $k_r(S)$ a partire dai dati tabulari implementati dall'utente usando varie tecniche di interpolazione.

Nei paragrafi seguenti viene sinteticamente descritta la logica di attribuzione delle diverse Spline ai layer numerici associati a ciascuno degli orizzonti del sistema reale schematizzato nel Paragrafo 7.2.

Con riferimento al tipo di orizzonte rappresentato nel modello, in Tabella 11.2 sono elencate le curve Spline, rispettivamente saturation spline $\psi(S)$ e conductivity spline $k_r(S)$, implementate e le corrispondenti figure in cui sono riportate.

Tabella 11.2- Confronto tra mezzo saturo e mezzo insaturo in termini di pressione capillare e permeabilità relativa.

Tipo di orizzonte	Saturation spline $\psi(S)$ [ID]	Conducivity spline $kr(S)$ [ID]	Figure di riferimento
C1 – Coesivo 1	#3	#4	Figura 11.2
C2 – Coesivo 2	#2	#2	Figura 11.3
G - Granulare	#4	#3	Figura 11.4

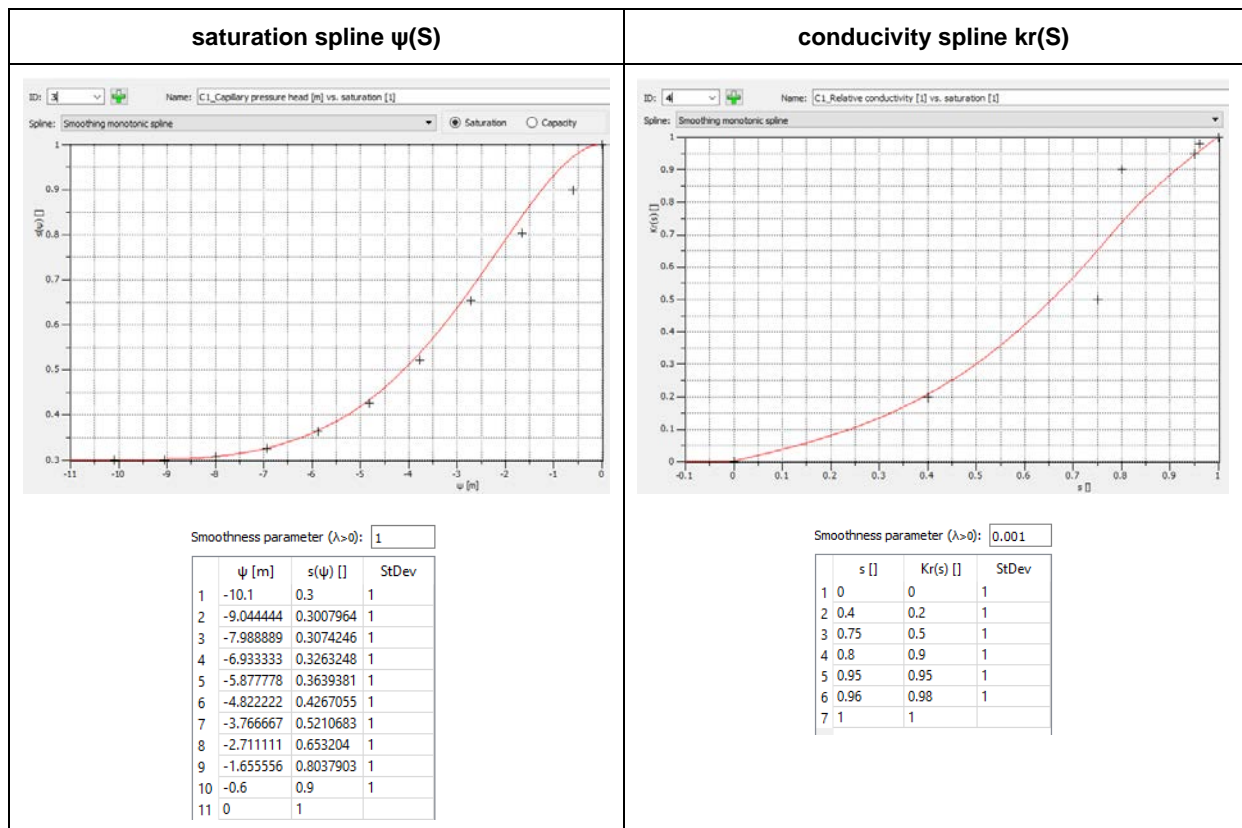


Figura 11.2 - Saturation spline e conducivity spline per lo strato C1

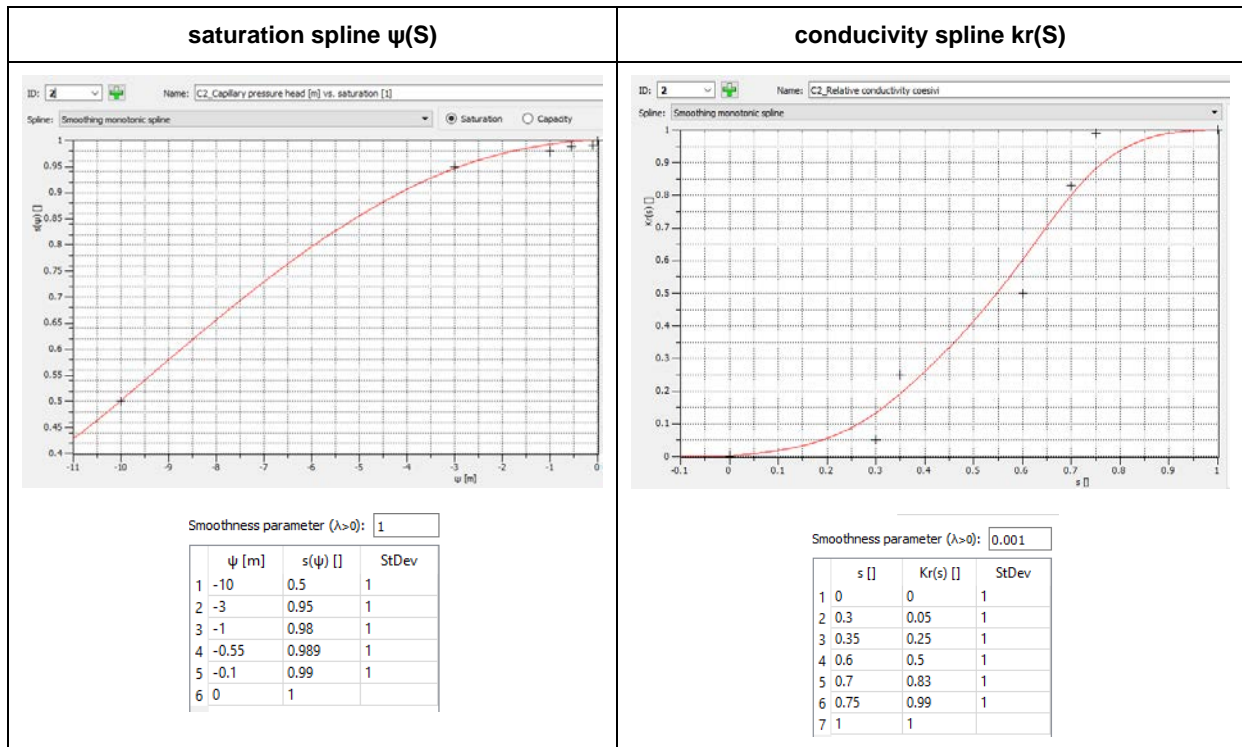


Figura 11.3 - Saturation spline e conductivity spline per lo strato C2

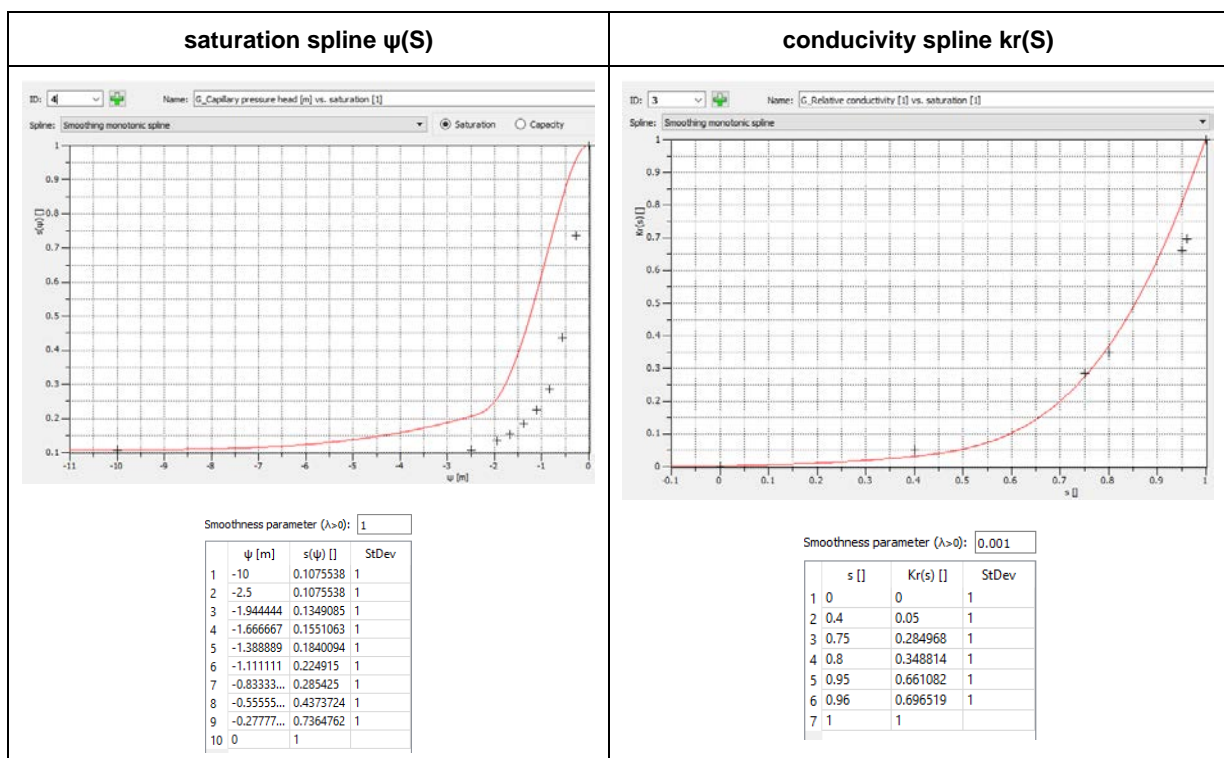


Figura 11.4 - Saturation spline e conductivity spline per lo strato G

11.2 PARAMETRIZZAZIONE DEL COMPORTAMENTO INSATURO DEI LAYER NUMERICI

Le seguenti figure forniscono una visione tridimensionale, strato per strato, della distribuzione verticale delle diverse classi di spline assegnate ai diversi layer numerici.

11.2.1. Orizzonte 1 – Depositi fini della valle del Tanaro e Coltri superficiali e detritiche di versante

In Figura 11.5 e in Figura 11.6 si riporta la distribuzione delle “saturation spline” e “conductivity spline” assegnate ai layer n. 1 ÷ 3.

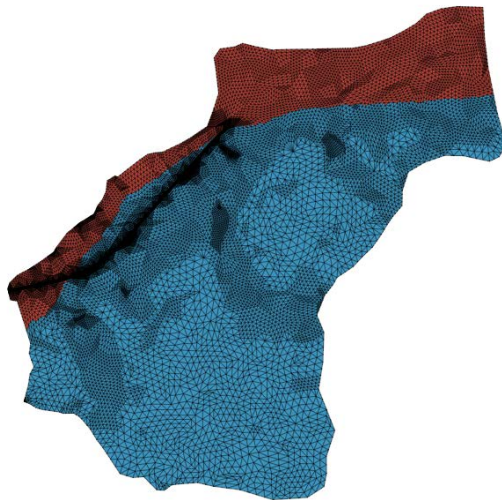


Figura 11.5 - Orizzonte 1. Distribuzione delle “saturation spline” assegnate ai Layer n. 1 – 3

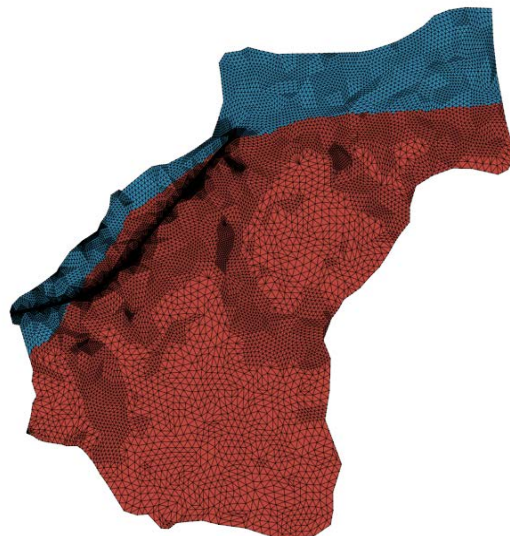


Figura 11.6 - Orizzonte 1. Distribuzione delle “conductivity spline” assegnate ai Layer n. 1 – 3

11.2.2. Orizzonte 2 – Depositi grossolani della valle del Tanaro e Coltri superficiali e detritiche di versante

In Figura 11.7 e in Figura 11.8 si riporta la distribuzione delle “saturation spline” e “conductivity spline” assegnate ai layer n. 4 ÷ 6.

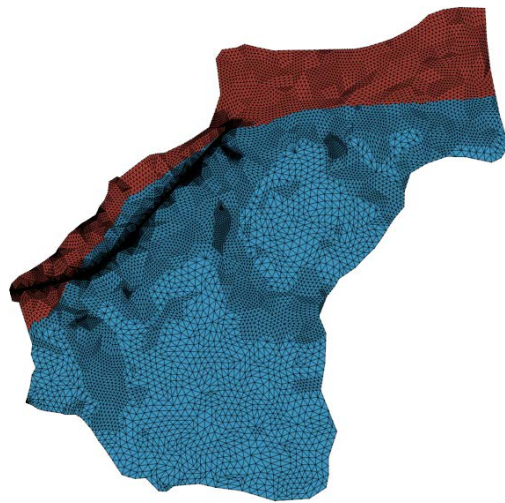


Figura 11.7- Orizzonte 2. Distribuzione delle “saturation spline” assegnate ai Layer n. 4 – 6

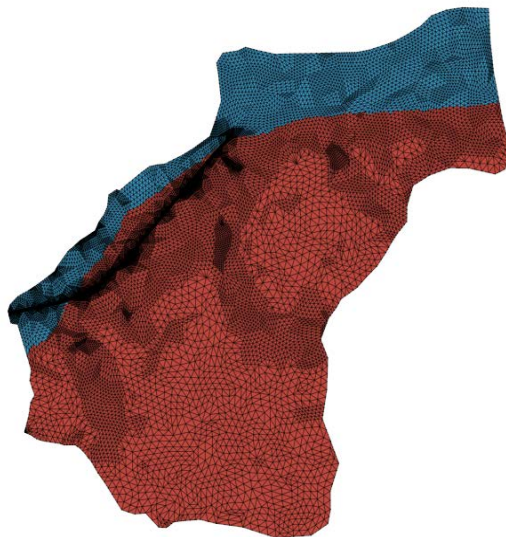


Figura 11.8- Orizzonte 2. Distribuzione delle “conductivity spline” assegnate ai Layer n. 4 – 6

11.2.3. Orizzonte 3 – Argille di Lugagnano

In Figura 11.9 e in Figura 11.10 si riporta la distribuzione delle “saturation spline” e “conductivity spline” assegnate ai layer n. 7 ÷ 9.

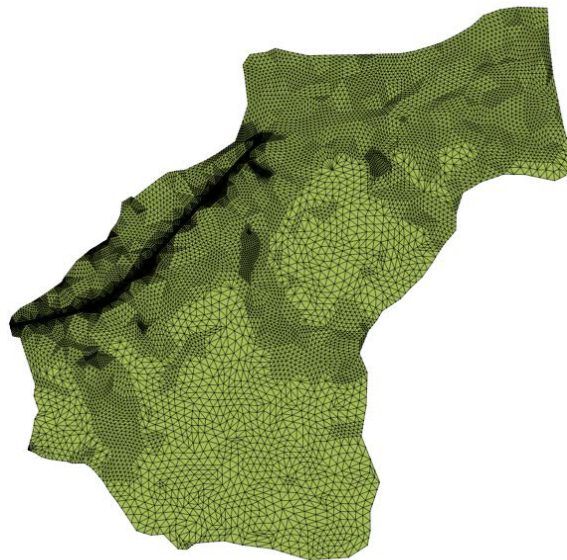


Figura 11.9- Orizzonte 3. Distribuzione delle “saturation spline” assegnate ai Layer n. 7 al n. 9.

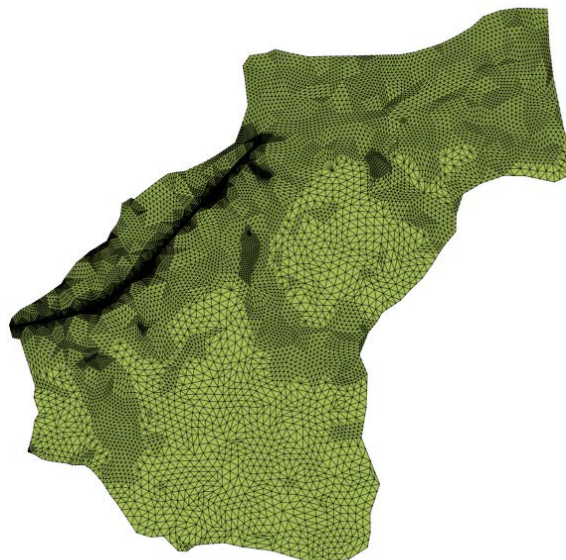


Figura 11.10- Orizzonte 3. Distribuzione delle “conductivity spline” assegnate ai Layer n. 7 al n. 9.

11.2.4. Orizzonte 4 – Formazione di Cassano - Spinola

In Figura 11.11 e in Figura 11.12 si riporta la distribuzione delle “saturation spline” e “conducivity spline” assegnate ai layer n. 10 e n. 11.

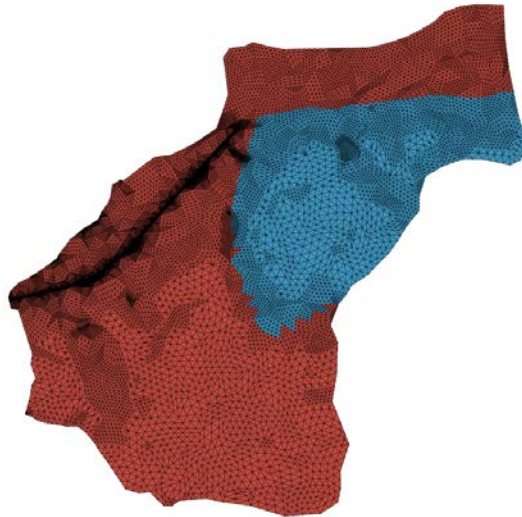


Figura 11.11- Orizzonte 4. Distribuzione delle “saturation spline” assegnate ai Layer n. 10 - 11

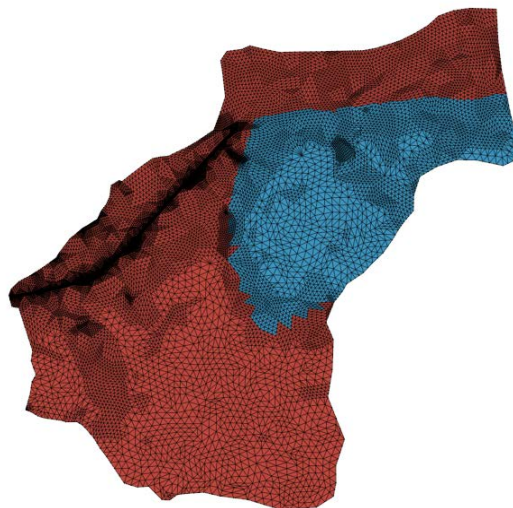


Figura 11.12- Orizzonte 4. Distribuzione delle “conducivity spline” assegnate ai Layer n. 10 - 11

11.2.5. Orizzonte 5 – Formazione Gessoso – Solfifera (porzione microcristallina)

In Figura 11.13 e in Figura 11.14 si riporta la distribuzione delle “saturation spline” e “conductivity spline” assegnate ai layer n. 12 e n. 13

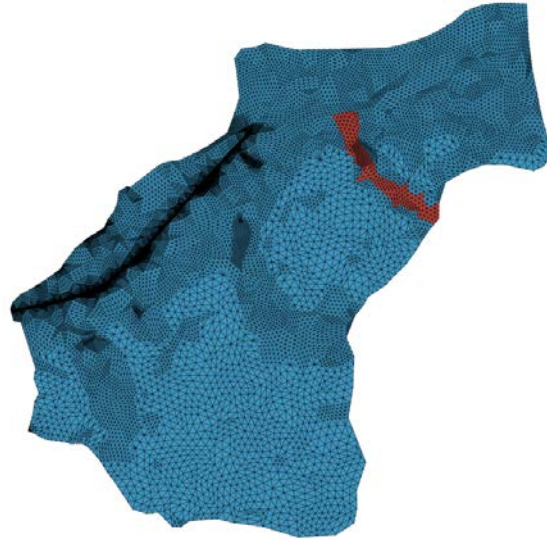


Figura 11.13 -Orizzonte 5. Distribuzione delle “saturation spline” assegnate ai Layer n. 12 - 13.

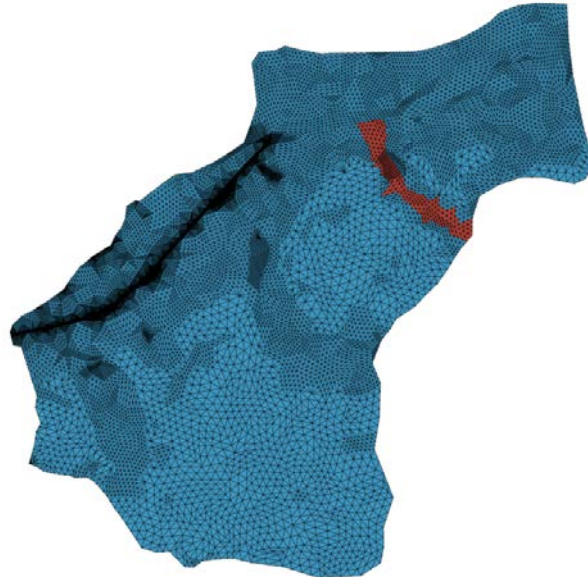


Figura 11.14 -Orizzonte 5. Distribuzione delle “conductivity spline” assegnate ai Layer n. 12 - 13.

11.2.6. Orizzonte 6 – Formazione Gessoso – Solfifera (porzione macrocristallina)

In Figura 11.15 e in Figura 11.16 si riporta la distribuzione delle “saturation spline” e “conductivity spline” assegnate ai layer n. 14 al n. 18.

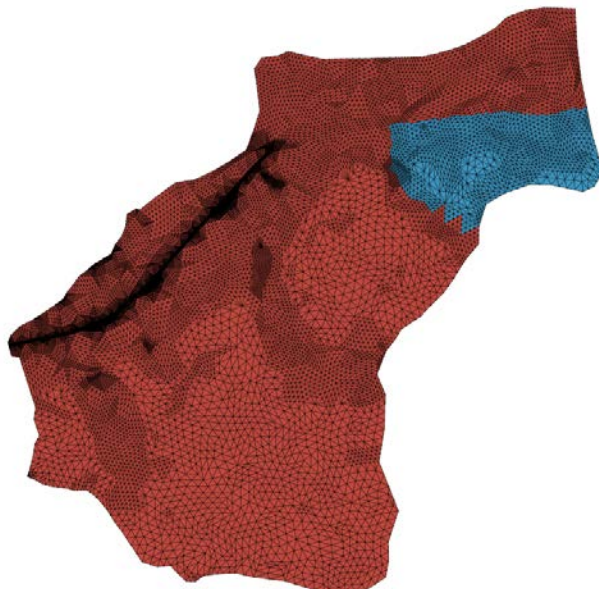


Figura 11.15 - Orizzonte 6. Distribuzione delle “saturation spline” assegnate ai Layer n. 14 – 18

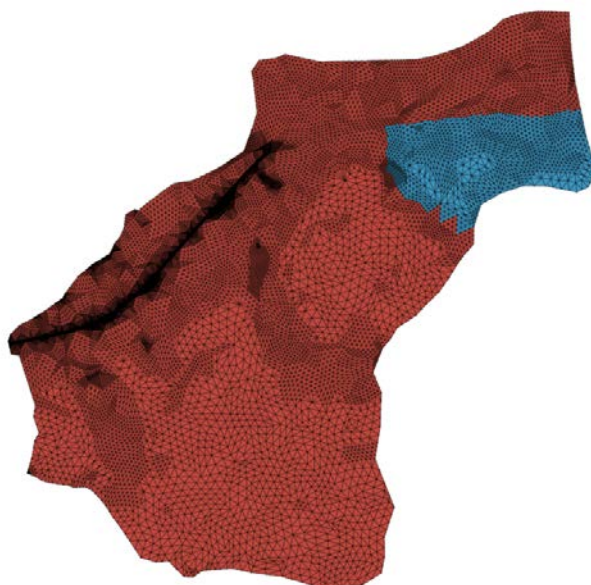


Figura 11.16 - Orizzonte 6. Distribuzione delle “conductivity spline” assegnate ai Layer n. 14 – 18

11.2.7. Orizzonte 7 – Formazione delle Marne di Sant’Agata Fossili

In Figura 11.17 e in Figura 11.18 si riporta la distribuzione delle “saturation spline” e “conductivity spline” assegnate ai layer n.. 19 al n. 38.

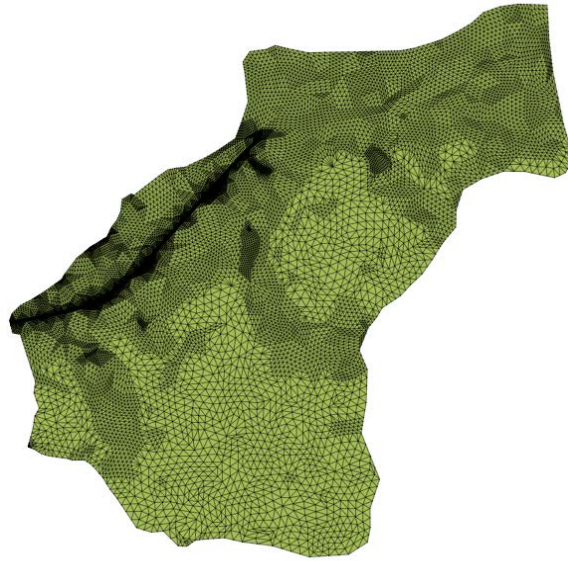


Figura 11.17 - Distribuzione delle “saturation spline” assegnate ai Layer n. 19 – 38

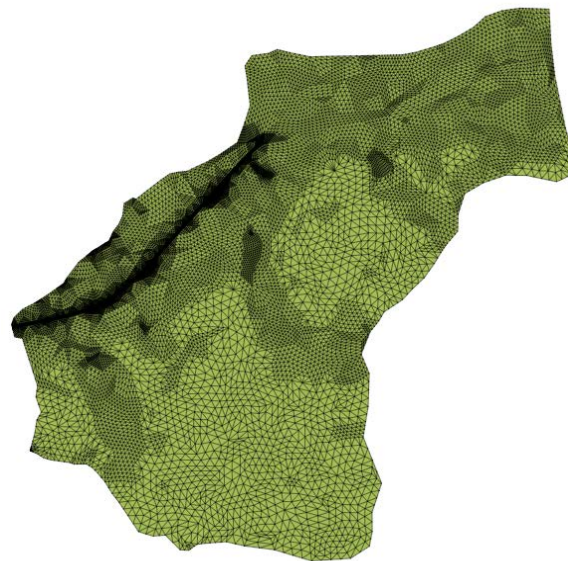


Figura 11.18 - Distribuzione delle “conductivity spline” assegnate ai Layer n. 19 – 38

11.3 EVENTO METEORICO

Come precipitazioni da implementare nel modello si sono scelti due eventi meteo uno di entità ordinaria ed uno eccezionale.

Al fine della modellazione della quantità d’acqua che si infiltra nel terreno, in analogia a quanto dettagliato nel paragrafo 6.5, si assume che solo il 30% della pioggia sia efficace ai fini dell’infiltrazione in accordo all’approccio “afflussi-deflussi”:

11.3.1. Evento di entità ordinaria

Con riferimento all'evento di intensità ordinaria, si è fatto riferimento all'evento che ha colpito la valle del Tanaro e che è stato registrato dalla stazione di Upega (Cuneo) nel gennaio 2018, tra il giorno 6 e il 10 circa. Il valore di pioggia cumulata in tale evento risulta pari a 200 mm e può essere considerato come rappresentativo degli eventi meteo tipici della zona.

L'intensità oraria massima registrata in tale evento è pari a 12 mm/h a cui corrisponde un valore di pioggia che si infiltra pari a 3.6 mm/h corrispondente al 30% dell'altezza sopra citata ($30\% \cdot 12 \text{ mm/h}$).

Nelle figure di seguito per l'evento ordinario sono riportati rispettivamente i grafici altezza pioggia/tempo registrati nella stazione sopra citata (Figura 11.19) e la rielaborazione secondo il criterio del 30% per la valutazione dell'aliquota di pioggia destinata all'infiltrazione e usata come input nel modello Feflow (Figura 11.20).

11.3.2. Evento di entità eccezionale (24 e 25 novembre 2016)

Con riferimento all'evento di intensità eccezionale, come evento di calcolo si è scelto quello registrato dalla stazione di Piaggia in occasione dell'alluvione che ha colpito il Piemonte il 24 e 25 novembre 2016.

In occasione di tale alluvione, per il bacino dell'alto Tanaro, il massimo apporto di precipitazioni si registra nel settore a monte del fiume (alto Tanaro), dove le piogge risultano praticamente incessanti per oltre quattro giorni.

Il volume di pioggia più gravoso è quello registrato nella stazione di Piaggia nel comune di Briga Alta, dove si sono raggiunti i 703.8 mm tra il 19 ed il 25; il dato è veramente notevole in quanto tale volume è poco più della pioggia che cade in un anno ad Asti (la media 1881-2013 è di 688 mm) e rappresenta più della metà delle precipitazioni che cadono annualmente in zona e pari a quattro volte circa l'evento ordinario descritto sopra.

Nelle figure di seguito per l'evento eccezionale sono riportati rispettivamente i grafici altezza pioggia/tempo registrati nella stazione sopra citata (Figura 11.21) e la rielaborazione secondo il criterio del 30% per la valutazione dell'aliquota di pioggia destinata all'infiltrazione e usata come input nel modello Feflow (Figura 11.22).

L'intensità oraria massima registrata in tale evento è pari a 33 mm/h a cui corrisponde un valore di pioggia che si infiltra pari a 9.9 mm/h corrispondente al 30% dell'altezza sopra citata ($30\% \cdot 33 \text{ mm/h}$).

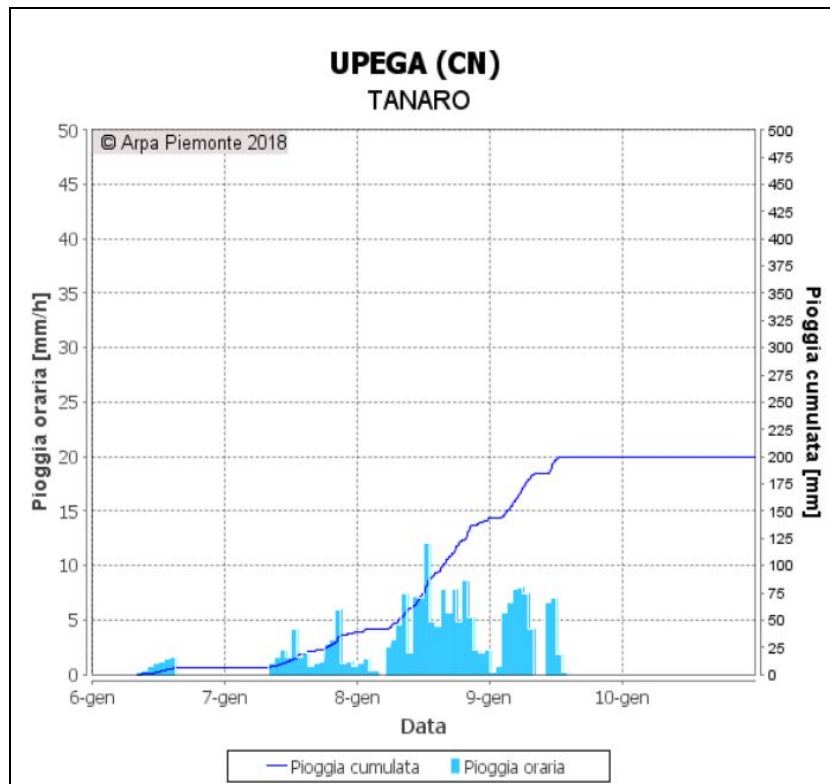


Figura 11.19 – Evento ordinario gennaio 2018 – Dato della stazione di Upega

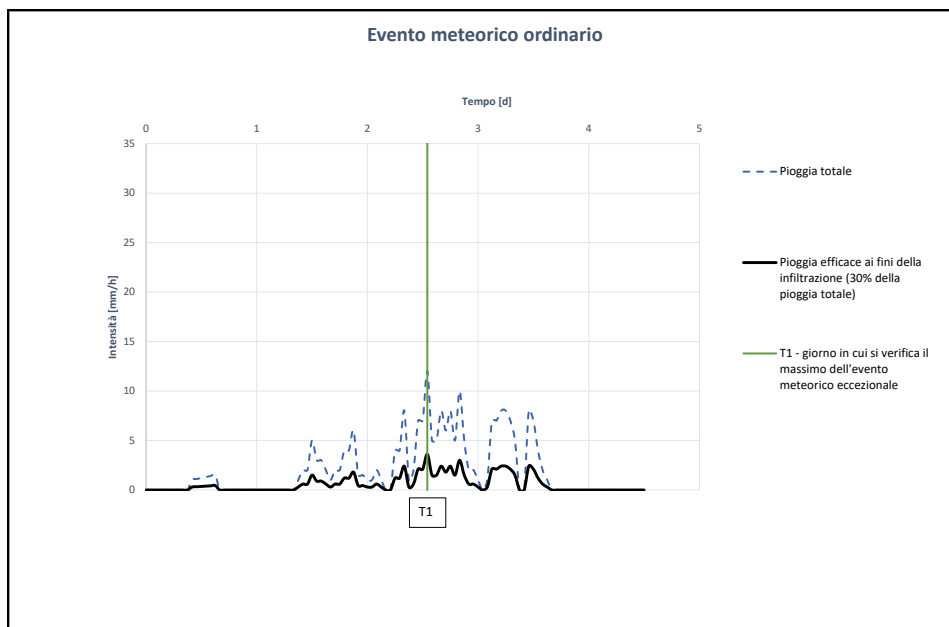


Figura 11.20 - Evento ordinario gennaio 2018 – Rielaborazione del dato della stazione di Upega

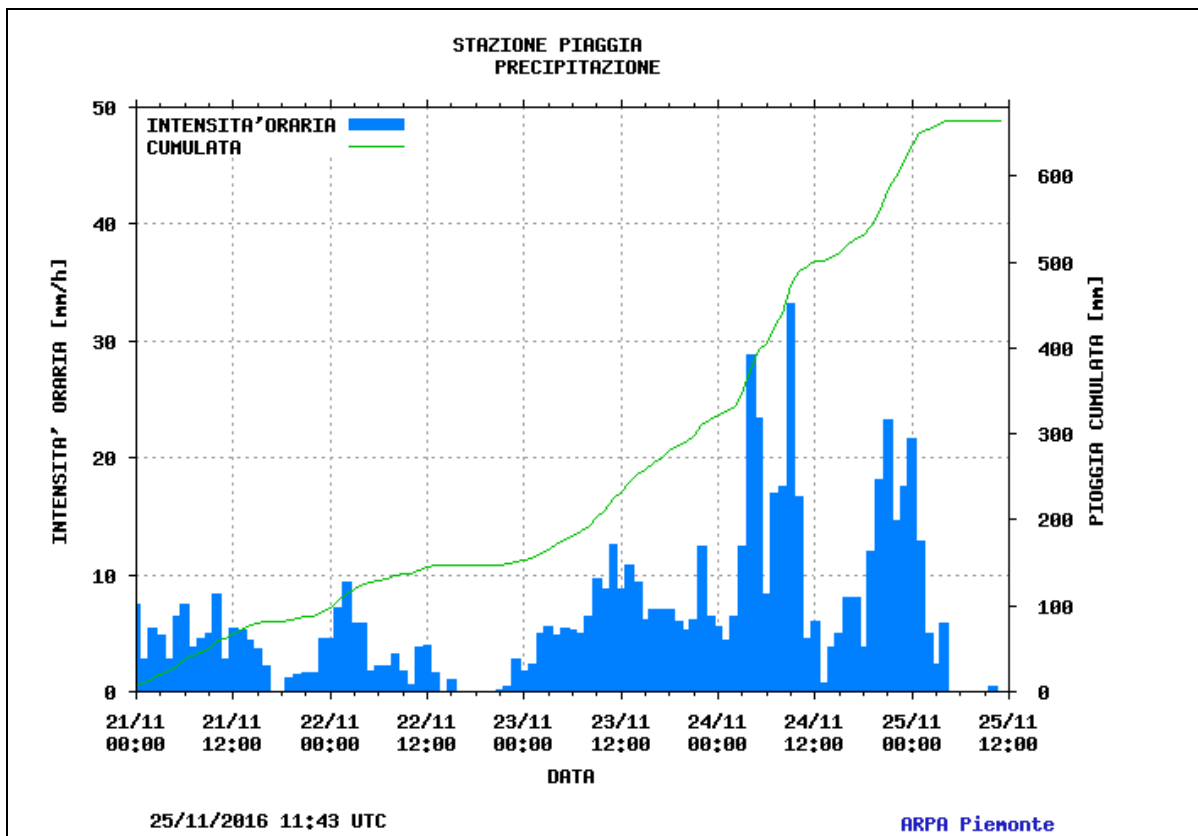


Figura 11.21 – Evento eccezionale novembre 2016 – Dato della stazione di Piaggia

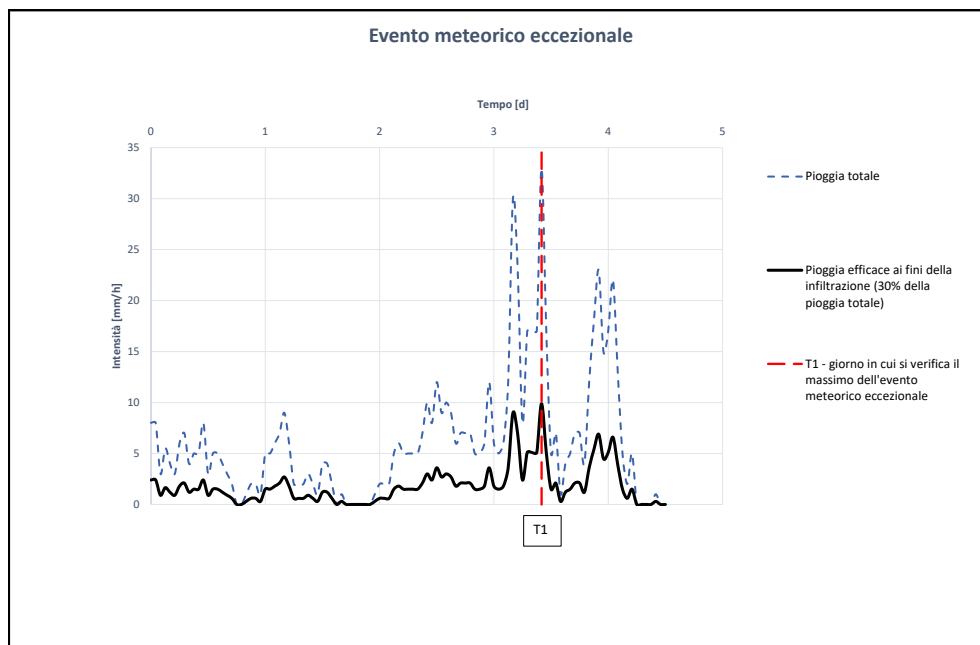


Figura 11.22 - Evento eccezionale novembre 2016 – Rielaborazione del dato della stazione di Piaggia

11.4 DESCRIZIONE DELL'ANALISI IMPLEMENTATE

Al fine di studiare la risposta del sistema agli eventi meteo di calcolo di durata limitata nel tempo, sono state implementate una serie di analisi di tipo transitorio con durata totale pari a 180 giorni.

In particolare le analisi, in riferimento alla presenza delle opere di sostegno, sono state di due tipi:

- analisi transitorie ante opera mirate alla ricostruzione della risposta del sistema nella sua configurazione in assenza delle opere di sostegno (nel seguito, modello ante-operam);
- analisi transitorie post opera mirate allo studio della risposta del sistema nella sua configurazione di progetto (con le opere realizzate) (nel seguito, modello post-operam).

Per entrambe le condizioni si sono valutati due diversi scenari:

- analisi con evento ordinario: implementazione dell'evento piovoso ordinario cui sopra come inflow in corrispondenza del layer superiore.
- analisi con evento eccezionale (24 e 25 novembre 2016): implementazione dell'evento piovoso eccezionale cui sopra come inflow in corrispondenza del layer superiore.

Le analisi oggetto di questo capitolo e sopra descritte sono state schematizzate nelle loro caratteristiche principali nella seguente Tabella 11.3.

Tabella 11.3- Tipologie di analisi oggetto di questo capitolo.

ANALISI	DURATA ANALISI	SCENARIO OPERE	EVENTO METEORICO
#1	180	ANTE OPERAM	ORDINARIO
#2	180	POST OPERAM	ORDINARIO
#3	180	ANTE OPERAM	ECCEZIONALE
#4	180	POST OPERAM	ECCEZIONALE

11.5 CONDIZIONI AL CONTORNO

Quale set di condizioni al contorno, si è adottato quanto sopra specificato nel capitolo 8.

11.6 CONDIZIONI INIZIALI

Quale set di condizioni iniziali è stato inizialmente assegnato un set di valori del carico idraulico con le seguenti caratteristiche:

- per il modello ante-operam è stato utilizzato il carico idraulico ottenuto dalle analisi stazionarie di calibrazione (vedi capitolo 9, Figura 9.3)

- Per il modello post-operam è stato utilizzato il livello di falda ottenuto dalle analisi del sistema in equilibrio in presenza delle opere di sostegno di cui al paragrafo 10.2, Figura 10.3 e Figura 10.4.

11.7 RISULTATO DELLE SIMULAZIONI

Per le analisi elencate e descritte sopra (Tabella 11.3), si riportano i risultati ottenuti in termini di carico idraulico e livelli piezometrici.

11.7.1. Analisi #1: scenario ante operam – evento meteorico ordinario

Per lo scenario ante-operam (in assenza di opere di sostegno) e per l'evento meteorico ordinario descritto al paragrafo 11.3.1, nelle successive figure sono riportate a confronto l'andamento della superficie piezometrica in condizioni iniziali indisturbate e nelle condizioni riferite ai diversi step temporali di calcolo.

In Figura 11.23, Figura 11.24 e in Figura 11.25, con riferimento all'acquifero dei gessi (cfr. Par. 5.2), si riporta la soluzione del modello numerico in termini di quote piezometriche (riferite al livello medio del mare) riferite a tre diversi step di calcolo ritenuti significativi ($t_1=5$ giorni – fine evento meteorico, $t_2=60$ giorni e $t_3=180$ giorni).

In tutte le figure elencate sopra per confronto sono riportate in azzurro chiaro le curve di livello del carico idraulico nella sua condizione iniziale (per maggiore dettaglio vedi 11.6).

Per gli stessi step temporali si riporta in Figura 11.26, in Figura 11.27 e in Figura 11.28 l'andamento della linea di falda in una sezione ritenuta significativa. Per confronto in Figura 11.29 è riportato l'andamento della falda nella medesima sezione nelle condizioni iniziali (prima dell'evento meteorico).

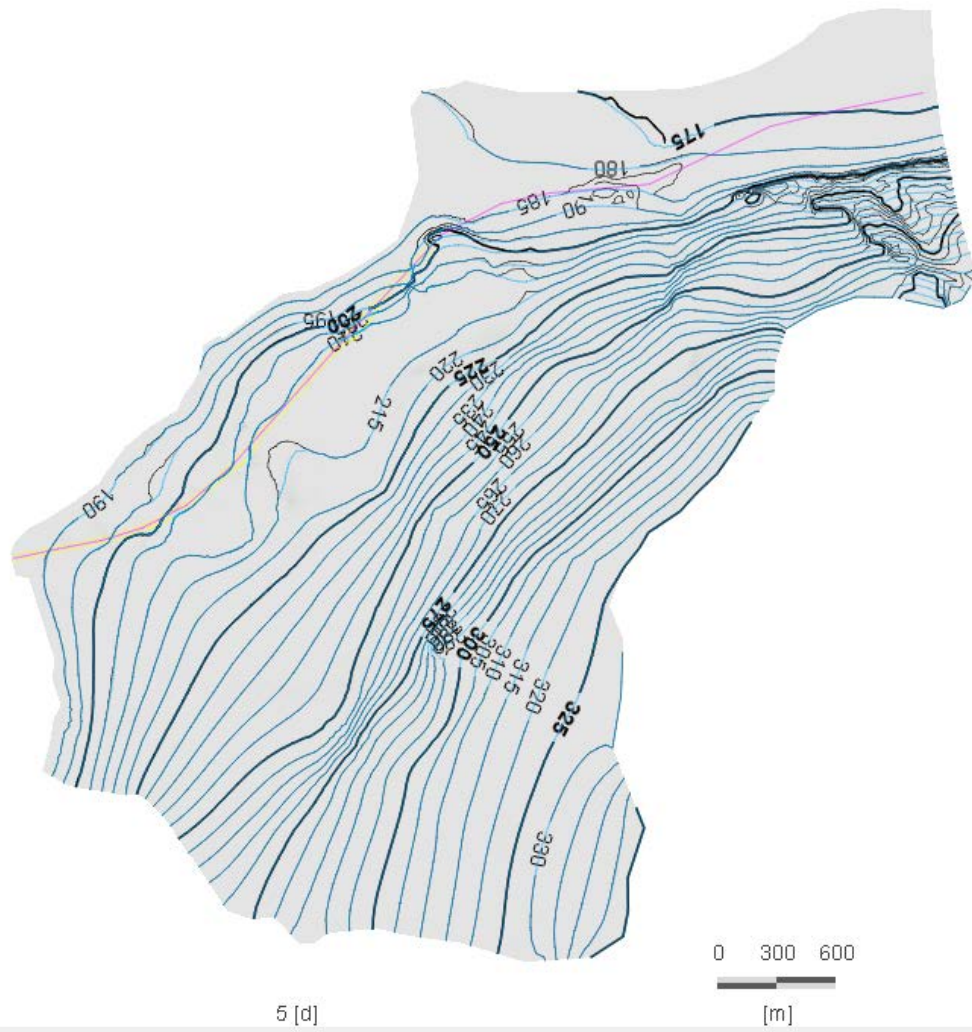


Figura 11.23- Analisi #1 - Soluzione del modello numerico al tempo t1=5 giorni - planimetria



Figura 11.24- Analisi #1 - Soluzione del modello numerico al tempo $t_2=60$ giorni planimetria

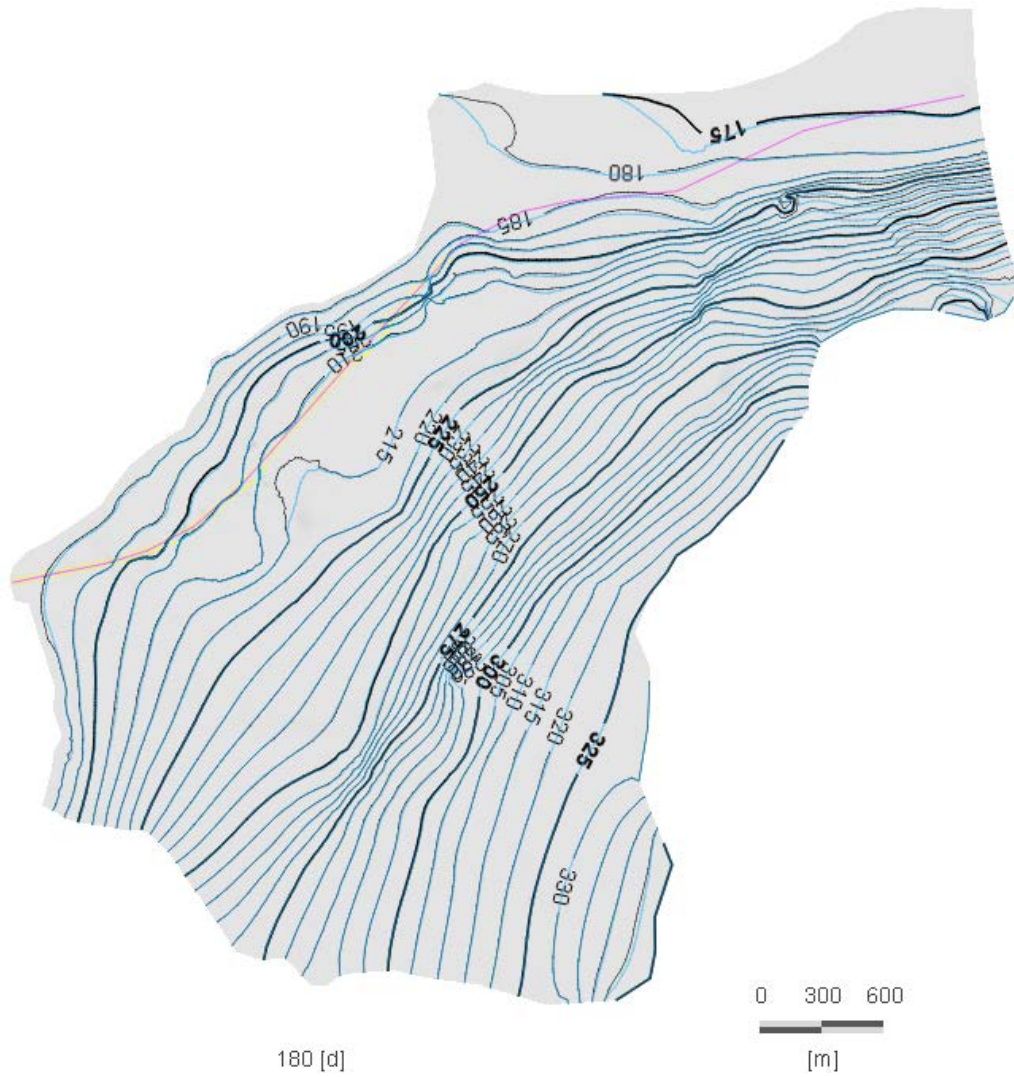


Figura 11.25- Analisi #1 - Soluzione del modello numerico al tempo $t_3=180$ giorni planimetria

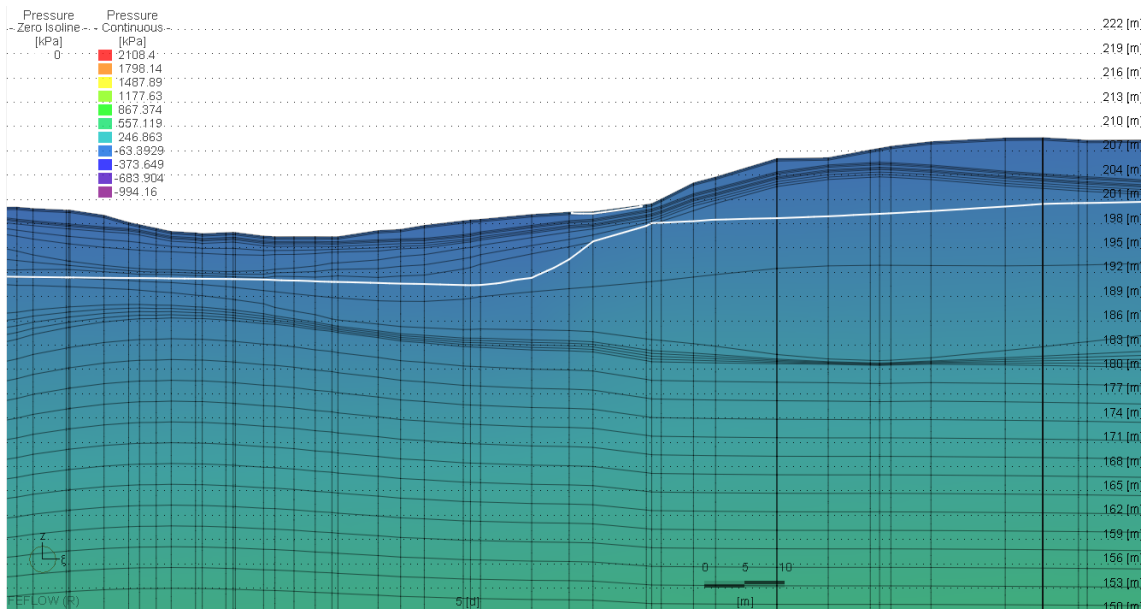


Figura 11.26-- Analisi #1 - Soluzione del modello numerico al tempo t1=5 giorni-sezione

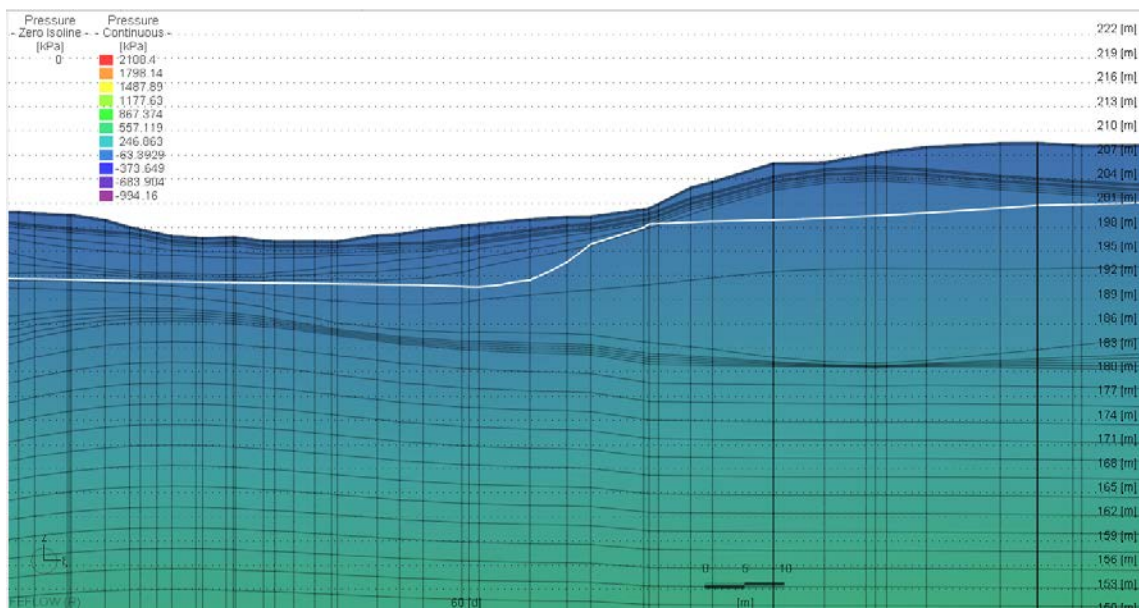


Figura 11.27- Analisi #1 - Soluzione del modello numerico al tempo t2=60 giorni-sezione

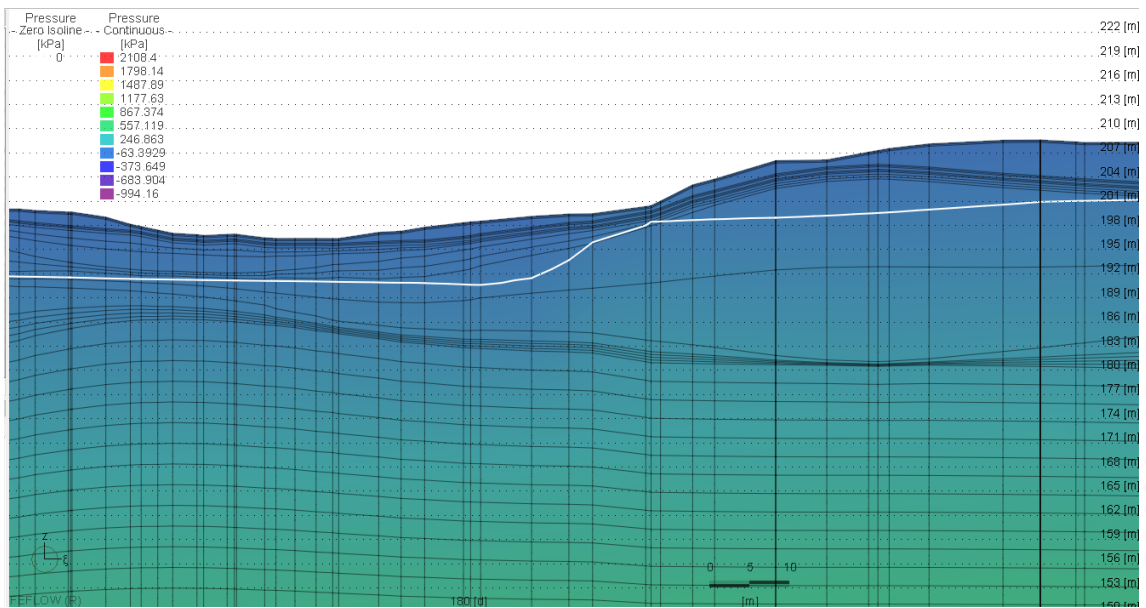


Figura 11.28- Analisi #1 - Soluzione del modello numerico al tempo $t_3=180$ giorni-sezione

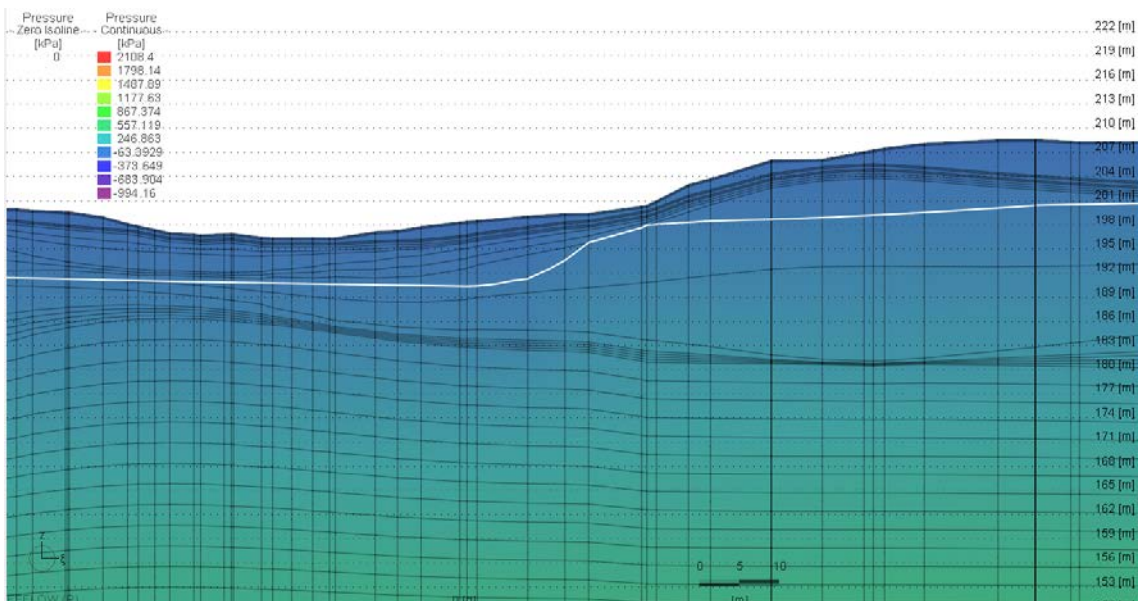


Figura 11.29- Soluzione del modello numerico al tempo $t_0=0$ giorni-sezione

11.7.2. Analisi #2: scenario ante operam – evento meteorico eccezionale (24 e 25 novembre 2016)

Per lo scenario ante-operam (in assenza di opere di sostegno) e per l'evento meteorico eccezionale descritto al paragrafo 11.3.2, nelle successive figure sono riportate a confronto l'andamento della superficie piezometrica in condizioni iniziali indisturbate e nelle condizioni riferite ai diversi step temporali di calcolo.

In Figura 11.30, in Figura 11.31 e in Figura 11.32 con riferimento all'acquifero dei gessi (cfr. Par. 5.2), si riporta la soluzione del modello numerico in termini di quote piezometriche (riferite al livello medio del mare) riferite a tre diversi step di calcolo ritenuti significativi ($t_1=5$ giorni – fine evento meteorico, $t_2=60$ giorni e $t_3=180$ giorni).

In tutte le figure elencate sopra per confronto sono riportate in azzurro chiaro le curve di livello del carico idraulico nella sua condizione iniziale (per maggiore dettaglio vedi 11.6).

Per gli stessi step temporali si riporta in Figura 11.33, Figura 11.35 e in Figura 11.36 l'andamento della linea di falda in una sezione ritenuta significativa. Alla Figura 11.34 è mostrato l'andamento della saturazione in corrispondenza della zona in cui a causa dell'evento meteorico eccezionale si verifica il formarsi di una falda sospesa.

Per confronto in Figura 11.29 è riportato l'andamento della falda nella medesima sezione nelle condizioni iniziali (prima dell'evento meteorico).



Figura 11.30- Analisi #2 - Soluzione del modello numerico al tempo t1=5giorni - planimetria

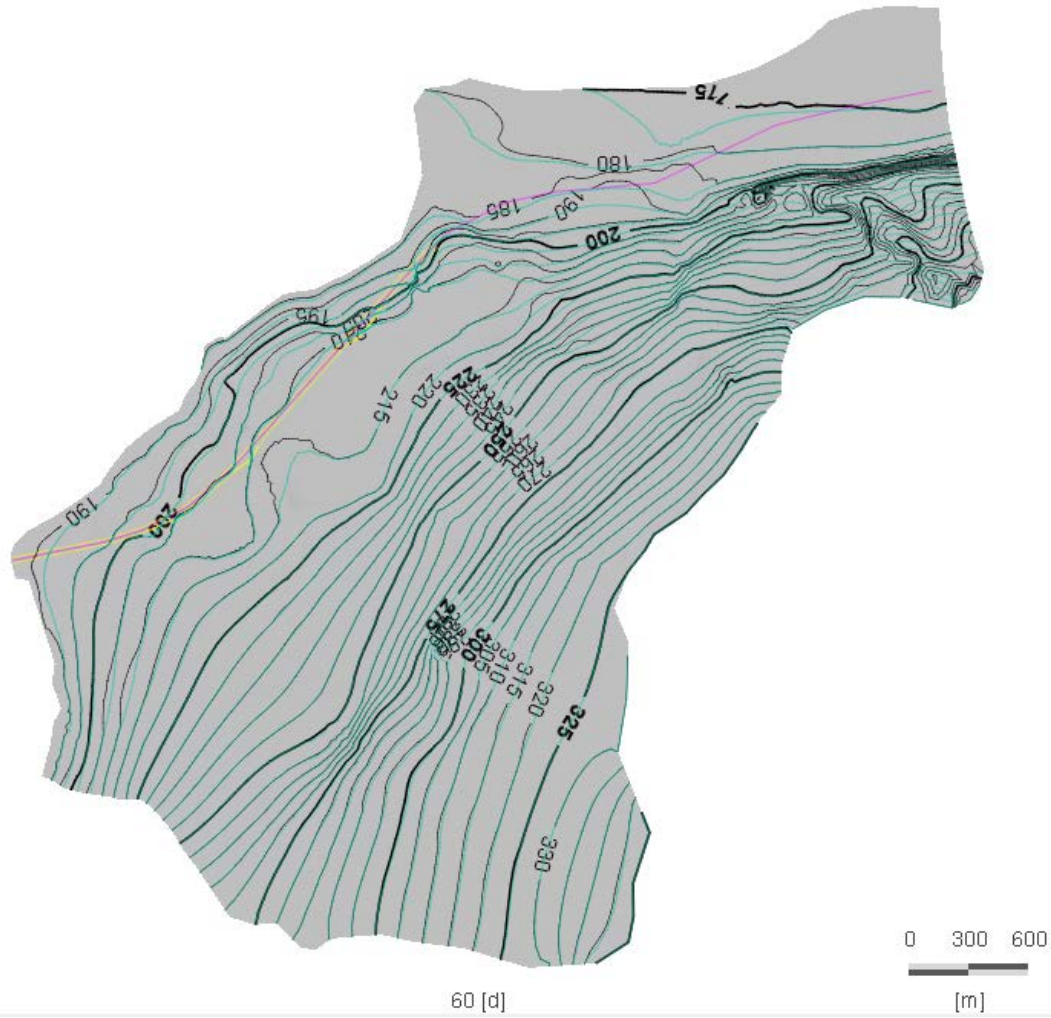


Figura 11.31- Analisi #2 - Soluzione del modello numerico al tempo t2=60giorni planimetria

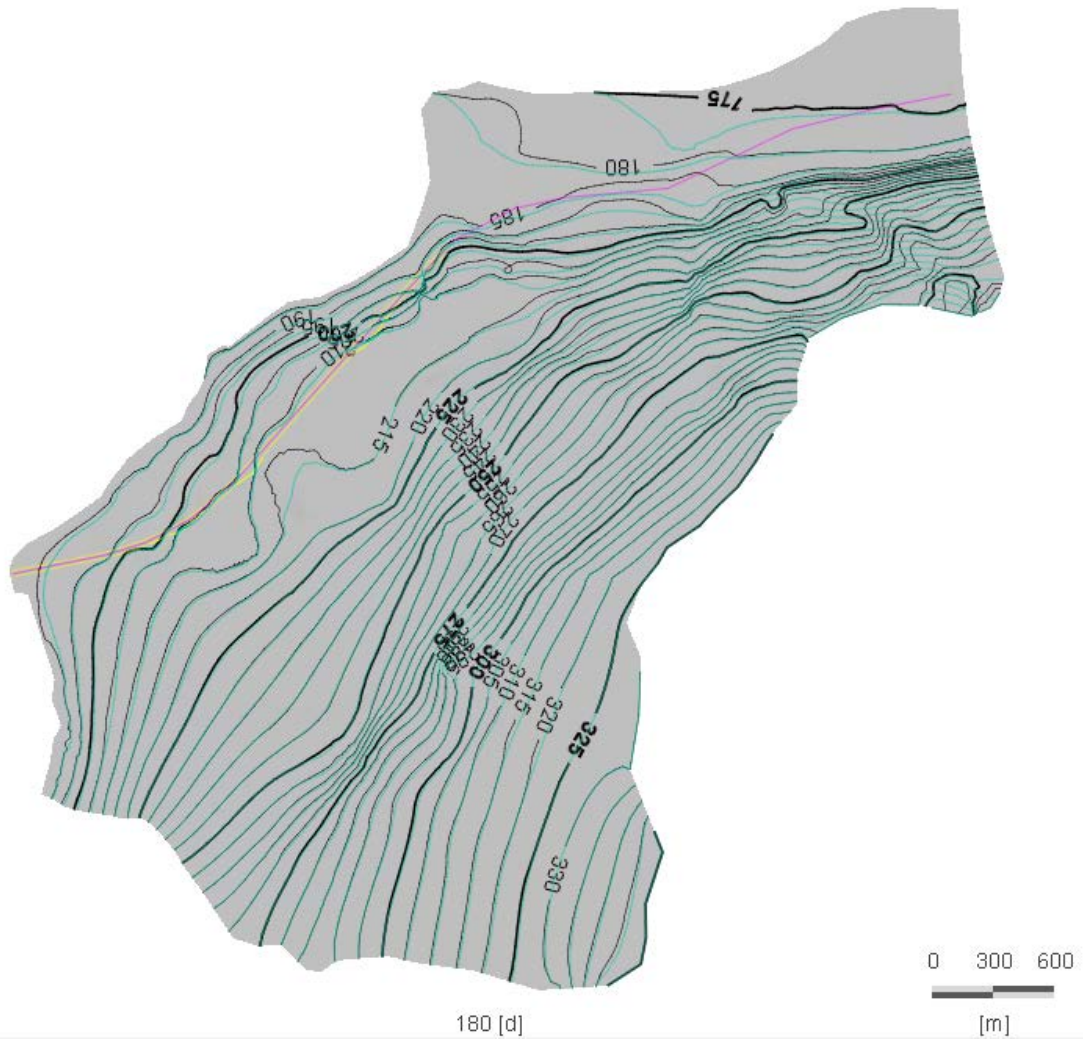


Figura 11.32- Analisi #2 - Soluzione del modello numerico al tempo t3=180giorni planimetria

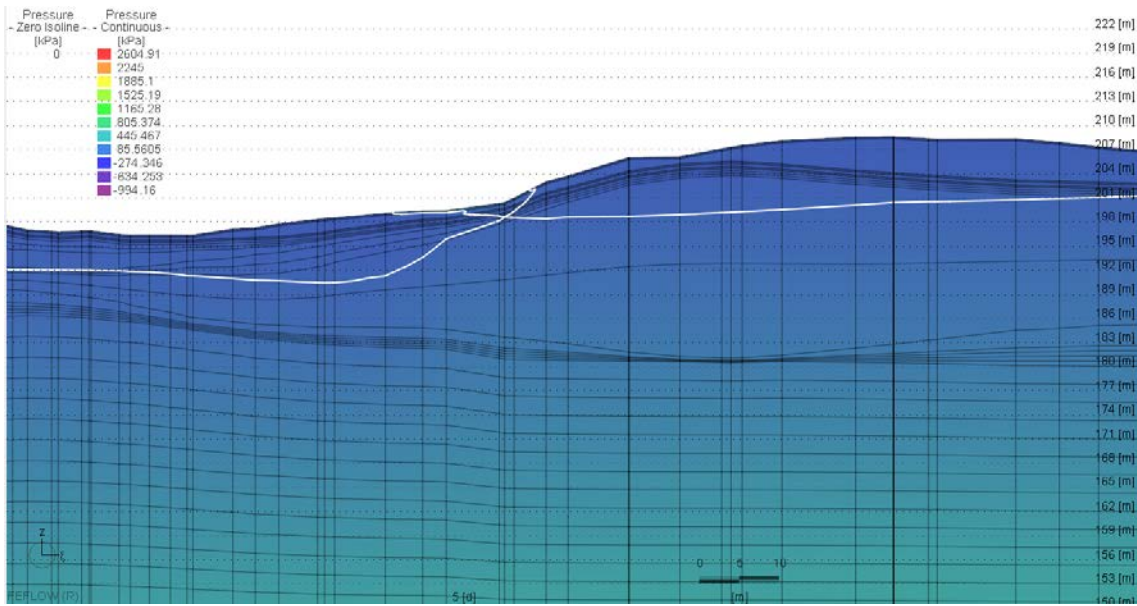


Figura 11.33-- Analisi #2 - Soluzione del modello numerico al tempo t1=5giorni-sezione

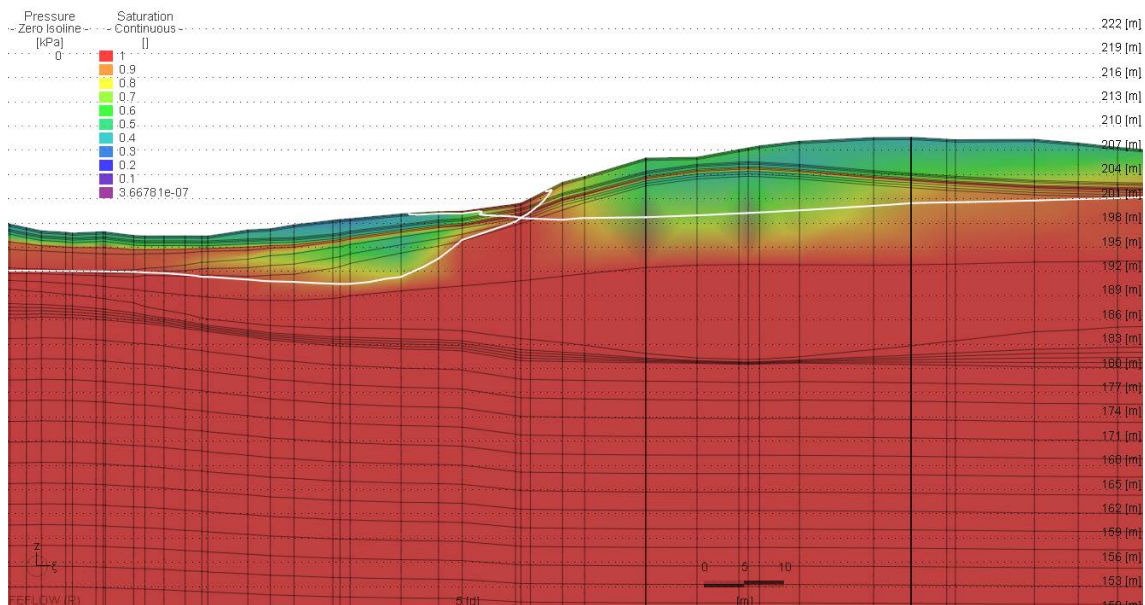


Figura 11.34-- Analisi #2 - Soluzione del modello numerico al tempo t1=5giorni-sezione - Saturazione

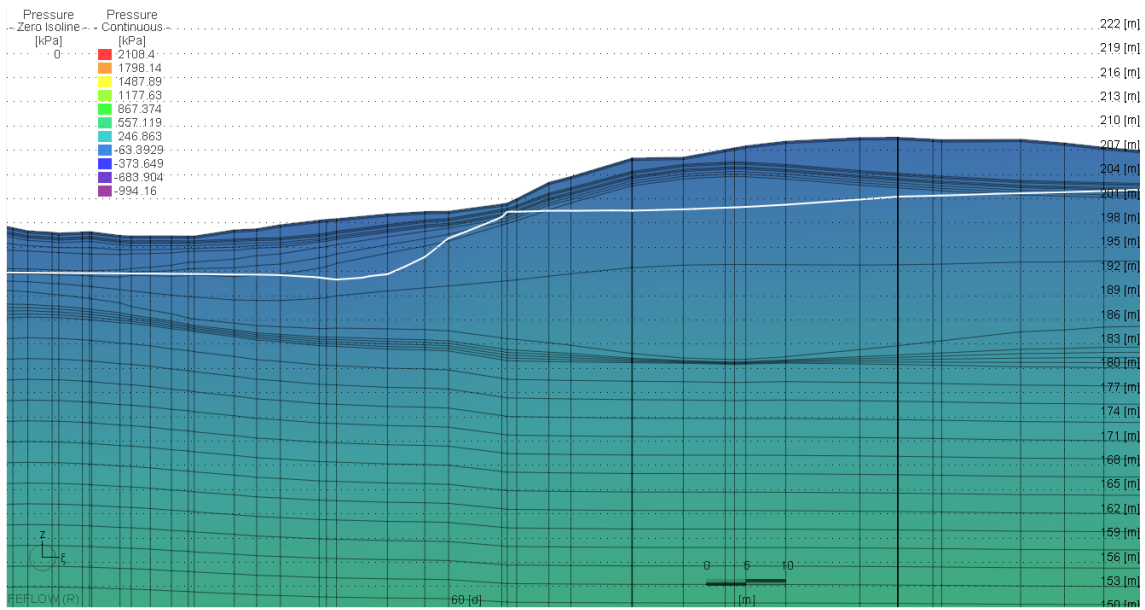


Figura 11.35- Analisi #2 - Soluzione del modello numerico al tempo t2=60giorni-sezione

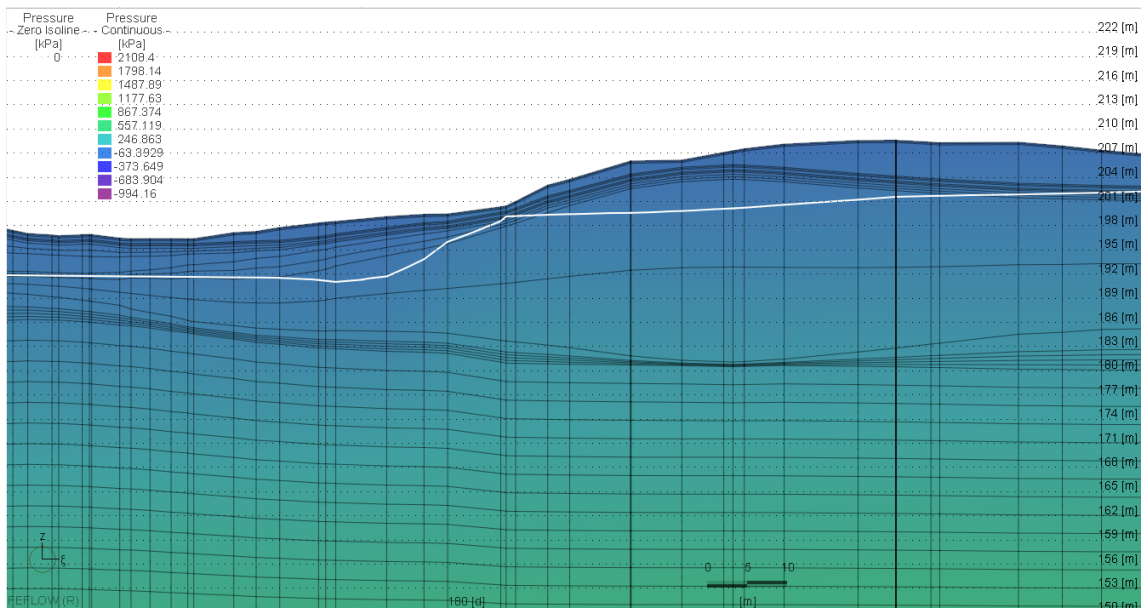


Figura 11.36- Analisi #2 - Soluzione del modello numerico al tempo t3=180giorni-sezione

11.7.3. Analisi #3: scenario post operam – evento meteorico ordinario

Come precedentemente illustrato, la finalità della modellazione numerica eseguita e presentata in questo capitolo è quella di fornire un supporto tecnico alla verifica che il progetto delle opere di sostegno previste nei tratti in trincea sia efficace nei confronti di eventuali variazioni del livello freatico dovute ad eventi meteorici di vario genere.

Per lo scenario post-operam (in presenza di opere di sostegno) e per l'evento meteorico ordinario descritto al paragrafo 11.3.1, nelle successive figure sono riportate a confronto l'andamento della superficie piezometrica nelle condizioni riferite ai diversi step temporali di calcolo sempre in presenza delle opere di sostegno.

Con riferimento all'acquifero dei gessi (cfr. Par. 5.2), si riporta la soluzione in planimetria del modello numerico in termini di quote piezometriche (riferite al livello medio del mare) riferite a tre diversi step di calcolo ritenuti significativi ($t_1=5$ giorni – fine evento meteorico, $t_2=60$ giorni e $t_3=180$ giorni) per le aree poste in prossimità delle opere.

Le figure di riferimento per gli step di calcolo sono:

- Per lo step di calcolo $t_1=5$ giorni, la Figura 11.37 (opera T1), la Figura 11.38 (opera T2), la Figura 11.39 (opera T3) e la Figura 11.40 (opera T4);
- Per lo step di calcolo $t_2=60$ giorni, la Figura 11.41 (opera T1), la Figura 11.42 (opera T2), la Figura 11.43 (opera T3) e la Figura 11.44 (opera T4);
- Per lo step di calcolo $t_3=180$ giorni, la Figura 11.45(opera T1), la Figura 11.46(opera T2), la Figura 11.47(opera T3) e la Figura 11.48(opera T4).

In tutte le figure elencate sopra laddove presente è riportata in rosso la linea “zero pressure” che individua le aree dove la falda raggiunge il piano campagna. Per la condizione iniziale si rimanda al precedente punto 11.6.

A titolo esemplificativo nel seguito sono riportate le soluzioni in termini di linea di falda per la sezione T1; in particolare.

- Per lo step di calcolo $t_1=5$ giorni, la Figura 11.49;
- Per lo step di calcolo $t_2=60$ giorni, la Figura 11.50;
- Per lo step di calcolo $t_3=180$ giorni la Figura 11.51.

Per l'andamento della falda nelle sezioni di cui sopra nella configurazione iniziale prima dell'evento meteo si veda per la sezione T1 la Figura 10.1, per la sezione T2 la Figura 10.2, per la sezione T3 la Figura 10.5 e la Figura 10.6, per la sezione T4 la Figura 10.7.

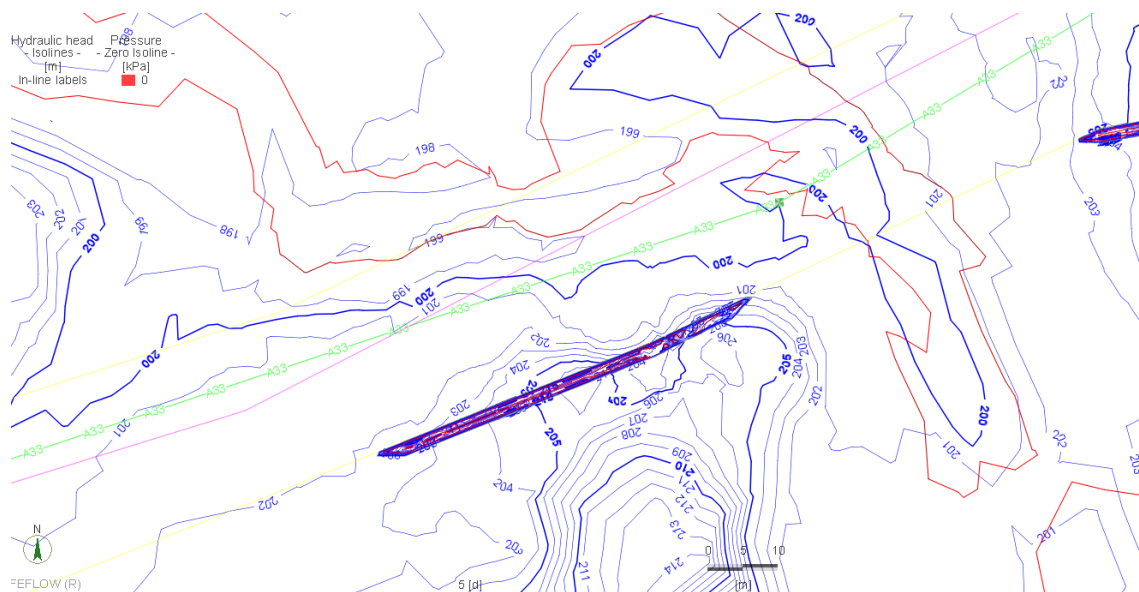


Figura 11.37- Analisi #3 – Opera T1 - Soluzione del modello numerico al tempo t1=5giorni - planimetria

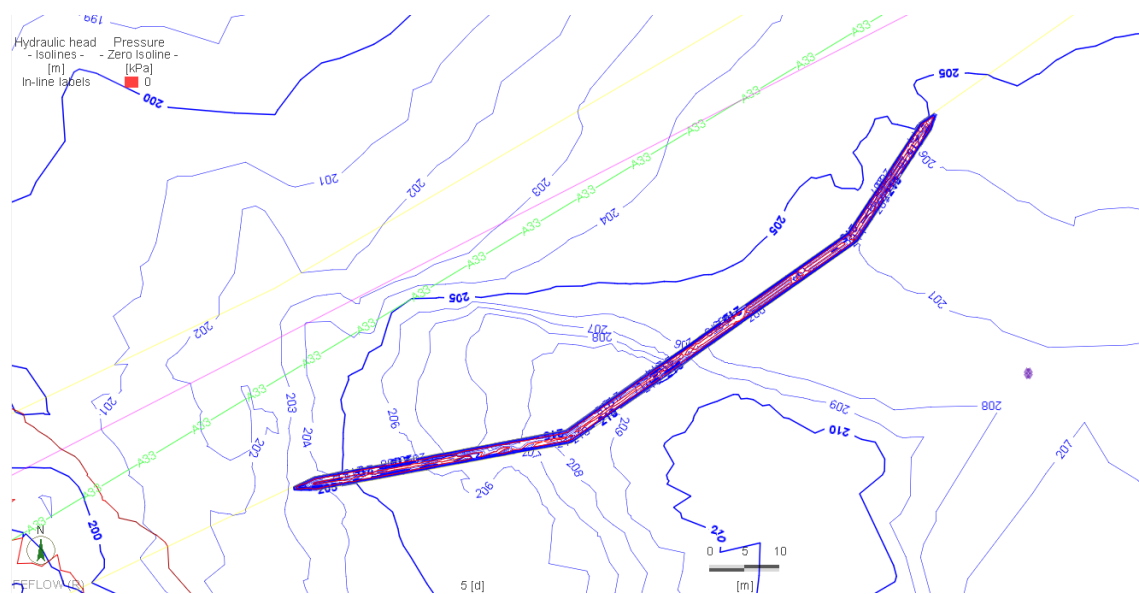


Figura 11.38- Analisi #3 – Opera T2 - Soluzione del modello numerico al tempo t1=5giorni - planimetria

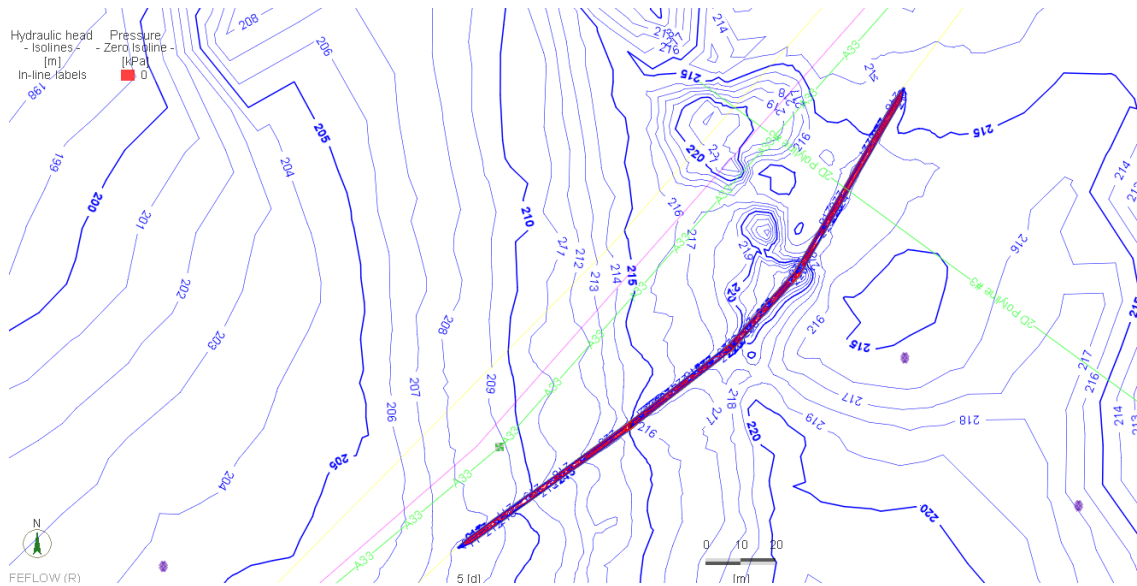


Figura 11.39- Analisi #3 – Opera T3 - Soluzione del modello numerico al tempo t1=5giorni - planimetria

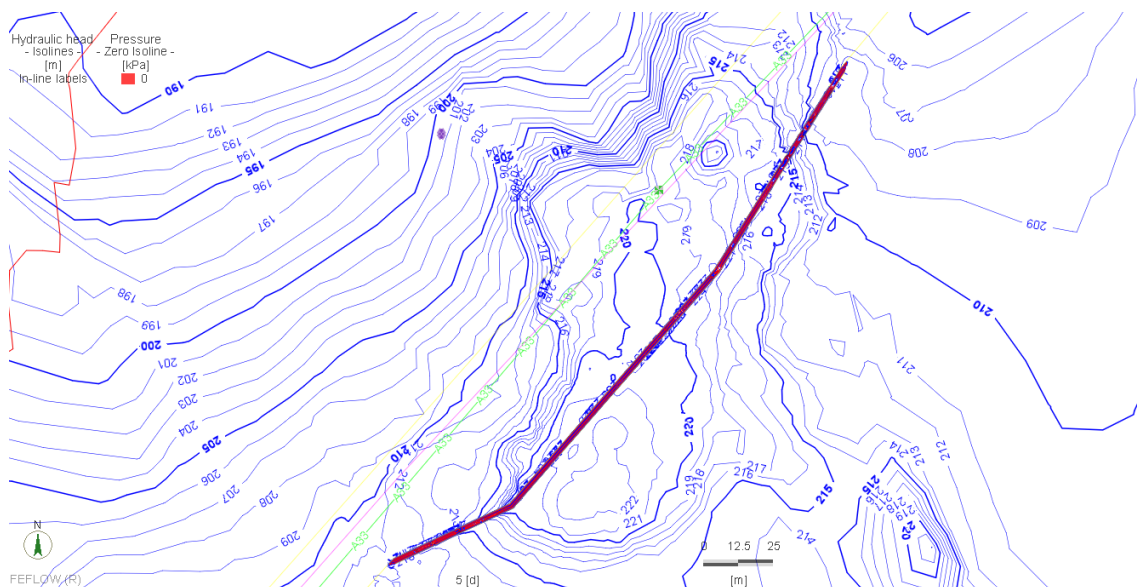


Figura 11.40- Analisi #3 – Opera T4 - Soluzione del modello numerico al tempo t1=5giorni - planimetria

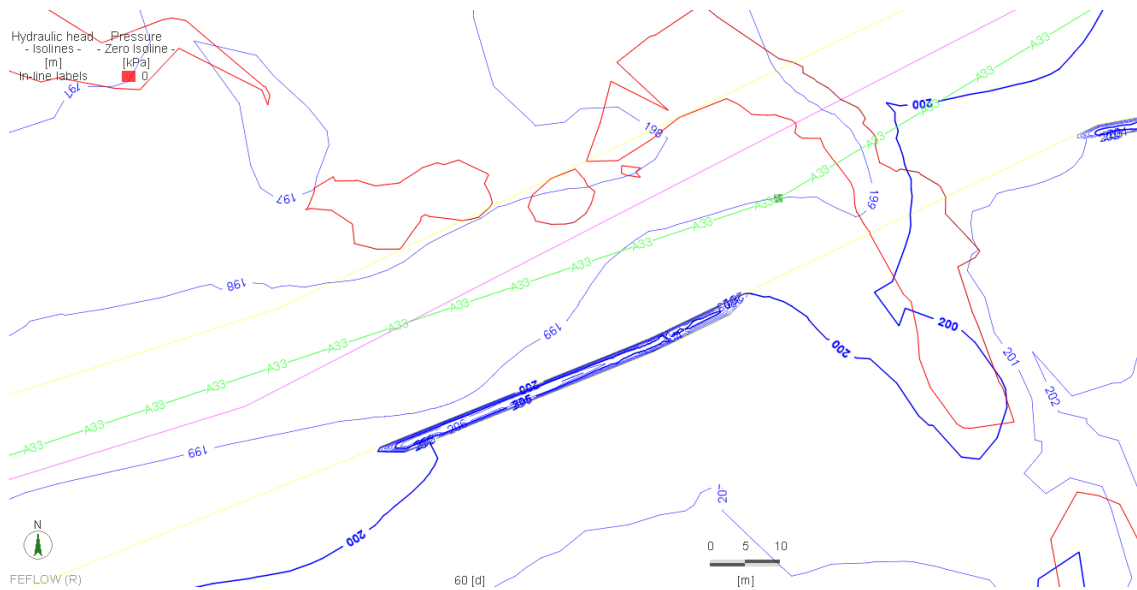


Figura 11.41- Analisi #3 – Opera T1 - Soluzione del modello numerico al tempo $t_2=60$ giorni - planimetria

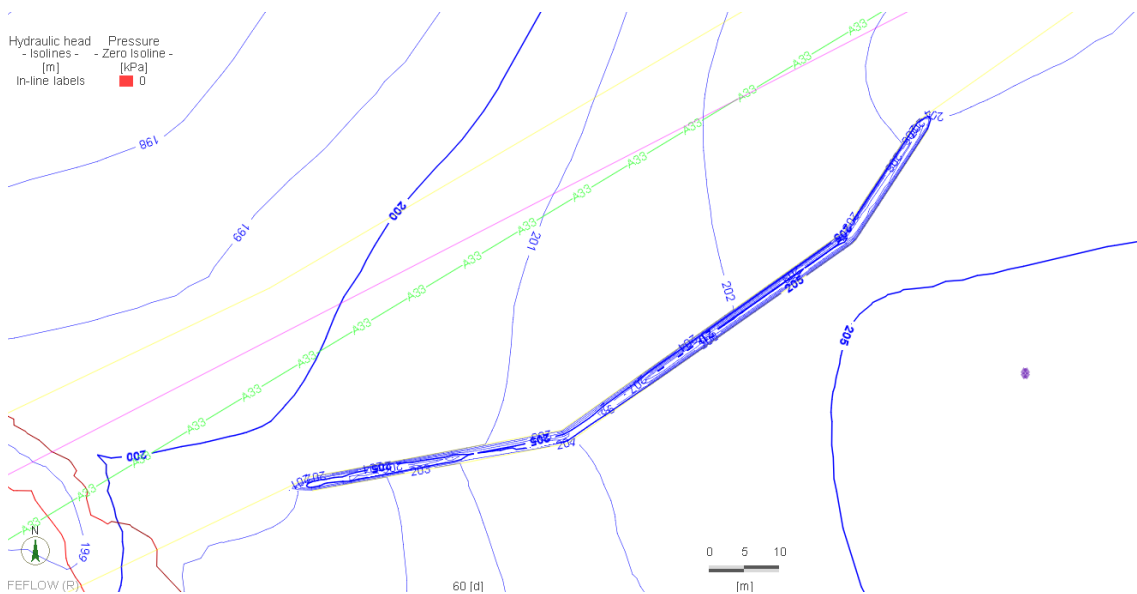


Figura 11.42- Analisi #3 – Opera T2 - Soluzione del modello numerico al tempo $t_2=60$ giorni - planimetria

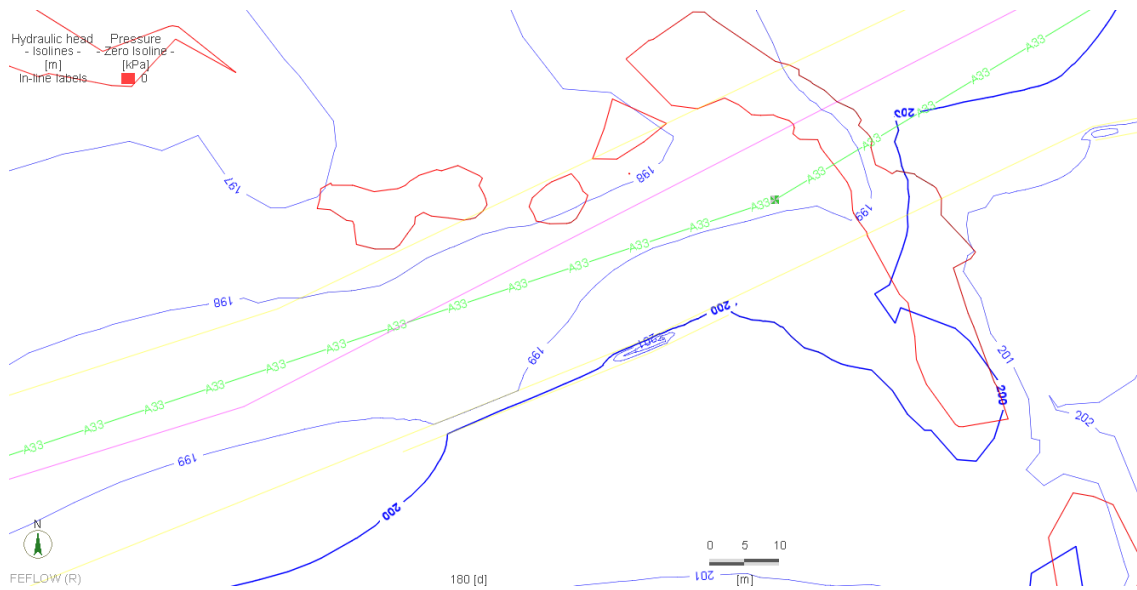


Figura 11.45- Analisi #3 – Opera T1 - Soluzione del modello numerico al tempo t3=180giorni - planimetria

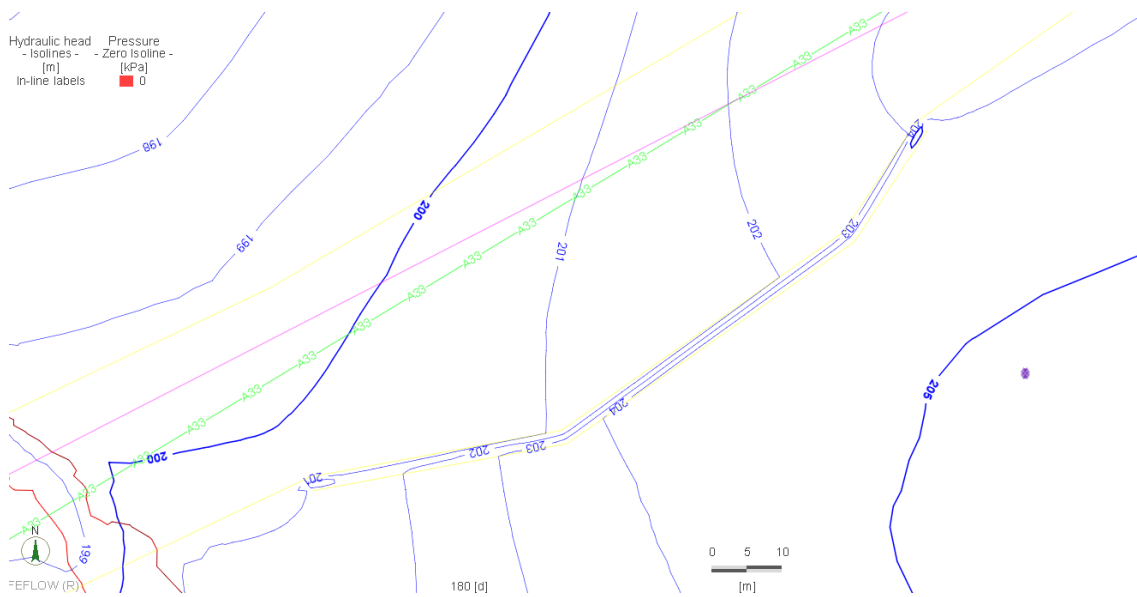


Figura 11.46- Analisi #3 – Opera T2 - Soluzione del modello numerico al tempo t3=180giorni - planimetria

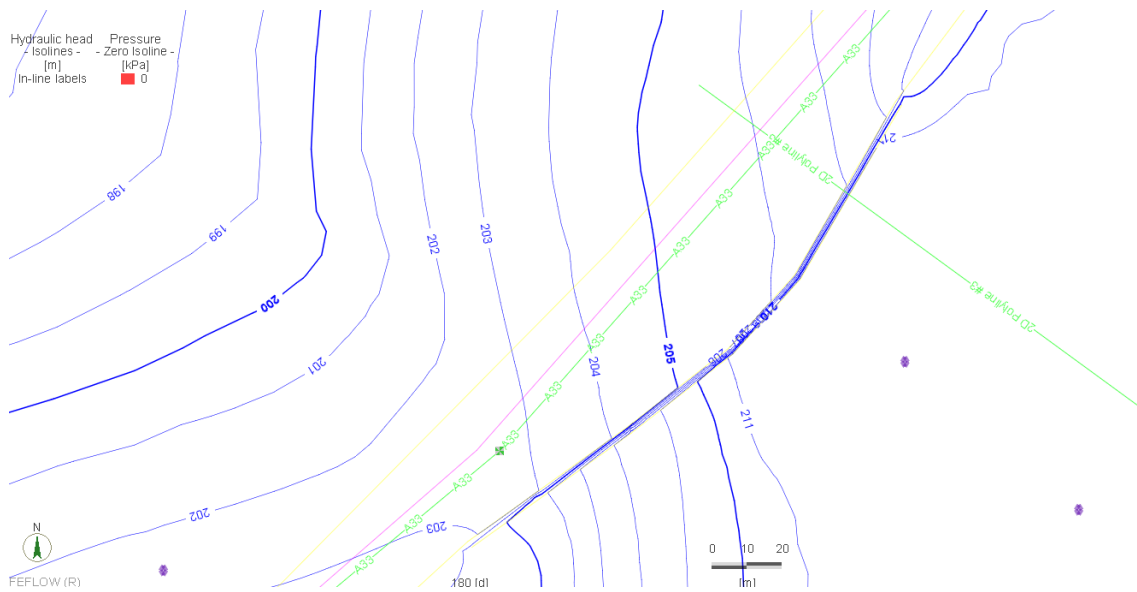


Figura 11.47- Analisi #3 – Opera T3 - Soluzione del modello numerico al tempo t3=180giorni - planimetria

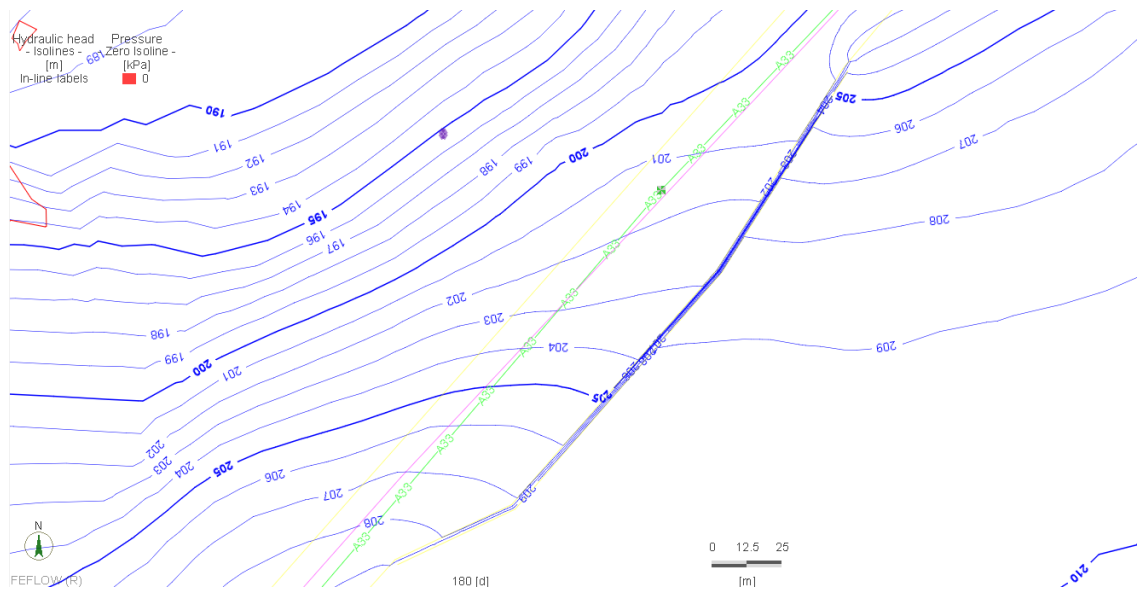


Figura 11.48- Analisi #3 – Opera T4 - Soluzione del modello numerico al tempo t3=180giorni - planimetria

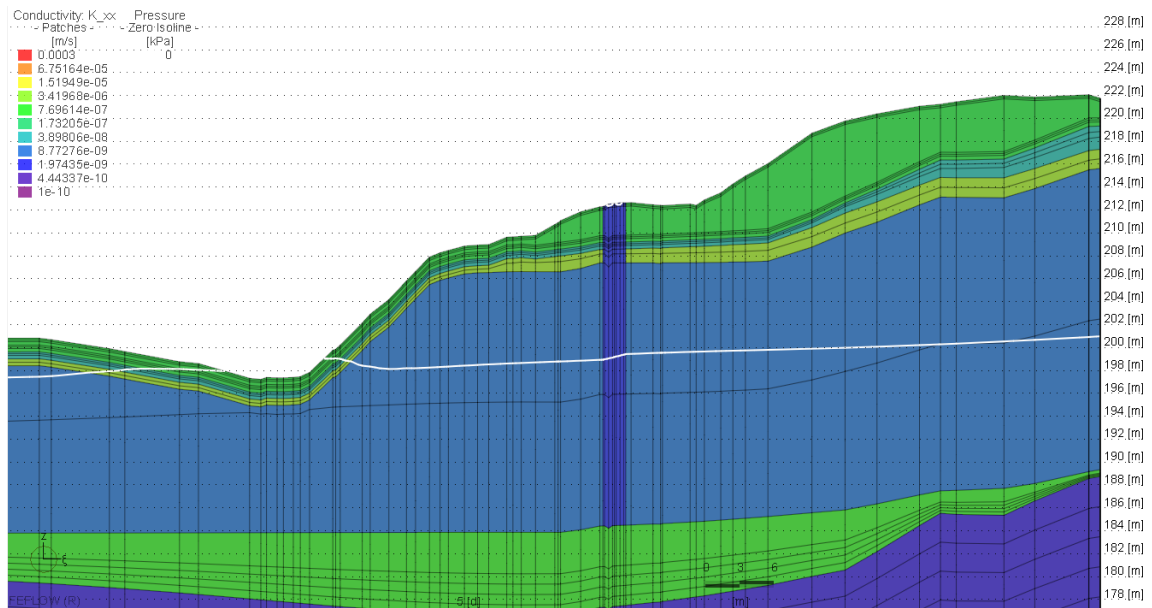


Figura 11.49- Analisi #3 – Opera T1 - Soluzione del modello numerico al tempo t1=5giorni - sezione

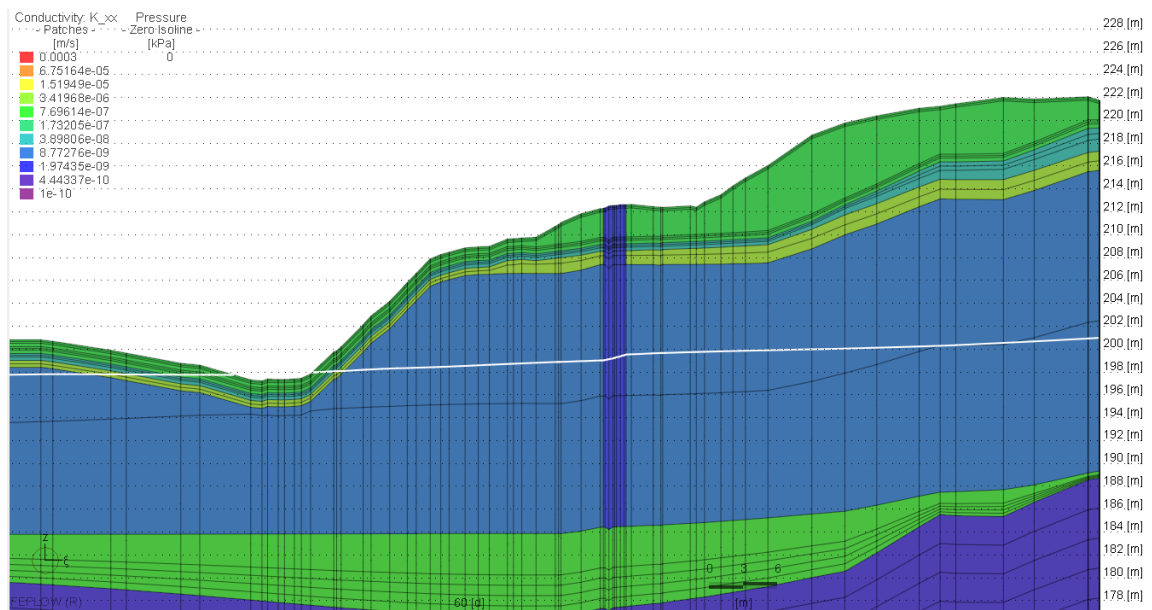


Figura 11.50- Analisi #3 – Opera T1 - Soluzione del modello numerico al tempo t2=60giorni – sezione

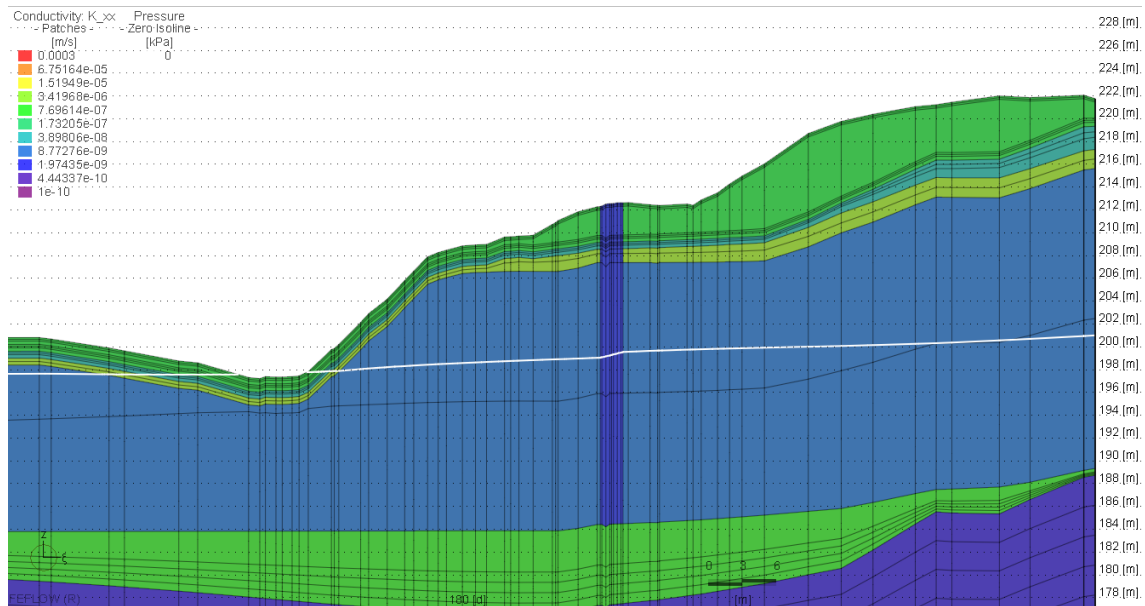


Figura 11.51- Analisi #3 – Opera T1 - Soluzione del modello numerico al tempo t3=180giorni – sezione

11.7.4. Analisi #4: scenario post operam – evento meteorico eccezionale

In modo analogo a quanto visto al punto precedente, per lo scenario post-operam (in presenza di opere di sostegno) e per l'evento meteorico eccezionale descritto al paragrafo 11.3.2, nelle successive figure sono riportate a confronto l'andamento della superficie piezometrica in condizioni iniziali indisturbate e nelle condizioni riferite ai diversi step temporali di calcolo sempre in presenza delle opere di sostegno.

Con riferimento all'acquifero dei gessi (cfr. Par. 5.2), si riporta la soluzione in planimetria del modello numerico in termini di quote piezometriche (riferite al livello medio del mare) riferite a tre diversi step di calcolo ritenuti significativi (t1=5 giorni – fine evento meteorico, t2=60 giorni e t3=180giorni) per le aree poste in prossimità delle opere.

Le figure di riferimento per gli step di calcolo sono:

- Per lo step di calcolo t1=5 giorni, la Figura 11.52 (opera T1), la Figura 11.53 (opera T2), la Figura 11.54 (opera T3) e la Figura 11.55 (opera T4);
- Per lo step di calcolo t2=60 giorni, la Figura 11.56 (opera T1), la Figura 11.57 (opera T2), la Figura 11.58 (opera T3) e la Figura 11.59 (opera T4);
- Per lo step di calcolo t3=180 giorni, la Figura 11.60 (opera T1), la Figura 11.61 (opera T2), la Figura 11.62 (opera T3) e la Figura 11.63 (opera T4).

In tutte le figure elencate sopra laddove presente è riportata in rosso la linea “zero pressure” che individua le aree dove la falda raggiunge il piano campagna. Per la condizione iniziale si rimanda al precedente punto 11.6.

A titolo esemplificativo nel seguito sono riportate le soluzioni in termini di linea di falda per la sezione T1; in particolare.

- Per lo step di calcolo t1=5 giorni, la Figura 11.64;

- Per lo step di calcolo $t_2=60$ giorni, la Figura 11.65;
- Per lo step di calcolo $t_3=180$ giorni la Figura 11.66.

Per l'andamento della falda nelle sezioni di cui sopra nella configurazione iniziale prima dell'evento meteo si veda per la sezione T1 la Figura 10.1, per la sezione T2 la Figura 10.2, per la sezione T3 la Figura 10.5 e la Figura 10.6, per la sezione T4 la Figura 10.7.

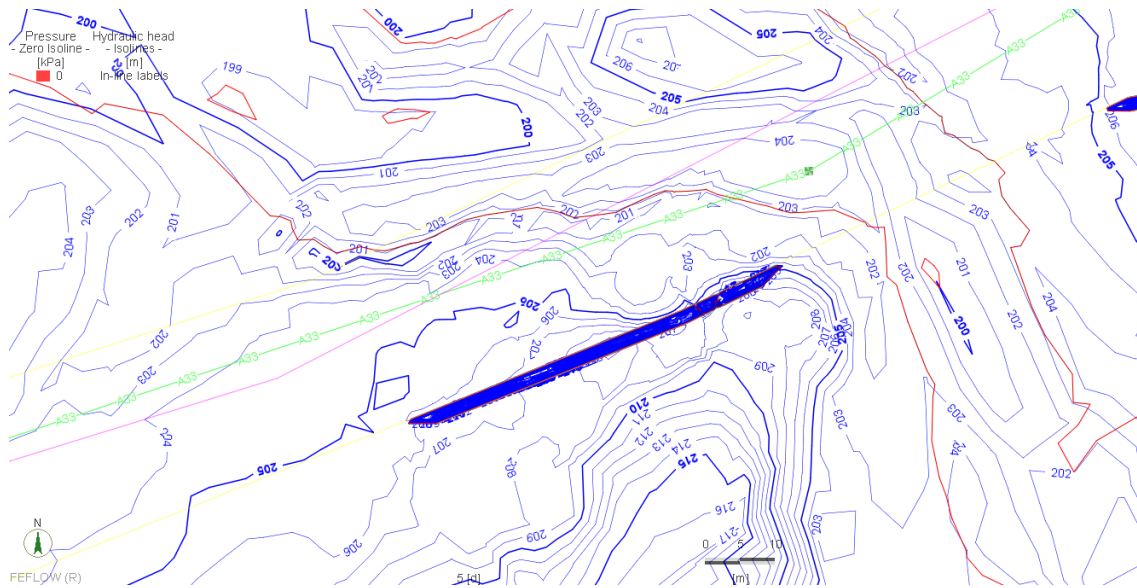


Figura 11.52- Analisi #4 – Opera T1 - Soluzione del modello numerico al tempo $t_1=5$ giorni - planimetria

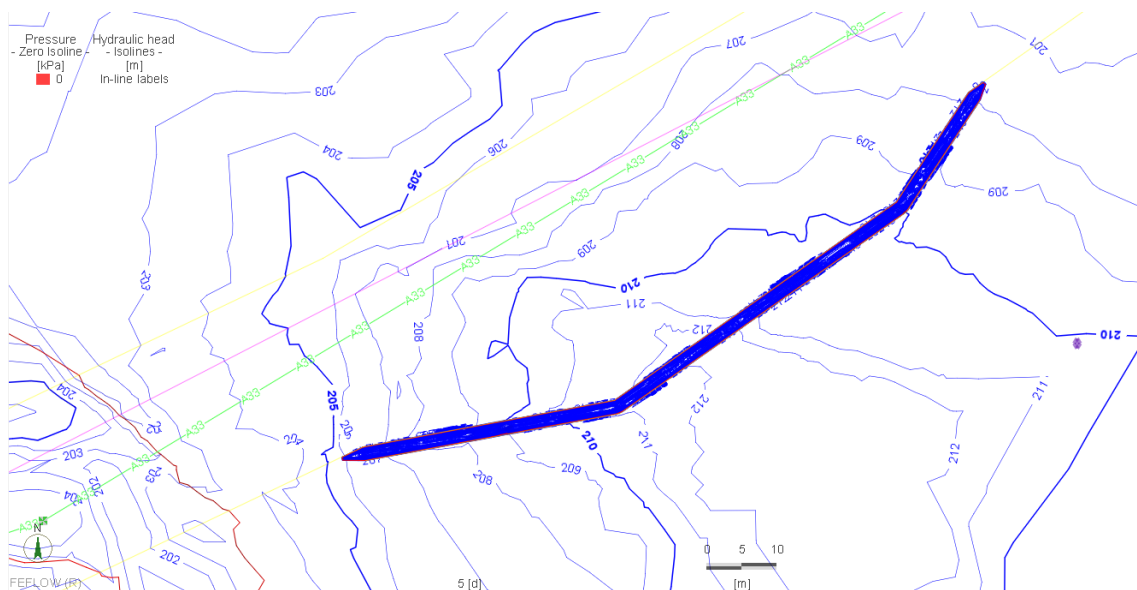


Figura 11.53- Analisi #4 – Opera T2 - Soluzione del modello numerico al tempo $t_1=5$ giorni - planimetria

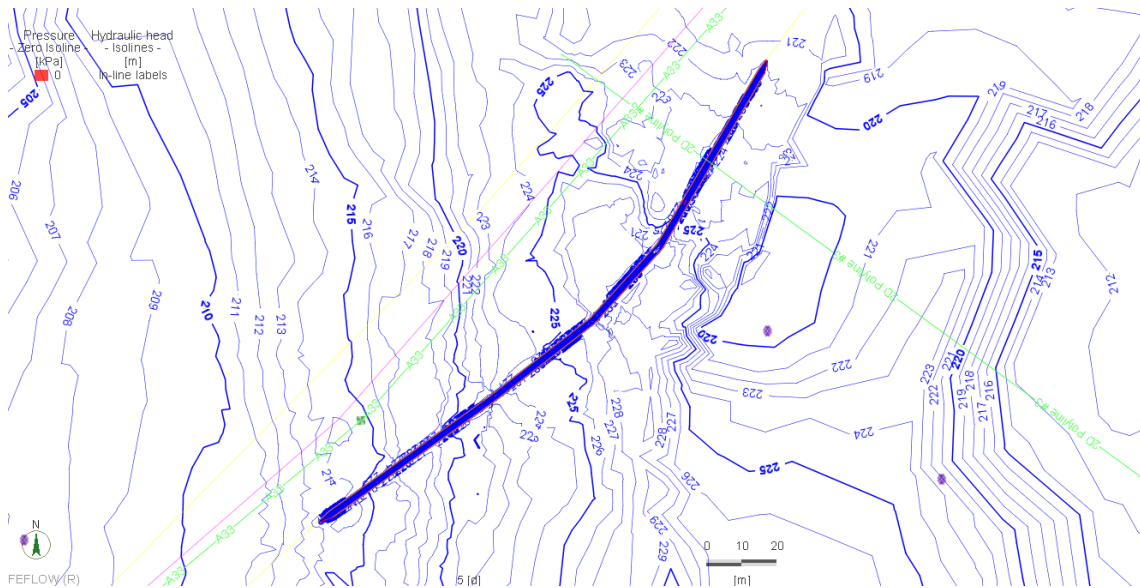


Figura 11.54- Analisi #4 – Opera T3 - Soluzione del modello numerico al tempo t1=5giorni - planimetria

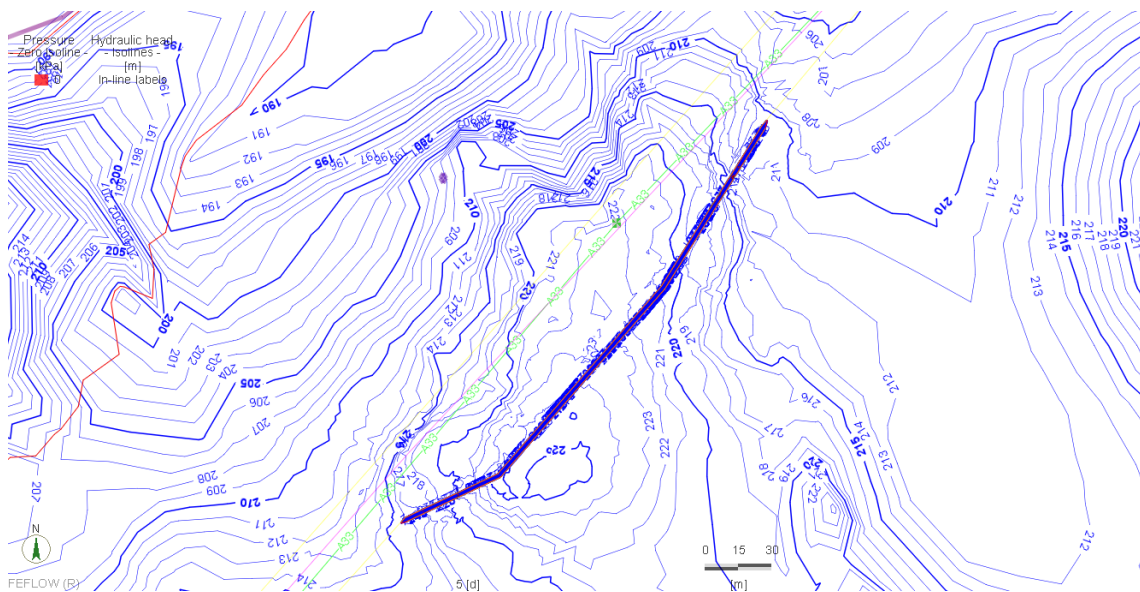


Figura 11.55- Analisi #4 – Opera T4 - Soluzione del modello numerico al tempo t1=5giorni - planimetria

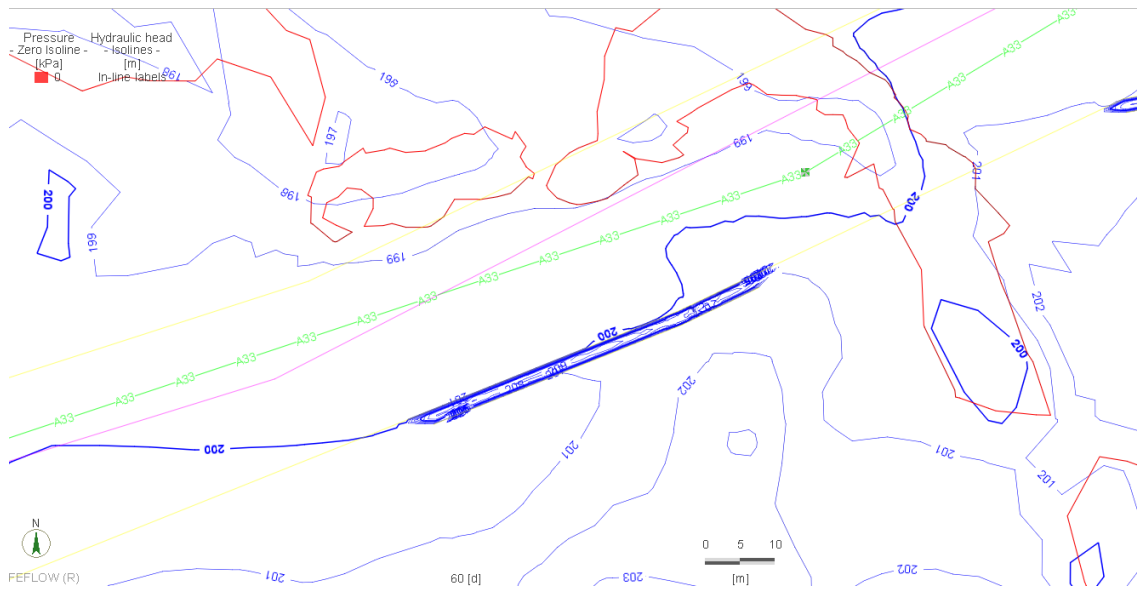


Figura 11.56- Analisi #4 – Opera T1 - Soluzione del modello numerico al tempo $t_2=60$ giorni - planimetria

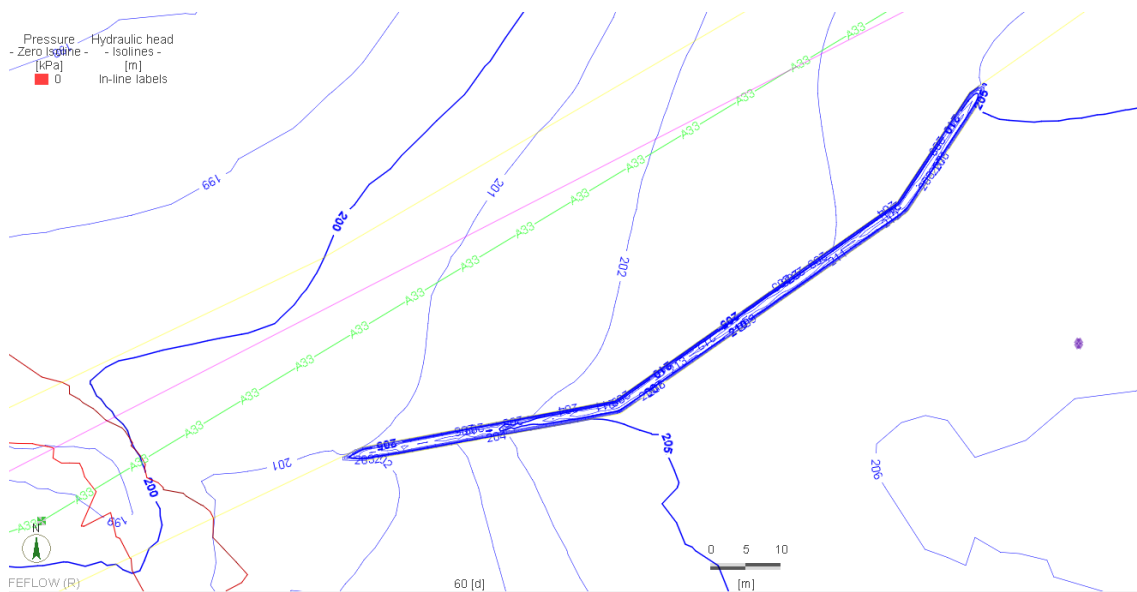


Figura 11.57- Analisi #4 – Opera T2 - Soluzione del modello numerico al tempo $t_2=60$ giorni - planimetria

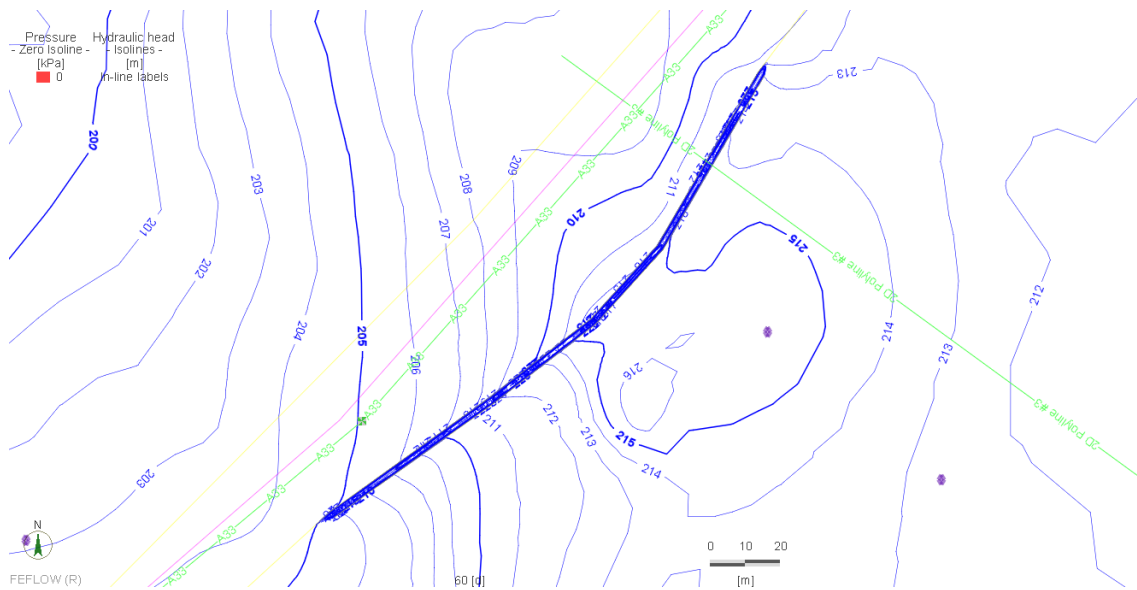


Figura 11.58- Analisi #4 – Opera T3 - Soluzione del modello numerico al tempo $t_2=60$ giorni - planimetria

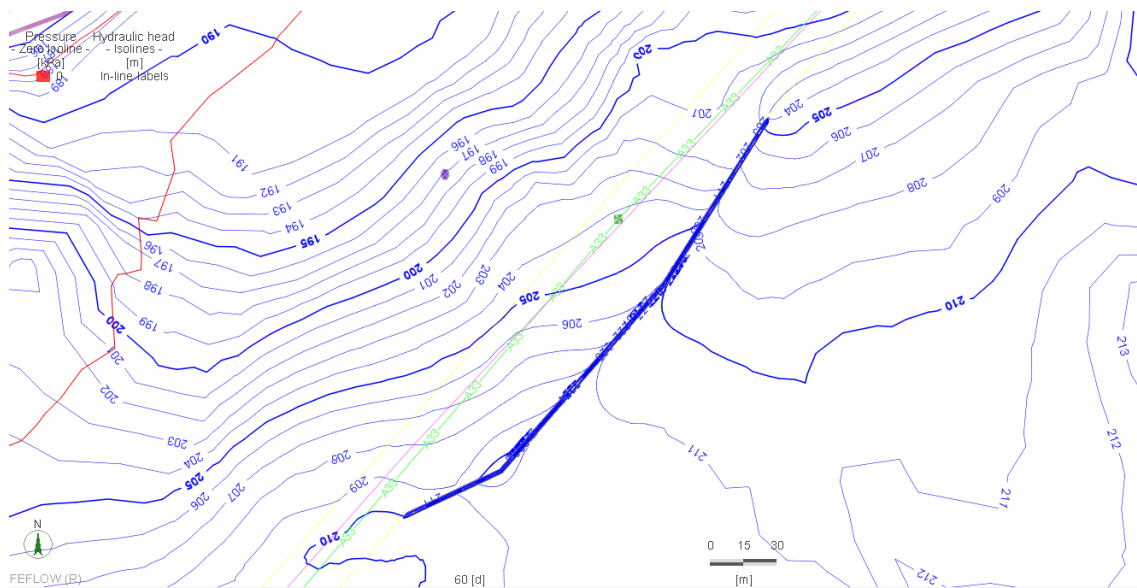


Figura 11.59- Analisi #4 – Opera T4 - Soluzione del modello numerico al tempo $t_2=60$ giorni - planimetria

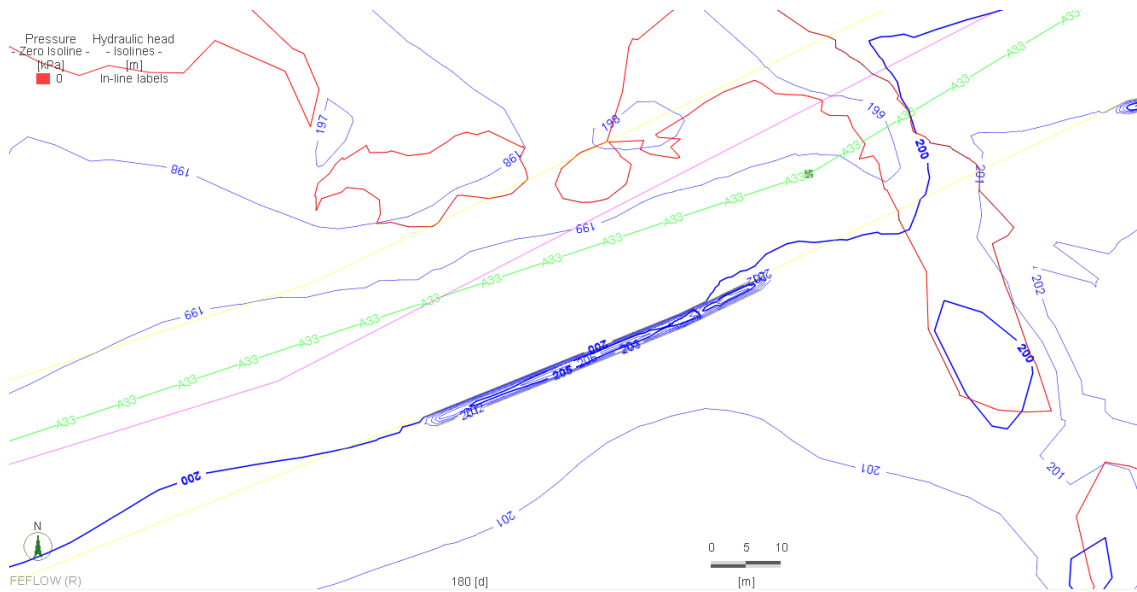


Figura 11.60- Analisi #4 – Opera T1 - Soluzione del modello numerico al tempo t3=180giorni - planimetria

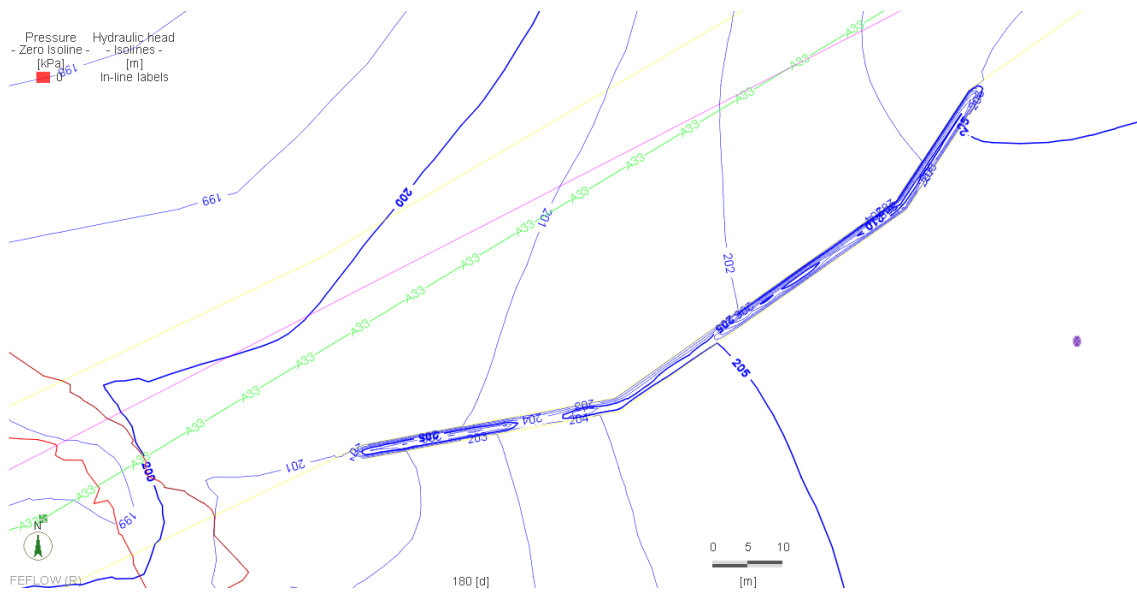


Figura 11.61- Analisi #4 – Opera T2 - Soluzione del modello numerico al tempo t3=180giorni - planimetria

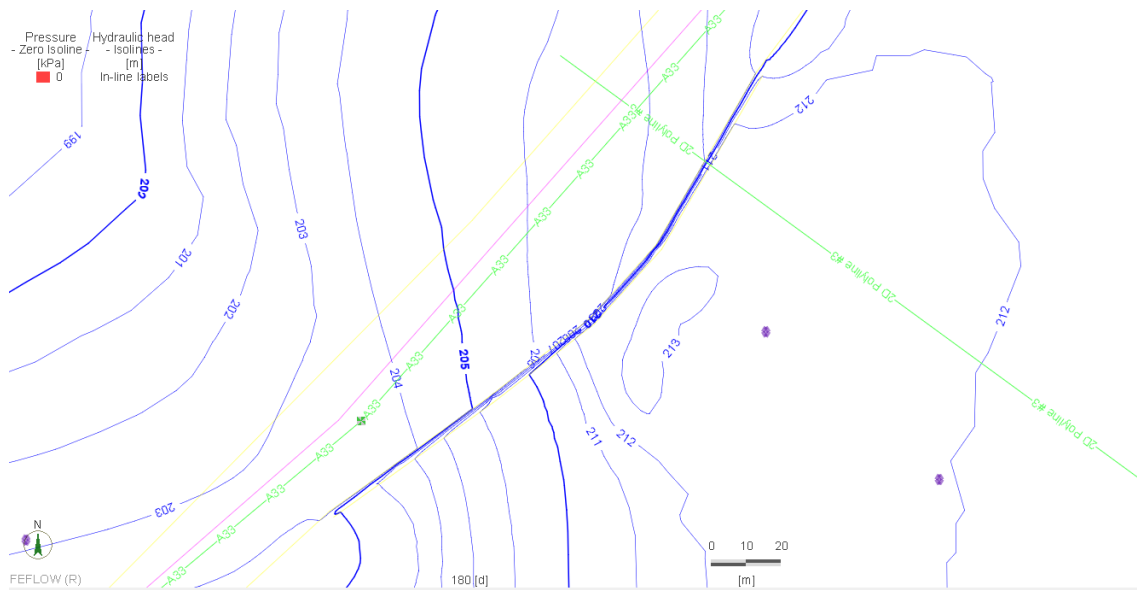


Figura 11.62- Analisi #4 – Opera T3 - Soluzione del modello numerico al tempo t3=180giorni - planimetria

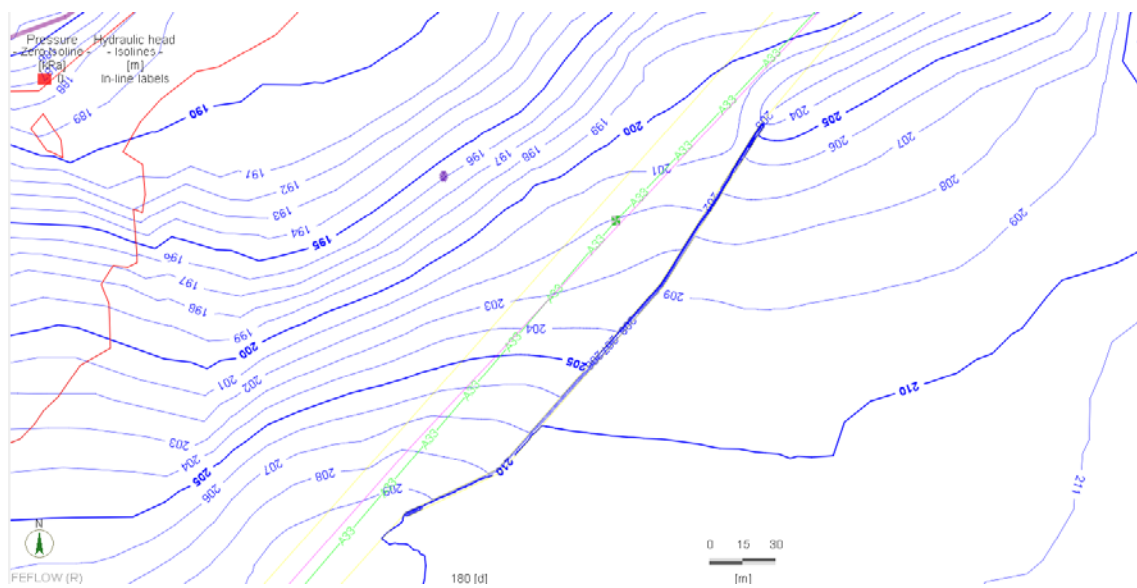


Figura 11.63- Analisi #4 – Opera T4 - Soluzione del modello numerico al tempo t3=180giorni - planimetria

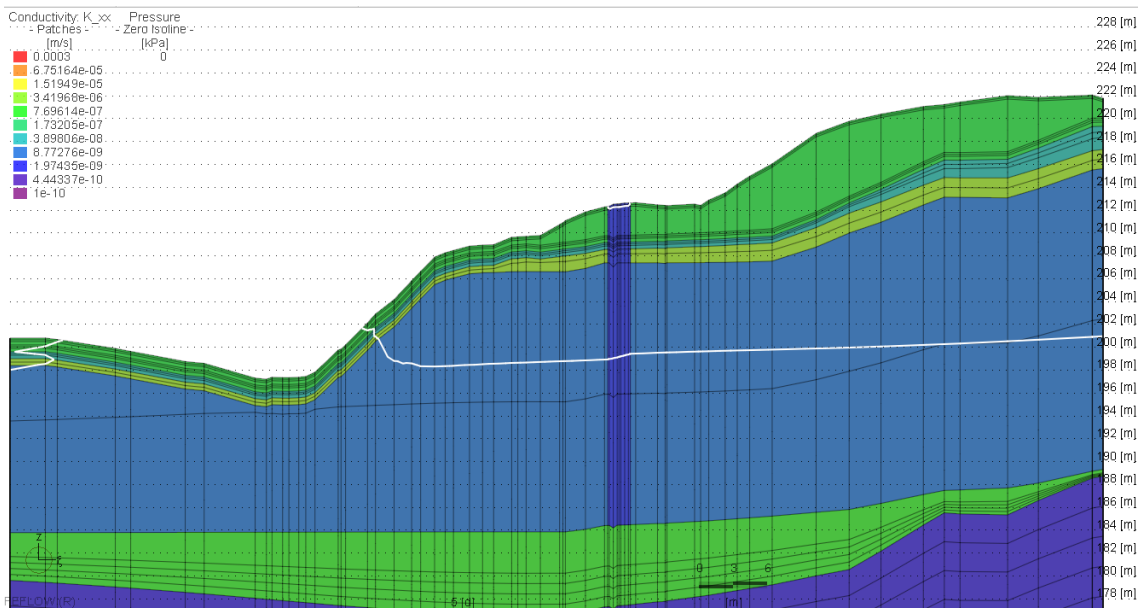


Figura 11.64- Analisi #4 – Opera T1 - Soluzione del modello numerico al tempo $t_1=5$ giorni - sezione

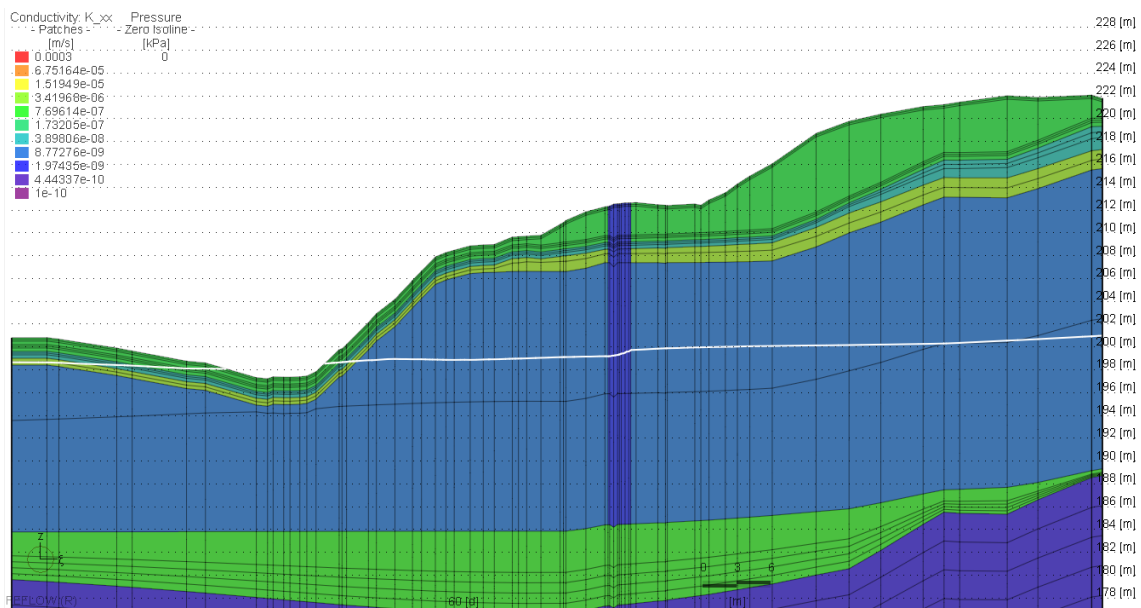


Figura 11.65- Analisi #4 – Opera T1 - Soluzione del modello numerico al tempo $t_2=60$ giorni – sezione

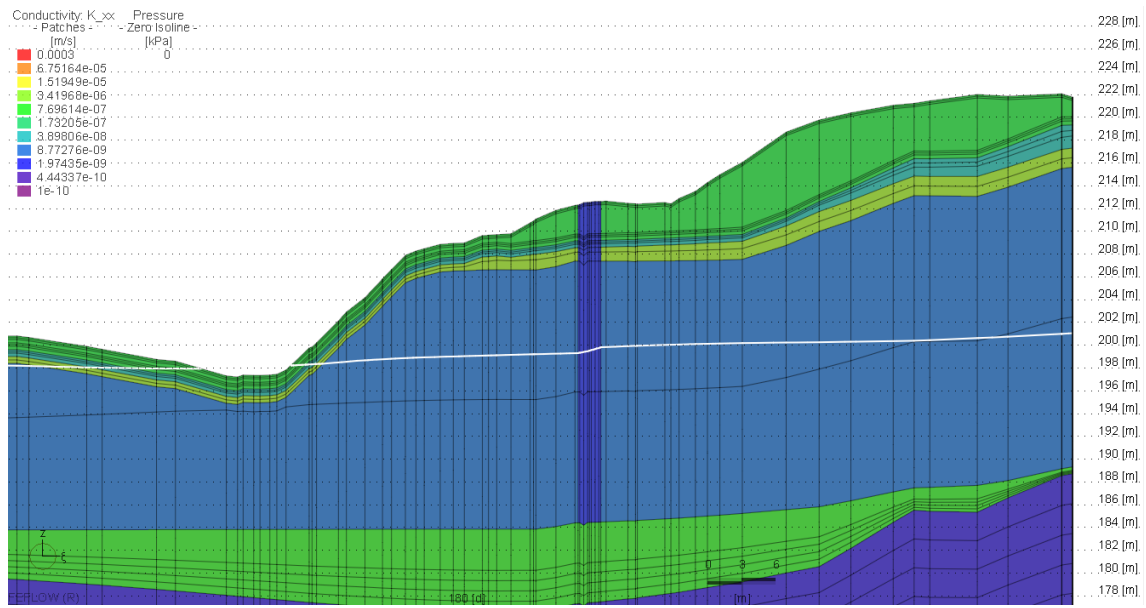


Figura 11.66- Analisi #4 – Opera T1 - Soluzione del modello numerico al tempo t3=180giorni – sezione

12. CONCLUSIONI

Il modello idrogeologico implementato, e oggetto del presente elaborato, ha permesso la ricostruzione del sistema acquifero della porzione della valle del Tanaro interessata dal Tronco II Lotto 6, Stralcio a, dell'autostrada A33 Asti-Cuneo.

Il modello, realizzato con il software Feflow, riproduce con un grado di approssimazione adeguato l'andamento della superficie piezometrica di riferimento per la zona e costituisce uno strumento efficace e realistico per il progetto e la verifica delle opere d'arte previste per la realizzazione del tracciato autostradale.

In particolare con il suddetto modello è stato possibile effettuare due tipi di valutazioni:

1. lo studio degli impatti sul sistema acquifero dati dall'inserimento delle paratie di sostegno necessarie alla realizzazione delle porzioni di tracciato in trincea dell'autostrada;

e

2. lo studio degli impatti sul sistema acquifero sia ante operam sia post operam (paratie) di eventi meteorici simulati in transitorio.

I risultati ottenuti dalle valutazioni di Tipo 1 mostrano quanto segue:

- a regime, gli impatti sulla falda per tre delle quattro trincee sono apprezzabili ma senza conseguenze significative sull'ambiente circostante;
- per una delle quattro trincee, la paratia Trincea T1, gli effetti sono estremamente ridotti, al limite dell'apprezzabile;
- in nessun caso si sono ottenuti innalzamenti dei livelli piezometrici tali da avvicinare in modo significativo la falda al piano campagna;
- gli innalzamenti della falda a monte delle opere di sostegno risultano in tutti i casi inferiori rispetto ai livelli di falda considerati quali condizioni di progetto per il dimensionamento delle paratie stesse.

I risultati ottenuti dalle valutazioni di Tipo 2 mostrano quanto segue:

- gli eventi sia ordinari che eccezionali generano degli innalzamenti localizzati che si generano in corrispondenza dell'evento e che si normalizzano nel giro di qualche giorno o al massimo qualche settimana anche nel caso dell'evento eccezionale;
- in corrispondenza degli eventi eccezionali, oltre agli innalzamenti localizzati della falda, si nota anche la formazione di falde sospese, con zone che si saturano sopra falda, in corrispondenza di terreni a permeabilità relativamente più basse. Tali situazioni si risolvono nel giro di pochi giorni. Questo tipo di fenomeno è ragionevolmente la causa di instabilizzazioni locali, laddove materiale con caratteristiche di resistenza già abbastanza basse si satura completamente generando meccanismi di rottura, come quelli che si sono verificati a Novembre 2016;
- la presenza delle opere di sostegno non sembra invece generare situazioni critiche nemmeno in corrispondenza degli eventi eccezionali, con innalzamenti contenuti e comunque normalizzati nel giro di pochi giorni.

Si sottolinea che nelle simulazioni con le opere d'arte non sono stati considerati, a vantaggio di sicurezza, tutti i sistemi di controllo della falda che sono invece previsti in progetto (trincee drenanti a tergo delle paratie e microdreni sub-orizzontali).

Si sottolinea anche che nello studio degli impatti sul sistema acquifero di eventi meteorici in transitorio, la localizzazione delle zone dove si generano le falde sospese è da approfondire in una successiva fase progettuale al fine di valutarne la effettiva corrispondenza con quanto avvenuto, per esempio, a Novembre 2016.