

PROGETTO AdSP n. 1951

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

CUP: C94E21000460001

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

GRUPPO DI PROGETTAZIONE:

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

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO:

ing. Paolo Crescenzi

NOME FILE: 1GNR_P_R_C-GEO_2AT_001_02_00

SCALA: ---

TITOLO ELABORATO:

Relazione idrogeologica parte 1 di 2

ELABORATO:

1GNR_P_R_C-GEO_2AT_001_02_00

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

Area di rifunzionalizzazione portuale di Servola (TS)

RELAZIONE IDROGEOLOGICA



Andrea Borgia
16.09.2023 16:15:50
GMT+01:00



prof. dott. geol. Andrea Borgia

Sommario

<i>Area di rifunionalizzazione portuale di Servola (TS)</i>	0
RELAZIONE IDROGEOLOGICA	0
<i>prof. dott. geol. Andrea Borgia</i>	0
<i>2023</i>	0
1 INTRODUZIONE	3
1.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE E GEOLOGICO	3
1.2 SCOPO DELLA MODELLAZIONE IDROGEOLOGICA	4
1.3 LAVORI PREGRESSI	5
1.4 IMPOSTAZIONE DEL MODELLO IDROGEOLOGICO	6
2 MODELLO GEOLOGICO	7
2.1 DATI DI INPUT E SOFTWARE	7
2.2 1° APPROSSIMAZIONE	10
2.3 2° APPROSSIMAZIONE	17
2.4 3° APPROSSIMAZIONE	20
2.5 4° APPROSSIMAZIONE	21
2.6 ANALISI DELLA VALIDITÀ DEL MODELLO GEOLOGICO	44
3 MODELLO IDROGEOLOGICO	47
3.1 SEQUENZA METODOLOGICA	47
5.2 CONDIZIONI AL CONTORNO	47
5.3 CALIBRAZIONE DEL MODELLO	48
5.3.1 <i>Analisi dei dati di calibrazione</i>	49
5.3.2 <i>Descrizione dei modelli idrogeologici</i>	57
5.3.3 <i>Analisi delle permeabilità</i>	61
5.3.4 <i>Calibrazione dei modelli idrogeologici</i>	64
5.4 RISULTATI RELATIVI AI DUE MODELLI IDROGEOLOGICI "RIO PRIMARIO E "MANDRACCHIO"	65
5.4.1 <i>Il modello "Rio Primario"</i>	65
5.4.2 <i>Il modello "Mandracchio"</i>	71
5.5 MODELLI IDROGEOLOGICI A SEGUITO DEGLI INTERVENTI DI MESSA IN SICUREZZA	77
5.5.1 <i>Il modello "Rio Primario"</i>	79
5.5.2 <i>Il modello "Mandracchio"</i>	82
5.5.3 <i>Laminazione nei terreni di riporto della Ferriera di Servola</i>	85
5.5.4 <i>L'effetto drenante del Rio Primario</i>	86
5.5.5 <i>Monitoraggio e caratterizzazione del drenaggio del Rio Primario</i>	89
5.5.6 <i>Monitoraggio in corso d'opera e post operam</i>	90

6	VERIFICA DEL MODELLO GEOLOGICO E REALIZZAZIONE DELLE SEZIONI GEOLOGICHE	92
7	UTILIZZO DEL MODELLO IDROGEOLOGICO ATTUALE PER LA VERIFICA DELLE CARATTERISTICHE PRELIMINARI DEL SETTO IMPERMEABILE E DEI DRENAGGI	97
7.1	IL MODELLO GENERALE INIZIALE E I POSSIBILI MODELLI DI DETTAGLIO	97
7.2	PRIMO MODELLO, COSIDDETTO "DI BASE", CON SOLO SETTO IMPERMEABILE E BARRIERA DRENANTE	97
7.2.1	<i>Caso "di base" a bassa permeabilità.</i>	99
7.2.2	<i>Caso di alta permeabilità.</i>	99
7.2.3	<i>Modello con barriera profonda.</i>	105
7.3	SECONDO MODELLO, COSIDDETTO "CON POZZI DRENANTI"	109
7.4	TERZO MODELLO, COSIDDETTO "COMPLETO"	109
7.4.1	<i>Modello "completo"</i>	113
7.4.2	<i>Modello "completo" con permeabilità elevate</i>	113
7.4.3	<i>Modello "completo" con setto impermeabile profondo</i>	113
8	I POZZI DRENANTI	123
9	VERIFICA DELLE AREE DI RICARICA ECCESSIVA PER IL LORO EVENTUALE CONTROLLO	124
10	VALUTAZIONE DELLE PORTATE	126
11	ULTERIORI SONDAGGI E PIEZOMETRI DI MONITORAGGIO	130
12	APPROFONDIMENTI MODELLISTICI E LA VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI CUMULATIVI	131
13	CONCLUSIONI	133
14	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	136

1 INTRODUZIONE

1.1 *Inquadramento territoriale e geologico*

L'area ex a caldo della Ferriera di Trieste e le aree limitrofe sono l'ambito all'interno del quale è prevista l'attuazione de:

- la MISP preconizzata dall'Accordo di Programma 2020 per l'attuazione del "*Progetto integrato di messa in sicurezza, bonifica e di reindustrializzazione dello stabilimento della Ferriera di Servola (TS)*", ai sensi dell'articolo 252-bis del decreto legislativo n. 152 del 2006 e s.m.i. (sottoscritto il 26/06/20, in seguito AdP) redatto da Logistica Giuliana;
- il progetto AdSPMAO n. 1951 finanziato con fondi del PNC (DL 77/2021 e al DM 330/2021) che include vari ambiti fra cui, i più rilevanti rispetto allo studio presente, quelli funzionali alla nuova stazione ferroviaria di Servola e la connessione viaria alla GVT.

Le aree sono ubicate nel territorio comunale di Trieste, si estendono su un'area fronte mare a ridosso della collina di Servola e tra lo stesso rilievo e quello di San Pantaleone che identificano la valle del Rio Primario.

L'area che fu dedicata alla produzione della ghisa (da fine '800 fino al 12.04.2020) dal punto di vista stratigrafico, risulta essere particolarmente complessa ed eterogenea, essendo stata oggetto di innumerevoli interventi di imbonimento tramite accumulo di materiali di origine varia sia naturale che antropica.

In estrema sintesi l'area, a partire dal piano campagna verso il basso, è costituita fondamentalmente da quattro unità stratigrafiche (si vedano i dettagli nella Relazione Geologica):

- *materiale di riporto*, caratterizzato da estrema variabilità tipologica sia in senso verticale che orizzontale, che risulta essere costituito anche da scarti di lavorazioni della stessa Ferriera (scorie, loppa, carbone, ghisa, ferro, minerali) oltre a detriti edili e macerie di provenienza sconosciuta ma in parte probabilmente anche provenienti dalla fase di demolizione e ricostruzione dell'area triestina dopo la seconda guerra mondiale, essendo potenzialmente presenti tra l'altro anche residui bellici;
- *sedimenti fluvio-lacustri e di barena alla foce del Rio Primario*, che si interdigitano verso il largo con
- *sedimenti marini* a granulometria varia;
- *Formazione Marnoso-arenacea (Flysch)*, la cui parte più superficiale risulta frequentemente alterata e disaggregata e che localmente è detta "*Crostello*".

La complessità topologica dei rapporti tra le unità idrogeologiche è particolarmente evidente nella prima delle unità "materiale di riporto", in quanto essa risulta possedere una eterogeneità intrinseca alla particolare tecnica "povera" di imbonimento applicata.

Al di sotto del riporto, si ritrovano importanti depositi quaternari a composizione variabile tra quella dei limi argillosi a tratti torbosi, limi argillosi e sabbiosi con resti conchigliari e quella delle argille sabbiose e ghiaiose. Le caratteristiche fisiche e meccaniche di tali termini

risultano estremamente variabili ed evidenziano il succedersi nel tempo di differenti ambienti di sedimentazione, da continentale a marino, manifestatesi a partire dall'ultima glaciazione wurmiana.

Il complesso del cosiddetto Flysch risulta contraddistinto da un'alternanza ritmica di strati arenacei (di spessori decimetrici) e marnosi (di colore marrone-ocraceo e spessori centimetrici). Le arenarie sono rocce a matrice carbonatica inglobanti una frazione detritica costituita essenzialmente da granuli di calcite, quarzo, altri silicati e resti di microfossili. Le marne sono rocce carbonatiche argillose ed hanno composizione mineralogica simile alle arenarie, ma si differenziano per una maggiore percentuale di carbonati a scapito degli altri componenti mineralogici. Tale substrato roccioso, essendo dotato di permeabilità per fratturazione e subordinatamente per porosità, ha il suo grado di permeabilità che può essere considerato basso o molto basso in relazione all'alterazione e disarticolazione a cui è soggetto nel livello superficiale, come per alto riscontrato in buona parte dei sondaggi realizzati.

L'acquifero superficiale, ubicato nei terreni di riporto, ospita una falda di tipo "libero" ed è caratterizzato da permeabilità per porosità variabile in funzione dell'eterogeneità dei materiali da cui è composto. Le superfici di confinamento idrogeologico verso il basso dell'acquifero libero sono costituite in parte dai depositi marini limo argillosi ed in parte, dove non presenti i primi, dal substrato flyschoidale. In tale quadro d'insieme, i dati di monitoraggio della falda e le prove di permeabilità eseguite hanno confermato che la falda superficiale raggiunge il suo equilibrio piezometrico al di sopra delle acque marine. Il deflusso idrico della stessa risulta condizionato dalla disomogeneità dei materiali antropici di riporto, dalla variabilità stagionale della ricarica, che è direttamente correlata con gli apporti meteorici, e dalle escursioni di marea, che influiscono sul deflusso verso mare creando, tra l'altro, caratteristiche condizioni di flusso e riflusso.

Il primo studio sulla idrogeologia della Ferriera di Servola è stato eseguito dall'Università di Trieste nel 2015. Lo studio attuale descrive la procedura di realizzazione del modello geologico che integra tutti i dati a disposizione in un modello idrogeologico a stato stazionario prima del barrieramento in progetto. Inoltre, questo studio riporta un'analisi completa di come il previsto barrieramento in progetto influisce sul flusso sotterraneo dei fluidi contenuti nei terreni di riporto della Ferriera e limita il trasferimento d'inquinanti verso il mare e verso la deviazione del Rio Primario (detta anche nel seguito semplicemente Rio Primario).

1.2 Scopo della modellazione idrogeologica

Alla base del modello idrogeologico vi è la realizzazione di un modello geologico di dettaglio che approssimi il più ragionevolmente possibile la realtà fisica e la topologia delle relazioni tra le varie unità litologiche che danno luogo all'acquifero complesso presente all'interno dei terreni di riporto della Ferriera di Servola.

Se ai fini di un'approssimazione grossolana può essere considerato ragionevole unificare il materiale di riporto in una sola unità litologica, ai fini di una progettazione anche preliminare è necessario definire con maggiore dettaglio tale unità. Tale definizione deve permettere di stabilire, per lo meno ad un livello statisticamente adeguato, gli effettivi percorsi del flusso sotterraneo e le relazioni tra i vari livelli dell'acquifero interdigitato superficiale con l'acquifero profondo presente nella sottostante formazione del Flysch.

Tale modello geologico è stato prodromico alla progettazione esecutiva del progetto Invitalia di barrieramento fisico lato mare della Ferriera (approvato nel 2021 e oggi in fase di realizzazione), costituito nella sostanza da un setto verticale impermeabile e da un drenaggio di raccolta dei deflussi subsuperficiali. Il citato modello idrogeologico descrive in dettaglio anche il deflusso sotterraneo a seguito del barrieramento di progetto, caratterizzando le portate lungo il drenaggio e le eventuali azioni necessarie a minimizzare il flusso che dai terreni di riporto della Ferriera tramite il Rio Primario ed il suo drenaggio basale arrivano al mare.

Su questa base idrogeologica devono essere impostate le opere progettuali della Nuova Stazione di Servola che potrebbero verificare sostanzialmente i deflussi sotterranei. Lo scopo di questa relazione è, pertanto, verificare che le citate opere progettuali previste non alterino quelle già progettate ed al momento in fase di costruzione.

1.3 Lavori progressi

La relazione *"Il modello idrogeologico dell'area dello stabilimento Ferriera di Servola (TS) - relazione finale"* redatta in data 27/10/2015 dall'Università degli studi di Trieste con la responsabilità scientifica del prof. dott. ing. Paolo Bevilacqua a seguito dell'affidamento dell'incarico da parte della Società Siderurgica Triestina s.r.l. ha avuto come obiettivo la costruzione di un modello idrogeologico che è stato propedeutico alla realizzazione del bando di gara:

"Il modello che è stato sviluppato sulla base delle informazioni esistenti e di quelle raccolte durante lo studio in oggetto, fornisce informazioni sulla struttura idrogeologica sito-specifica, sulla distribuzione spaziale dei parametri idrogeologici, sui flussi idrici sotterranei e sulla distribuzione dei contaminati.

Sulla base delle informazioni raccolte e dei risultati delle simulazioni si ritiene utile e indispensabile effettuare alcuni ulteriori approfondimenti circa le caratteristiche dell'acquifero e del materiale attraversato dal flusso sotterraneo".

Questo stesso modello progressivo indica, quindi, la necessità di approfondimenti sia a livello delle conoscenze sulle unità idrogeologiche dell'area, sia sul vero e proprio flusso sotterraneo che dalle prime deriva. In particolare, dalle indagini piezometriche era emersa la possibilità che l'acquifero profondo, presente nella formazione del Flysch, fosse in pressione rispetto all'acquifero superficiale contenuto nei materiali di riporto.

Il modello idrogeologico attuale è basato quindi, tra l'altro, sulle nuove campagne d'indagine geognostiche eseguite nel 2018 dall'Agenzia INVITALIA, con le associate misure di conducibilità idraulica e dati di monitoraggio in continuo della falda e dei principali parametri chimico-fisici, realizzati nel 2018-2019 (Borgia, 2019). In particolare, i dati di monitoraggio sono stati utilizzati per la calibrazione del modello idrogeologico al fine di stabilire le portate nei vari settori di recapito (il mare ed il Rio Primario) nelle condizioni precedenti e successive alla messa in sicurezza dell'acquifero contenuto nei terreni di riporto della Ferriera.

Pertanto, l'accuratezza del modello idrogeologico e dei risultati ottenuti, oltre alla sua applicabilità nella progettazione della Nuova Stazione di Servola dipendono logicamente ed in forma stringente dalla densità, qualità ed accuratezza dei dati geognostici e di

monitoraggio forniti allo scrivente. A questo fine su tali dati sono state, tra l'altro, anche eseguite analisi di qualità specifiche al fine di valutarne l'accuratezza.

1.4 Impostazione del modello idrogeologico

Il primo passo, per la realizzazione di un modello numerico della idrogeologia della Ferriera, è lo sviluppo del modello concettuale. Esso deve in primo luogo rispecchiare la geologia ed in secondo luogo l'idrodinamica sotterranea dell'area. Ovviamente, il modello concettuale rappresenta una semplificazione ed idealizzazione delle condizioni idrogeologiche effettive, ma deve tuttavia costituire una rappresentazione coerente e completa della realtà fisica presente nell'area. In pratica, il modello concettuale già di per sé condiziona in forma esclusiva i risultati di qualunque modello numerico venga poi da questo realizzato.

Il modello numerico successivo costituisce una rappresentazione matematica discretizzata dello stesso modello concettuale, che integra le caratteristiche fisiche del sistema naturale da simulare nelle espressioni matematiche classiche del flusso nei mezzi porosi. L'affidabilità dei risultati del modello idrogeologico numerico dipende essenzialmente dalla bontà del modello concettuale che rappresenta. In sintesi, risulta essere più accurato e, quindi, applicabile alla progettazione un modello numerico approssimativo ma basato su di un modello concettuale corretto, che un modello numerico "perfetto" ma basato su un modello concettuale non accurato.

Per la realizzazione dei modelli concettuale e numerico dell'area della Ferriera è stato necessario procedere alla creazione di un modello geologico statisticamente affidabile e all'assunzione di condizioni al contorno adeguate a descrivere le condizioni naturali di flusso al margine dell'area investigata. Infine, il modello numerico deve rappresentare la stessa complessità geologica ed idrogeologica identificata nel modello concettuale da cui deriva.

2 MODELLO GEOLOGICO

2.1 Dati di input e software

Il modello geologico è stato realizzato adoperando il programma GMS (Groundwater Modeling System) della AquaveoTM, nella versione 10.3.5, come interfaccia ai codici di calcolo MODFLOW e MODPATH del US Geological Survey, che costituiscono gli standard internazionali adoperati per questo tipo di simulazioni. Il GMS è una delle più complete e articolate interfacce grafiche esistenti sul mercato per la modellizzazione geologica, permettendo di ricostruire la geologia non solo attraverso la creazione di sezioni geologiche e volumi litologici, ma anche attraverso la ricostruzione palinspastica dei processi geologici di deposizione¹.

Il primo gradino per la realizzazione di un modello geologico, che approssimi per quanto possibile la realtà naturale, consiste nell'integrare tutte le conoscenze acquisite nell'area in esame costituendo una rappresentazione sufficientemente schematica, omogenea e razionale della realtà geologica locale.

Pertanto sono stati raccolti tutti i dati geostatigrafici al momento disponibili provenienti da una serie di campagne di sondaggi geognostici eseguiti nel tempo tra il 1971 ed il 2018 e mai rielaborati ed integrati in un unico modello. Questi dati sono costituiti da 410 sondaggi che di seguito sono suddivisi per tipologia ed anno di esecuzione:

- Nell'area di proprietà (191.438 mq)
 - Numero Sondaggi PZ (da 5 a 10m – nel 2005): 11
 - Numero Sondaggi S (da 4 a 10m – nel 2005): 63
- Nell'area demaniale (325.230 mq)
 - Numero Sondaggi PZ (da 5 a 25m – nel 2008): 13
 - Numero Sondaggi S (da 4 a 27m – nel 2008): 119
- Altri sondaggi
 - Numero Sondaggi storici SS (da 3,85 a 38,4m – nel 1971): 54
 - Numero Sondaggi S bis (da 14 a 27,20 m – nel 1997): 8
 - Numero Sondaggi S52-F2 – S102-F1 (da 7 a 27 m – nel 2005 e 2008): 41

¹ Borgia A., Cattaneo L., Marconi D., Delcroix C., Rossi E.L., Clemente G., Amoroso C.G., Lo Re F., Tozzato E., 2010. Using a MODFLOW grid, generated with GMS, to solve transport problem with TOUGH2 with complex geological environments: the intertidal deposits of the Venetian Lagoon. TOUGH 2009. Computer & Geosciences, doi 10.1016/j.cageo.2010.11.007.

- Numero Sondaggi Autorità Portuale di Trieste S1-APT_S30-APT (da 6,3 a 38 m – nel periodo 2008-2009): 17
- Numero Sondaggi SM1/2/3/SP7 (da 10 a 15m – nel 2015): 4
- Numero Sondaggi storici DZ (da 10 a 29,3m – nel 2015): 4
- Numero Sondaggi NS1-NS3 (da 40 m – nel 2015): 2
- Numero Sondaggi PZ A/W/X/Y/02b/bis (da 10 a 16 m – nel 2017): 8
- Numero Sondaggi SE01/02/03/SI01 (da 8 a 13,80 m – nel 2017): 4
- Numero Sondaggi SPF – parco fossile – (da 15 a 22 m – nel 2018): 5
- Numero Sondaggi SPM – parco minerali – (da 7,5 a 25 m – nel 2018): 5
- Numero Sondaggi PZ1A1 – PZ11A2 (da 3,5 a 22 m – nel 2018): 18
- Numero Sondaggi S1A1 – S6A1 (da 10 a 42,5 m – nel 2018): 31
- Numero Sondaggi S-A/ S-C/S-A (da 5 a 12,5 m – nel 2018): 3

Al fine di una ricostruzione geologica utile per la modellistica idrogeologica è necessario costruire una scala di permeabilità (il parametro che più di tutti influenza il flusso nei mezzi porosi) direttamente correlata ad una scala delle litologie "standard" più frequentemente incontrate nelle sezioni stratigrafiche dei sondaggi stessi.

Si deve ricordare, infatti, che, secondo l'equazione di Darcy (eq. 1), la permeabilità (k – kappa minuscola) è definita con unità di misura m^2 , mentre la conducibilità idraulica (K – kappa maiuscola) ha per convezione unità di misura m/s . Esemplificando in una direzione spaziale soltanto,

$$v_x = -\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (1);$$

dove v_x è la velocità nella direzione di flusso, k è la permeabilità del mezzo poroso, μ è la viscosità del fluido che permea il mezzo poroso e dp/dx è il gradiente idraulico (il gradiente della pressione) nella direzione x . Qualora entri in gioco la gravità, il gradiente di pressione deve essere diverso dal gradiente idrostatico al fine di indurre moto nel fluido. Il segno negativo indica che il fluido si muove nella direzione negativa del gradiente idraulico (i), cioè da pressioni maggiori a pressioni minori. La relazione tra le due differenti grandezze, della misura della facilità con cui un mezzo permeabile permette ad un fluido di muoversi al suo interno sotto l'effetto di un gradiente di pressione, proviene dalla relazione

$$\frac{dp}{dx} = \rho g \frac{dh}{dx} \quad (2);$$

nella quale è stata assunta costante la densità del fluido, e da cui deriva insieme alla equazione numero (1)

$$v_x = -Ki \quad (3);$$

dove

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (4);$$

ed

$$i = \frac{dh}{dx} \quad (5).$$

ρ e g , secondo la convenzione comune, sono rispettivamente la densità del fluido e l'accelerazione di gravità.

Si osserva che la conducibilità idraulica non soltanto dipende dalla permeabilità del mezzo, ma anche, tramite la densità e la viscosità, dalla tipologia del fluido e dalla sua temperatura e pressione. Ad esempio, a pressione atmosferica, la viscosità dell'acqua – e quindi la conducibilità idraulica – varia di circa il 50% passando dai 5 ai 15 °C.

Pertanto, quando si parla di conducibilità idraulica è necessario specificare il fluido a cui essa è riferita, e la temperatura e pressione dello stesso. Conoscendo infine l'equazione di stato del fluido per il rango di temperature e pressioni d'interesse è facile passare da una grandezza all'altra. Quanto affermato è particolarmente importante per l'area della Ferriera di Servola dove sono presenti zone impregnate da idrocarburi e fluidi a densità diversa (come l'acqua di mare e quella di falda). Nello specifico la conducibilità idraulica (K) misurata per l'acqua ad una data temperatura, non può essere direttamente applicata a quei volumi in cui vi è presenza di idrocarburi o acqua di mare. Ne segue che in questa relazione, per quanto possibile, si preferisce l'utilizzo della permeabilità, al posto della conducibilità idraulica, come parametro di caratterizzazione idrogeologica delle varie litologie presenti nei sondaggi.

La tabella seguente indica le litologie utilizzate nella modellazione geologica con le relative permeabilità. Tali valori della permeabilità sono stati ottimizzati tramite le misure di conducibilità idraulica ottenute dalle misure di campagna e di laboratorio come meglio esplicitato nei successivi capitoli di questa relazione.

Tabella 2-1: Corrispondenza tra litologie e permeabilità utilizzate nel modello definitivo.

n.	Litologia	Permeabilità (m ²) k	
		orizzontale	verticale
1	Ghiaia	1.00E-10	1.00E-10
2	Ghiaia sabbiosa	5.00E-11	5.00E-11
3	Sabbia ghiaiosa	1.00E-11	1.00E-11
4	Sabbia	5.00E-12	5.00E-12
5	Sabbia limosa	1.00E-12	3.33E-13
6	Limo sabbioso	5.00E-13	1.66E-14
7	Limo	1.00E-13	3.33E-14
8	Limo argilloso	5.00E-14	5.00E-15
9	Argilla limosa	1.00E-14	1.00E-15
10	Argilla	5.00E-15	5.00E-16
11	Crostello	1.00E-13	1.00E-13
12	Flysch	5.00E-14	5.00E-14
13	Scorie ferrose	1.00E-11	1.00E-11
14	Loppa	1.00E-12	1.00E-12
15	Cemento	1.00E-11	5.00E-11
16	Asfalto	1.00E-14	1.00E-14
17	Carbone	1.00E-12	1.00E-12

Nella successiva realizzazione del modello geologico sono state fatte le seguenti approssimazioni.

2.2 1° approssimazione

Come prima approssimazione è stato necessario identificare i "materiali idrogeologici" (le litologie di cui alla Tabella 2-1) con cui rappresentare le stratigrafie dei sondaggi. Considerando che essi sono stati eseguiti nel tempo da diverse società e persone, ne segue che le stratigrafie restituite contengono anch'esse un'approssimazione difficilmente quantificabile con certezza, che può dipendere sia dalle specifiche procedure di sondaggio delle varie società, che dalla sensibilità e capacità delle singole persone nel distinguere praticamente "ad occhio" e nel descrivere omogeneamente i vari materiali incontrati. Pertanto, sono stati fatti vari sopralluoghi in Ferriera per analizzare i sondaggi realizzati nell'ultima campagna geognostica e "sintonizzarsi" con i responsabili della redazione delle stratigrafie degli stessi nella identificazione delle descrizioni litologiche. Le carote ottenute sono state anche paragonate alle foto delle stesse. In ultimo, sono state rivisitate tutte le stratigrafie dei sondaggi realizzati in precedenza, reinterprestando le descrizioni presenti secondo la sequenza di litologie (materiali) rappresentata in Tabella 2-1. A titolo esemplificativo si riporta nelle figure seguenti l'interpretazione di alcuni sondaggi provenienti da varie campagne geognostiche.

A questo fine si deve immediatamente indicare che talvolta questa approssimazione può comportare errori difficilmente quantificabili con certezza. Infatti, la condizione ideale ai fini del modello idrogeologico, ma probabilmente impraticabile nella cantierizzazione dei sondaggi, sarebbe stata quella della misura diretta delle permeabilità orizzontali e verticali su ognuna delle litologie incontrate in ognuno dei sondaggi e, sulla base di queste misure, poi indicarne la idro-litologia.

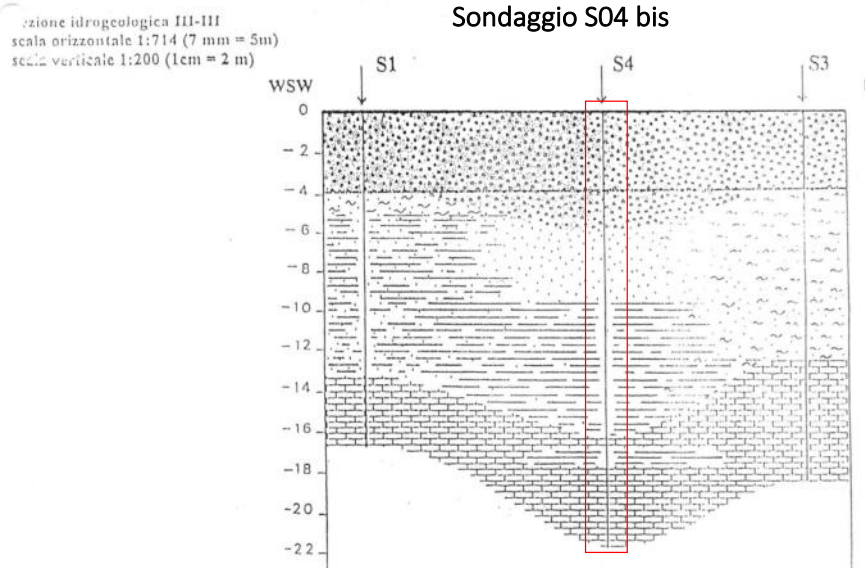


Figura 2-1: Sondaggio S4 bis eseguito nel 1997. Per questi non sono presenti le schede dei singoli sondaggi, ma solo sezioni interpretative

Sondaggio storico SS7


IMPRESA DOTT. ING. R. ROSTIROLLA UFFICIO STUDI E PROGETTAZIONI TRIESTE Via dell'Annunziata 6 - tel. uff. 24165, 24268, officina 820021		COMMITTENTE: I. C. L. I. S. - Roma LAVORO: Ricerche geognostiche LOCALITÀ: Italsider stab di Trieste						
FORO N. 6 bis Coordinate:		Quota pieno campagna: + 33.69 Inclinazione: verticale		Data inizio sondaggio: 16-2-1971 Data fine sondaggio: 16-2-1971				
quote sul m.m. m.	profondità totale m. (quota p.c.)	spessore strato m.	spessore specifico	descrizione del terreno attraversato	perforazione tipo diametro mm. investimento diametro mm.	campioni tipo da m. e m. n. riferim. campione		Osservazioni e Note
+ 33.69	0.00	1.30		Ghiaia sabbiosa terreno di riporto	R07 65	R1	1298	LEGGENDA: I -- Campione indisturbato R -- Campione rimeneggiato
+ 32.39	- 1.30	1.30		Limo sabbioso (paleosuolo) marna				
+ 31.09	- 2.60	0.60		Crostello crostello		R2	1299	
+ 30.49	- 3.20	1.80		Flysch arenaria bruna compatta		R3	1300	
+ 28.69	- 5.00			fine trivellazione Text				

Figura 2-2: Questi sondaggi sono stati eseguiti nel 1971 e pertanto son chiamati "storici".

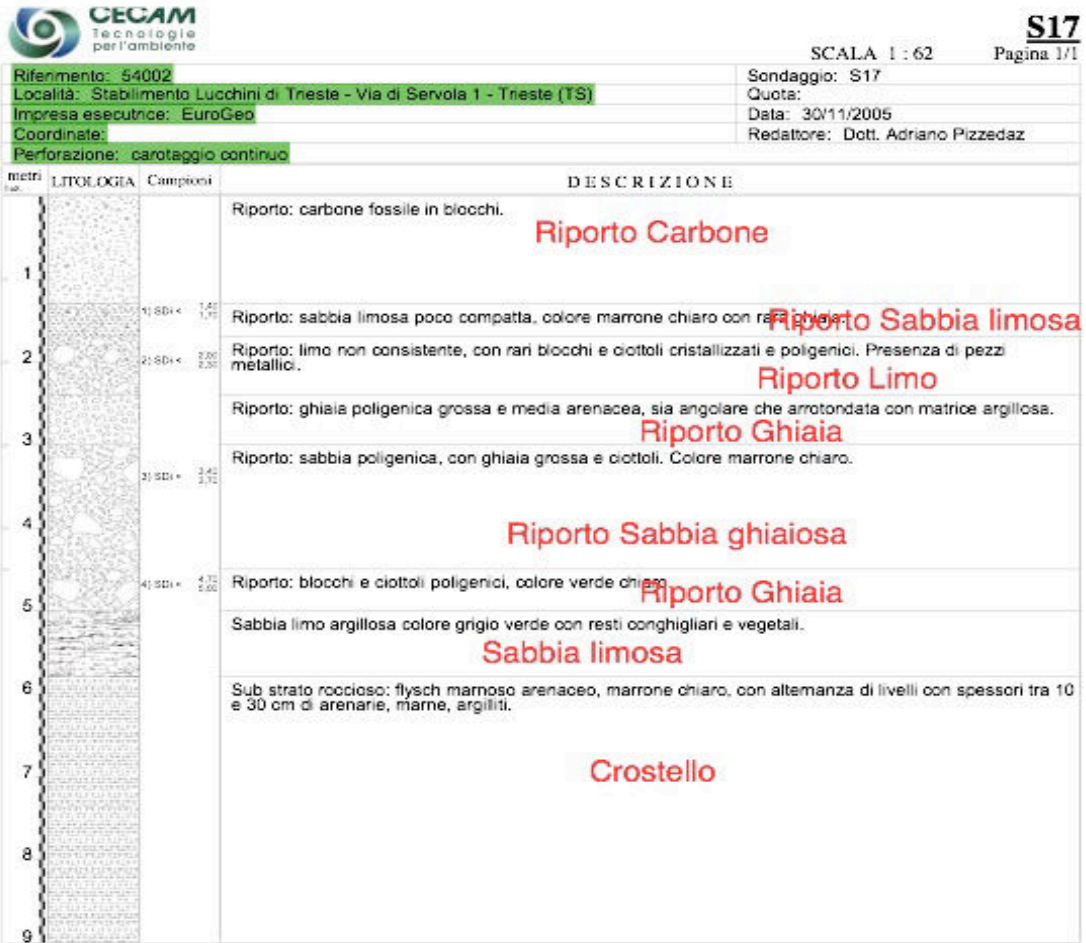


Figura 2-3: Questi sondaggi denominati "S" sono stati eseguiti nel 2005 e nel 2008

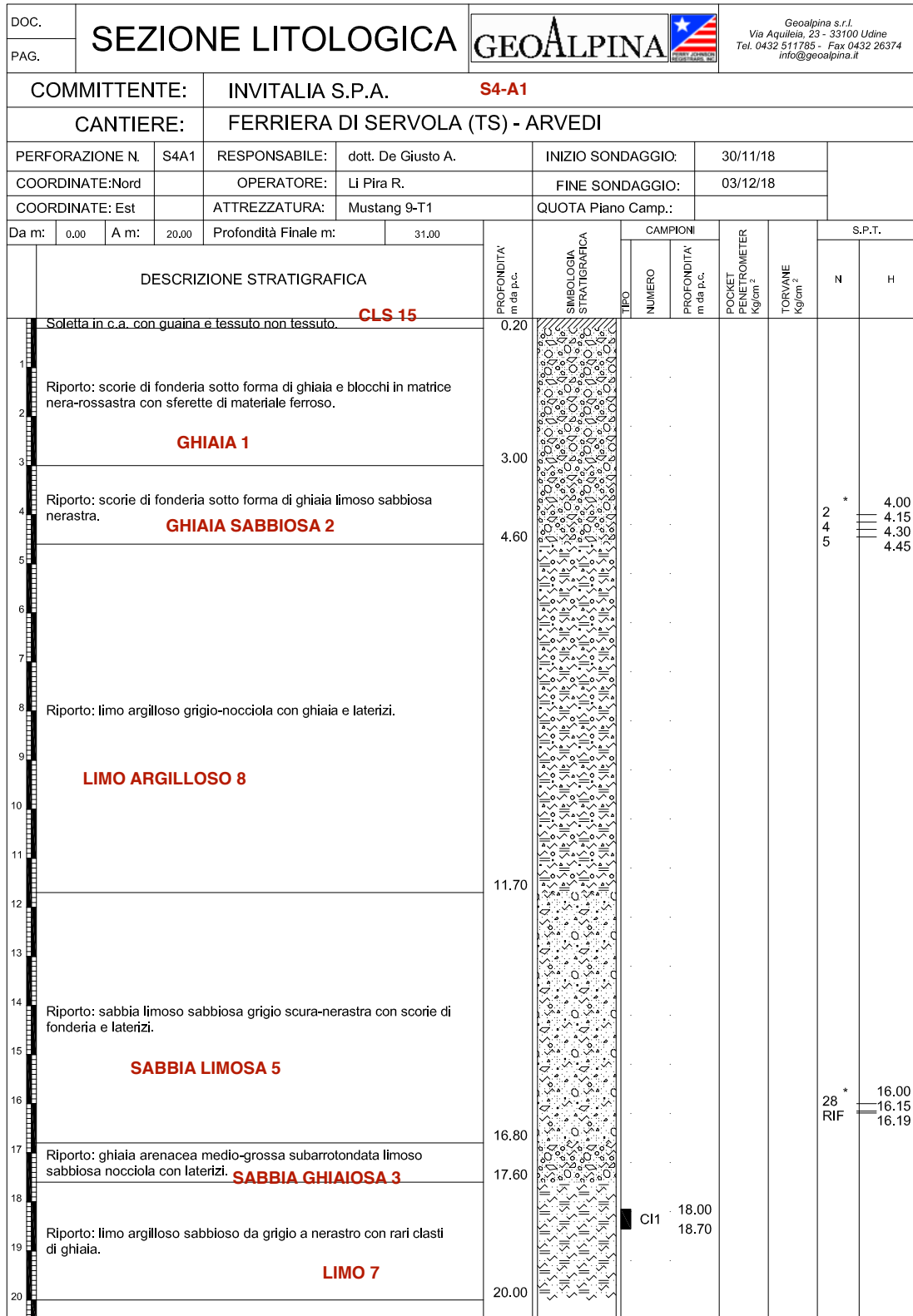


Figura 2-4: Primi 20 m del sondaggio S4A1 della campagna geognostica 2018.

I sondaggi sono stati successivamente riportati all'interno del software GMS tramite una tabella nella quale la stratigrafia è indicata convenzionalmente dall'alto verso il basso

tramite la quota (in metri) sul livello medio del mare del contatto superiore. La fine del sondaggio è indicata dalla quota di fondo pozzo alla quale è ovviamente associato l'ultimo materiale incontrato nella stratigrafia. Il software permette di stabilire una successione litostratigrafica (quella effettivamente rilevata) ed una successione idrostratigrafica che è quella effettivamente utilizzata nel calcolo numerico. Pertanto, lo stesso permette di associare facilmente a ciascun sondaggio unità idrostratigrafiche senza variare le unità litologiche dei sondaggi stessi. Permette inoltre, nel caso sia possibile, di definire orizzonti stratigrafici specifici (Figura 2-5 e Figura 2-6). In questo modello le unità idrostratigrafiche corrispondono alle unità litostratigrafiche.

Tramite la rappresentazione grafica dei sondaggi (Figura 2-7) è stato possibile tentare di ricostruire le sezioni stratigrafiche di tutta l'area della Ferriera (Figura 2-8). Come può essere osservato, sono state costruite sezioni NE-SO, in quanto si potrebbe in prima approssimazione supporre che l'abbonimento delle aree a mare sia avvenuto proprio da terra verso mare, condizionando così la formazione del "deposito" e permettendo una più coerente ricostruzione delle sezioni stratigrafiche.

In pratica, per quanto possano essere distinti volumi omogenei di materiali più grossolani alla foce del Rio Primario, o sedimenti più fini (limi argillosi) "al largo" della collina di Servola, o ancora zone con riporto omogeneo di materiali altamente drenanti (ghiaie) nell'area di imbonimento del Rio Primario, la variabilità litostratigrafica sia orizzontale che verticale predomina tutto il volume di materiali al di sopra del Flysch.

Questa estrema variabilità areale litologica e stratigrafica, che diventa particolarmente esasperata nei volumi di riporto antropico, impedisce di fatto di definire orizzonti litostratigrafici omogenei che possano essere tracciati su tutta l'area o almeno su una parte significativa di questa. Cioè impedisce, di fatto, di creare una sequenza stratigrafica ordinata in relazione a cosa "sta sotto", che si è quindi "deposta" prima, e cosa "sta sopra" che è, quindi, più "giovane".

Pertanto, l'eterogeneità riscontrata impedisce praticamente di ricostruire dalle sezioni geologiche volumi litostratigrafici omogenei a cui poter attribuire delle relazioni temporali univoche. Per realizzare un modello geologico adeguato, si deve necessariamente evolvere a sistemi di analisi dei depositi diversi da quelli "standard" generalmente utilizzati.

A questo fine si ritiene opportuno dover affrontare il problema da un punto di vista sostanzialmente diverso. Cioè si deve partire dalla definizione del grado di accuratezza che il modello geologico deve necessariamente avere in relazione alla modellistica numerica. Conseguentemente è fondamentale discutere di un'ulteriore serie di approssimazioni che devono essere adottate per la realizzazione del modello geologico.

TABELLA RIASSUNTIVA DELLE STRATIGRAFIE DEI SONDAGGI						
Name	X	Y	Z corrected for ground ele	SoilID	HGUID	HorizonID
PZ23	2424505.426	5053158.497	3.18	2	2	0
PZ23	2424505.426	5053158.497	2.68	7	7	0
PZ23	2424505.426	5053158.497	2.18	8	8	0
PZ23	2424505.426	5053158.497	-2.62	1	1	0
PZ23	2424505.426	5053158.497	-8.82	2	2	0
PZ23	2424505.426	5053158.497	-12.32	3	3	0
PZ23	2424505.426	5053158.497	-13.02	5	5	0
PZ23	2424505.426	5053158.497	-13.62	6	6	0
PZ23	2424505.426	5053158.497	-14.62	8	8	0
PZ23	2424505.426	5053158.497	-16.82	8	8	0
S195	2424407.791	5053035.776	3.03	3	3	0

Figura 2-5: Esempio di tabella stratigrafica così come inserita nel software GMS.

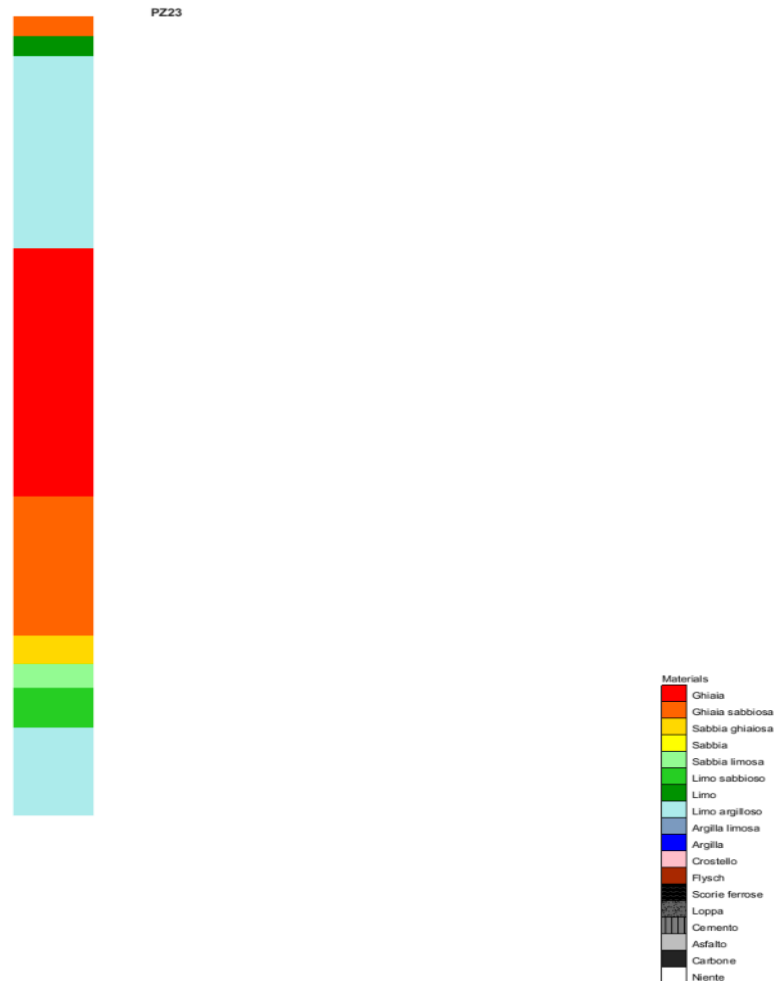


Figura 2-6: Visualizzazione della stratigrafia del sondaggio PZ23. A destra la legenda dei colori in funzione delle unità litostratigrafiche utilizzate. Notare che per utilità nella modellistica geologica è opportuno definire un materiale generico "Niente".

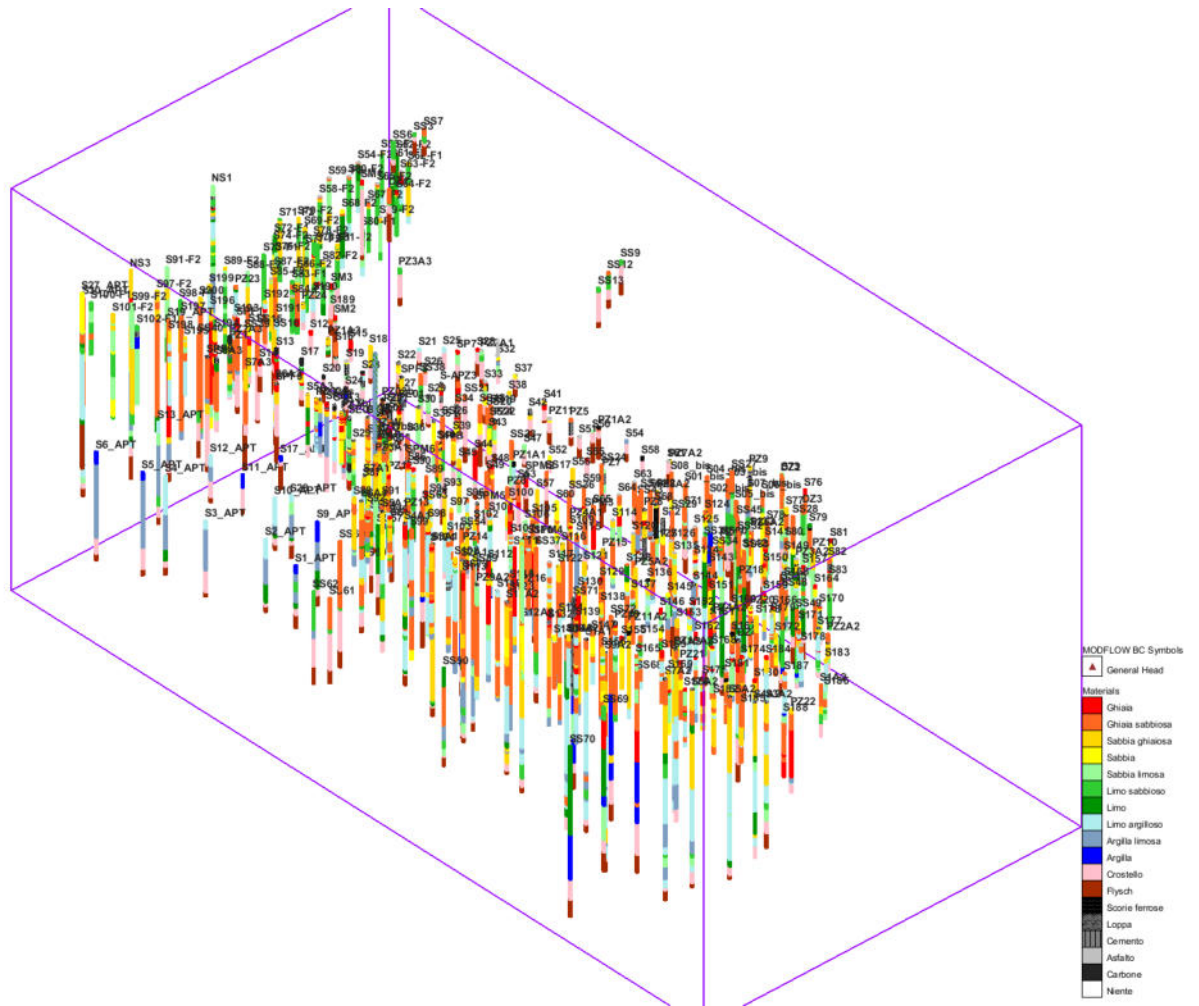


Figura 2-7: Visualizzazione di tutti i sondaggi utilizzati nella generazione del modello geologico. Si evidenzia la grande variabilità litologica sia verticale che orizzontale senza specifici orizzonti facilmente definibili a meno dei due orizzonti riferiti al "Crostello" ed al Flysch. A destra la legenda dei colori. Esagerazione verticale di 10 volte.

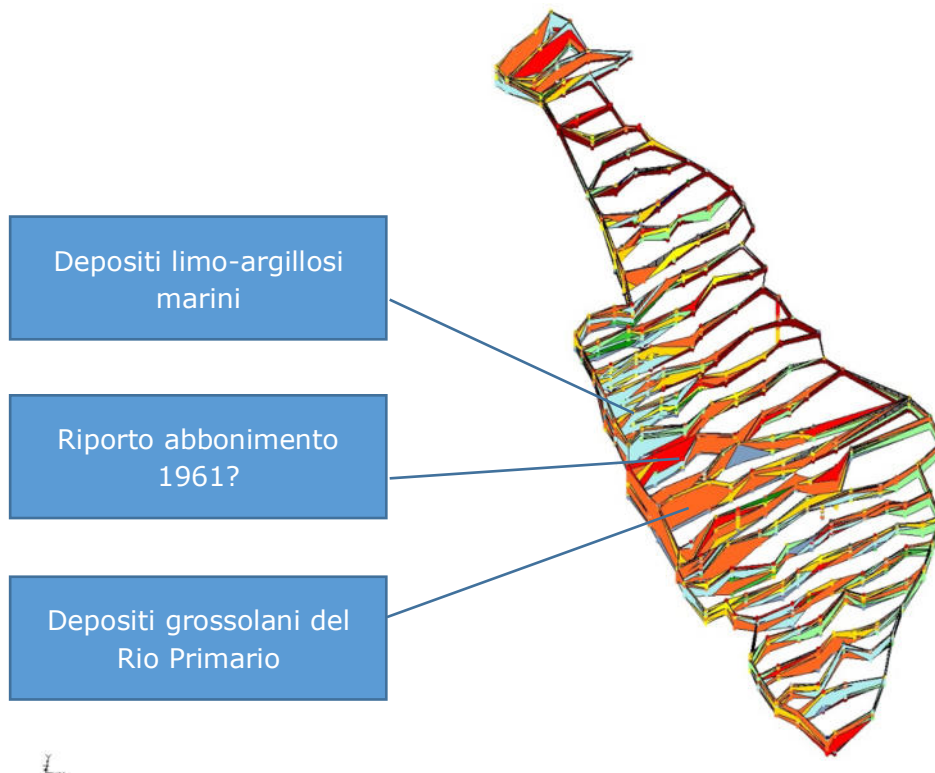


Figura 2-8: Realizzazione delle sezioni stratigrafiche del modello. Notare l'eterogeneità stratigrafica che difficilmente permette di stabilire delle correlazioni orizzontali estese a tutta l'area della Ferriera. La corrispondenza tra colori ed unità stratigrafiche è la stessa della figura precedente. Esagerazione verticale di 5 volte.

2.3 2° approssimazione

La seconda approssimazione da fare è diretta conseguenza della densità dei sondaggi geognostici. È inutile, infatti, fare un modello geologico molto più accurato di quanto i sondaggi stessi possano permettere. D'altronde è altrettanto inutile fare un modello geologico molto più accurato di quanto poi il modello numerico sia in grado di rappresentare. Pertanto, dai dati geognostici si deve determinare subito l'approssimazione accettabile per la griglia di calcolo del modello numerico. Questa stessa approssimazione sarà quella necessaria e sufficiente da utilizzare anche per il modello geologico.

Dall'analisi dei sondaggi a disposizione si evidenzia che raramente nella stratigrafia degli stessi sono descritte unità litologiche con spessori molto inferiori ai 0.25 m. Pertanto, si è deciso di adottare 0.25 m come limite minimo di spessore degli strati per la realizzazione della griglia di calcolo del modello numerico e conseguentemente del modello geologico.

Inoltre, mentre nella verticale dei sondaggi vi è continuità delle conoscenze stratigrafiche, in orizzontale è necessario interpolare il materiale presente dai sondaggi limitrofi. Dato che la densità dei sondaggi è mediamente pari a circa 1 sondaggio ogni 50 m, si può ipotizzare di suddividere questi 50 m in cinque intervalli, creando quindi celle di 10 m x 10 m, che comporta poi utilizzare il seguente criterio di interpolazione. Ad ogni quota dal piano campagna, il materiale di un sondaggio può essere attribuito con buona approssimazione a tutta la cella in cui il sondaggio stesso si trova. Con un'approssimazione minore, tale materiale può essere attribuito anche alle celle immediatamente limitrofe alla prima. Con questo criterio vengono così definiti i materiali di quattro delle celle che formano il citato

intervallo tra due sondaggi distanti 50 m. Pertanto, rimane soltanto da stabilire il materiale della cella centrale all'intervallo, la terza a partire da quelle corrispondenti ad ognuno dei due sondaggi estremi. Il materiale di questa cella potrà essere attribuito in base alla distribuzione topologica complessiva dei materiali presenti all'intorno.

Questa semplice procedura nella scelta dei materiali per cadauna delle celle permette di ricostruire un modello geologico, statisticamente coerente, del volume dei materiali presenti nell'area della Ferriera di Servola dal piano campagna fino al Flysch su cui essi appoggiano. Essa soddisfa lo scopo di rappresentare la geologia sottostante la ferriera con il dettaglio maggiore possibile, considerando contemporaneamente la necessità di ridurre ad un minimo accettabile il numero delle celle in modo da rendere il successivo calcolo numerico ragionevolmente gestibile, sia per quanto riguarda l'utilizzo di memoria da parte dell'applicativo, sia per la velocità di esecuzione. Permette, inoltre, di paragonare le litologie inferite in un modello geologico costruito con i dati precedenti alla campagna geognostica del 2018 con quelle ricavate dal modello definitivo che includono appunto anche questa campagna. Questo modo di procedere dà la possibilità di valutare quantitativamente l'accuratezza dello stesso modello geologico e la necessità o meno di ulteriori raffinamenti.

Pertanto, si è proceduto in primo luogo a definire l'area di interesse in un parallelepipedo con dimensioni orizzontali pari a 1600 m di lunghezza parallelamente alla costa (orientata a 123,5° dal nord), per 790 m di larghezza perpendicolarmente a questa. Lo spessore del parallelepipedo è stato scelto di 77 m da +34 m a -43 m s.l.m.m. (Figura 2-9).

La griglia di calcolo è poi suddivisa per la sua lunghezza in 152 celle di 10 m più 2 celle di 20 m di lato ai due estremi, mentre per la sua larghezza è divisa in 67 celle di 10 m più 6 celle di 20 m di lato agli estremi. Infine, lo spessore è diviso in 149 celle di cui 72 di 0.25 m, 36 di 0.50 m e 41 di 1.0 m di spessore (Figura 2-9). In totale la griglia contiene più di 1.500.000 celle. Questa stessa griglia, creata per rappresentare il modello geologico, può così essere utilizzata successivamente per rappresentare il dominio di calcolo del modello numerico. A questo fine è bene ricordare che unicamente le celle che si trovano al di sotto della falda acquifera sono quelle che effettivamente saranno utilizzate nei calcoli dal modello numerico per un totale che supera il milione di celle.

Il successivo sviluppo del modello geologico necessita di tre ulteriori approssimazioni.

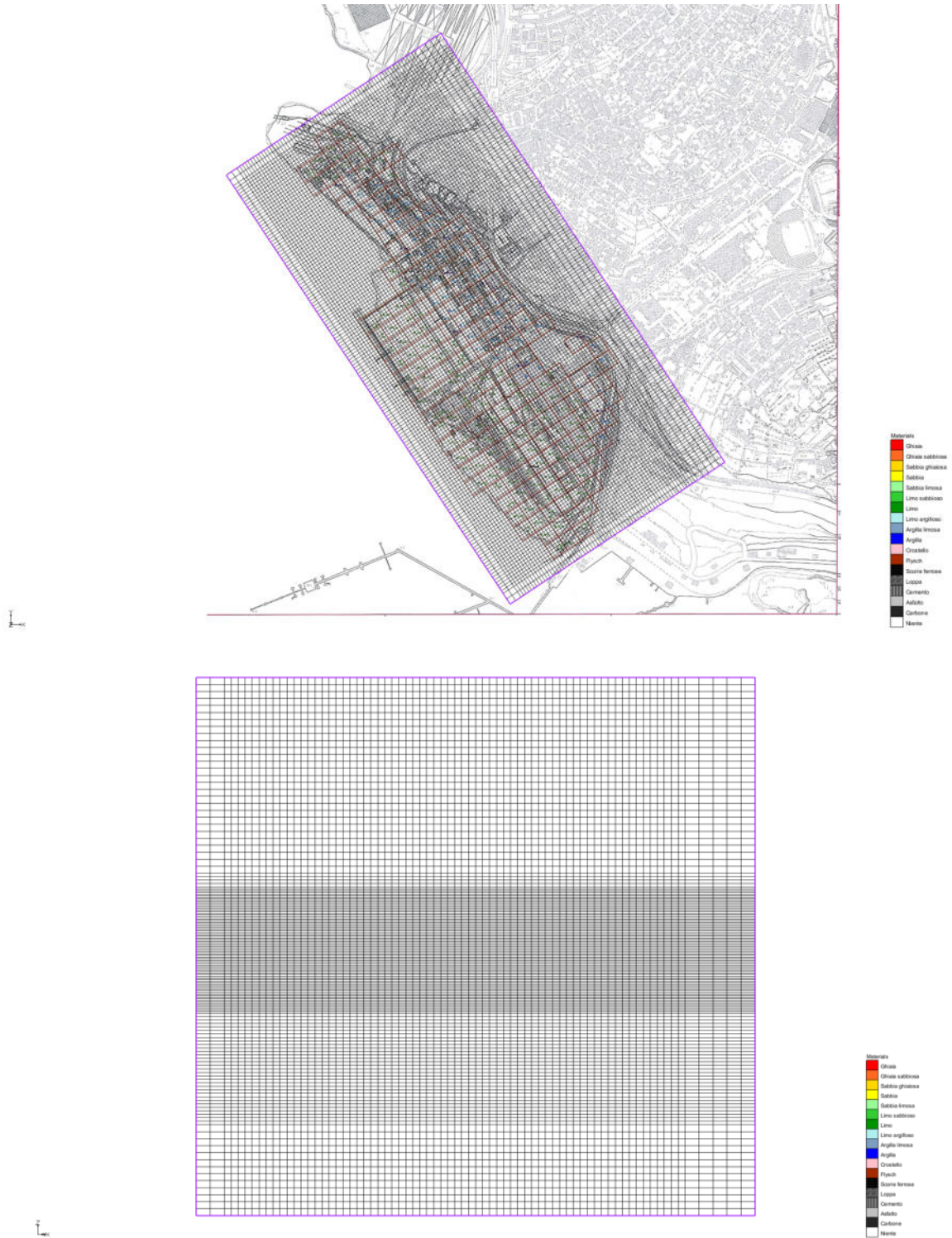


Figura 2-9: Griglia per la realizzazione del modello geologico. a) Orizzontalmente nella direzione x vi sono 152 celle di 10 m di lato, più due celle di 20 m di lato agli estremi per un totale di 1600 m; nella direzione y vi sono 67 celle di 10 m di lato più 2 celle all'estremo SO e 4 celle all'estremo NE di 20 m di lato per un totale di 790 m. b) Sezione verticale della griglia di calcolo; le celle più fini al centro hanno spessore di 0.25 m, seguono verso l'alto ed il basso celle con spessore 0.5 m ed infine celle con spessore 1.0 m. Esagerazione verticale: 10 volte.

2.4 3° approssimazione

A seguito della definizione della griglia di calcolo, devono essere trasferiti alla stessa griglia i dati di tutti i sondaggi (Figura 2-10). In particolare, alle celle di ogni colonna viene attribuito il materiale del sondaggio che è in tale colonna. Fondamentalmente le regole per identificare il materiale del sondaggio da trasferire alla cella sono due: 1) viene attribuito alla cella il materiale maggiormente rappresentato in essa; 2) qualora siano presenti due materiali diversi ed uno di questi, anche se è rappresentato in misura minore, è più importante nel determinare le caratteristiche idrogeologiche della cella, ad essa viene attribuito tale materiale. Ad esempio, in una sequenza di celle argillose, se vi è la presenza di un livello di sabbia che occupa una porzione inferiore al 50% di una cella, a questa viene attribuito come materiale la sabbia. Viceversa, ad una cella in cui compare un livello di argilla all'interno di una successione di celle sabbiose viene dato come materiale l'argilla anche se occupa una frazione più piccola della cella. Inoltre, qualora un sondaggio si trovi a cavallo di due colonne di celle, i materiali del sondaggio vengono trasferiti ad entrambe le colonne. Infine, se un sondaggio raggiunge il Flysch (o il "Crostello") viene attribuito come materiale il Flysch (o circa 2 m di "Crostello" più il Flysch) a tutta la restante colonna verso il basso. L'assunzione di attribuire uno spessore massimo di 2 m di "Crostello", qualora nel sondaggio non sia raggiunto il Flysch, deriva dall'esperienza acquisita sui vari sondaggi che li contengono entrambi, nei quali mediamente il "Crostello" ha uno spessore di circa 2 m. Dato che il "Crostello" ha generalmente una permeabilità maggiore del Flysch, questa approssimazione permette di mantenere la continuità laterale, limitandola verticalmente, dell'acquifero ivi presente.

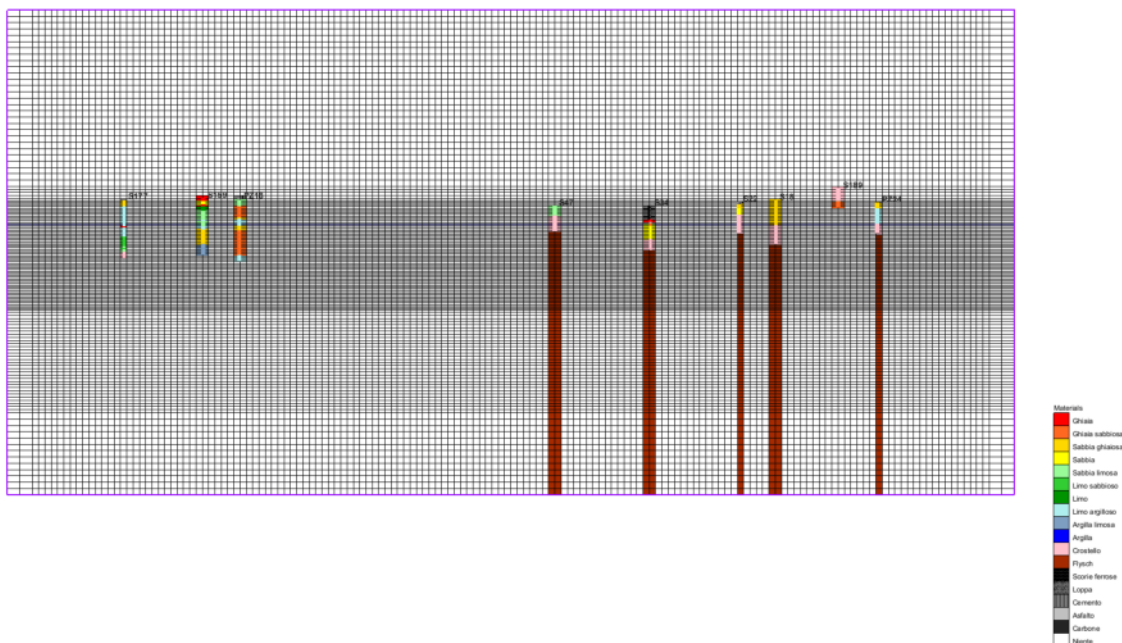


Figura 2-10: Trasferimento della litologia dei sondaggi geognostici alla griglia di calcolo. Notare nella zona NO della griglia (destra) che il Flysch, ove presente al fondo dei sondaggi, è stato esteso fino al fondo della stessa. Esagerazione verticale: 10 volte.

2.5 4° approssimazione

La successiva approssimazione è immediata e consiste nell'identificare in ogni strato della griglia aree ad uguale litologia, seguendo criteri che sono per quanto possibile: a) stratigrafici per quanto riguarda il Flysch ed il "Crostello", b) sedimentologici particolarmente in riferimento ai depositi fluvio-lacustri, barenali e marini, oltre che c) costruttivi in relazione ai materiali di riporto, e d) statistici in generale. In questa maniera sono stati ricostruiti gli strati che rappresentano in "sezioni" geologiche orizzontali la geologia dell'area della Ferriera di Servola (Figura 2-13 e 2-14) fino alla quota di +4 m sul piano campagna, quota massima raggiunta dai materiali di riporto. Inoltre, è stata utilizzata la topografia, rilevata durante questa commessa, inserendola nel modello sia per la parte della Ferriera sopra che per quella al di sotto del livello del mare (Figura 2-15).

Una nota aggiuntiva deve essere fatta in relazione ai criteri sopra elencati. Mentre da un punto di vista stratigrafico è accettabile che il Flysch occupi necessariamente la sezione inferiore del modello e sia coperto da uno "manto" variamente spesso di Crostello, le relazioni tra questo basamento ed i soprastanti depositi sedimentari può in qualche caso apparire complessa. Fondamentalmente la regola adottata nella ricostruzione di questi rapporti fa in modo che il Flysch ed il Crostello si "spostino regolarmente verso terra" salendo nella sequenza degli strati della griglia.

Per quanto riguarda invece i depositi sedimentari, è stata data importanza alla presenza del Rio Primario e ad una eventuale successione sedimentaria regressiva e trasgressiva che ha portato i sedimenti fluvio-lacustri al di sopra di quelli marini e viceversa. In alcune aree della Ferriera verso SE si osservano sedimenti limosi con alto contenuto di carbonio alla foce del Primario facendo supporre l'esistenza passata di facies barenali.

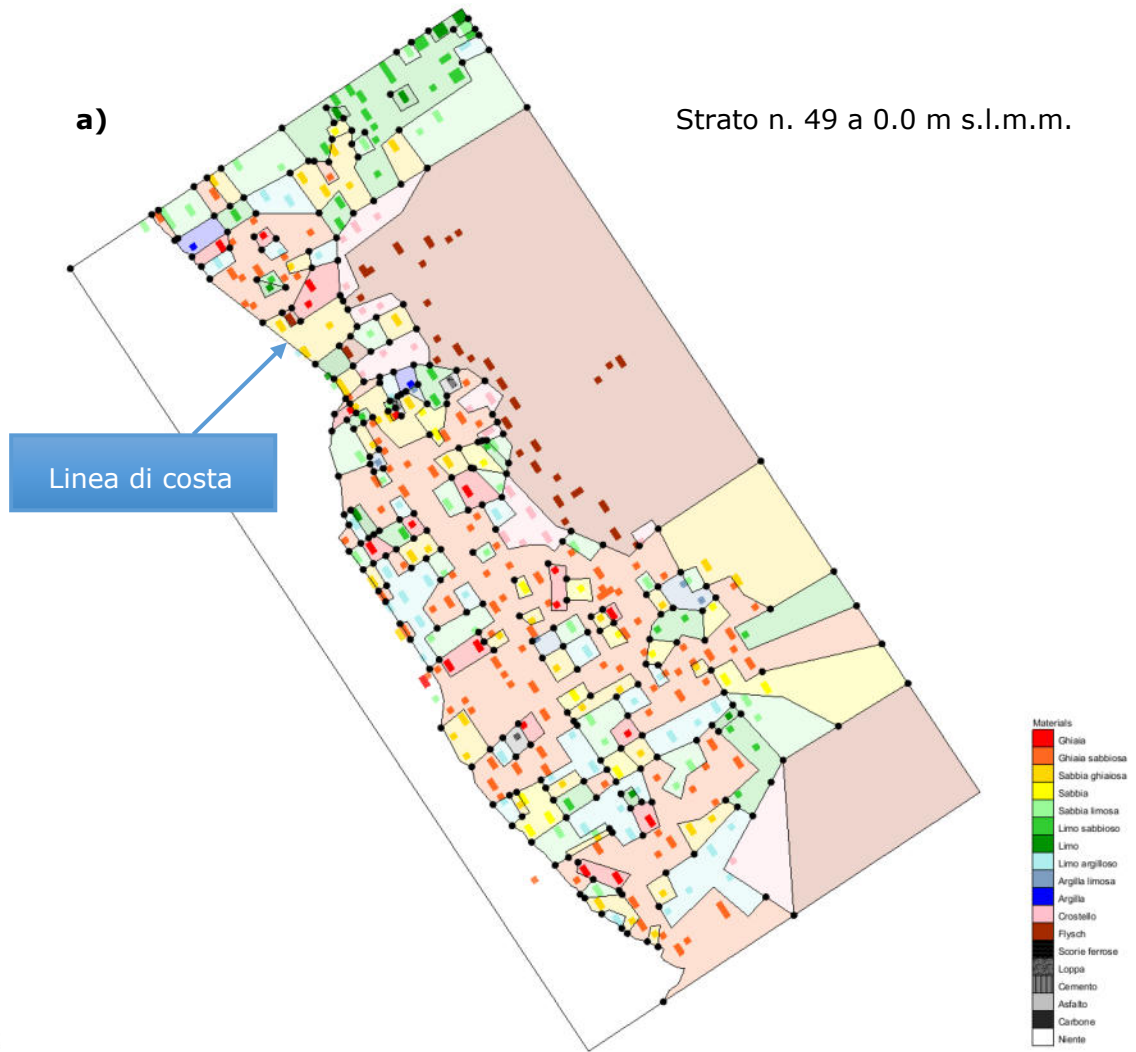


Figura 2-11: Strato orizzontale attraverso le formazioni rocciose, i depositi fluvio-lacustri ed il riporto nell'area della Ferriera di Servola al livello del mare. Notare il frequente contatto tra ghiaia sabbiosa ed argilla limosa che suggerisce come i livelli ghiaiosi del riporto siano "affondati" all'interno dei depositi argillosi.

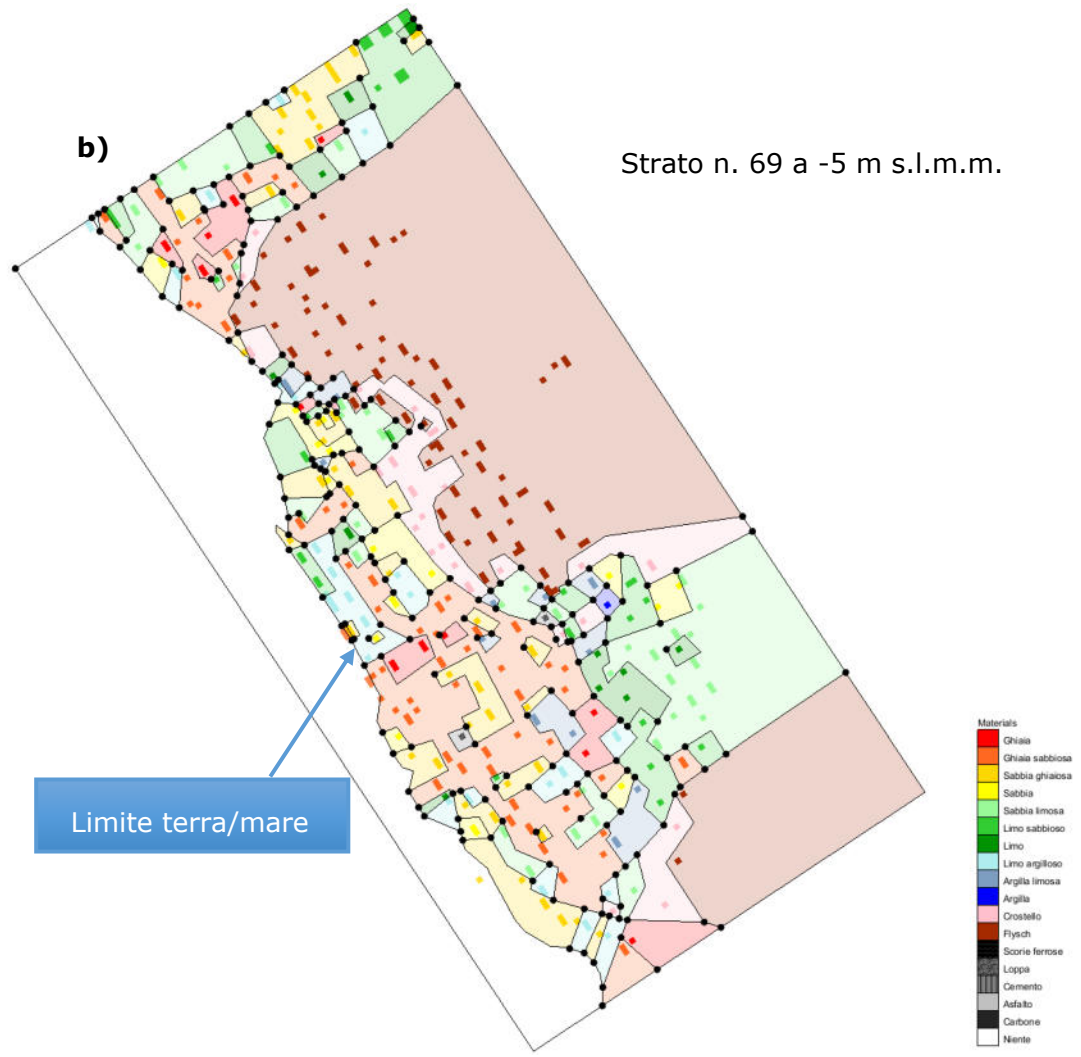


Figura 2-12: Strato orizzontale a -5 m s.l.m.m.. Compaino alla foce del Rio Primario importanti depositi di sabbie limose che passano a limi andando verso il largo.

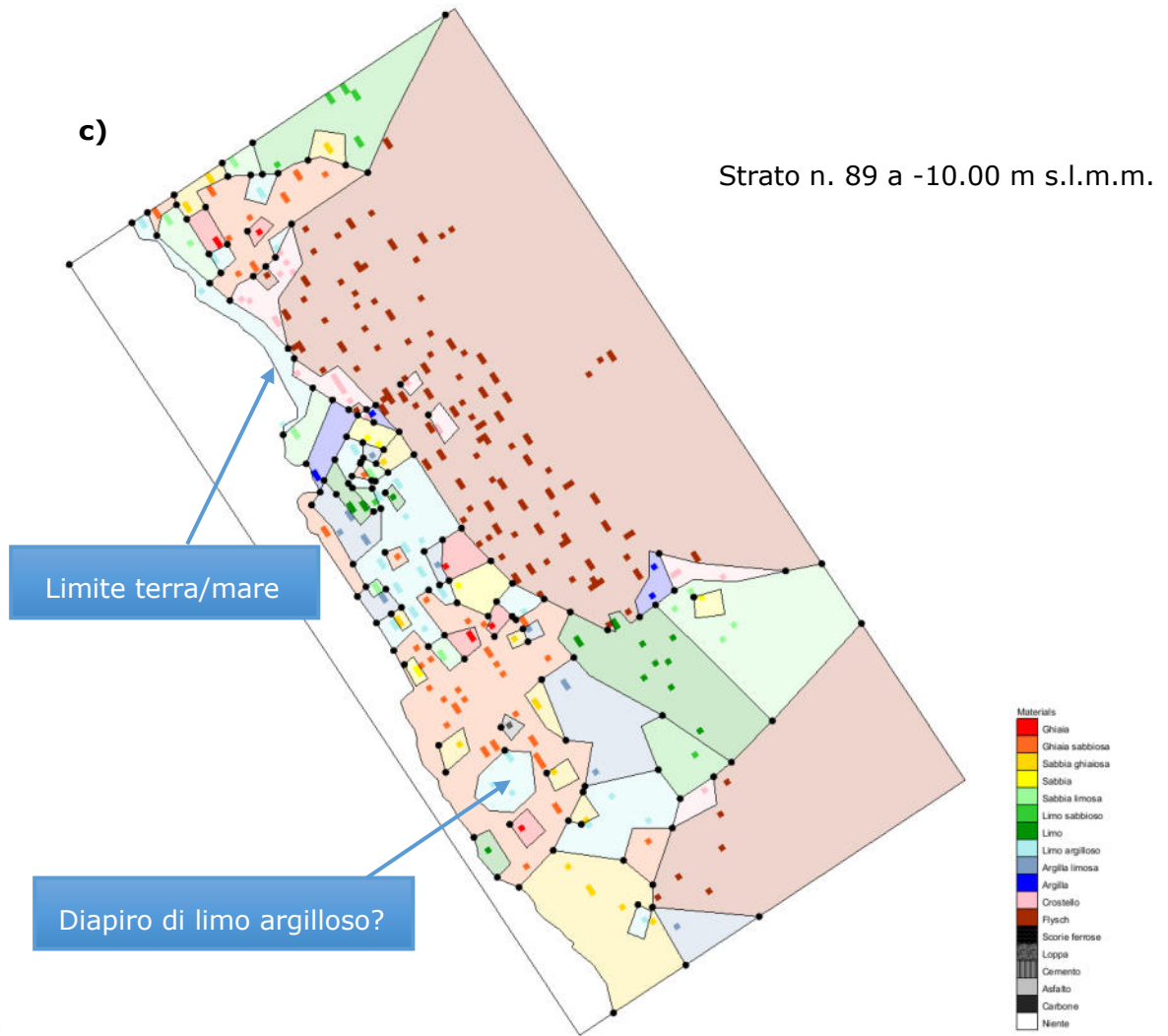


Figura 2-13: A -10 m s.l.m.m. notare come la sezione del Rio Primario diventa più stretta e dalle sabbie limose si passi verso SO a limi ed a limi argillosi ed argille limose indicando una chiara progressione nella sedimentazione fine. Notare altresì come i depositi di ghiaia sabbiosa interrompono i sedimenti più argillosi creando delle forme pseudo-diapiriche di sedimenti più argillosi che risalgono verso l'alto.

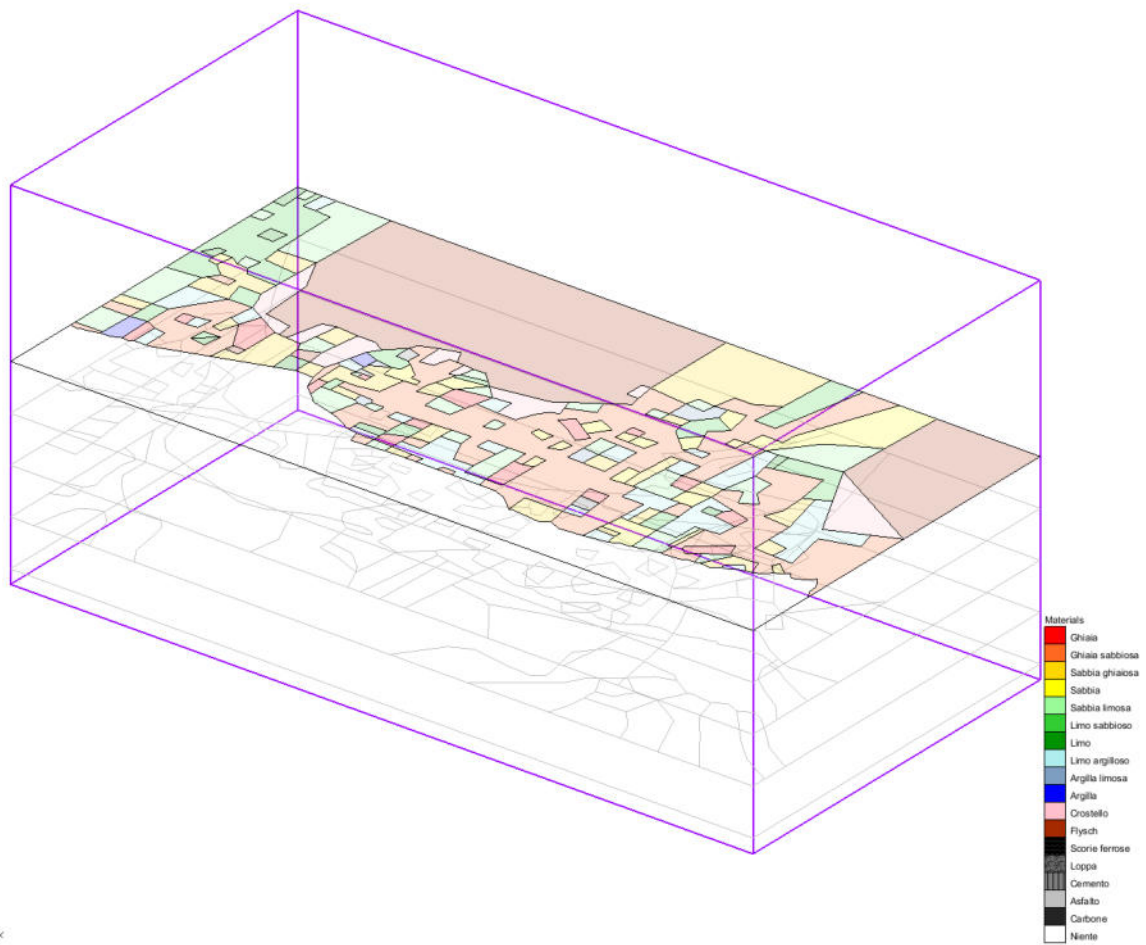


Figura 2-14: Parallelepipedo (in viola) per la ricostruzione del modello geologico. I quattro strati evidenziati si localizzano dall'alto verso il basso a 0.0 m, -10 m, -20 m, -30 m e -40 s.l.m.m.

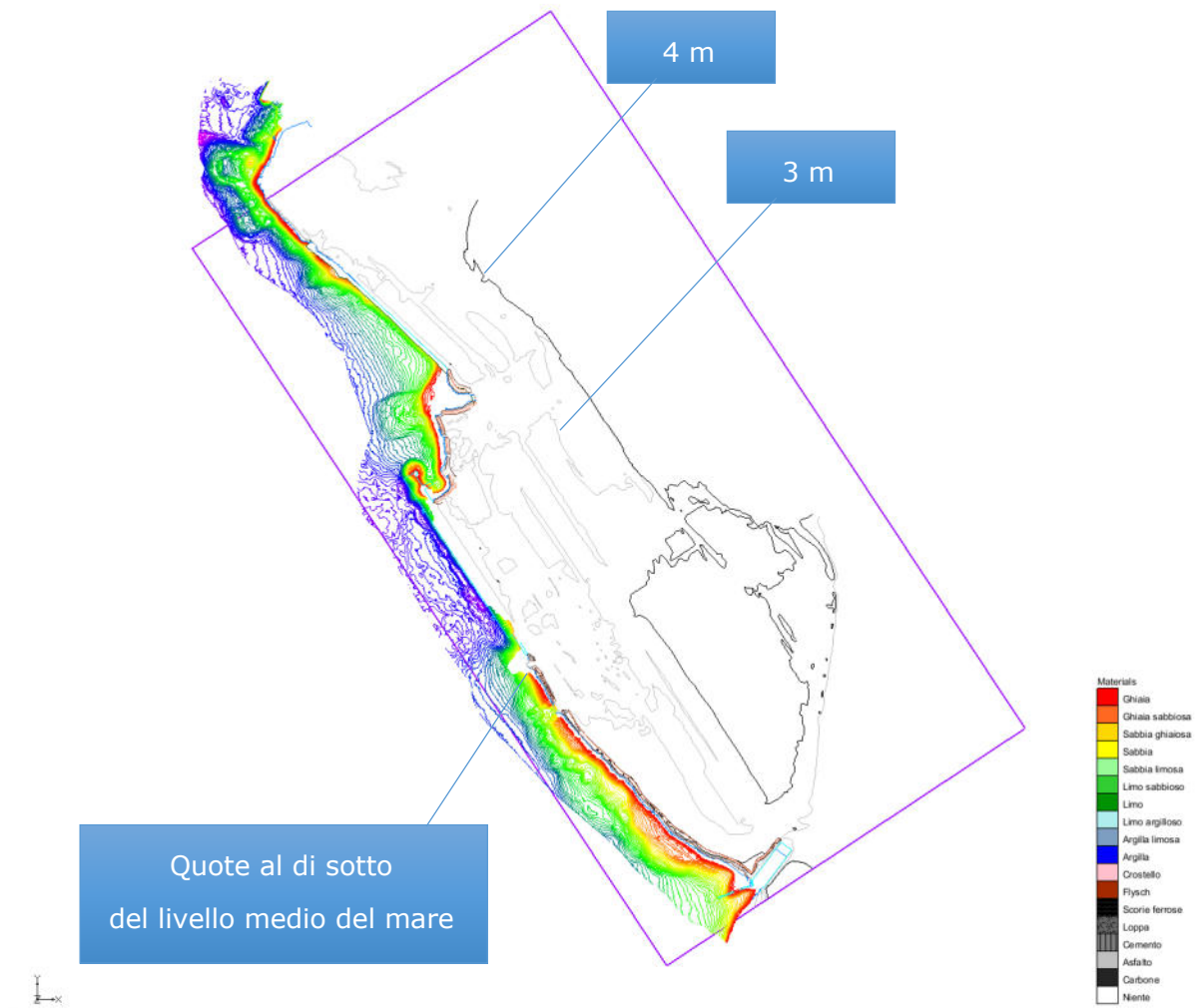


Figura 2-15: Topografia utilizzata per la realizzazione del modello geologico.

Infine, per quanto riguarda il riporto si è cercato di considerare le modalità realizzative dello stesso che è per abbancamenti successivi di materiali anche sostanzialmente diversi tra loro, accumulati generalmente da terra verso mare e spianati a formare limitate aree suborizzontali. Nel caso in cui questi abbancamenti siano stati sversati su materiali argillosi dei sedimenti sottostanti, questi possono essere affondati generando la risalita di piccoli pseudo "diapiri" e formando bruschi contatti tra materiali grossolani (dei riporti) e materiali plastici (dei sedimenti argillosi).

Come ultima tappa per la realizzazione del modello geologico, queste sezioni orizzontali sono state trasferite alla griglia di calcolo attribuendo a ciascuna cella quel materiale che risulta essere maggiormente presente nella stessa. Il risultato è un modello 3D della geologia che rappresenta una ricostruzione coerente e statisticamente valida della realtà geologica dell'area della Ferriera (Figura 2-16).

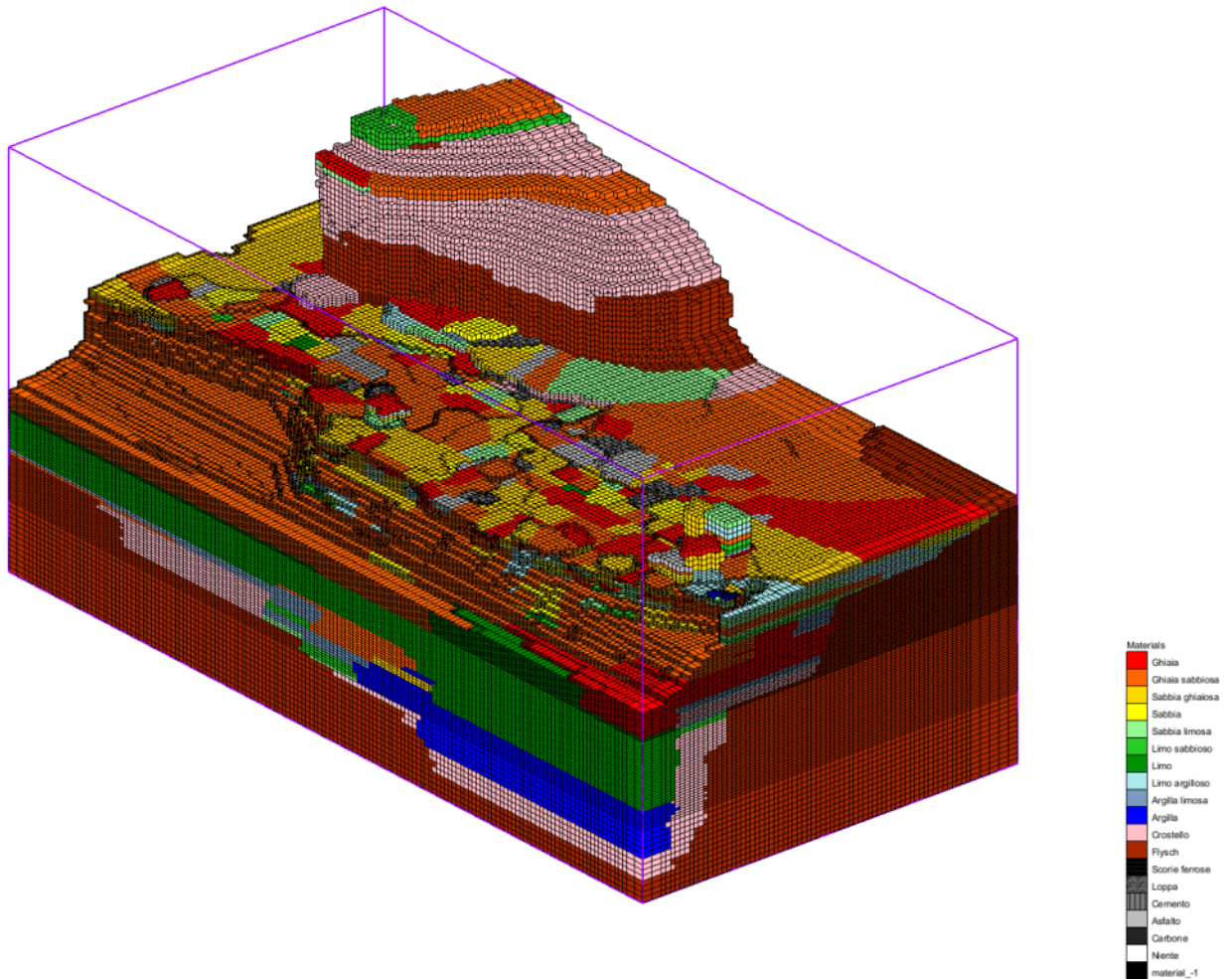


Figura 2-16: Modello geologico. Ricostruzione statistica 3D della geologia dell'area della Ferriera di Servola.

Di seguito si presentano una serie di sezioni del modello geologico che meglio mostrano la complessa situazione stratigrafica dell'area. Vengono presentate da prima una serie di sezioni orizzontali a quote da 2 m s.l.m.m. fino a -20 m s.l.m.m. (Figure 2-17, 2-18, 2-19, 2,20, 2-21 e 2-22). Successivamente vengono presentate una serie di sezioni SO-NE a partire da NO verso SE (Figure 2-23, 2-24, 2-25, 2-26, 2-27 e 2-28). Infine, vengono presentate delle sezioni SE-NO (viste da terra verso mare) attraverso l'area della Ferriera (Figure 2-29, 2-30, 2-31 e 2-32).

Il risultato ottenuto conforta che è possibile ricostruire adeguatamente la complessità geologica e stratigrafica dell'area tramite un modello che, mantenendo una coerenza realizzativa, possa essere considerato una rappresentazione statisticamente valida della effettiva realtà fisica.

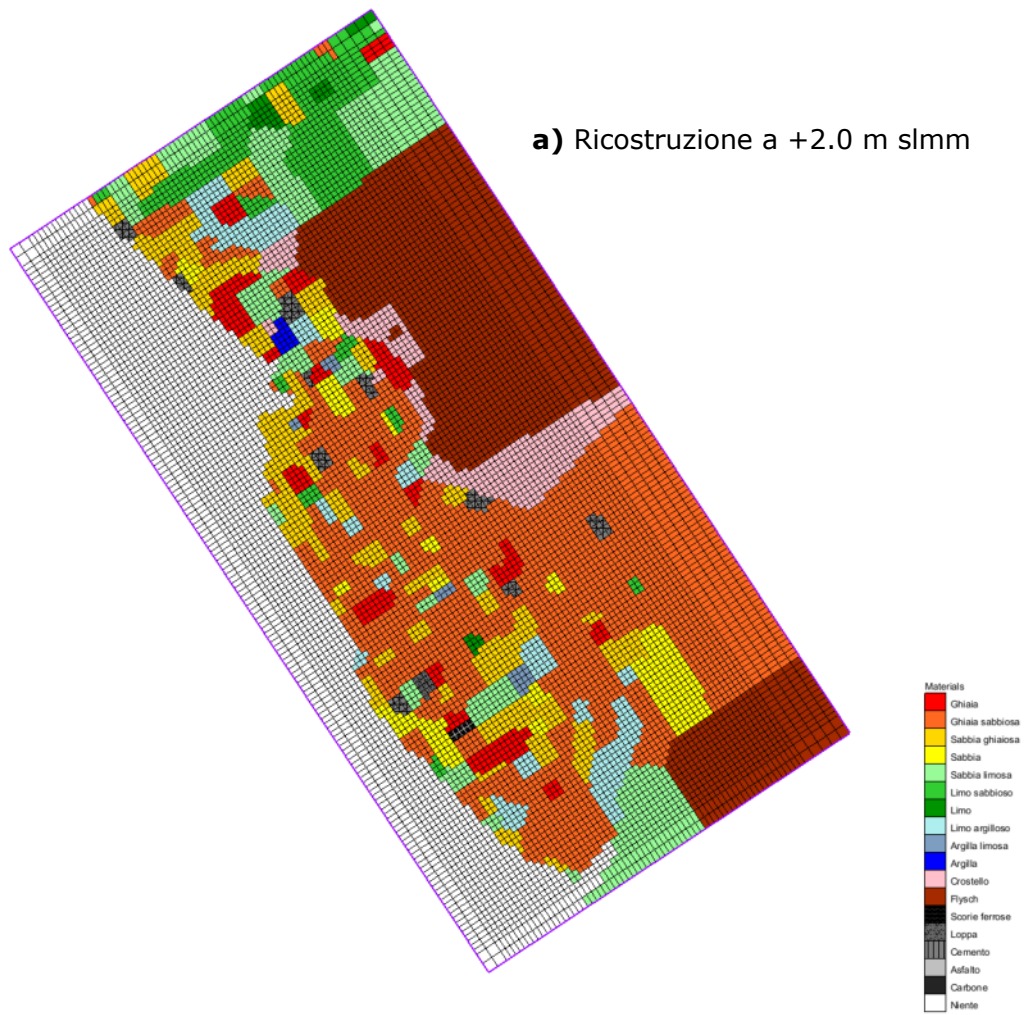


Figura 2-17: Sopra al livello del mare la distribuzione dei materiali presenti nell'area della Ferriera è costituita essenzialmente da riporto.

b) Ricostruzione a 0.0 m slmm

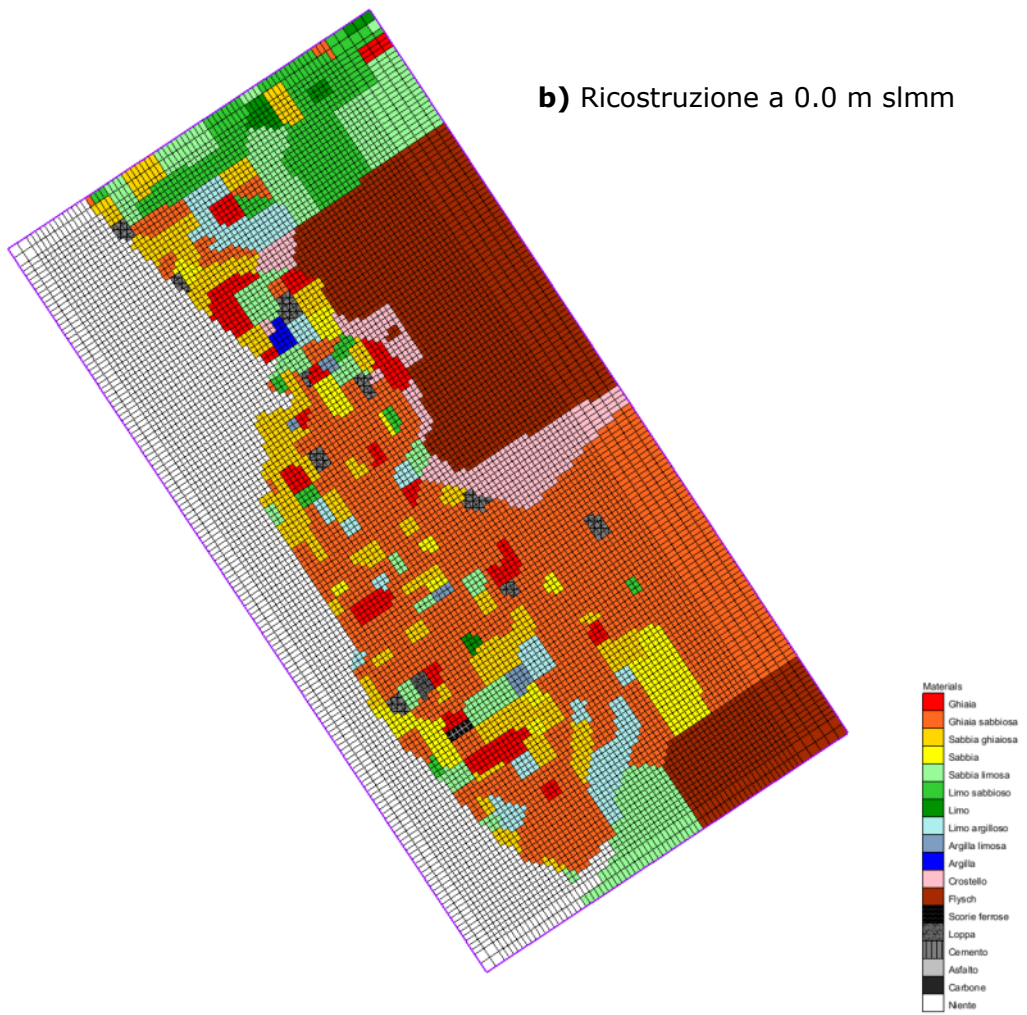


Figura 2-18: Anche a livello del mare la prevalenza dei materiali è essenzialmente il riporto.

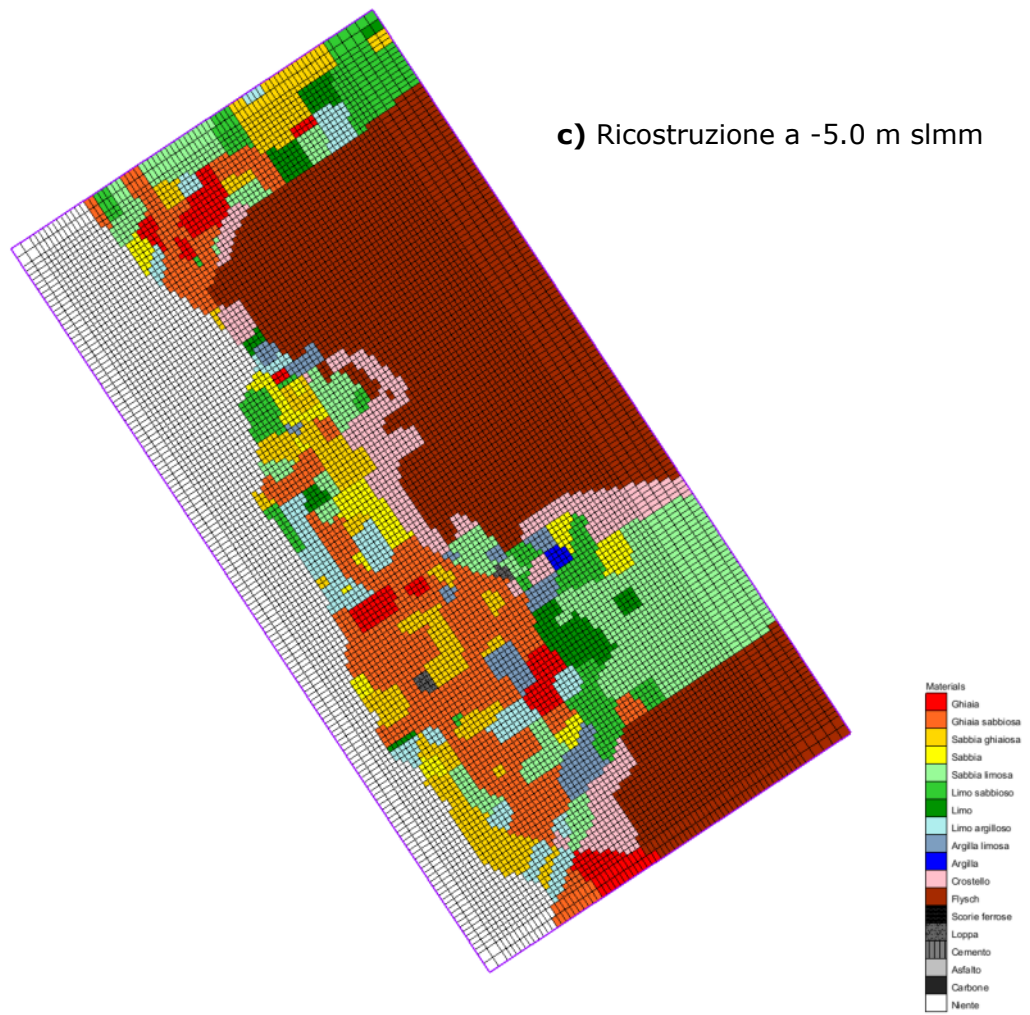


Figura 2-19: Alla profondità di -5 m slmm si osservano tuttavia materiali riconducibili dall'affondamento del riporto in sedimenti più plastici.

d) Ricostruzione a -10.0 m slmm

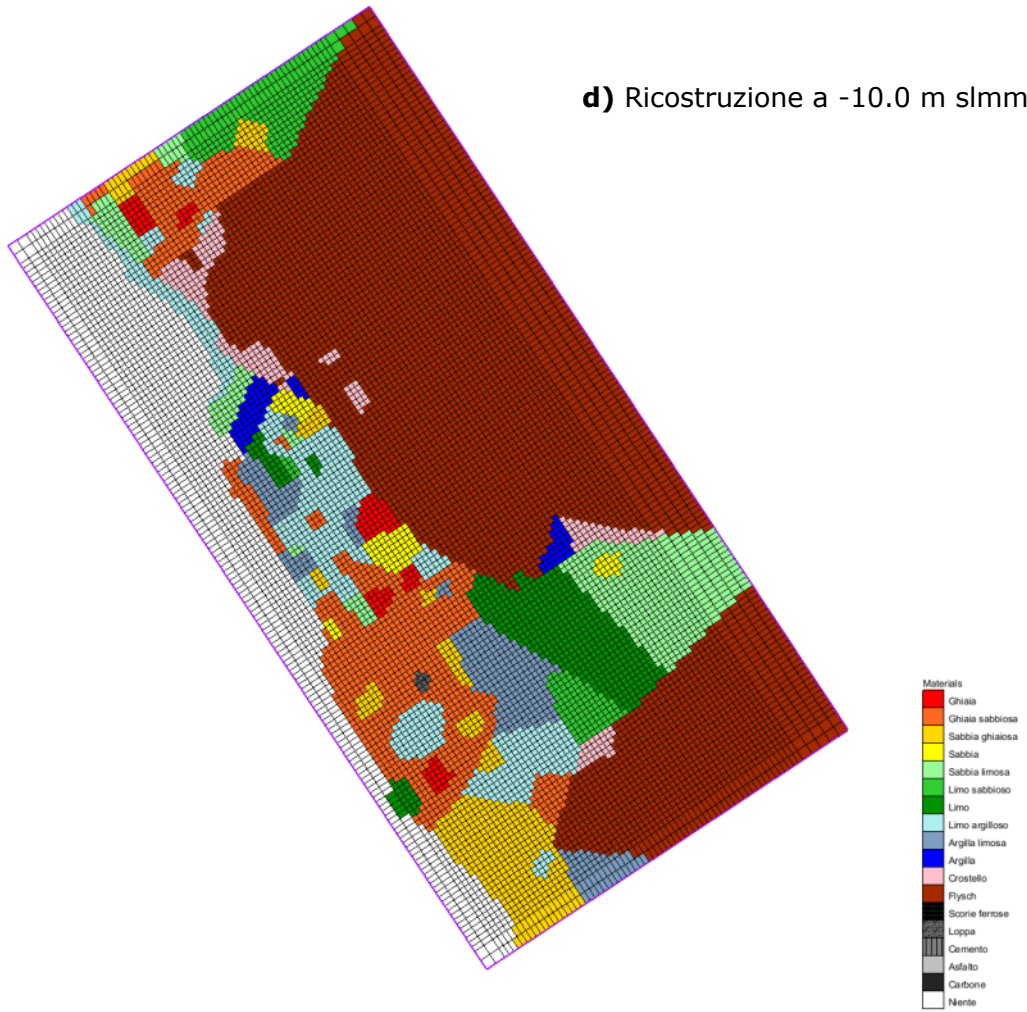


Figura 2-20: Alla profondità di -10 m dal piano campagna si nota alla foce del Rio Primario la presenza di sedimenti che divengono più fini andando verso mare (SO) e passano da limi sabbiosi a limi, a limi argillosi ed argille limose. Più a mare esiste un ambiente a maggior energia deposizionale (ghiaie sabbiose); tali materiali potrebbero tuttavia in parte provenire dai riporti eseguiti nel tempo.

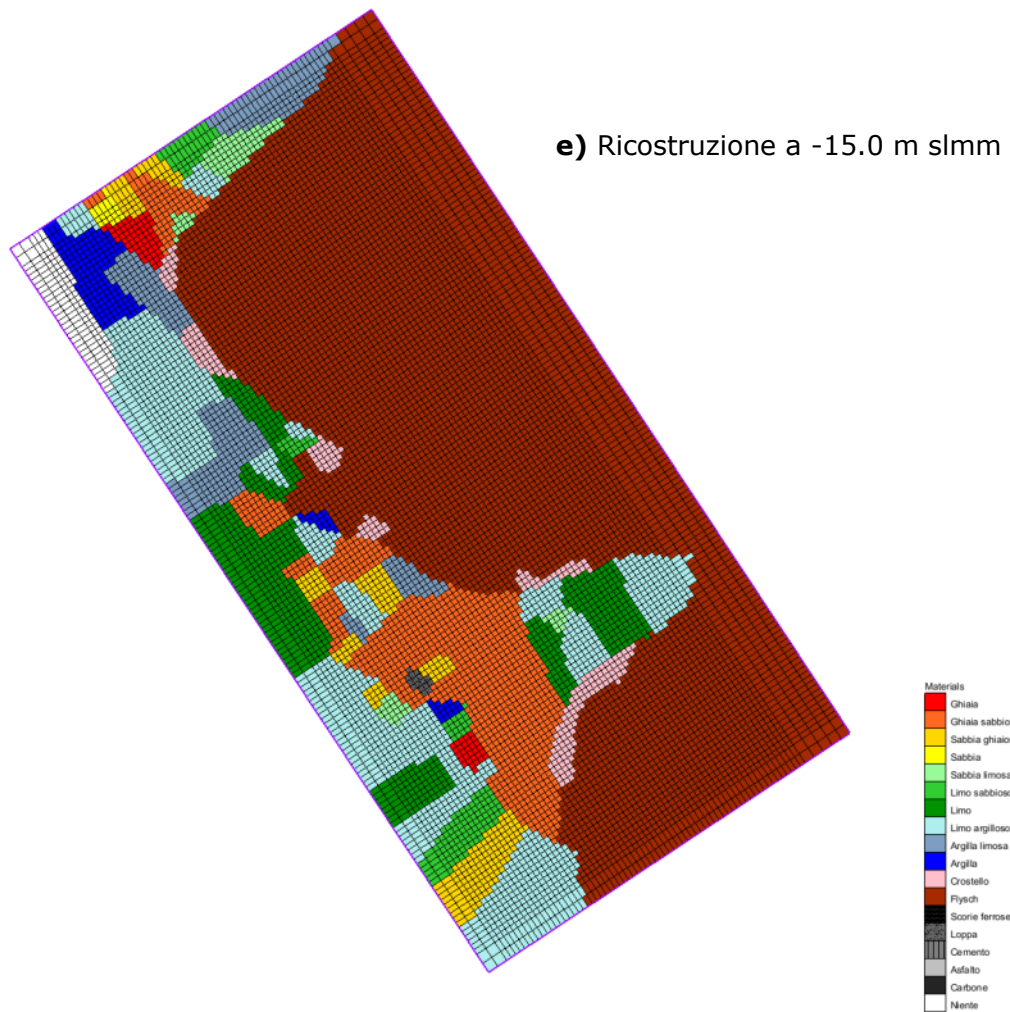


Figura 2-21: Si nota già a -15 m slmm la vasta estensione del Flysch incisa dall'alveo del Rio Primario. Tale alveo è occupato da sedimenti fini a monte (NE) che divengono più grossolani a valle (SO) indicando un ambiente a maggior energia deposizionale verso valle.

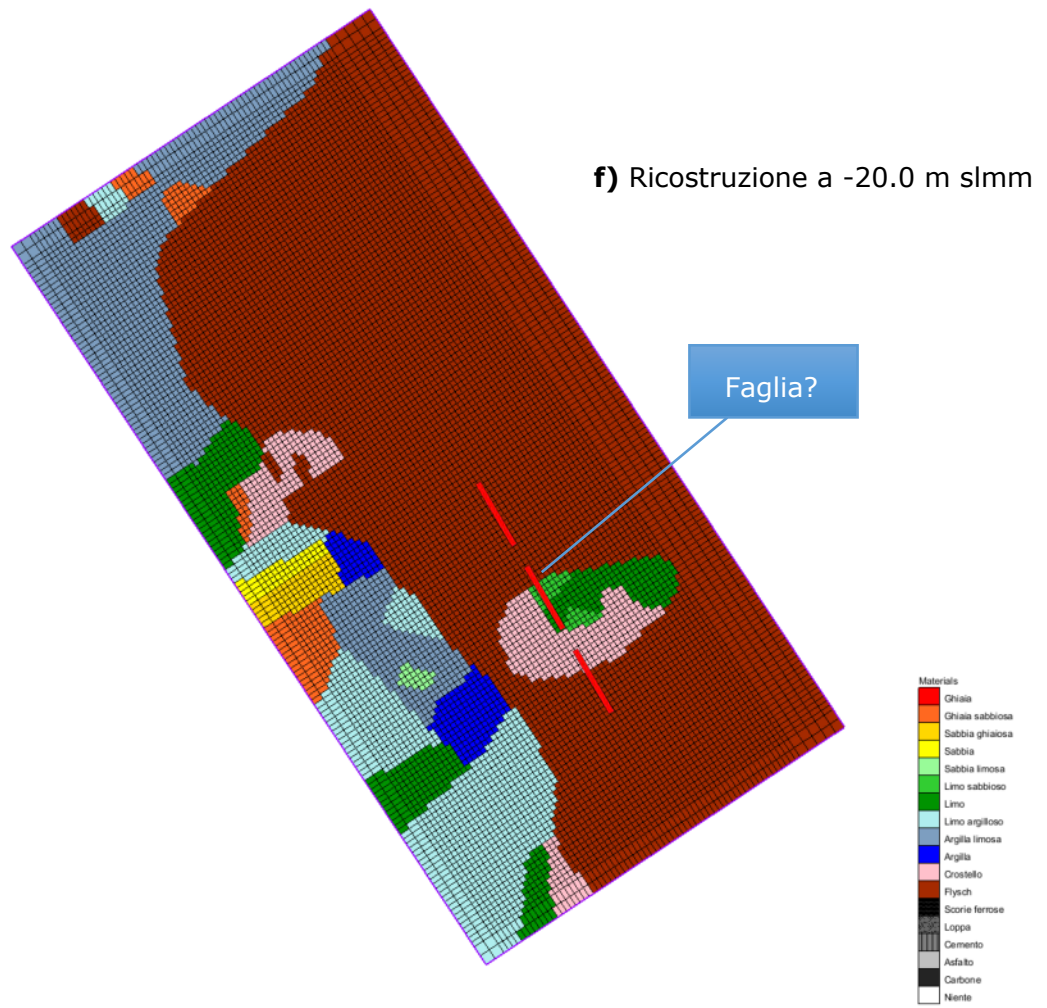


Figura 2-22: Si nota a -20 m slmm che nella zona dell'alveo del Rio Primario vi sono sedimenti circondati anche verso mare dal Flysch. Tale anomalia nel paleo profilo d'equilibrio del Rio Primario, che permane per alcuni metri anche a profondità maggiori di quota -20 m, potrebbe forse indicare la presenza di faglie che si sono mosse, dislocando il Flysch verso l'alto a SO della foce in tempi relativamente recenti (Pleistocene Superiore - Olocene?). D'altronde il numero esiguo di sondaggi che la identificano (4) non permette al momento di definire più accuratamente la condizione strutturale, né di datare con precisione tale ipotetica struttura.

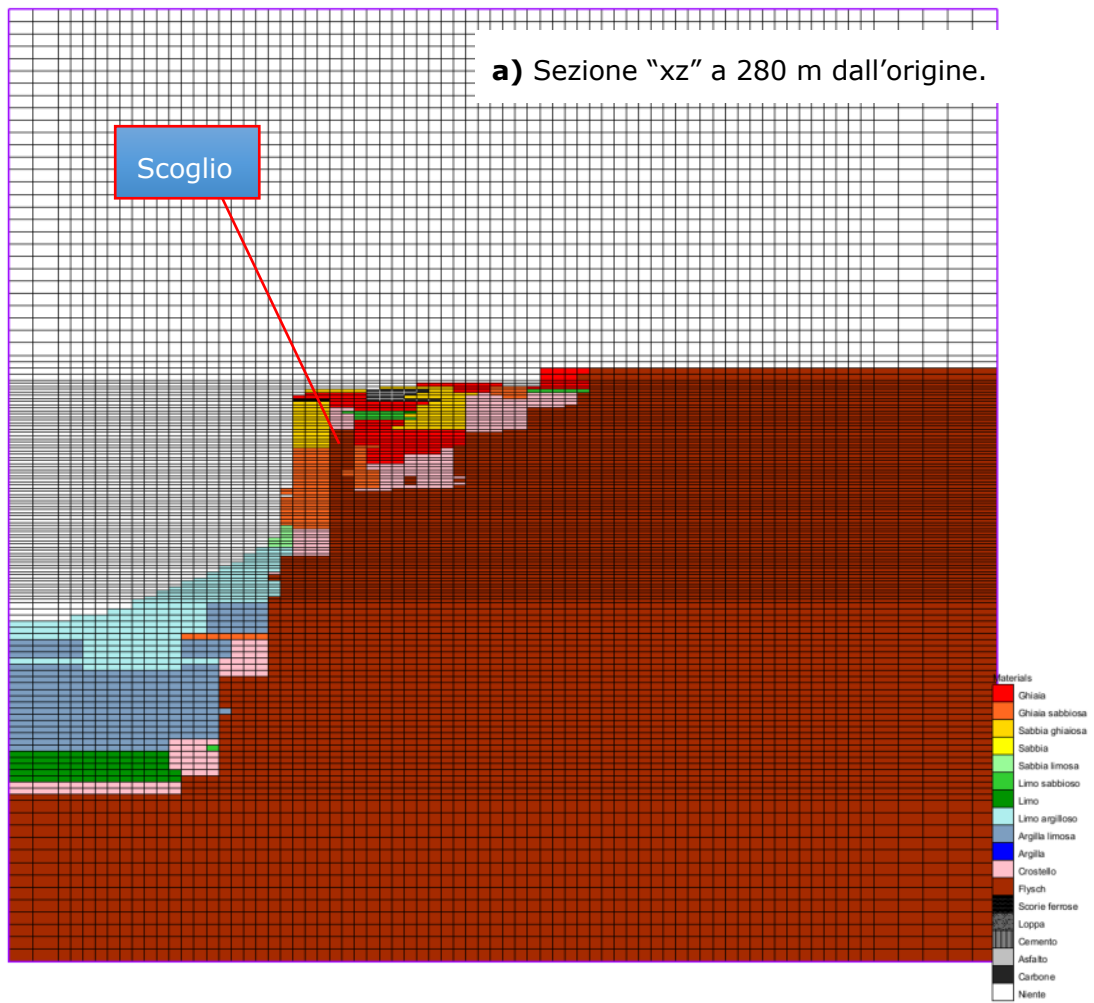


Figura 2-23: Sezione SO-NE vicino al limite NO della griglia. Notare la Collina di Servola costituita essenzialmente da Flysch e lo "scoglio" sepolto dai riempimenti, con sedimenti grossolani lato terra. Esagerazione verticale 10 volte.

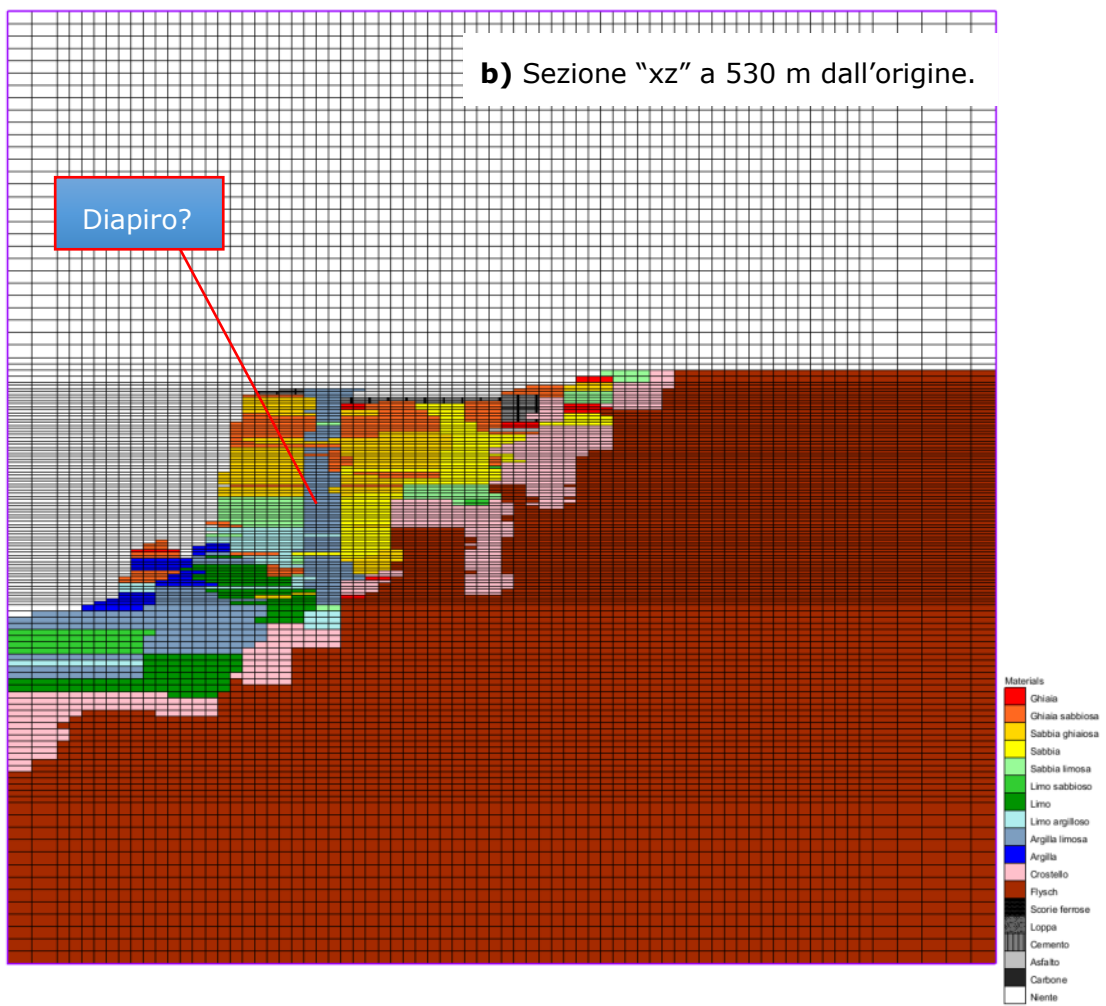


Figura 2-24: Sezione orientata come la precedente a 530 m dall'origine. Notare il diapiro di argille limose che taglia grossomodo tutta la sequenza di riporto e che presenta una litologia estremamente variabile nella parte alta della sezione. Esagerazione verticale 10 volte.

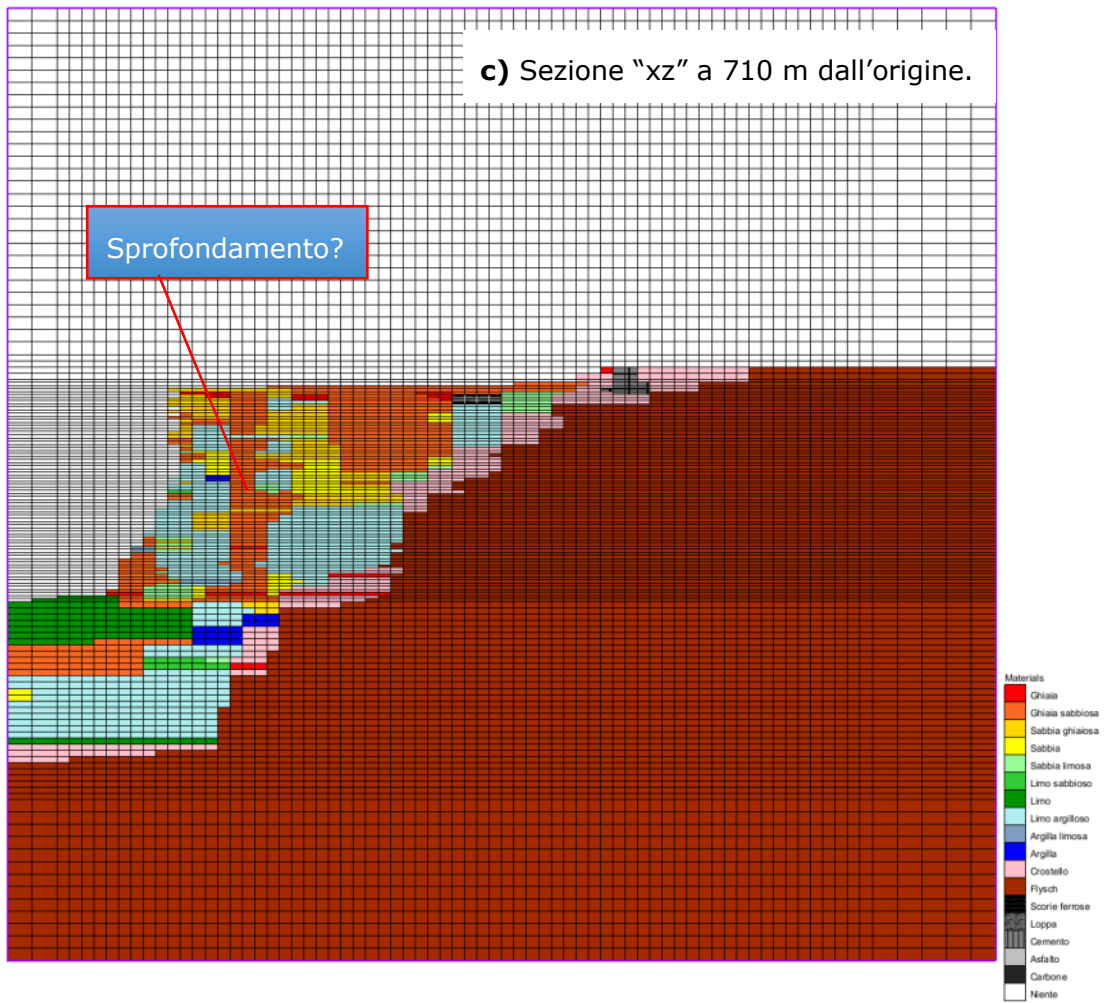


Figura 2-25: Sezione orientata come la precedente a 710 m dall'origine. Notare lo sprofondamento di ghiaia sabbiosa che taglia grossomodo tutta la sequenza di riporto la quale presenta una litologia estremamente variabile nella parte alta della sezione. Esagerazione verticale 10 volte.

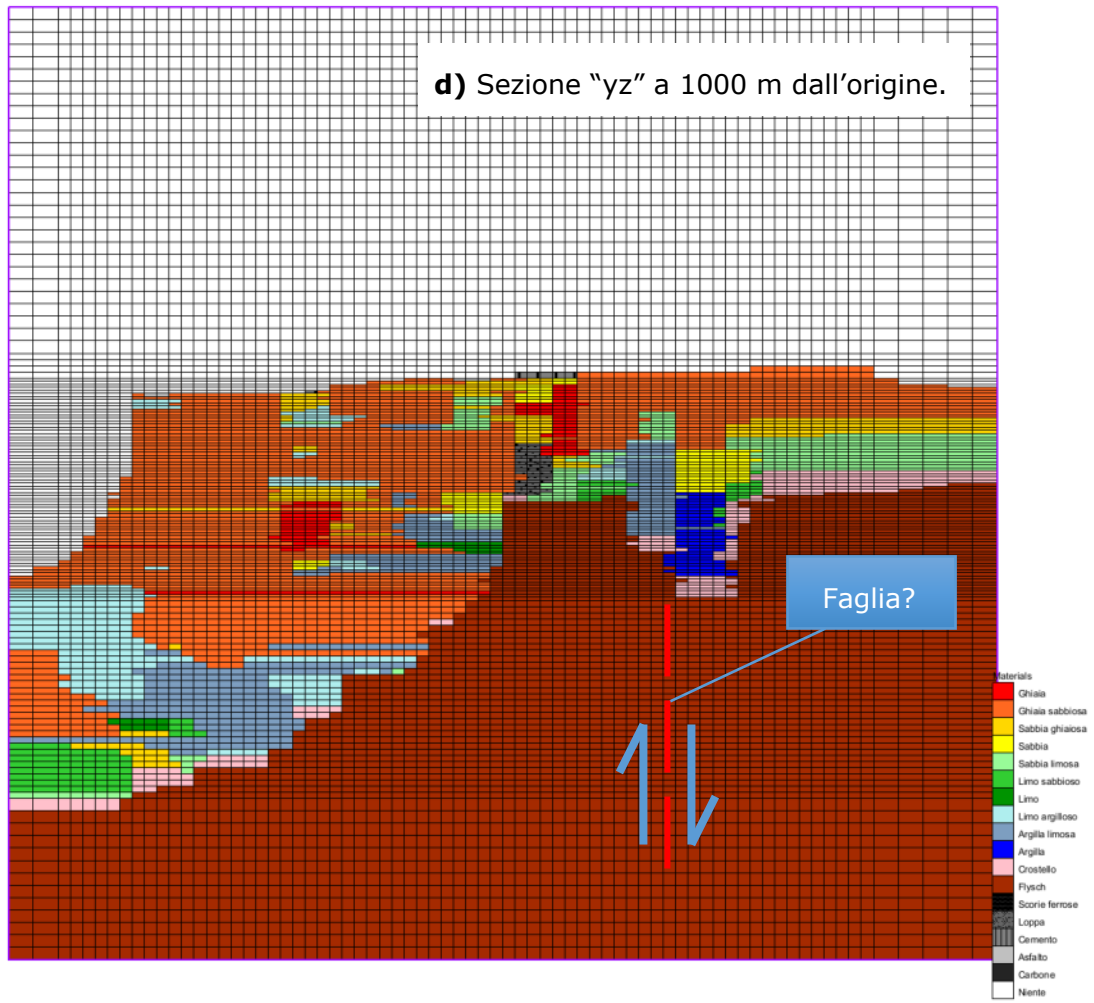


Figura 2-26: Si nota la presenza di strutture rilevate del Flysch verso mare, che ipoteticamente potrebbero essere generate da strutture di faglia, e la presenza di strati impermeabili al di sopra del Flysch nella parte più a mare della sezione. Esagerazione verticale 10 volte.

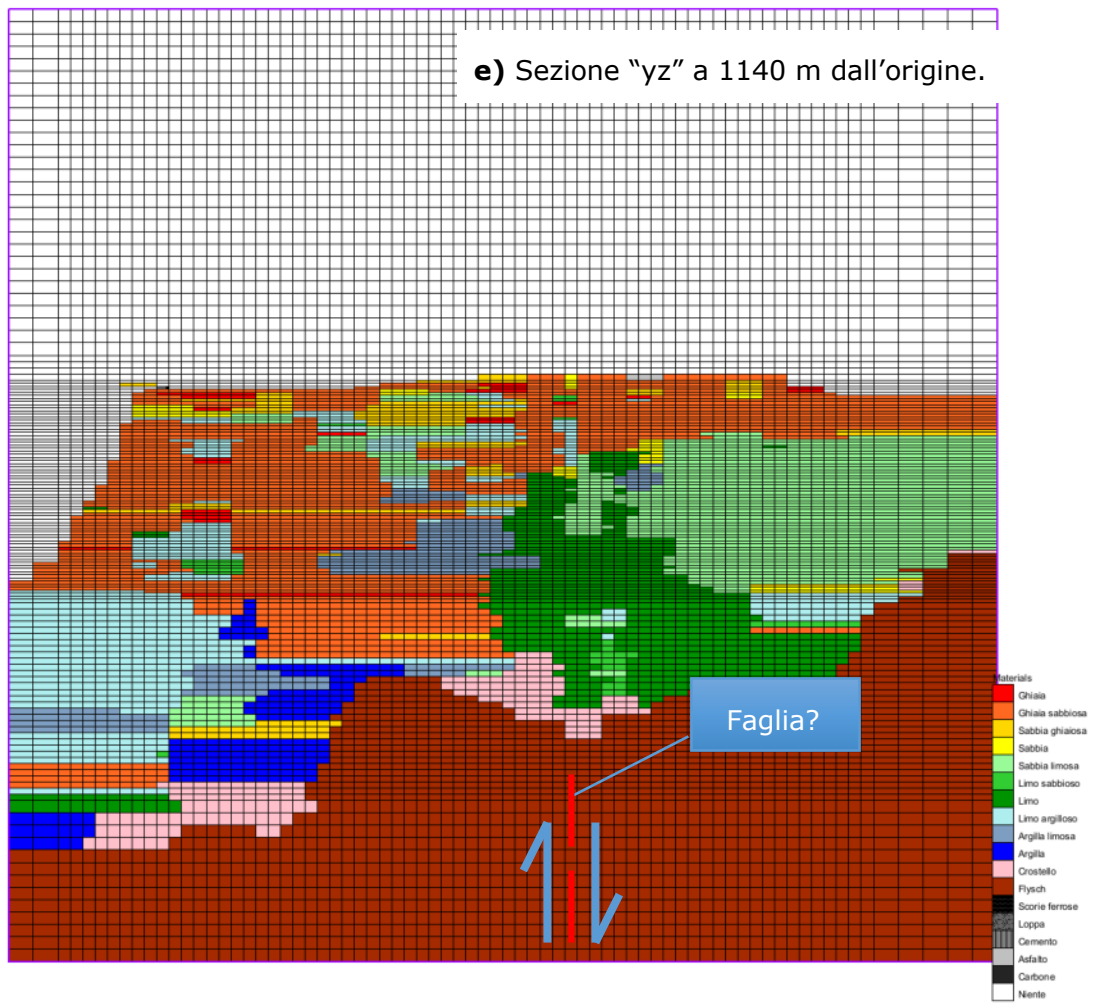


Figura 2-27: Sezione a 1140 m dall'origine. Notare che anche in questa sezione si nota la presenza di strutture "anomale" che potrebbero far pensare alla presenza di faglie con movimenti recenti nel Flysch. Da segnalare, altresì, che in questa sezione lungo il Rio Primario sembrerebbe essere presente una possibile progradazione dei sedimenti. Esagerazione verticale 10 volte.

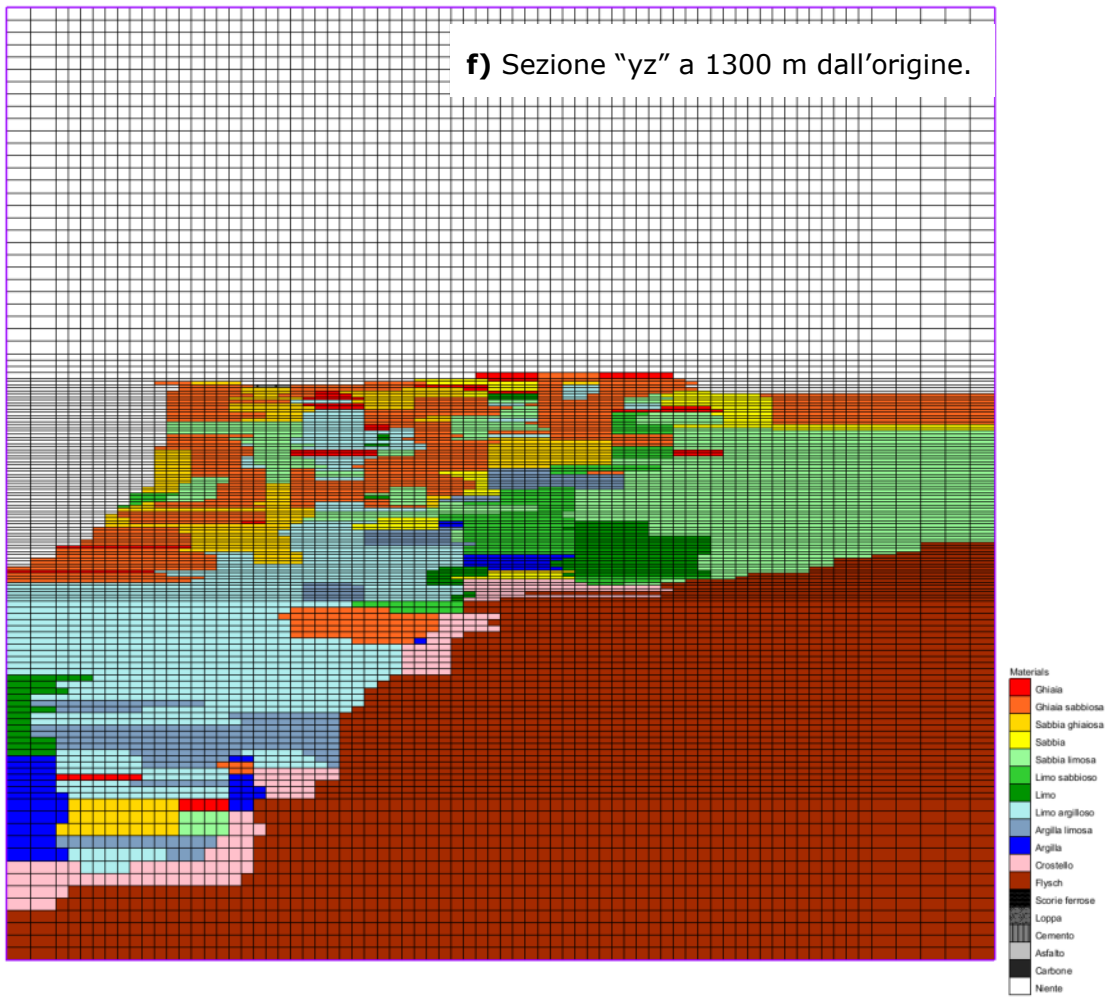


Figura 2-28: Sezione a 1300 m dall'origine vicino all'asse del Rio primario. Notare anche in questa sezione la progradazione della copertura del Flysch di sabbie limose che passano a limi ed a limi argillosi verso mare. Esagerazione verticale 10 volte.

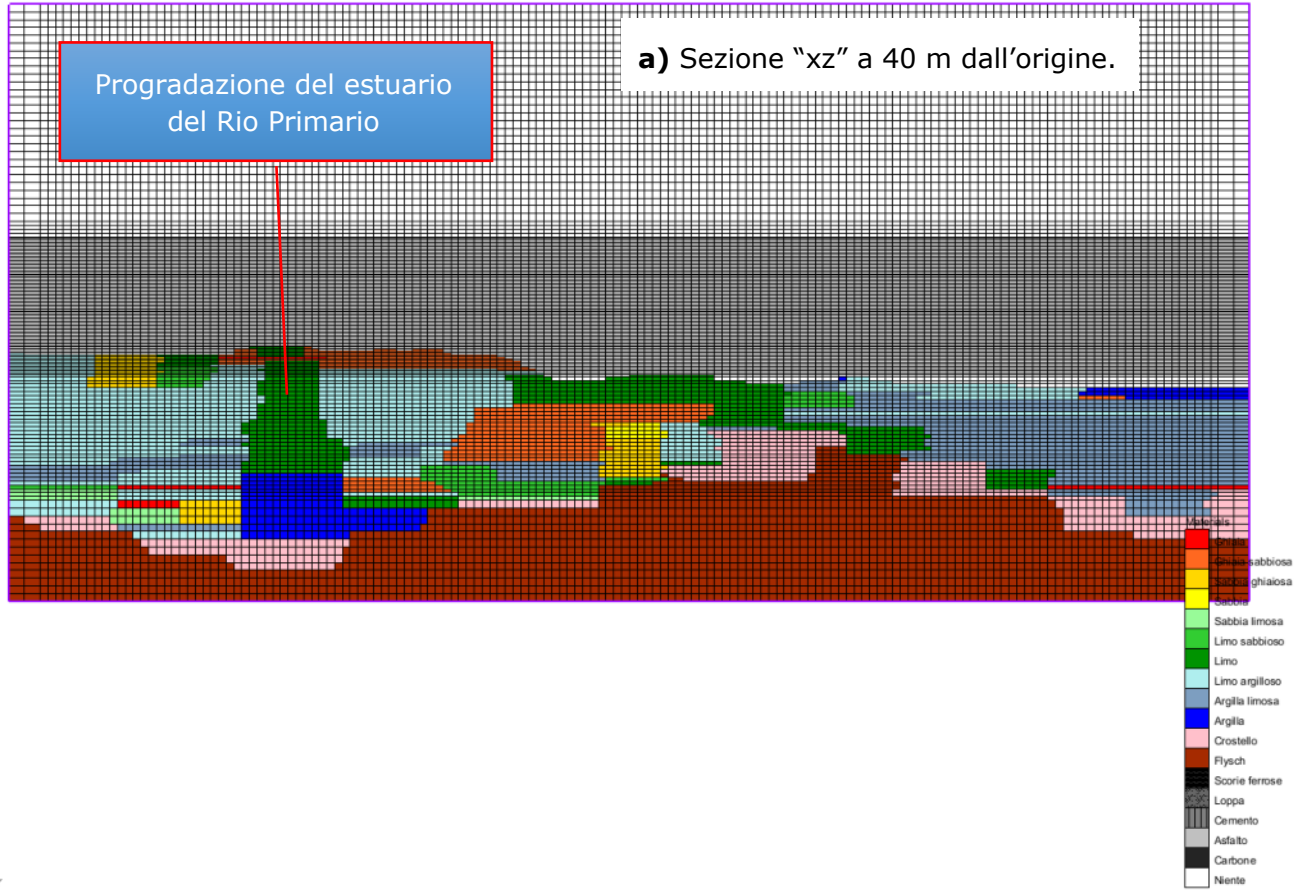


Figura 2-29: Sezione lato mare della Ferriera di Servola a 40 m dall'origine. L'incisione del Rio Primario è occupata da materiali argillosi in basso, mentre in alto da materiali più permeabili.

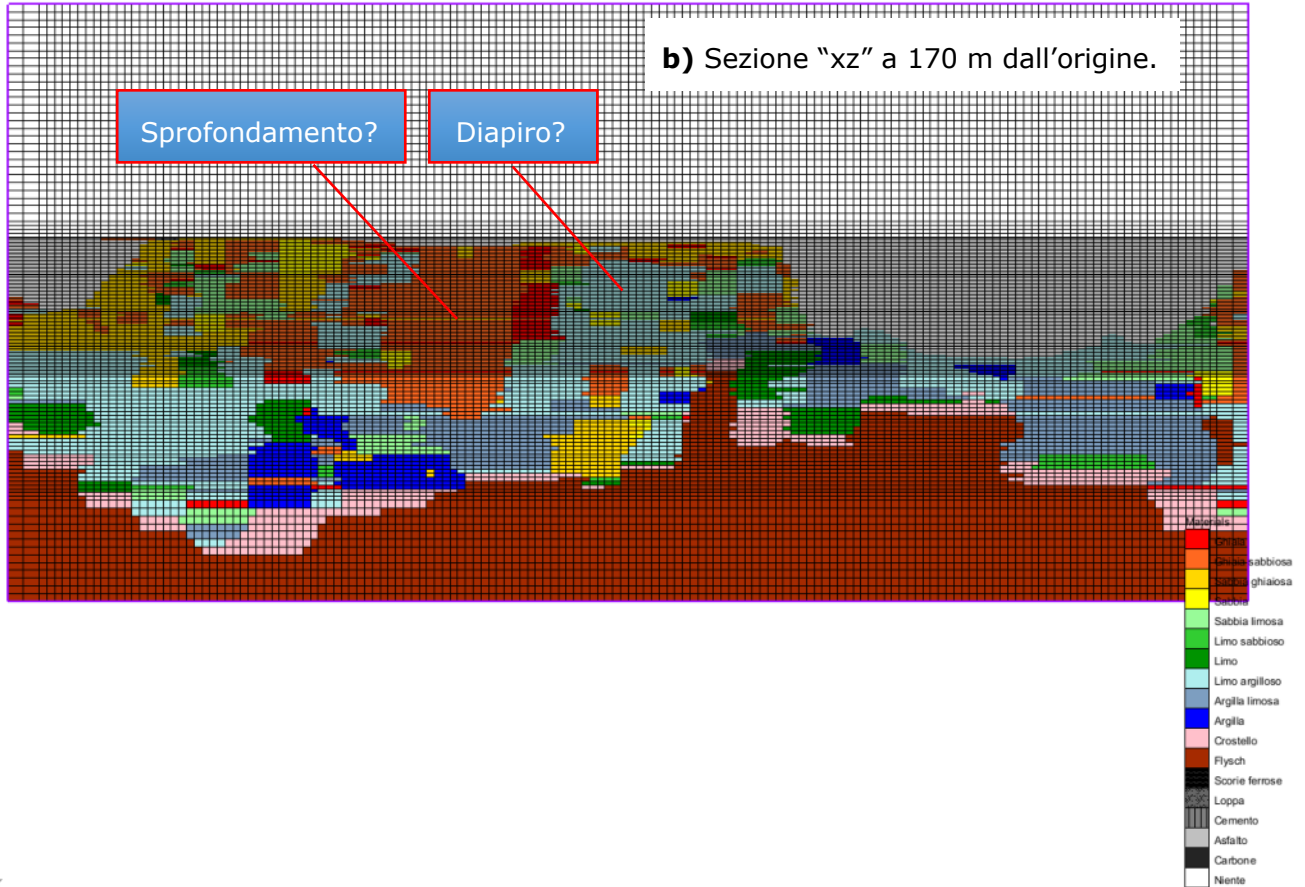
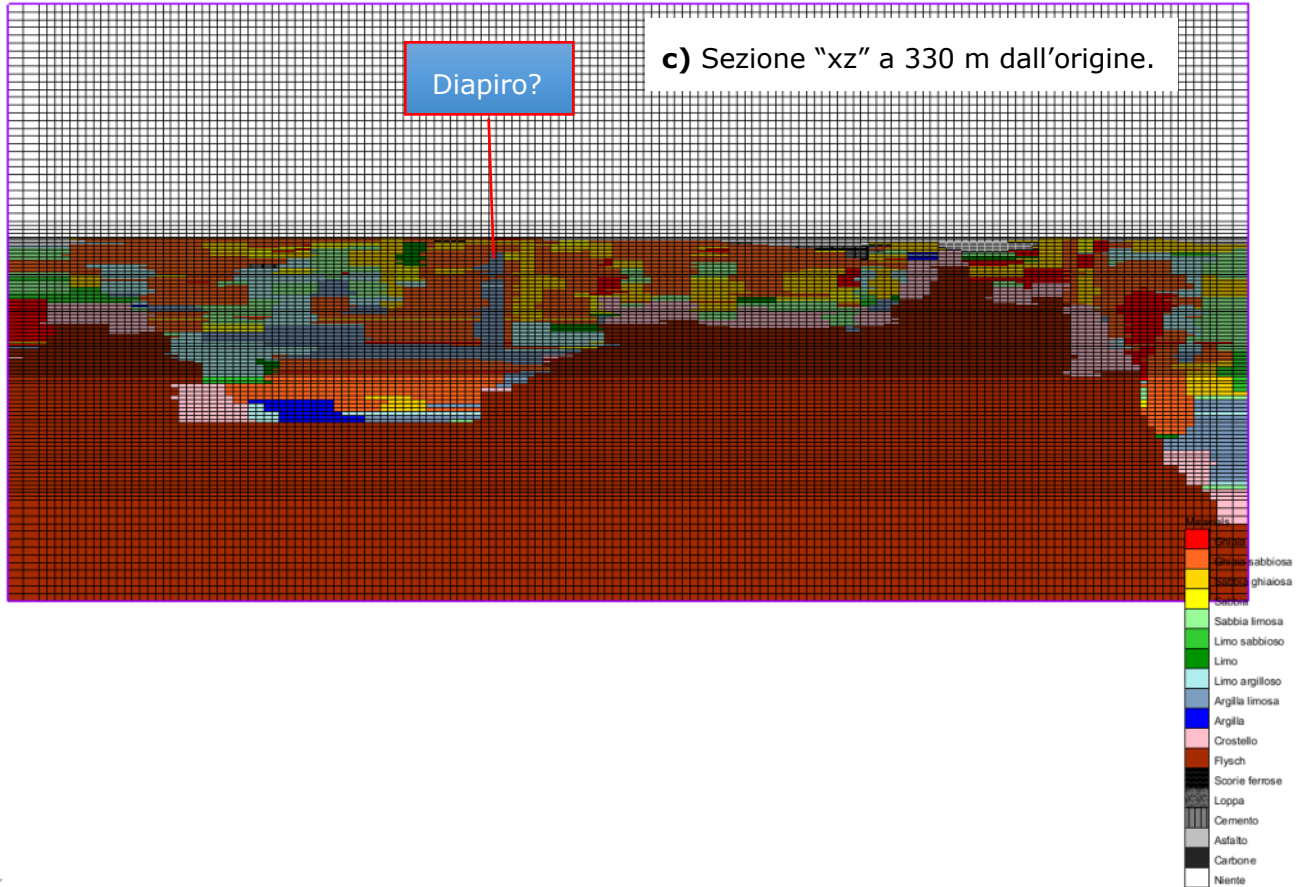


Figura 2-30: Sezione lato mare della Ferriera di Servola a 170 m dall'origine, quindi spostandosi verso terra rispetto alla sezione precedente. L'incisione del Rio Primario è occupata da materiali argillosi in basso, mentre in alto da materiali più permeabili di riporto. Notare il consistente deposito di limo argilloso che presenta contatti subverticali con le unità più permeabili di riporto e che potrebbe avere un'origine diapiriforme per l'"abbonimento" avvenuto nel tempo dei piazzali della Ferriera.



1.

Figura 2-31: Sezione lato mare della Ferriera di Servola a 330 m dall'origine. Notare la presenza prevalente di materiali di riporto ed un potenziale diapiro di argilla limosa che "taglia" la ghiaia sabbiosa.

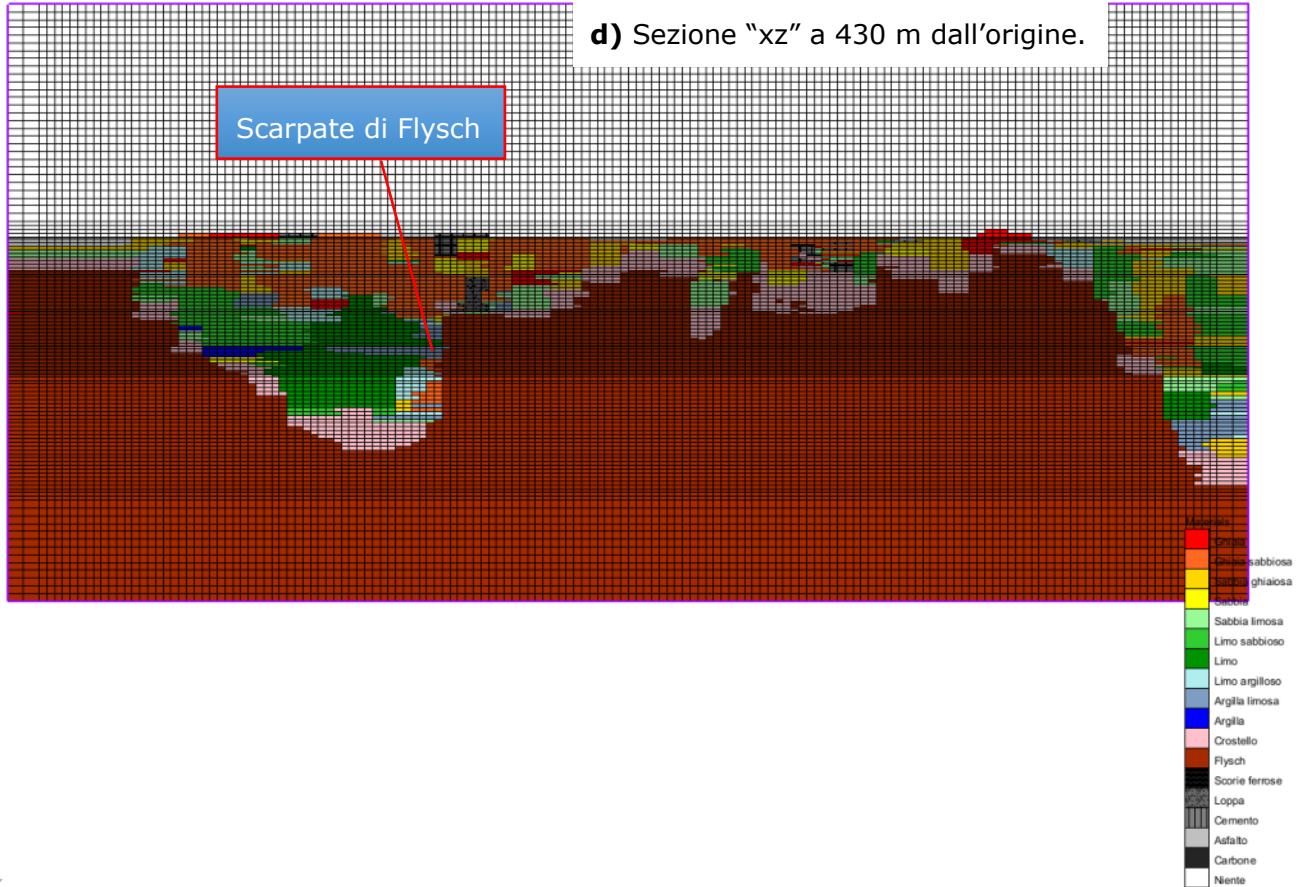


Figura 2-32: Sezione lato mare della Ferriera di Servola a 430 m dall'origine. Notare la presenza prevalente di materiali di riporto vicino alla superficie ed una potenziale scarpata sui versanti del paleo alveo del Rio Primario.

2.6 Analisi della validità del modello geologico

L'analisi della validità della procedura di creazione del modello geologico (e la validità dello stesso modello geologico) può essere verificata tramite il paragone tra il modello geologico discretizzato, realizzato con la stessa procedura, utilizzando il numero più esiguo di sondaggi (in totale 262), terebrati in epoca precedente ai sondaggi realizzati nel 2018, ed il modello utilizzato in fase definitiva e successivamente confermato in questa fase esecutiva di realizzazione della barriera idraulica. Cioè, tramite la griglia del modello con sondaggi ridotti, ovviamente meno accurata di quella definitiva, in pratica, viene stimata l'affidabilità geologica di tutta la griglia anche di quelle parti di essa senza sondaggi e quindi con un livello di approssimazione minore.

Ripetendo lo stesso procedimento con tutti i dati la griglia del modello geologico definitivo (che ha un numero di sondaggi quasi doppio – 262 contro 410) si ottiene una "griglia" geologica che è ovviamente più accurata della precedente. La differenza tra le due griglie, o meglio tra i materiali di ogni cella delle due griglie dà conto dell'accuratezza della prima griglia ed, indirettamente, della seconda. Infatti, se la differenza tra le due griglie fosse nulla, entrambe le griglie sarebbero praticamente ottimali. Per valori maggiori di zero, ovviamente la seconda griglia costituisce un miglioramento rispetto alla prima. Quando questa differenza è molto maggiore di zero, significa che la prima griglia è meno accurata, ma potrebbe esserlo, pur in forma minore, anche la seconda griglia. In pratica, quando la differenza tra le due griglie produce una gaussiana con il picco attorno allo zero e valori superiori all'80% delle celle si ritiene che la seconda griglia sia adeguatamente accurata.

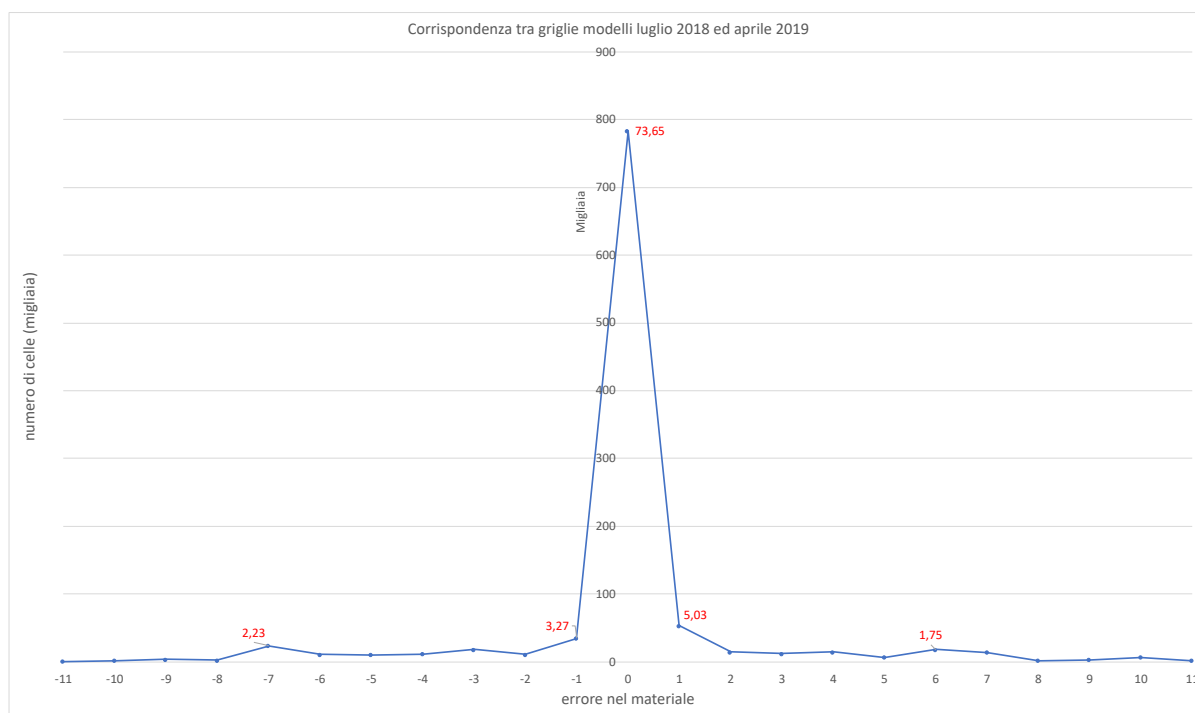


Figura 2-33: Grafico dell'errore attorno allo zero tra la griglia con dati ridotti e quella completa di tutti i dati del progetto definitivo. Notare come gli errori da -1 e +1 siano accettabili dal processo di modellazione geologica statistica adottato. I valori +6, +7 e -6, -7 che statisticamente hanno qualche valenza sono prevalentemente legati alla definizione troppo approssimativa del contatto Flysch-Crostello con i depositi sedimentari e di riporto nel modello geologico con dati ridotti.

Il risultato della differenza tra le due griglie è mostrato in Figura 2-33. Circa 81% delle celle del modello definitivo ha un materiale che, nel limite di errore, è identico al materiale del modello ridotto. Questo risultato assicura la bontà della metodologia utilizzata per la

realizzazione del modello geologico. I valori più elevati degli errori intorno a +6, +7 e -6, -7, che sono statisticamente rilevabili, derivano prevalentemente dalla poca conoscenza del contatto Flysch-Crostello con i depositi sedimentari e di riporto nel modello geologico discretizzato ridotto.

Per meglio rappresentare quanto appena detto, le figure seguenti fanno vedere la sezione orizzontale della griglia dell'errore a -0.25 m slmm ed a -10.0 m slmm, e la sezione verticale a 300 m dall'origine. Come può essere osservato gli errori si concentrano al limite tra Flysch e Crostello con i sedimenti ed il riporto. Ovviamente gli errori sono maggiori laddove nel modello mancano dati (sondaggi).

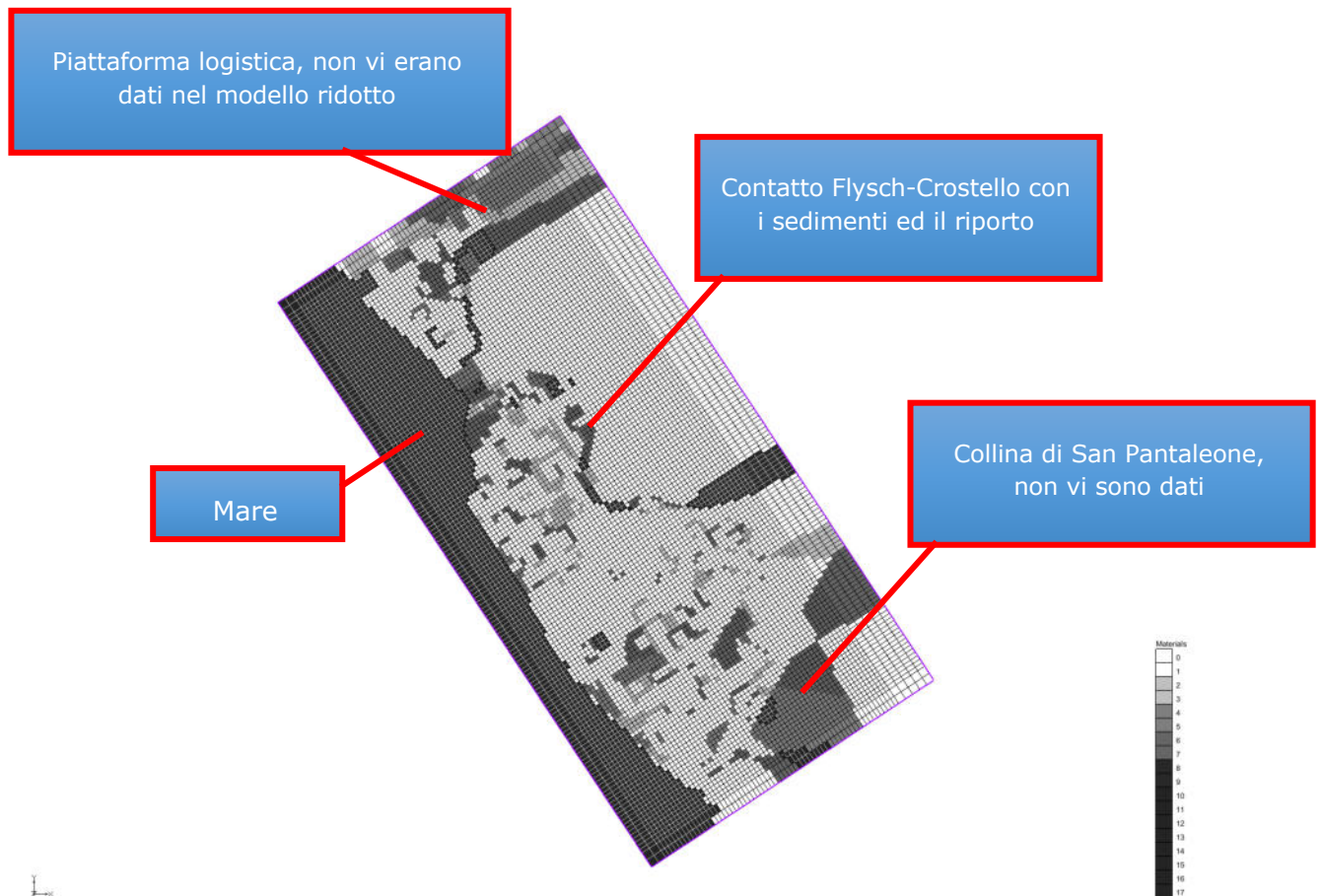


Figura 2-34: Sezione orizzontale della griglia dell'errore a -0.25 m slmm. Notare come il contatto tra Flysch e "Crostello" con sedimenti e riporto sia marcato da errori più grandi. La parte relativa al mare è artificialmente messa in evidenza per far risaltare la linea di costa. La maggior parte della griglia è di color bianco indicando un'equivalenza tra i modelli geologici discretizzati ridotto e completo

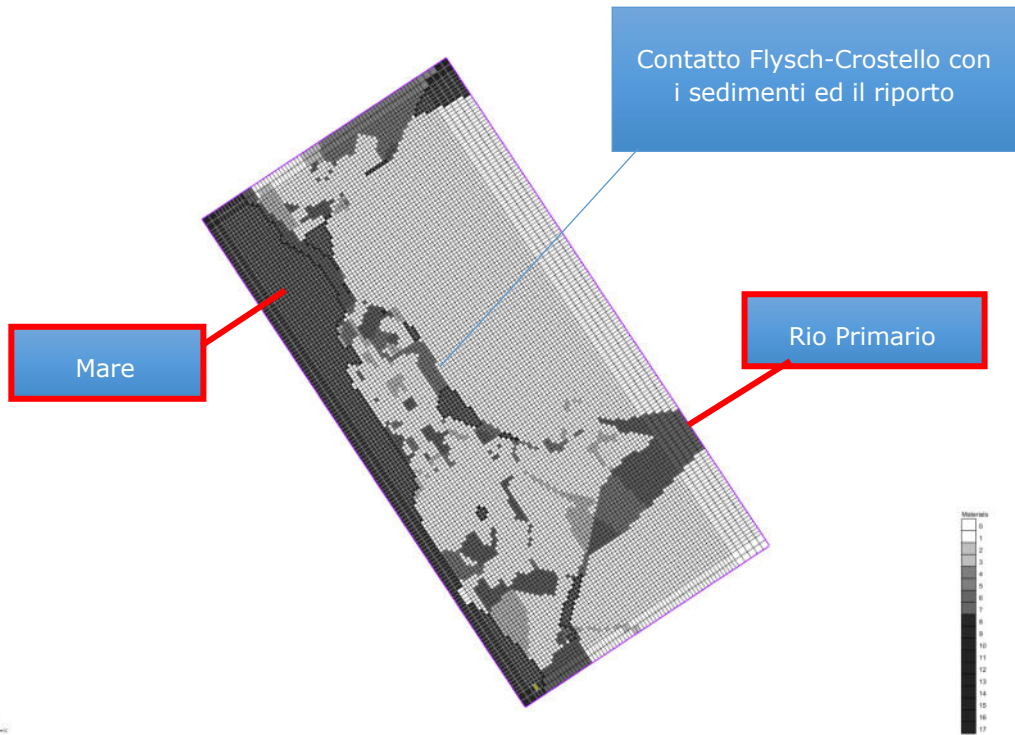


Figura 2-35: Sezione orizzontale a -10 m slmm. Notare che a profondità maggiori gli errori sono più marcati, particolarmente nelle aree del Rio Primario e del contatto tra il Flysch e "Crostello" con i sedimenti ed il riporto. Questo dipende dal fatto che a profondità maggiori si riduce la densità dei dati.



Figura 2-36: Sezione verticale della griglia dell'errore a 300 m dall'origine. Notare che a profondità maggiori corrispondono errori maggiori, particolarmente nelle aree del Rio Primario e del contatto tra il Flysch e Crostello con i sedimenti ed il riporto.

3 MODELLO IDROGEOLOGICO

3.1 Sequenza metodologica

Una volta realizzato il modello geologico, la preparazione del modello idrogeologico deve seguire necessariamente la seguente serie di passi, il primo dei quali corrisponde a stabilire le condizioni al contorno del modello stesso.

In questo caso specifico vi sono due fondamentali situazioni che devono essere rappresentate, quella attuale prima della messa in sicurezza (modello 1 o modello "before") e quella successiva alla costruzione del barrieramento lato mare (modello 2 o modello "after").

5.2 Condizioni al contorno

Nel modello numerico le condizioni al contorno sono rappresentate dal mare (livello di falda mantenuto costantemente a 0.00 m s.l.m.m.) lungo tutta la riva ed il fondo marino da SE a NO (Figura 3-1).

Dal lato Est il confine deve essere posto lungo la deviazione del Rio Primario che costituisce un drenaggio sia superficiale che profondo molti metri. Dai dati a disposizione si può dedurre che tale drenaggio rimane al livello medio del mare fino a circa 350 m dalla costa, aumentando poi di quota verso monte da 0.0 m a 0.20 m s.l.m.m. a NE dove il Rio Primario interrato esce dal sedime della Ferriera.

A monte, verso il confine NE, il livello di falda deve essere imposto in modo da portarlo internamente alla Ferriera alle quote misurate nei piezometri e, quindi, viene determinato in fase di calibrazione. Nel caso specifico la quota massima della falda all'interno della Collina di Servola, a seguito di vari esperimenti di modellazione, è stata individuata come variabile in un rango circa da 4 a 10 m s.l.m.m.. Dalla zona centrale della collina, la falda decresce a ventaglio fino a poco sotto la quota del piano campagna tutt'attorno alla base della collina stessa.

Lungo il confine NO è stato assunto un limite a carico costante posto al livello del mare in modo da rappresentare in forma sufficientemente approssimativa l'acquifero al di sotto della Piattaforma Logistica. In tale area, infatti, il sistema di messa in sicurezza è già stato realizzato.

Lungo il mare e nella collina di Servola, i livelli di falda imposti e mantenuti costanti nel tempo sono riprodotti identici su tutti i livelli del modello.

A questo modello può essere applicata, in prima istanza, una ricarica efficace stimata come massima nell'ordine del 15% della piovosità media annua. Anche se questo valore potrebbe sembrare sovrastimato, l'osservazione di campagna mostra una copertura superficiale estremamente permeabile. Inoltre, la frequente bagnatura estiva dei depositi carbone e minerali e dei piazzali per ridurre la polvere e le attività di raffreddamento della Ferriera possono comportare un ulteriore aumento della infiltrazione efficace (ricarica) rispetto a quella legata alla piovosità. Nella fase di calibrazione del modello, come vedremo in seguito, la ricarica verrà variata anche di valori significativi.

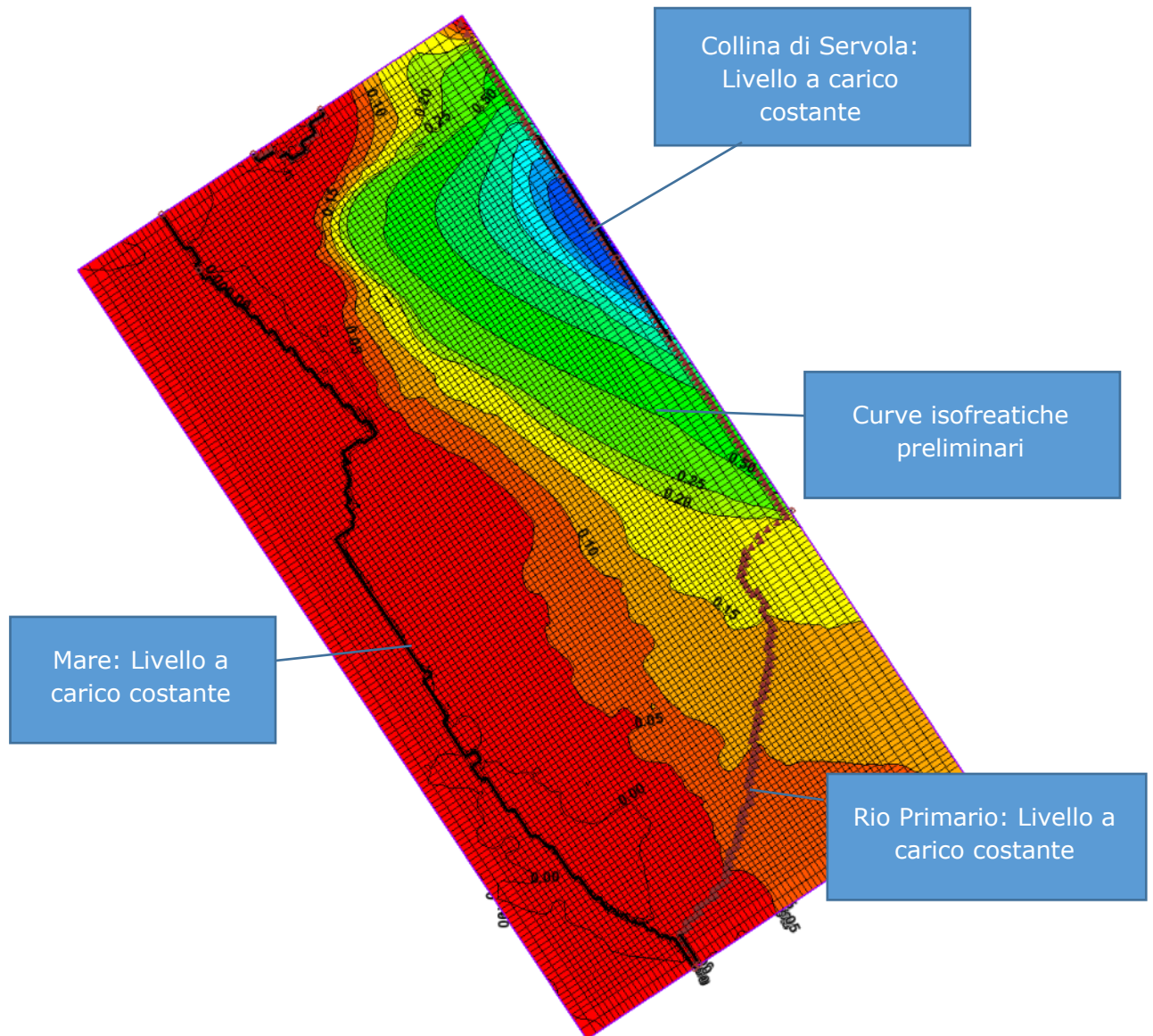


Figura 3-1: Condizioni al contorno del modello numerico. Lungo mare la quota della falda è mantenuta a 0.00 m s.l.m.m.. Lungo il Rio Primario la quota è imposta al livello del mare fino a circa 350 m di distanza dalla costa; successivamente la quota aumenta linearmente fino a 0.20 m s.l./m.m. all'uscita dal sedime della Ferriera.

5.3 Calibrazione del modello

La calibrazione del modello numerico avviene seguendo quattro direzioni distinte: la prima corrisponde all'analisi dei dati di calibrazione, la seconda consiste nella definizione della quota dei carichi costanti a monte della Ferriera, la terza è rappresentata dalla scelta delle permeabilità delle litologie del modello geologico, e la quarta nella definizione delle ricariche (infiltrazioni efficaci) specifiche per ogni area del modello. Ovviamente, questo è un processo reiterativo fino al raggiungimento degli obiettivi di calibrazione.

La fase di calibrazione viene frequentemente eseguita tramite codici di calcolo specifici (ad esempio PEST). In questo caso si è preferito eseguire una calibrazione per fasi successive in modo da poter verificare direttamente il peso e le relative influenze sui risultati dei singoli criteri di calibrazione. Quest'approccio è giustificato in quanto, almeno per ciò che riguarda la geologia, essa è già definita dallo studio statistico presentato nei capitoli precedenti.

5.3.1 Analisi dei dati di calibrazione

I dati utili alla calibrazione del modello sono stati ottenuti dai dati di monitoraggio in continuo di piezometri all'interno della Ferriera, dati che sono stati forniti dall'Agenzia INVITALIA nel corso del 2018 e 2019. Si tratta di una serie di sondaggi utilizzati anche ai fini stratigrafici che sono stati adibiti a piezometri con strumentazione dedicata. Tali piezometri sono stati suddivisi per zone in funzione della loro rilevanza ai fini del modello idrogeologico come indicato in Tabella 3-1 ed in Figura 3-2.

Tabella 3-1: Suddivisione dei piezometri per zone. Sottolineati i piezometri non funzionanti.

Zona	Identificativo
Piezometri alti	<u>PZ3.A3</u> , PZ2.A1, PZ11, PZ1.A2
Piezometri bassi	PZ24, PZ1.A3, PZ4, <u>PZ1.A1</u> , PZ7, PZ7.A2
Rio Primario	PZ9, Dz2bis, Dz3bis, PZ10, PZ8.A2, PZ6.A2, PZ3.A2
Intermedi	PZ23, PZ4A1, PZ25A2bis, PZ4.A2bis
Mare	PZ2.A3, PZXbis, PZYbis, PZWbis, PZ3.A1, <u>PZ9.A2</u> , PZ16, PZ11.A2, PZ10.A2, <u>PZ22</u> , PZ2.A2

I piezometri alti sono locati nella parte verso monte della Ferriera attorno alla Collina di Servola. Tra questi il piezometro PZ3.A3, locato nella area uffici sulla Collina di Servola, per quanto sia stato utilizzato per realizzare misure del livello di falda e prove di permeabilità non ha mai restituito dati utili, essendo stato dichiarato sempre "secco".

I piezometri bassi sono locati alla base della Collina di Servola a "valle" idrogeologica rispetto ai piezometri alti. Tra questi il piezometro PZ1.A1, locato immediatamente verso monte del Parco Minerali, non ha restituito dati nell'intervallo febbraio – aprile 2019.

I piezometri Rio Primario sono stati ubicati nella zona di monte del Rio Primario all'interno della Ferriera e coprono l'area in cui il Rio Primario è stato deviato nel 1962.

I piezometri intermedi occupano una fascia tra i piezometri bassi e del Rio Primario e la costa.

I piezometri mare sono locati lungo la riva del golfo di Muggia. Tra questi il piezometro PZ9.A2, locato lungo la riva, ed il piezometro PZ22, locato a fianco del porticciolo a SE della Ferriera, non hanno restituito dati nell'intervallo febbraio – aprile 2019.



Figura 3-2: Ubicazione dei piezometri utilizzati per la calibrazione del modello con indicate le zone di appartenenza

L'analisi dei dati piezometrici dei monitoraggi in continuo ha portato ad evidenziare l'incongruenza e pertanto la difficoltà di utilizzo per i dati nei mesi di monitoraggio del 2018, nei quali, tra l'altro, non erano tuttavia stati realizzati i nuovi piezometri. I dati di gennaio-febbraio 2019 non possono essere utilizzati mancando, in questo periodo, i rilevamenti in continuo della marea. Pertanto, si è stati costretti ad utilizzare unicamente i monitoraggi in continuo relativi ai periodi febbraio-marzo e marzo-aprile 2019.

Di seguito vengono descritti i rilevamenti così come registrati ad alcuni piezometri che sono caratteristici ed esemplificativi del loro comportamento.

Il Piezometro PZ11 (Figura 3-3) ha generalmente un comportamento regolare con un livello di falda che varia tra i 3.5 m ed i 4.0 m s.l.m.m.. Si nota come non vi sia alcuna correlazione con la marea, ma che questa correlazione sia, invece, molto evidente con la piovosità.

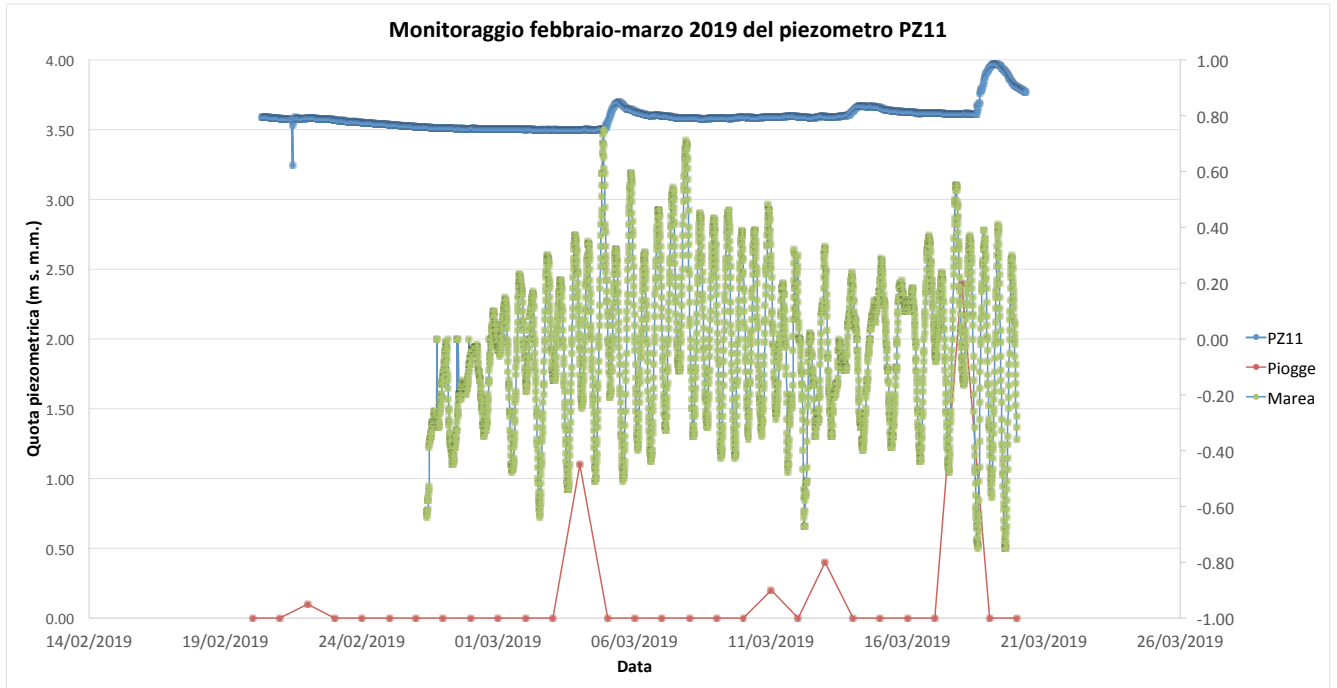


Figura 3-3: Livello piezometrico del PZ11 durante il periodo febbraio-marzo 2019 (scala di sinistra). Livello di marea nello stesso periodo (scala di destra). Piovosità (scala di sinistra in mm). Notare come ai picchi di pioggia, anche relativamente piccoli, corrispondono significative variazioni del livello piezometrico.

In effetti esiste una correlazione logaritmica tra pioggia e variazione del livello di falda con un alto coefficiente di correlazione (Figura 3-4). Infatti, con il picco di piovosità alquanto ridotto di 2.4 mm la falda risale di 35 cm, mentre con piovosità maggiori anche di un ordine di grandezza la falda sale in proporzione minore. Ciò sembra indicare che durante la pioggia l'area del piezometro viene "inondata" da acque di ruscellamento superficiale o piuttosto da dispersori o rotture della fognatura della raccolta acqua piovana. Infine, dopo la pioggia la falda decade esponenzialmente indicando un normale fenomeno di dispersione nell'acquifero.

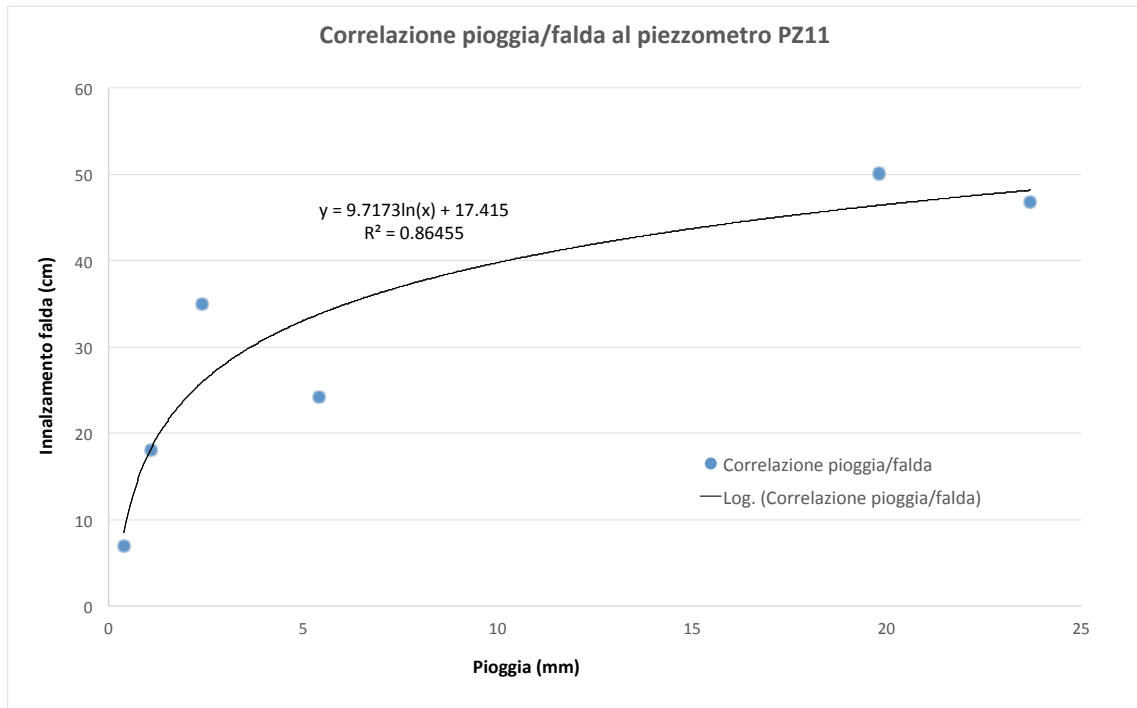


Figura 3-4: Correlazione tra pioggia e variazione del livello di falda basata sui dati registrati al piezometro PZ11 nelle due campagne di monitoraggio. Si nota come con piovosità ridotte la falda risale di oltre due ordini di grandezza, mentre con piovosità elevate la falda non risale così significativamente.

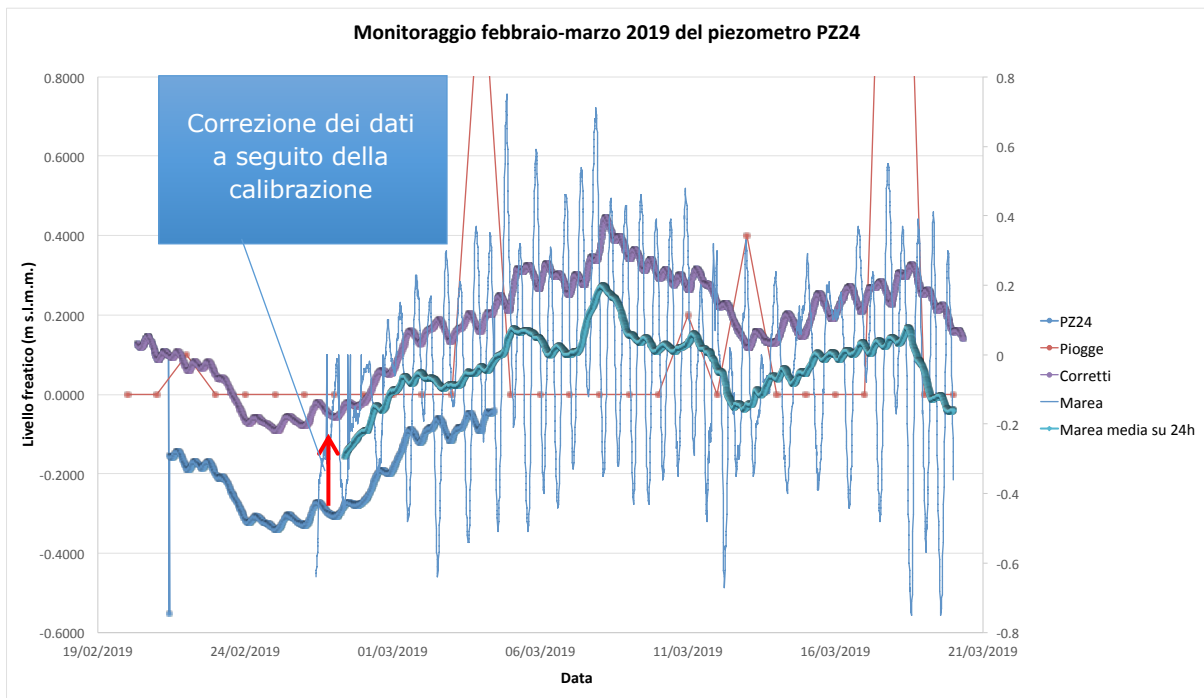


Figura 3-5: Livello piezometrico del PZ24 durante il periodo febbraio-marzo 2019 (scala di sinistra). Livello di marea nello stesso periodo con media mobile su 24 ore (scala di destra). Piovosità (scala di sinistra in mm). Notare come i dati piezometrici siano stati corretti "rialzandoli" nella prima parte del periodo in base alla calibrazione eseguita. Non si nota una forte correlazione con i dati di pioggia.

I dati del piezometro PZ24 (Figura 3-5) durante il monitoraggio nella prima parte del periodo sono stati corretti in base alla calibrazione effettuata nella seconda parte dello

stesso periodo sommando un fattore di correzione. L'oscillazione corretta mostra una periodicità con piccole ampiezze che segue l'oscillazione della marea diurna con un ritardo di 6:30 h, ma segue ancor più da vicino le variazioni della marea integrate tramite la media mobile su 24h.

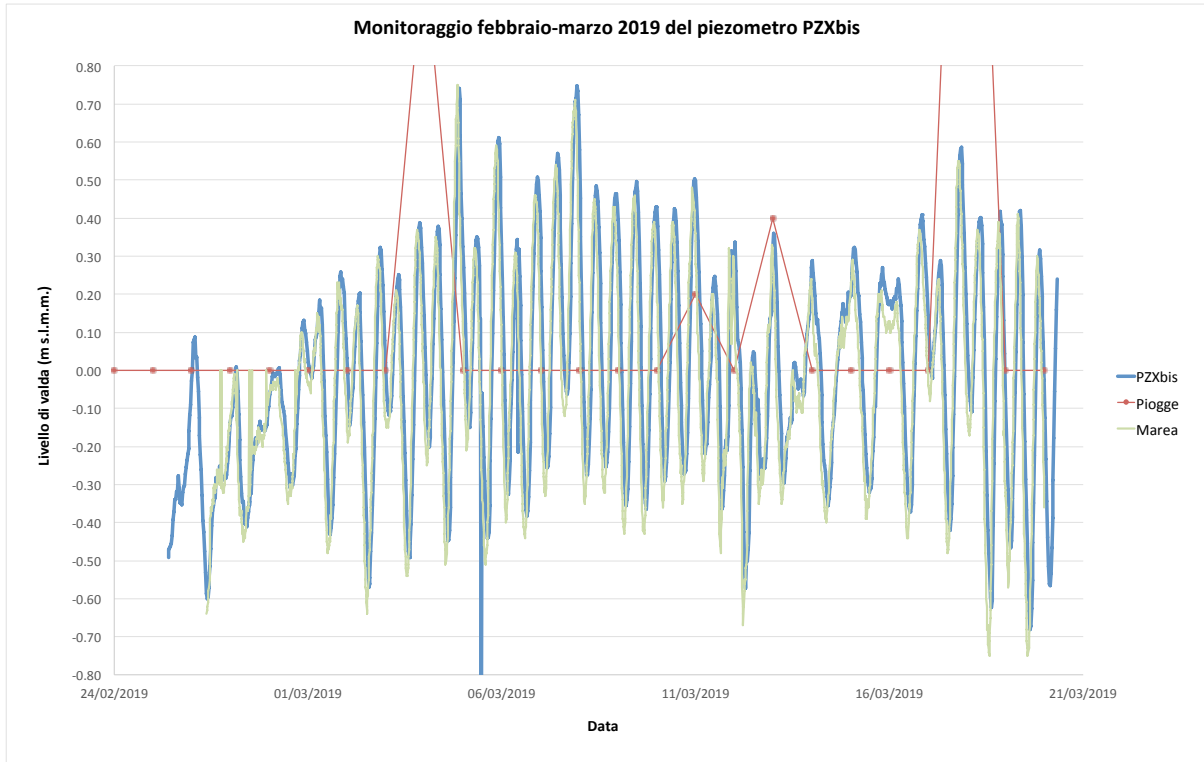


Figura 3-6: Livello piezometrico del PZXbis durante il periodo febbraio-marzo 2019 e livello di marea nello stesso periodo. Piovosità (scala di sinistra in mm). Notare come vi sia una corrispondenza totale tra la marea ed i livelli di falda i cui picchi seguono con un ritardo di circa 30 min. i picchi di marea.

I livelli di falda registrati al piezometro PZXbis (Figura 3-6) mostrano una totale sovrapposizione con i dati mareali con un ritardo che è di soltanto circa 30 min. Si noti, altresì, come i massimi piezometrici siano leggermente superiori ai massimi di marea (2-3 cm), mentre i minimi mareali sono sempre chiaramente inferiori ai minimi della falda (7-8 cm). Questo comportamento suggerisce che vi sia una significativa alimentazione della falda da monte.

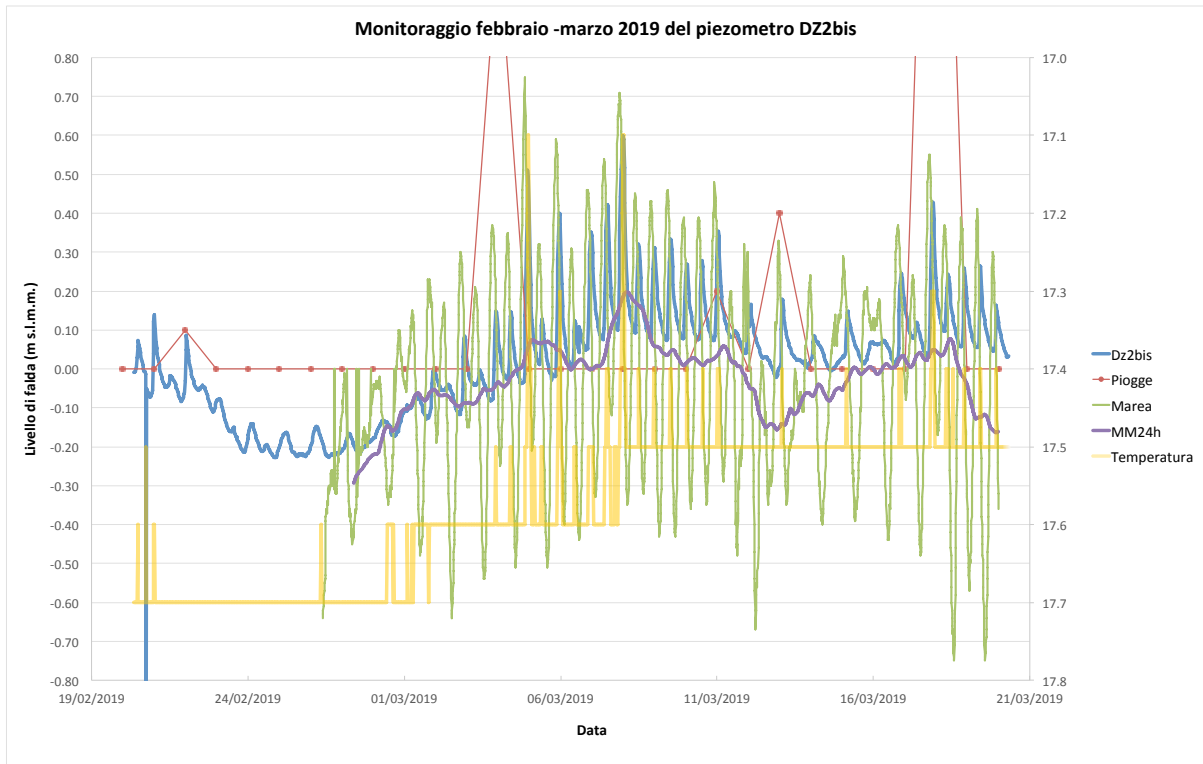


Figura 3-7: Livello piezometrico (scala di sinistra) e variazione della temperatura (scala di destra invertita con minimi in alto e massimi in basso), oltre al dato mareale, alla sua media mobile (scala di sinistra) ed alla pioggia (scala di sinistra in mm), del DZ2bis durante il periodo febbraio-marzo 2019.

Le registrazioni della falda e della temperatura al piezometro DZ2bis nel periodo febbraio-marzo 2019 in paragone ai dati mareali sono riportati in Figura 3-7. Notare come nel periodo di acqua bassa (prima parte di febbraio) il livello piezometrico segue da vicino la media mobile su 24h del livello del mare oltre a presentare oscillazioni di più breve periodo che seguono i picchi di marea. Cioè, pur localizzandosi il piezometro a circa 550 m dalla costa (è il piezometro più lontano dalla costa) la falda si trova al di sotto del livello del mare seguendo l'andamento dell'acqua bassa. Invece, quando le oscillazioni di marea superano circa i 20 cm s.l.m.m. il piezometro inizia a registrare dei picchi del livello di falda che seguono i picchi di marea con un ritardo di circa 2:30h. Ugualmente si registrano diminuzioni repentine della temperatura pari a 0.1-0.5 °C con lo stesso ritardo. Non si registrano però picchi negativi di valore paragonabile in corrispondenza dei minimi di marea.

Ovviamente questo è un comportamento anomalo che sembrerebbe potrebbe essere giustificato tramite l'assunzione che esista un drenaggio particolarmente efficiente che metta in comunicazione il piezometro DZ2bis con il mare attraverso il drenaggio dello scatolare del Rio Primario deviato.

Oltre a ciò, si può ipotizzare che lo stesso scatolare di cemento armato, realizzato per deviare il Rio Primario e costruito nel 1962, abbia una giunzione non a tenuta completa in prossimità di dove lo stesso scatolare va ad innestarsi al Rio Primario vero e proprio (anch'esso intubato) all'uscita dal sedime della Ferriera. Dai dati a disposizione tale giuntura si trova proprio a circa 20 cm s.l.m.m.

In conclusione, si dovrebbe ipotizzare che il piezometro DZ2bis segue da vicino le variazioni di marea (in modo più simile al PZ24 e meno al PZXbis) tramite un drenaggio molto

efficiente, che però ne smorza le oscillazioni di alta frequenza, ed allo stesso tempo riceve un apporto diretto dal mare attraverso lo scatolare del Rio Primario tutte le volte che l'alta marea supera i 20 cm s.l.m.m. in modo da produrre i picchi positivi della falda associati alla repentina riduzione della temperatura.

La questione problematica non è tanto l'apporto diretto dal mare tramite la perdita di acqua marina dallo scatolare del Rio Primario deviato, ma piuttosto il fatto che il piezometro DZ2bis abbia un livello di falda mediamente molto basso e risenta così evidentemente delle variazioni di marea di lungo termine, comportandosi come i piezometri che si localizzano vicini al mare. Due potrebbero essere le ipotesi da proporre per questo comportamento anomalo:

- la prima che il drenaggio realizzato nel 1962 sotto lo scatolare del Rio Primario deviato sia effettivamente molto efficiente (ipotesi sviluppata nel prosieguo nel "modello Rio Primario");
- la seconda che in fase di realizzazione dello scatolare del Rio Primario deviato sia stata realizzato o mantenuto collegamento (una condotta?) tra l'attacco del Rio Primario e la costa (ipotesi sviluppata nel prosieguo nel "modello Mandracchio").

La realizzazione delle opere di barrieramento durante la fase esecutiva, tutt'ora in corso, fa propendere per la prima di queste due ipotesi.

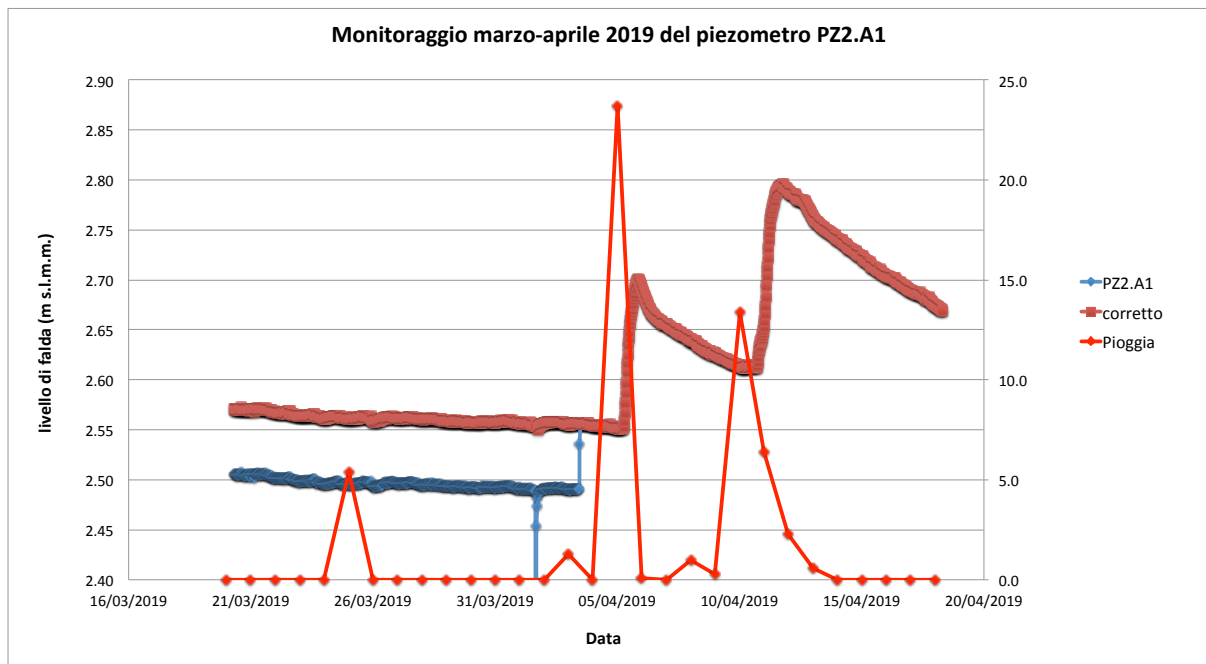


Figura 3-8: Livello piezometrico (scala di sinistra) e dato di piovosità giornaliera (scala di destra in mm) del PZ2.A1 durante il periodo marzo-aprile 2019. Notare i picchi nella falda in corrispondenza dei picchi di piovosità in modo simile al PZ11 (Figura 3-3), ma in questo caso con piogge di piccola intensità non vi sono aumenti nel livello di falda. Notare altresì che la prima parte del periodo è stata corretta verso l'alto in base alla calibrazione eseguita a metà del periodo.

La falda al piezometro PZ2.A1 (Figura 3-8), come per altro in quasi tutti gli altri piezometri, durante il secondo periodo di monitoraggio (marzo-aprile 2019) registra un andamento

fortemente influenzato dalla piovosità (scala di destra in mm) soltanto quando, a differenza del PZ11, la piovosità tende ad essere significativa (almeno maggiore di 6 mm). Questo andamento, che è osservato anche in altri piezometri (per esempio PZ7, PZ7.A2, PZ10 e PZ3.A2) potrebbe testimoniare la presenza di perdite in acquifero dal sistema fognario delle acque piovane ogniqualvolta si superi una portata definita.

Come mostrato, dove è stato rilevato necessario farlo, i dati di monitoraggio sono stati corretti per riportarli ai livelli di calibrazione strumentale.

Infine, con lo scopo di eliminare l'influenza della oscillazione di marea nei dati di monitoraggio, sia per il primo (febbraio-marzo) che per il secondo periodo (marzo-aprile) del 2019 di rilevamento della falda, è stata adottata la seguente procedura:

- 1) È stato scelto l'intervallo di tempo tra due minimi di marea corrispondenti ai quarti di luna mediando i valori di marea rilevati in tale intervallo. Per il primo periodo la media è pari a -2 cm s.l.m.m., mentre per il secondo periodo la media ha un valore di -1 cm s.l.m.m.. Tali incertezze, rispetto allo zero del livello medio del mare, sono praticamente paragonabili all'errore di misura (circa ± 1 cm) e possono essere trascurate.
- 2) È stata fatta la media dei dati calibrati, per il medesimo intervallo temporale dei due periodi di misura, di tutti i piezometri monitorati.
- 3) In base all'analisi dei dati sono state adottate, per il primo periodo di misura, ulteriori correzioni per i piezometri localizzati nella zona "Rio Primario" basandosi sulle calibrazioni effettuate durante il secondo periodo che sembrano maggiormente attendibili.
- 4) Infine, è stata computata la media tra i dati piezometrici corretti del primo e del secondo periodo di misura in modo da ottenere i dati di calibrazione per il modello idrogeologico.

I risultati di questa procedura sono riportati in Tabella 3-2 dove:

- La media dei piezometri nel primo periodo è indicata come "Falda 1" e quella del secondo periodo come "Falda 2".
- Nella colonna "Correzione" sono riportati i dati dei piezometri relativi alla zona del "Rio Primario" così come corretti secondo quanto indicato al soprastante punto 3).
- La colonna "Differenza" corrisponde, appunto, alla differenza tra "Falda" 2 e "Falda 1", dove si osserva che tali differenze risultano mediamente contenute in un intervallo ristretto con una media di 3 cm ed una deviazione standard di 9 cm. Questa media e deviazione standard sulla differenza tra le due campagne di misura indicano immediatamente l'accuratezza che il modello idrogeologico deve ottenere per poter essere considerato calibrato. In pratica, qualora il modello idrogeologico predica la quota di falda dei piezometri di calibrazione con una precisione di ± 9 cm si deve ritenere che la calibrazione ha raggiunto il livello ottimale massimo. Questo ovviamente senza considerare che nel modello vi sono errori dipendenti dalle comunque imperfette conoscenze della geologia, della permeabilità, della ricarica e delle condizioni al contorno.
- Le colonne "Modello Rio Primario" e "Modello Mandracchio" con le associate colonne "Differenza" corrispondono ai risultati dei due modelli idrogeologici che sono presentati e discussi nei capitoli successivi.

Tabella 3-2: Dati di calibrazione. In rosso il dato relativo al piezometro PZXbis al momento non preso in considerazione.

Piezometro	Falda 1 (cm slmm)	Correzione (cm slmm)	Falda 2 (cm slmm)	Differenza (cm)	Media (cm slmm)	Modello Rio Primario (cm slmm)	Differenza (cm)	Modello Mandracco (cm slmm)	Differenza (cm)
PZ2.A1	2.52		2.61	0.09	2.57	2.60	0.03	2.50	-0.07
PZ11	3.58		3.83	0.25	3.70	3.65	-0.05	3.65	-0.05
PZ1.A2	3.99		4.03	0.03	4.01	4.02	0.01	4.05	0.04
PZ24	0.24		0.16	-0.08	0.20	0.31	0.11	0.31	0.11
PZ1.A3	2.49		2.46	-0.03	2.48	2.40	-0.08	2.52	0.04
PZ4	1.14		1.02	-0.13	1.08	1.16	0.08	1.13	0.05
PZ7	1.47		1.42	-0.05	1.44	1.51	0.07	1.50	0.06
PZ7.A2	1.24		1.37	0.13	1.31	1.38	0.07	1.33	0.02
PZ9	1.20		1.22	0.02	1.21	1.18	-0.03	1.21	0.00
Dz2bis	0.08		0.10	0.02	0.09	0.10	0.01	0.10	0.01
Dz3bis	0.92	0.70	0.73	0.03	0.71	0.72	0.01	0.72	0.01
PZ10	0.91	0.72	0.77	0.05	0.75	0.78	0.03	0.77	0.02
PZ8.A2	0.99	1.03	1.07	0.04	1.05	1.02	-0.03	1.03	-0.02
PZ6.A2	0.17	0.91	0.75	-0.17	0.83	0.85	0.02	0.82	-0.01
PZ3.A2	0.76		0.79	0.03	0.77	0.74	-0.03	0.69	-0.08
PZ23	-0.01		-0.03	-0.02	-0.02	0.05	0.07	0.06	0.08
PZ4.A1	0.29		0.29	0.00	0.29	0.35	0.06	0.35	0.06
PZ5.A2bis	0.20		0.20	-0.01	0.20	0.28	0.08	0.28	0.08
PZ4.A2bis	0.22		0.22	-0.01	0.22	0.23	0.01	0.28	0.06
PZ2.A3	0.01		0.18	0.16	0.09	0.04	-0.05	0.04	-0.05
PZXbis	0.03		0.31	0.27	0.03	0.03	0.00	0.03	0.00
PZYbis	0.06				0.06	0.12	0.06	0.12	0.06
PZWbis	0.17		0.27	0.10	0.22	0.29	0.07	0.28	0.06
PZ3.A1	0.25		0.36	0.11	0.31	0.26	-0.05	0.25	-0.06
PZ16	0.11		0.13	0.02	0.12	0.08	-0.04	0.08	-0.04
PZ11.A2	0.05		0.26	0.21	0.15	0.12	-0.03	0.13	-0.02
PZ10.A2	0.19		0.23	0.04	0.21	0.14	-0.07	0.17	-0.04
PZ2.A2	0.41		0.41	0.00	0.41	0.36	-0.05	0.35	-0.06
Media =				0.03			0.01		0.01
Deviazione standard =				0.09			0.05		0.02

5.3.2 Descrizione dei modelli idrogeologici

Come meglio esemplificato al paragrafo precedente, il piezometro DZ2bis ha un comportamento anomalo rispetto all'andamento "normale" della falda con flusso da monte verso valle (vedi Figura 3-7). Tale piezometro registra, infatti, una falda con quote inferiori a quelle rilevate nei piezometri più a valle idrogeologica. Inoltre, risente in modo molto evidente delle oscillazioni di marea di lungo periodo, incluso l'acqua bassa - la falda si

trova, infatti, sotto al livello del mare durante la prima parte del primo periodo di monitoraggio.

Qualora tale comportamento sia assunto corretto – dall’analisi dei dati non si riscontrano motivi salienti che permettano di pensare che il piezometro non registri correttamente il livello di falda – al fine di spiegare tale comportamento anomalo, è necessario riportare i piani di costruzione del 1961 (Figura 3-9) e del 1962 (Figura 3-10) relativi alla deviazione del Rio Primario, oltre alle immagini aeree del 1943 e del 1957 (Figura 3-11). Nell’immagine del 1943 si osserva come il Rio Primario non fosse stato ancora deviato.

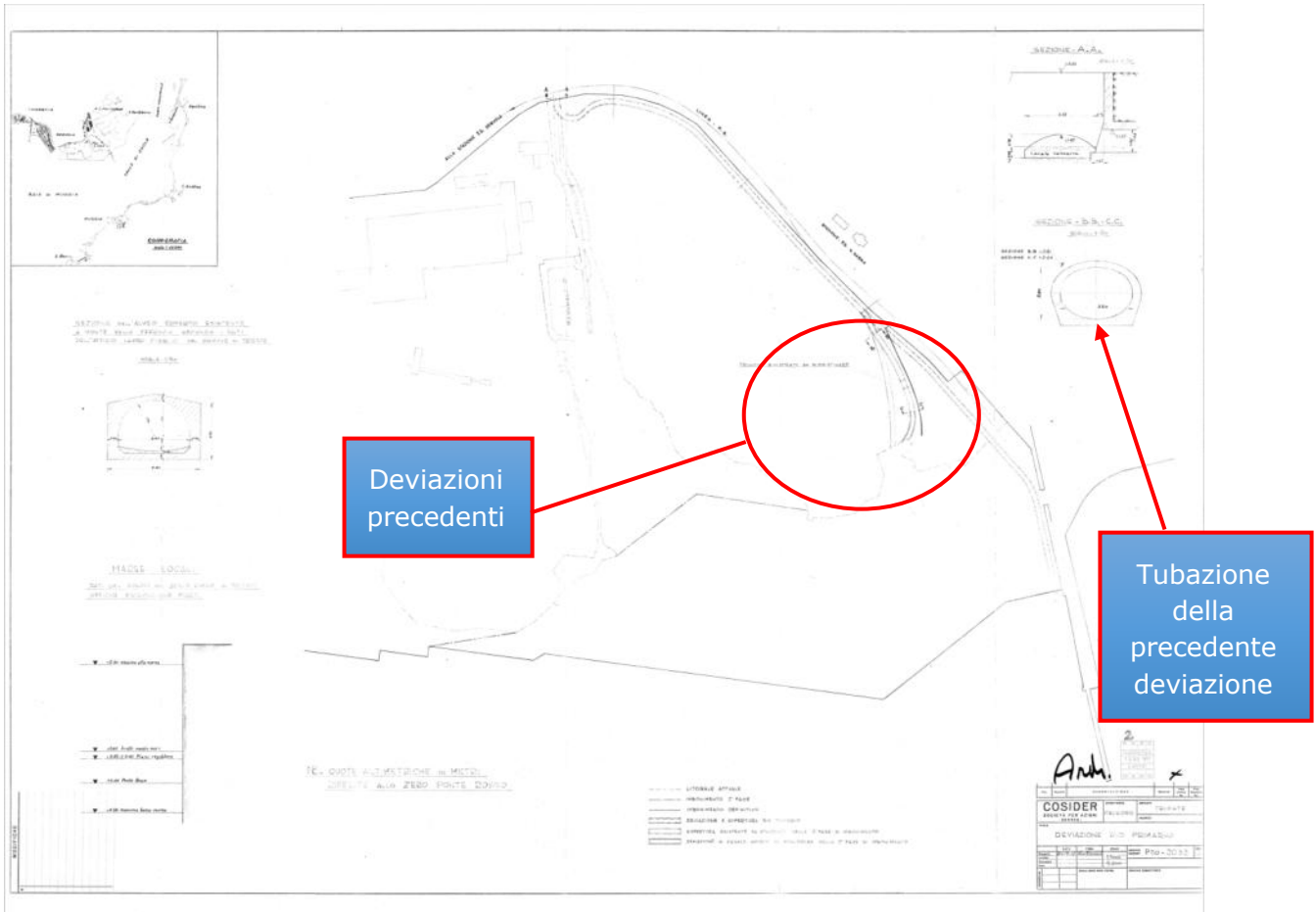


Figura 3-9: Planimetria del progetto di deviazione del Rio Primario del 1961.

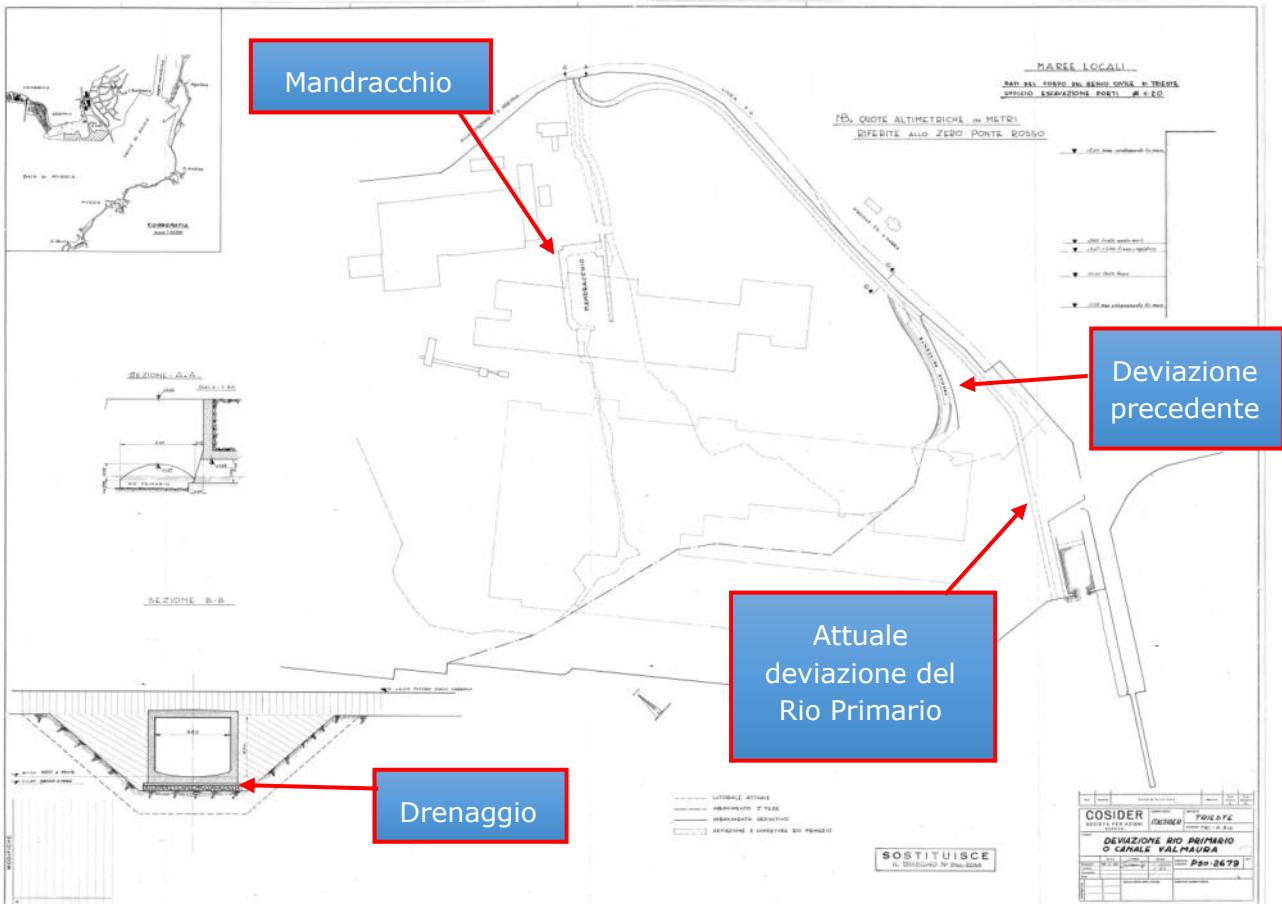


Figura 3-10: Planimetria del progetto di deviazione del Rio Primario del 1962

Nell'immagine del 1957, invece, si osserva come vi fosse già stata una prima deviazione del Rio Primario a cielo aperto con una parte finale che sembra interrata verso la foce, anche se tuttavia è presente il vecchio corso del Rio Primario con il porticciolo detto "Mandracchio" sul lato ovest. La parte interrata potrebbe essere la "tubazione" danneggiata così come riportata nella pianta del 1961 e del 1962 come "tronco esistente". Tra l'altro si osserva nella pianta del 1961 come vi fosse un precedente percorso in prossimità della foce, forse tuttavia a cielo aperto. Tale percorso era stato con probabilità successivamente intubato ed evidentemente danneggiato come indicato sempre nella pianta del 1961. Si potrebbe pertanto affermare che, sia il vecchio corso del Rio Primario verso il "Mandracchio" sia quest'area con le vecchie deviazioni del Rio Primario, possano rappresentare vie di "comunicazione" sotterranea diretta tra l'area del DZ2bis e l'area costiera di SE della Ferriera.

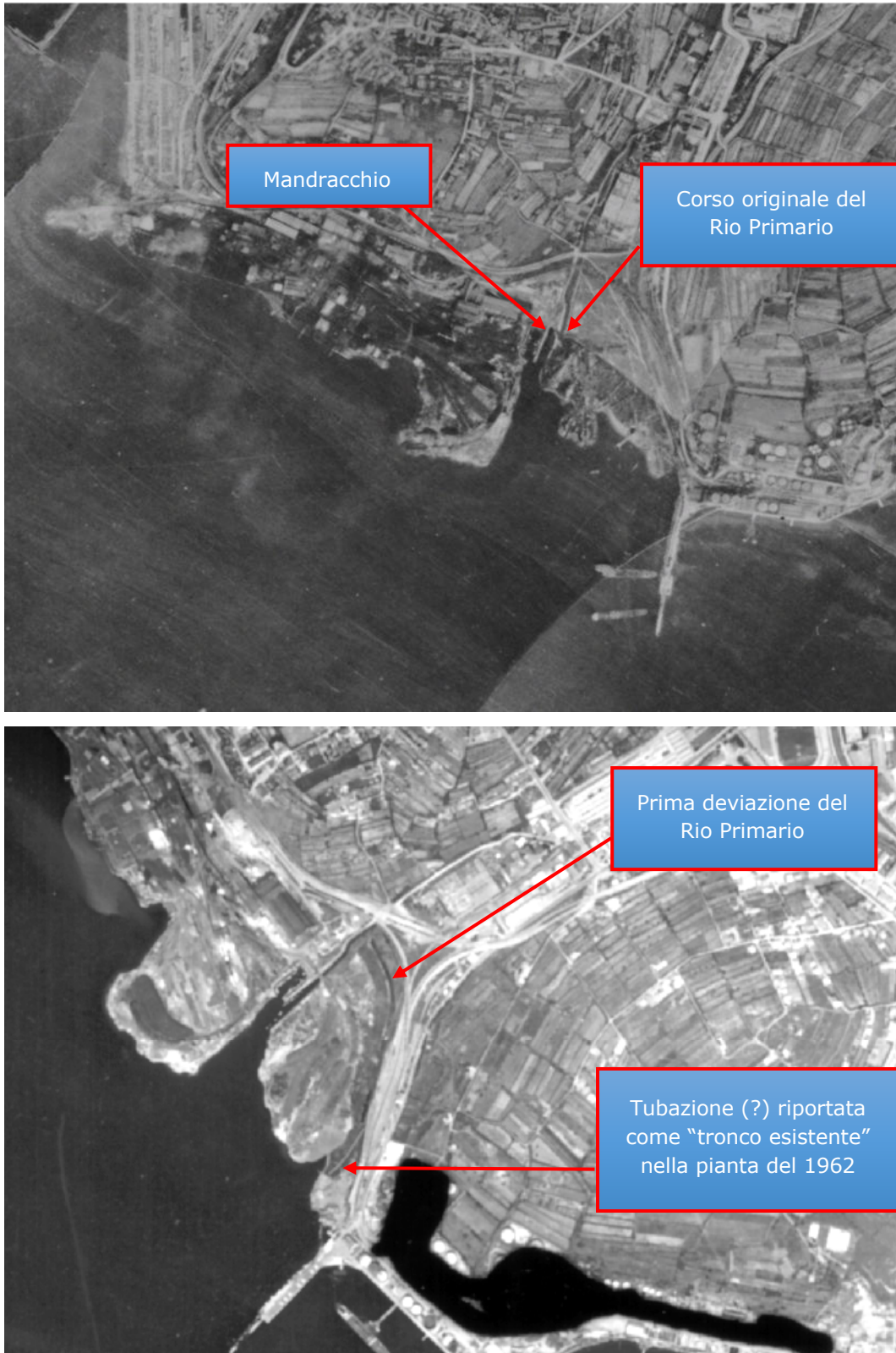


Figura 3-11: Immagini aeree a) del 1943 (GoogleEarth) e b) del 1957.

Qualora invece il livello di falda misurato dal piezometro DZ2bis fosse errato implicherebbe, dai dati a disposizione, che il livello di falda sarebbe necessariamente più alto e simile ai livelli di falda misurati nei piezometri limitrofi al DZ2bis (per esempio i piezometri PZ9,

DZ3bis). In questo caso il drenaggio delle acque sotterranee della Ferriera verso il Rio Primario diminuirebbe sostanzialmente. Pertanto, l'assunzione di questo modello, che esista effettivamente un drenaggio, è comunque cautelativa da un punto di vista di dispersione degli inquinanti nell'ambiente e tende ad includere lo scenario peggiore (il cosiddetto "worst case scenario").

È su questa base che vengono presentati due modelli idrogeologici per spiegare una così forte correlazione tra il livello di falda misurato al DZ2bis e le oscillazioni di marea:

- il primo detto "Rio Primario", che attribuisce alla base drenante dello scatolare in cemento armato, così come rappresentata nella pianta del 1962 (Figura 3-10), tale effetto;
- il secondo detto "Mandracchio", che attribuisce tale effetto al drenaggio, ipotizzato tuttavia attivo, del vecchio alveo del Rio Primario e/o delle vecchie deviazioni dello stesso Rio Primario.

Fondamentalmente la differenza tra i due modelli sta nel fatto che nel primo di essi (modello "Rio Primario") il drenaggio del Rio Primario al di sotto dello scatolare in cemento armato deve essere attivo e ben funzionante per tutta la sua lunghezza dall'ingresso nella Ferriera al mare, drenando così le acque superficiali per tutto il suo corso. In questo caso il livello di falda nel drenaggio deve rimanere pari a zero (l.m.m.) dalla foce fino a circa 4/5 della lunghezza del Rio Primario interno alla Ferriera.

Infatti, secondo i dati riportati nella mappa del 1962 (Figura 3-10) il fondo dello scatolare varia da -0.85 m s.l.m.m. allo sbocco a mare per risalire all'inizio a monte a +0.20 m s.l.m.m.. Cioè, partendo dal mare, il livello medio di questo dovrebbe risentirsi nello scatolare, assumendo ragionevolmente un gradiente costante del fondo dello stesso, fino appunto a circa 4/5 della distanza dal mare verso terra. Oltre questo limite (cioè nell'ultimo circa 1/5 della lunghezza del Rio Primario deviato) il fondo dello scatolare risale sopra al livello del mare fino ad arrivare a +0.20 m s.l.m.m. poco oltre la posizione del piezometro DZ2bis. Ovviamente le oscillazioni di marea possono risalire o scendere lungo lo scatolare del Rio Primario deviato ben oltre questo limite.

Pertanto, i gradienti di falda tra le aree limitrofe al Rio Primario attuale e lo stesso Rio sono significativamente elevati imponendo un drenaggio elevato delle acque sotterranee dal sedime della Ferriera.

Nel secondo modello (Modello Mandracchio), invece, il drenaggio potrebbe essere limitato alla sola area del DZ2bis, permettendo un drenaggio meno spinto (e quindi minori gradienti di falda) lungo il resto del corso del Rio Primario deviato.

Ad ogni buon conto, la modellistica in essere mostra come vi sia abbastanza ridondanza nel modello idrogeologico stesso e nel progetto per affrontare le varie ipotesi esemplificate in questa relazione.

5.3.3 *Analisi delle permeabilità*

Sono state raccolte le misure disponibili di conducibilità idrauliche dei vari materiali utilizzati nel modello idrogeologico (Tabella 3-3). Tali misure sono state eseguite in campagna (prove Le Franc e Lugeon) ed in laboratorio. Si evidenzia come per riportare i valori di conducibilità idraulica (m/s) a unità di permeabilità (m^2) si deve moltiplicare gli stessi valori per circa 10^{-7} (vedi Eq. 4).

Dall'analisi delle misure di permeabilità effettuate per ogni unità idrogeologica si nota come queste varino di circa due ordini di grandezza. Ciò è probabilmente dovuto alla

approssimazione nella descrizione delle stesse unità idrogeologiche nelle stratigrafie dei sondaggi ed a errori intrinseci alla misura della permeabilità in foro. Ad esempio, non risultano generalmente rilevate temperatura, densità e viscosità dell'acqua durante le misure di conducibilità idraulica.

Dai valori riportati in Tabella 3-3a è stata ricavata una scala di valori di permeabilità per le unità idrogeologiche sedimentarie (da 1 a 10 in Tabella 3-3) utilizzate nel modello, nella quale le permeabilità variano di mezzo ordine di grandezza da un'unità alla successiva. Mantenendo inalterate le proporzioni reciproche tra le varie unità, questa scala è stata regolata tramite la calibrazione del modello idrogeologico (vedi paragrafo successivo) ottenendo i valori riportati in Tabella 2-1. La regolazione della permeabilità del Flysch e del Crostello (sezione superficiale alterata dello stesso) ha seguito la medesima procedura. Infine, dato che su scorie ferrose, cemento, asfalto e carbone non sono state eseguite prove specifiche di permeabilità, le permeabilità di queste unità sono state attribuite per analogia con le unità litologiche corrispondenti per granulometria e tessitura.

Il rapporto tra permeabilità orizzontali e verticali, anch'esso non misurato, né in campagna né in laboratorio, è infine attribuito in base alla granulometria, con rapporti che sono assunti pari alla unità per i materiali più grossolani (da ghiaie a sabbie) crescendo fino a 10 per i materiali più fini (da limi ad argille) come specificatamente indicato in Tabella 2-1.

Con questa procedura, partendo dal modello geologico, si è potuti arrivare alla definizione della distribuzione spaziale della permeabilità nelle tre dimensioni della griglia di calcolo mantenendo l'intrinseca complessità della topologia geologica naturale.

Le misure di conducibilità idraulica effettuate nei nuovi sondaggi realizzati sulla Collina di Servola nel gennaio-febbraio 2022 (Tabella 3.3b) mostrano una sostanziale congruenza, cioè nei limiti di errore di misura della conducibilità idraulica con prove Lefranc, rispetto ai dati già a disposizione (Tabella 3.3a).

Relazione idrogeologica

Tabella 3-3b: Misure di conducibilità idraulica con prove Le Franc . In rosso le prove eliminate in quanto non consistenti.

Materiale	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14
Numero	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14
Litologia	Ghiaia	Ghiaia sabbiosa	Sabbia ghiaiosa	Sabbia	Sabbia limosa	Limo sabbioso	Limo	Limo argilloso	Argilla limosa	Argilla	Crostello	Flysch	Loppa
Piezometro	K (m/s)	K (m/s)	K (m/s)	K (m/s)	K (m/s)	K (m/s)	K (m/s)	K (m/s)	K (m/s)	K (m/s)	K (m/s)	K (m/s)	K (m/s)
PZ14													
PZ15									1.48E-10				
PZ16									1.79E-07				
PZ17				3.75E-07					5.35E-07				
PZ23								3.08E-06					
S85								5.97E-08					
S109									4.38E-09	4.45E-08			
S197									7.86E-06				
DZ2												4.80E-08	
DZ2BIS		7.77E-04							1.31E-06				
DZ3					1.18E-04								3.40E-06
DZ4		7.51E-05									1.80E-07	2.45E-07	7.51E-05
PZ1.A1								7.60E-06					
PZ2.A1												2.58E-05	
PZ3.A1			2.93E-05										
PZ4.A1			3.61E-03										2.93E-05
S1.A1		1.69E-06											3.61E-03
S2.A1								1.27E-07					
S3.A1			1.04E-04										
S4.A1								1.14E-07					
S5.A1							1.99E-05				1.99E-05		
S6.A1											6.37E-05		
S7.A1								5.31E-08					
PZ1.A2											1.59E-05		
PZ2.A2											8.40E-05		
PZ3.A2			1.59E-04										
PZ4.A2								1.03E-03					
PZ5.A2			2.27E-04										2.27E-04
PZ7.A2											1.67E-07		
PZ8.A2								8.16E-08					
PZ9.A2	1.44E-02												
PZ10.A2			2.88E-03										
PZ11.A2			3.20E-05										
S1.A2											1.50E-07		
S3.A2								1.81E-06					
S5.A2							5.93E-05				5.93E-05		
S7.A2								2.23E-07					
S9.A2								2.72E-06					
S11.A2						3.58E-06							
S13.A2								2.40E-07					
PZ1.A3												5.76E-07	
PZ2.A3						4.54E-05							4.54E-05
PZ3.A3											4.19E-07		
S1.A3								3.57E-07					
S2.A3								2.07E-08					
S3.A3								7.15E-08					
S5.A3											6.70E-05		
S6.A3												6.20E-08	
S7.A3											2.07E-06		
S8.A3											4.26E-05		
Media	1.44E-02	2.85E-04	1.01E-03	3.75E-07	1.18E-04	2.45E-05	3.96E-05	6.98E-05	1.65E-06	4.45E-08	2.96E-05	5.02E-06	7.97E-04
Deviazione standard		4.28E-04	1.55E-03			2.96E-05	2.79E-05	2.66E-04	3.08E-06		3.17E-05	1.03E-05	1.57E-03
Massimo	1.44E-02	7.77E-04	3.61E-03	3.75E-07	1.18E-04	4.54E-05	5.93E-05	1.03E-03	7.86E-06	4.45E-08	8.40E-05	2.58E-05	3.61E-03
Minimo	1.44E-02	1.69E-06	2.93E-05	3.75E-07	1.18E-04	3.58E-06	1.99E-05	2.07E-08	1.48E-10	4.45E-08	1.50E-07	4.80E-08	2.93E-05
Max/Min	1.00E+00	4.60E+02	1.23E+02	1.00E+00	1.00E+00	1.27E+01	2.98E+00	4.98E+04	5.31E+04	1.00E+00	5.60E+02	5.38E+02	1.23E+02
	eseguite su due unità		prove Lugeon		Le Franc 2008			laboratorio 2008			Le Franc 1955		

Piezometro	Data misura	Conducibilità idraulica
		Lefranc
		m/s
SG009	17/02/22	2,83E-06
	17/02/22	1,46E-06
SG011	03/02/22	3,80E-06
	08/02/22	5,06E-07
SG012	27/01/22	8,30E-07
	28/01/22	5,26E-07
SG013	11/02/22	2,07E-06
	16/02/22	8,32E-07
	Media	1,61E-06
	Deviazione Standard	1,20E-06

Tabella 3-4b: Misure di conducibilità idraulica del gennaio-febbraio 2022.

5.3.4 Calibrazione dei modelli idrogeologici

Ai fini della calibrazione del modello, come detto, è stata utilizzata una procedura reiterativa in cui sono state calibrate, in ordine temporale e di importanza, per prime le condizioni al contorno – cioè la quota del limite a carico costante di monte – in quanto le altre quote lungo i limiti sono semplicemente determinate dal livello medio del mare -. In seconda istanza è stata calibrata la scala delle permeabilità riducendo o aumentando le permeabilità delle unità idrogeologiche, ma mantenendo costante il rapporto di permeabilità tra loro. In terza istanza sono state calibrate le ricariche per ogni area attorno ai piezometri di calibrazione.

Queste tre azioni applicate in successione temporale ricorsivamente hanno permesso di raggiungere rapidamente l’oggetto della calibrazione. Cioè, la falda modellata è stata riportata il più vicino possibile alla quota dei piezometri cosiddetti “alti” e “bassi”.

La metodologia applicata ha consentito di risolvere il problema della limitatezza delle conoscenze relative al livello della falda mediata negli anni nella zona della Collina di Servola, dove nel modello sono stati appunto applicati i carichi costanti. In particolare, si ritiene che in futuro dovrebbe essere monitorata la falda al suo interno in modo da verificare le effettive variazioni stagionali della stessa. La stessa metodologia ha risolto il problema della non completa conoscenza dei valori locali della effettiva ricarica efficace.

L’utilizzo di questi due set di piezometri permette di effettuare una calibrazione sia sulla quota di ogni piezometro che sul gradiente della falda. In pratica, la corrispondenza tra il gradiente di falda nel modello e nella realtà fisica, permette di verificare non solo la quantità di flusso che dall’area di alimentazione attraversa il modello, ma anche, retrospettivamente alla scala della Ferriera, la validità delle assunzioni fatte e della procedura utilizzata.

Una volta calibrate le permeabilità delle unità idrogeologiche ed i carichi costanti di monte del modello (alla collina di San Pantaleone vengono attribuiti carichi costanti e ricarica comparabili a quelli della collina di Servola, anche se questa collina non ha influenza sul

comportamento del modello a causa dell'effetto drenante del Rio Primario) si può semplicemente calibrare la parte restante del modello tramite la ricarica (infiltrazione efficace).

Sono stati calibrati i due modelli "Rio Primario" e "Mandracchio" avendo come obiettivo quello di riprodurre una falda acquifera che si discosti al massimo di 10 cm dalla media dei due periodi di rilevamento riportata in Tabella 3-2. I risultati, cioè i livelli piezometrici calcolati e la differenza con tale media, sono riportati nella stessa tabella. Si osserva come la media dei discostamenti tra i modelli e la realtà è pari a 1 cm per entrambi, mentre la deviazione standard rispetto alla media è pari a 5 cm per il primo dei due modelli ed a 2 cm per il secondo di essi. Questo garantisce che entrambi i modelli siano calibrati correttamente da un punto di vista numerico sulla base della qualità dei dati piezometrici a disposizione. Infatti, tali valori della media e della deviazione standard sono inferiori a quelli ottenuti dalla differenza dei due successivi monitoraggi.

5.4 Risultati relativi ai due modelli idrogeologici "Rio Primario e "Mandracchio"

Di seguito vengono presentati i risultati dei due modelli "Rio Primario" e "Mandracchio" discussi in precedenza e relativi alla situazione idrogeologica effettiva attuale prima degli interventi di messa in sicurezza.

Conviene, altresì, sottolineare nuovamente che la differenza tra i due modelli risiede unicamente nel tipo e nell'efficienza di drenaggio del Rio Primario. Infatti, mentre nel primo dei due modelli il drenaggio esistente al disotto dello scatolare del Rio Primario deviato risulta essere molto efficiente, drenando la falda lungo tutto il suo percorso, nel secondo modello il drenaggio avviene in forma molto efficiente soltanto nella zona del piezometro DZ2bis ed in misura minore nella restante parte del suo percorso.

5.4.1 Il modello "Rio Primario"

Il modello "Rio Primario" mostra un alto piezometrico all'interno della Collina di Servola con un forte gradiente in tutta l'area dove affiora il Flysch o dove lo stesso è molto vicino alla superficie topografica sopra al livello del mare (Figura 3-12). Il gradiente della falda diventa significativamente più basso al passare dal Flysch (poco permeabile) all'area dei riporti (generalmente molto più permeabili). Viene evidenziato l'effetto drenante molto efficiente del Rio Primario (così come deviato) tramite dei gradienti particolarmente elevati in corrispondenza del suo corso.

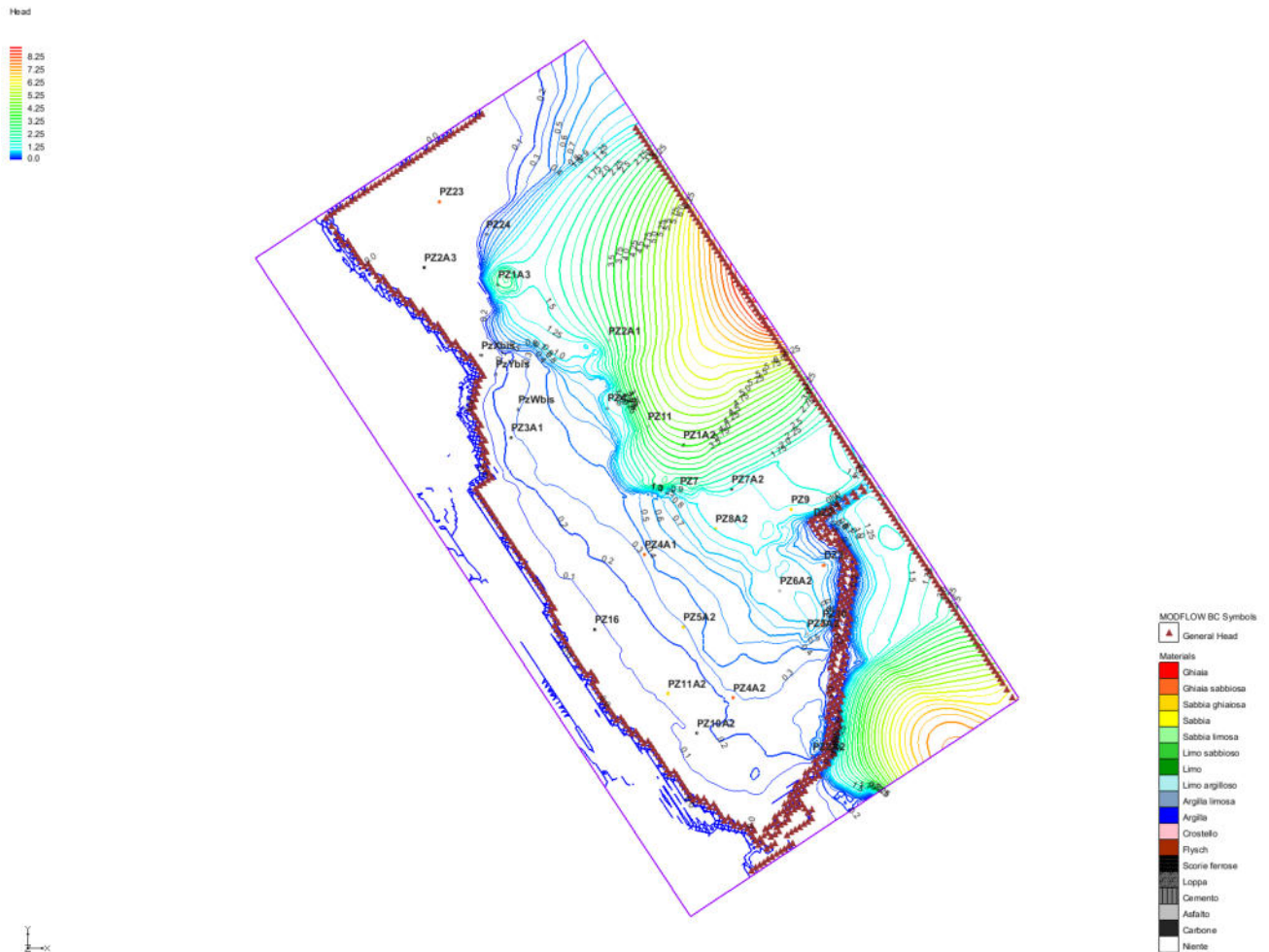


Figura 3-12: Modello "Rio Primario", livello di falda calibrata. Notare l'alto piezometrico sulla Collina di Servola che degrada all'interno della Ferriera e come il gradiente della falda diventi significativamente più basso al passare dal Flysch (poco permeabile) all'area dei riporti (generalmente molto più permeabili). Notare il piezometro PZ1.A3 che per essere calibrato necessita di una ricarica particolarmente elevata (vedi Figura 3-13).

La calibrazione ottenuta tramite la ricarica efficace (Figura 3-13) permette di riconoscere una serie di aree con ricarica particolarmente elevata. Alcune di queste corrispondono alle aree di lavoro della Ferriera e sono funzione della bagnatura del parco carbone o del parco minerali o del raffreddamento, o alla probabile presenza di dispersori o perdite dalla rete fognaria. Altre aree, come quelle verso SE si ritiene che siano prevalentemente conseguenza del modello scelto.

Si osserva, in particolare, che la ricarica è molto elevata nella prima sezione del Rio Primario a causa della necessità di mantenere forti gradienti nella falda in prossimità del fiume che è ipotizzato drenare in modo molto efficiente la stessa falda. Si nota altresì un'importante area a forte ricarica (gialla) lungo tutto il margine S del modello. Si ritiene che questa ricarica anomala sia in parte legata alla poca qualità di isolamento rispetto alle piogge della copertura dei piazzali superficiali.

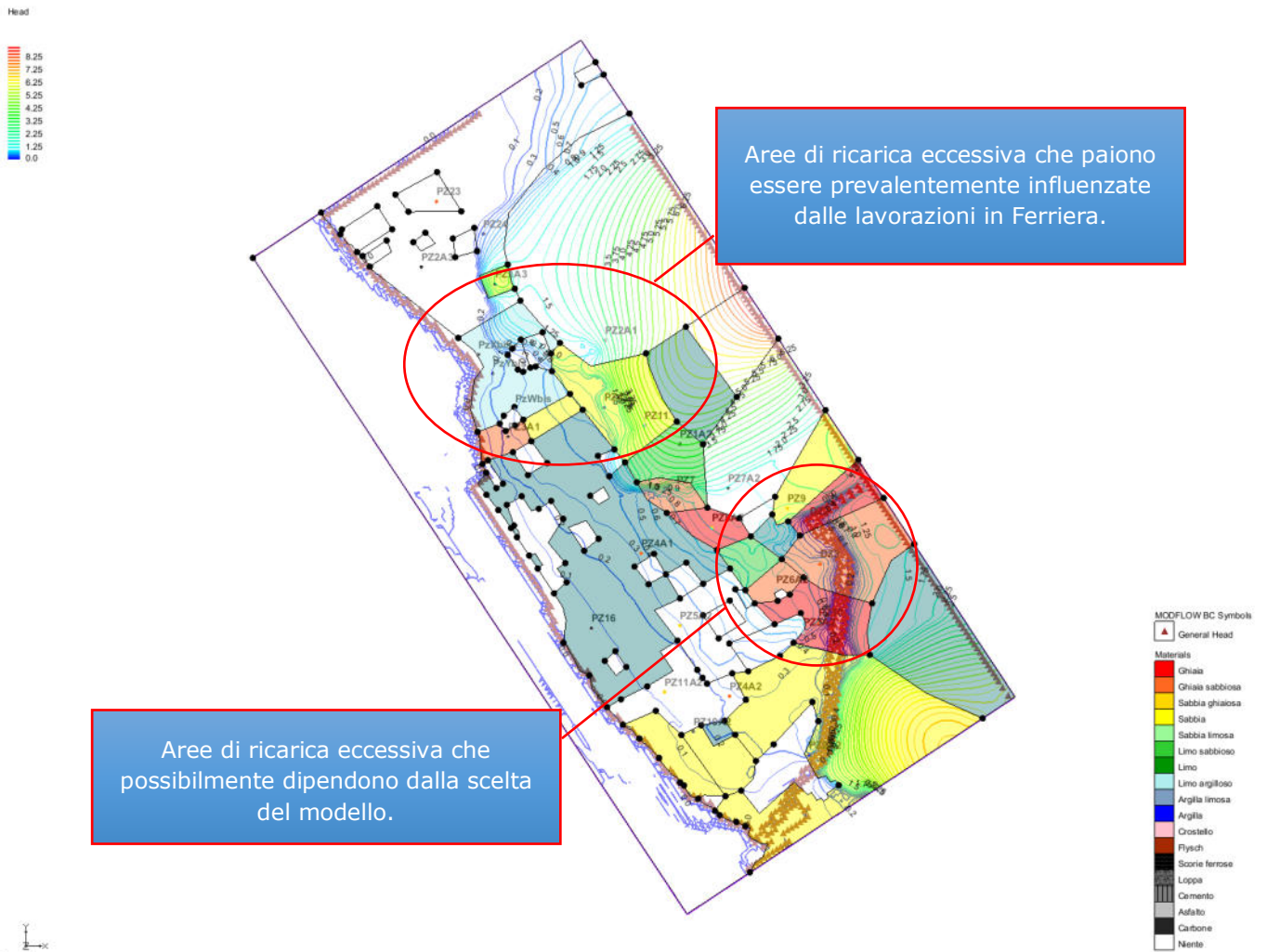


Figura 3-13: Ricarica applicata al modello "Rio Primario". Le aree in bianco hanno ricarica zero. Le aree di colore hanno i seguenti intervalli di ricarica: celeste (10^{-10} - 10^{-9} m/s), blu-verde ($1 \cdot 10^{-9}$ - $5 \cdot 10^{-9}$ m/s), verde ($5 \cdot 10^{-9}$ - $1 \cdot 10^{-8}$ m/s), giallo ($1 \cdot 10^{-8}$ - $5 \cdot 10^{-8}$ m/s), arancione ($5 \cdot 10^{-8}$ - $1 \cdot 10^{-7}$ m/s) e rosso ($>1 \cdot 10^{-7}$ m/s). In pratica, i colori giallo, arancione e rosso indicano ricariche molto superiori alla normale infiltrazione efficace legata alla piovosità.

È necessario, ad ogni buon conto, far presente come tra le scelte di calibrazione del modello è stata preferita una calibrazione con permeabilità relativamente più elevate nei litotipi presenti, in modo da cercare di massimizzare le portate di deflusso attraverso il sistema poroso e poter così essere cautelativi per eccesso nel dimensionamento delle portate medie da inviare al sistema di trattamento delle acque. È questo il motivo per il quale l'infiltrazione efficace potrebbe effettivamente essere in parte sovrastimata.

Nella Figura 3-14 è possibile osservare come il flusso sia estremamente lento nel Flysch, mentre, a causa della molto maggiore permeabilità, esso sia estremamente più rapido nei materiali di riporto. Inoltre, le linee di flusso tendono a concentrarsi in "corridoi" specifici a più alta permeabilità probabilmente anche legati alla presenza dei sedimenti del paleo-alveo del Rio Primario. Anche in queste figure è ben evidente l'effetto drenante che, nelle ipotesi del modello, è esercitato dal Rio Primario.

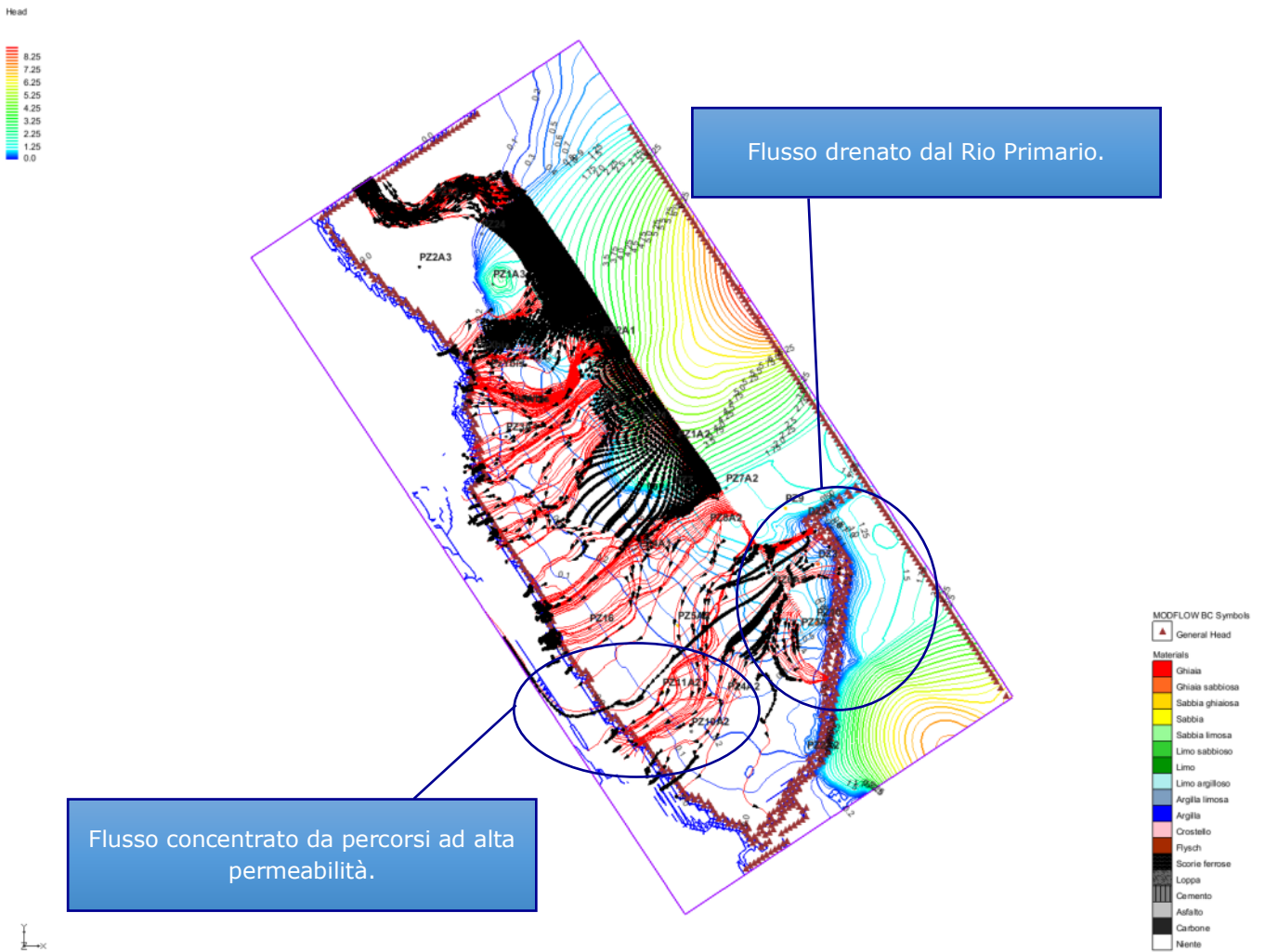


Figura 3-14: Linee di flusso del modello da una fascia nella zona a NE della Ferriera. Le frecce nere indicano intervalli di percorrenza lungo tali linee pari a 10 anni. Si nota come il flusso sia estremamente lento nel Flysch, mentre sia estremamente più rapido nei materiali di riporto. Altresì, le linee tendono a concentrarsi in "corridoi" specifici più permeabili. Anche in questo caso è ben evidente l'effetto drenante che pare esercitato dal Rio Primario.

Nella Figura 3-15 viene evidenziato come le linee di flusso si approfondiscano in corrispondenza del Flysch per poi tornare verso l'alto fino al corpo dei terreni di riporto della Ferriera, nei quali, essendo essi molto più permeabili del Flysch, il flusso diventa grossomodo suborizzontale. Questo dimostra come le acque contenute nei terreni di riporto tendano ad essere "sostenute" all'interno degli stessi dall'acquifero presente nel Flysch. Notare, altresì, che mentre i tempi di percorrenza delle acque nel Flysch, a causa della bassa permeabilità, sono grandi, nei terreni di riporto le velocità di flusso sono significativamente più elevate.

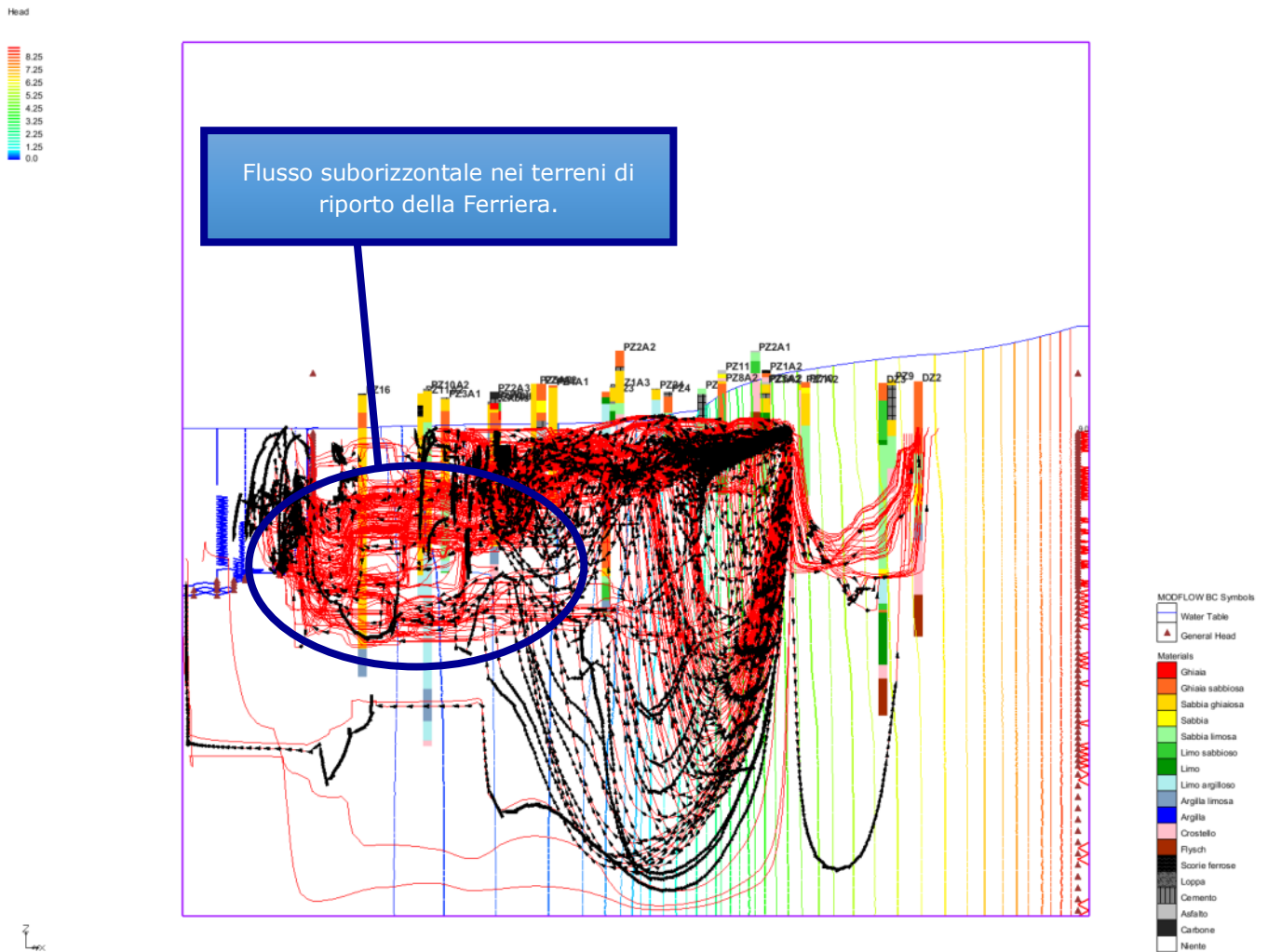


Figura 3-15: Sezione verticale delle linee di flusso guardando verso NO. Si nota come queste si approfondiscono in corrispondenza del Flysch per poi tornare verso l'alto fino al corpo dei terreni di riporto della Ferriera, nei quali, essendo molto più permeabile del Flysch, il flusso di diventa grossomodo suborizzontale.

Al fine di calcolare le portate che dalla Ferriera vanno verso le aree di recapito (il mare ed il Rio Primario), sono state identificate una serie di aree rettangolari, lungo la costa e perpendicolari alla stessa, di larghezza pari a 50 m (Figura 3-16). Sono inoltre state identificate un'area specifica che rappresenta la Piattaforma Logistica (a NO) e tre aree lungo il corso Rio Primario.

Le portate attraverso ognuna di tali aree sono indicate in Figura 3-17. La distribuzione delle portate lungo il barriera lato mare (aree n. da 1 a 28) mostra come la sezione verso SE della Ferriera (aree n. da 1 a 13) tende ad avere portate dalla Ferriera al mare significativamente più elevate (3.8 l/s) in paragone alle portate nella sezione centrale (a meno delle aree n. 19, 20 e 21) o in quella verso NO. In particolare, le aree da 19 a 24, che sono tra quelle dove le acque risultano essere maggiormente inquinate, portano soltanto 0,86 l/s, di cui 0,74 l/s sono drenate a mare soltanto dalle aree 19 e 20.

In effetti, un'analisi particolare deve essere fatta proprio nella sezione dove si registrano le concentrazioni più elevate di inquinanti (aree dalla n. 19 alla n. 24). Il modello in questa sezione prevede una portata (allo stato stazionario) abbastanza bassa dalla Ferriera al mare. D'altronde l'affidabilità di questi valori delle portate è funzione della bontà della

calibrazione del modello, che è a sua volta funzione della qualità dei dati di monitoraggio a disposizione.

In effetti, si evince che proprio quest'area è quella che possiede meno dati ai fini di una calibrazione adeguata. Infatti, il piezometro PZ3.A3 non ha restituito dati, mentre il piezometro PZ1.A3 mostra un livello di falda troppo elevato rispetto ai piezometri circostanti e deve essere trattato indipendentemente dal resto del modello. Inoltre, il piezometro PZXbis ha un valore estremamente basso (3 cm) durante il primo periodo di monitoraggio, mentre non può essere considerato attendibile durante il secondo periodo (vedi Tabella 3-2). Infine, il piezometro PZYbis non ha rilevato dati durante il secondo periodo. Pertanto, si è necessariamente costretti a ritenere poco affidabile il dato di portata rilevato nelle succitate aree, ritenendo di dover correggere cautelativamente, e per analogia al rapporto con il livello di falda misurato nei piezometri più prossimi al PZ2bis, di un fattore 2 il dato di portata. In pratica si ritiene di dover considerare una portata complessiva di queste aree (dalla n. 19 alla n. 24) almeno pari, arrotondando per eccesso, a circa 1,8 l/s.

La bassa portata verso mare della sezione NO della Ferriera di Servola corrisponde allo stato di flusso stazionario e pertanto non include i fenomeni di risalita della falda durante i periodi di piovosità intensa, alta marea o acqua alta, o la sua discesa durante i periodi di bassa marea ed acqua bassa. È proprio l'alternanza di questi cicli (con oscillazioni complessive che comunemente possono superare i 1,5 m) che permette l'efficace dilavamento degli inquinanti dai terreni di riporto della Ferriera: essi, infatti, vengono così prima inondati d'acqua (durante le oscillazioni positive) e successivamente drenati verso il mare (nei periodi di oscillazioni negative).

Le portate di drenaggio dalla Ferriera verso il Rio Primario sono elevate (3,62 l/s) particolarmente nella sezione di monte attraverso la quale vi è la maggior parte della portata (3,07 l/s). Queste portate significative derivano, come detto, direttamente dall'aver assunto nel modello che il drenaggio esistente al di sotto del Rio Primario fosse estremamente efficiente, comportando gradienti elevati della falda proprio in prossimità di esso. A loro volta tali gradienti della falda possono essere mantenuti soltanto tramite una ricarica molto elevata (Figura 3-13) che potrebbe essere non giustificata. D'altronde, le recenti indagini svolte durante la fase esecutiva di costruzione del barrieramento fisico lato Rio primario e lato mare confermano la bontà delle assunzioni fatte.

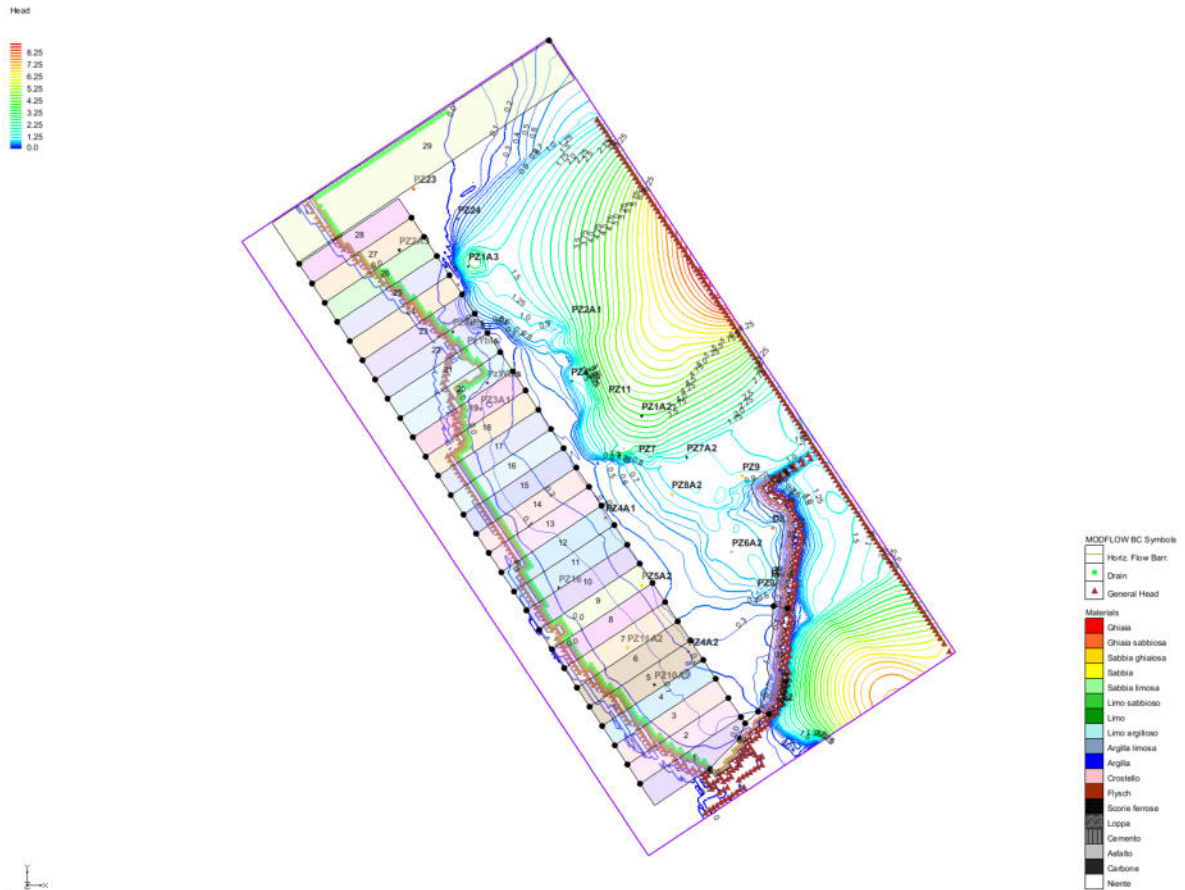


Figura 3-16: Aree per le quali è stata calcolata la portata verso mare (aree da n. 1 a 28 in sezioni di larghezza pari a 50 m ognuna), verso la zona della Piattaforma Logistica (area n. 29) e verso il Rio Primario (aree dalla 30, verso valle, alla 32, verso monte).

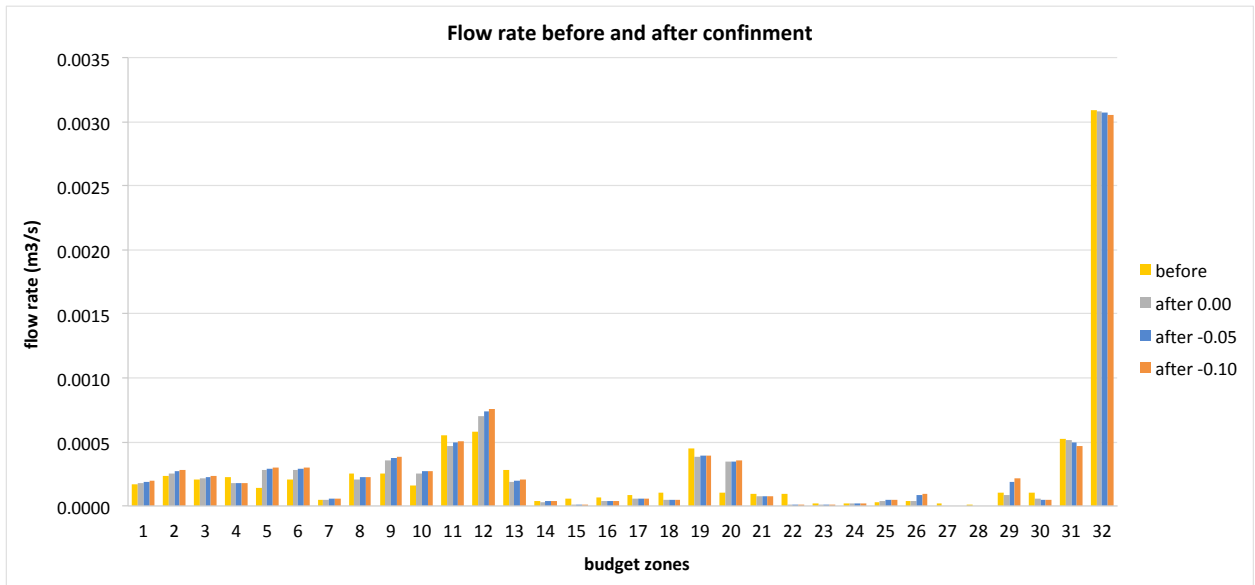


Figura 3-17: Portate calcolate per il modello calibrato in ognuna delle aree di flusso (vedi Figura 3-16) prima (before) e dopo (after) la messa in sicurezza della Ferriera di Servola per tre differenti livelli della falda all' altezza del drenaggio di confinamento. Notare il flusso rilevante (circa 3 l/s) che dalla Ferriera sarebbe drenato nell' ipotesi del modello "Rio Primario".

5.4.2 Il modello "Mandracchio"

Il modello "Mandrachio" calibrato (Figura 3-18) presenta una sostanziale similitudine con il modello precedente, a meno dell'area dello stesso Rio Primario. Per questo motivo non si ripresentano gli stessi commenti già riportati, che comunque valgono specificatamente anche per questo modello, ma si aggiungono commenti specifici relativi soltanto a queste differenze.

Nel modello "Mandrachio", infatti, a differenza del modello "Rio Primario" si suppone che il drenaggio avvenga prevalentemente nell'intorno del piezometro DZ2bis, lungo linee di deflusso preferenziale non tuttavia identificate, mentre il corso del Rio Primario deviato pur rimanendo sempre drenante, ha un effetto significativamente meno spinto.

Il risultato (Figura 3-18) mostra come il livello di falda lungo il Rio Primario sia più elevato (da 0.40 m a 0.60 m s.l.m.m. contro da 0.00 m a 0.10 m s.l.m.m. imposto nel modello precedente) con gradienti minori verso i terreni di riporto della Ferriera e, di conseguenza, con portate minori di acqua drenata dalla falda verso lo stesso Rio.

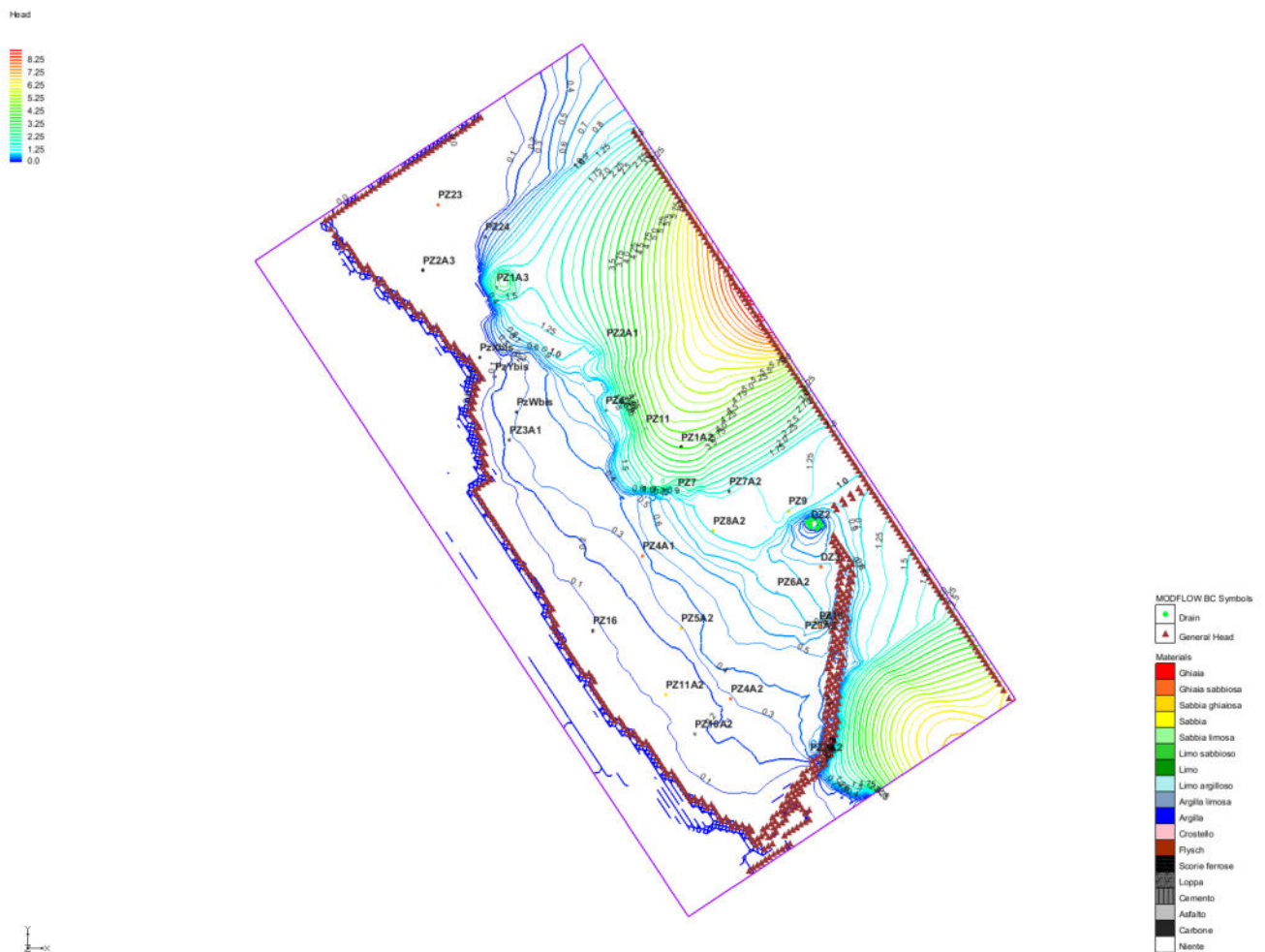


Figura 3-18: Modello "Mandrachio", livello di falda calibrata. Notare come vi sia una sostanziale similitudine con il modello "Rio Primario" (vedi Figura 3-12) a meno dell'area, appunto, dello stesso Rio Primario.

Il modello mostra come con l'ipotesi "Mandrachio" (Figura 3-19) la ricarica non è più così elevata nella parte superiore del corso del Rio Primario in paragone a quella ottenuta con il modello "Rio Primario". Inoltre, l'alta ricarica che è stata imposta nella zona a S della Ferriera potrebbe essere anch'essa giustificata in quanto rifletterebe il fatto che il

drenaggio nella area del DZ2bis scarichi proprio in quest'area più a valle – seguendo vecchie vie di drenaggio tutt'ora non ben identificate (probabilmente il vecchio corso del Rio Primario in direzione del Mandracchio o la precedente deviazione del Rio Primario) – le acque drenate da monte.

Le considerazioni esposte nei paragrafi precedenti fanno, al momento, sostenere che il cosiddetto modello "Rio Primario" possa forse rappresentare più da vicino la realtà fisica del flusso sotterraneo nella Ferriera di Servola. Ciò non toglie che il modello cosiddetto "Mandracchio" possa anche lui avere qualità rappresentative della realtà fisica.

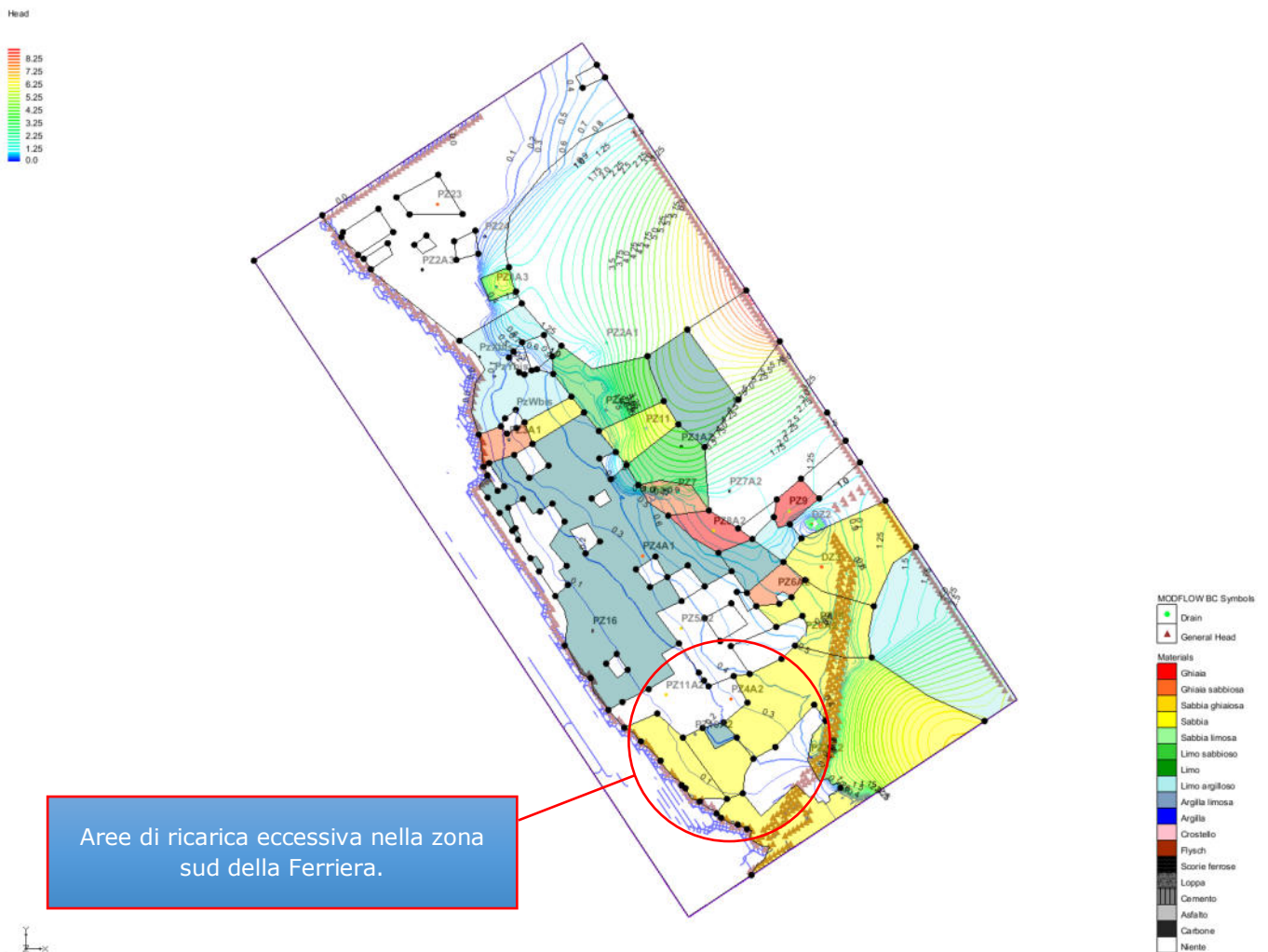


Figura 3-19: Ricarica del Modello "Mandracchio" che permette di calibrare il modello. Notare come la ricarica sia sostanzialmente identica a quella del modello "Rio Primario" a meno dell'area dello stesso Rio Primario (vedi Figura 3-13) dove nella parte a monte la ricarica è sostanzialmente minore (da colore arancione e rosso a colore giallo). Le aree in bianco hanno ricarica zero. Le aree di colore hanno i seguenti intervalli di ricarica: celeste (10^{-10} - 10^{-9} m/s), blu-verde ($1 \cdot 10^{-9}$ - $5 \cdot 10^{-9}$ m/s), verde ($5 \cdot 10^{-9}$ - $1 \cdot 10^{-8}$ m/s), giallo ($1 \cdot 10^{-8}$ - $5 \cdot 10^{-8}$ m/s), arancione ($5 \cdot 10^{-8}$ - $1 \cdot 10^{-7}$ m/s) e rosso ($>1 \cdot 10^{-7}$ m/s).

Come nel modello precedente, le linee di flusso (Figura 3-20) identificano aree di concentrazione dello stesso con velocità di trasporto abbastanza lento nel Flysch e significativamente più rapido nei terreni di riporto della Ferriera. Notare, altresì, la differenza sostanziale nell'area attorno al DZ2bis, nel quale vengono drenati

prevalentemente i terreni di riporto della Ferriera, mentre il Rio Primario ha un effetto drenante minore rispetto al modello "Rio Primario".

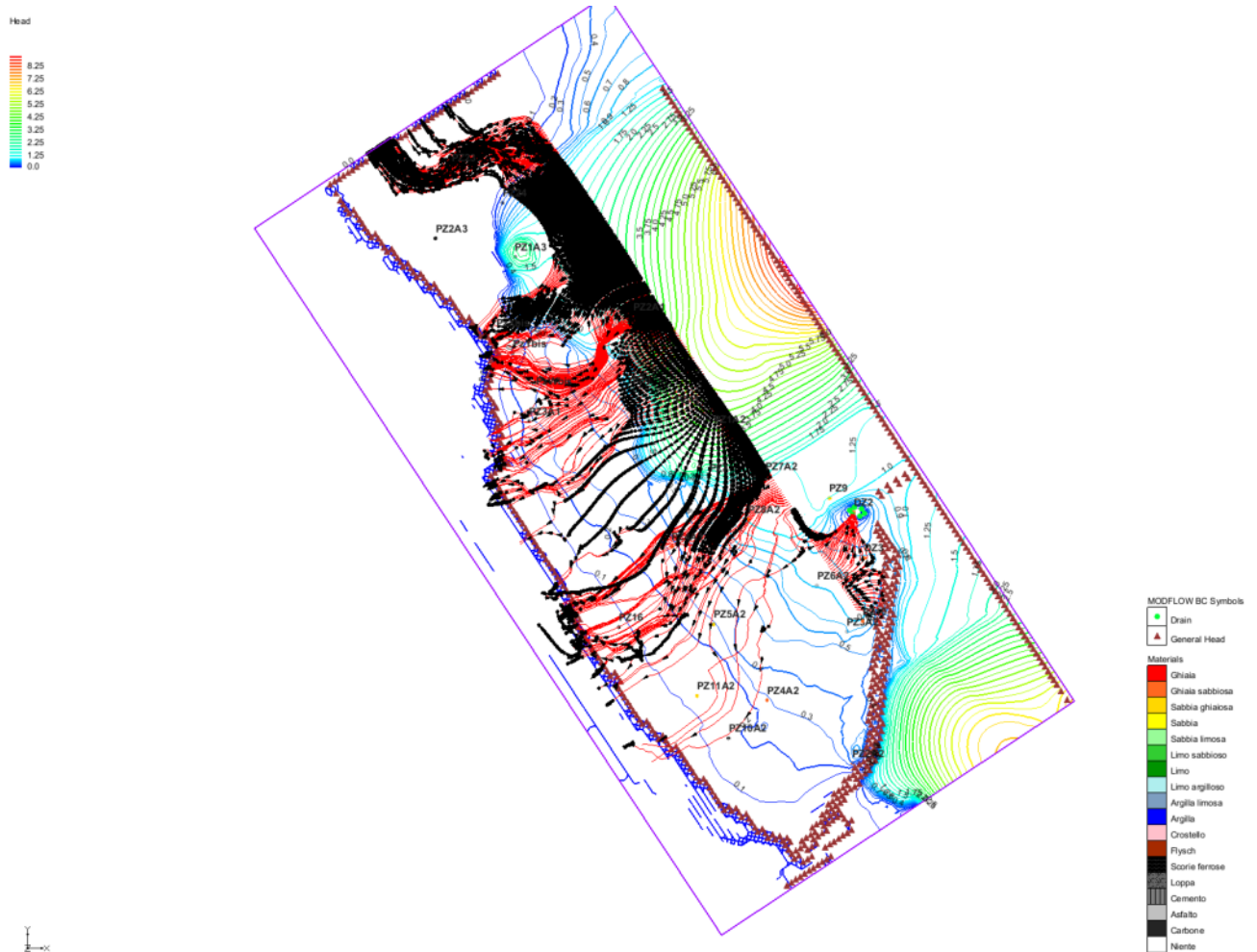


Figura 3-20: Linee di flusso del Modello "Mandrachio". Le frecce nere lungo le linee di flusso sono ad intervalli temporali di 10 anni.

Come nel modello precedente, le linee di flusso (Figura 3-21) identificano circuiti profondi nel Flysch e suborizzontali all'interno dei terreni di riporto della Ferriera.

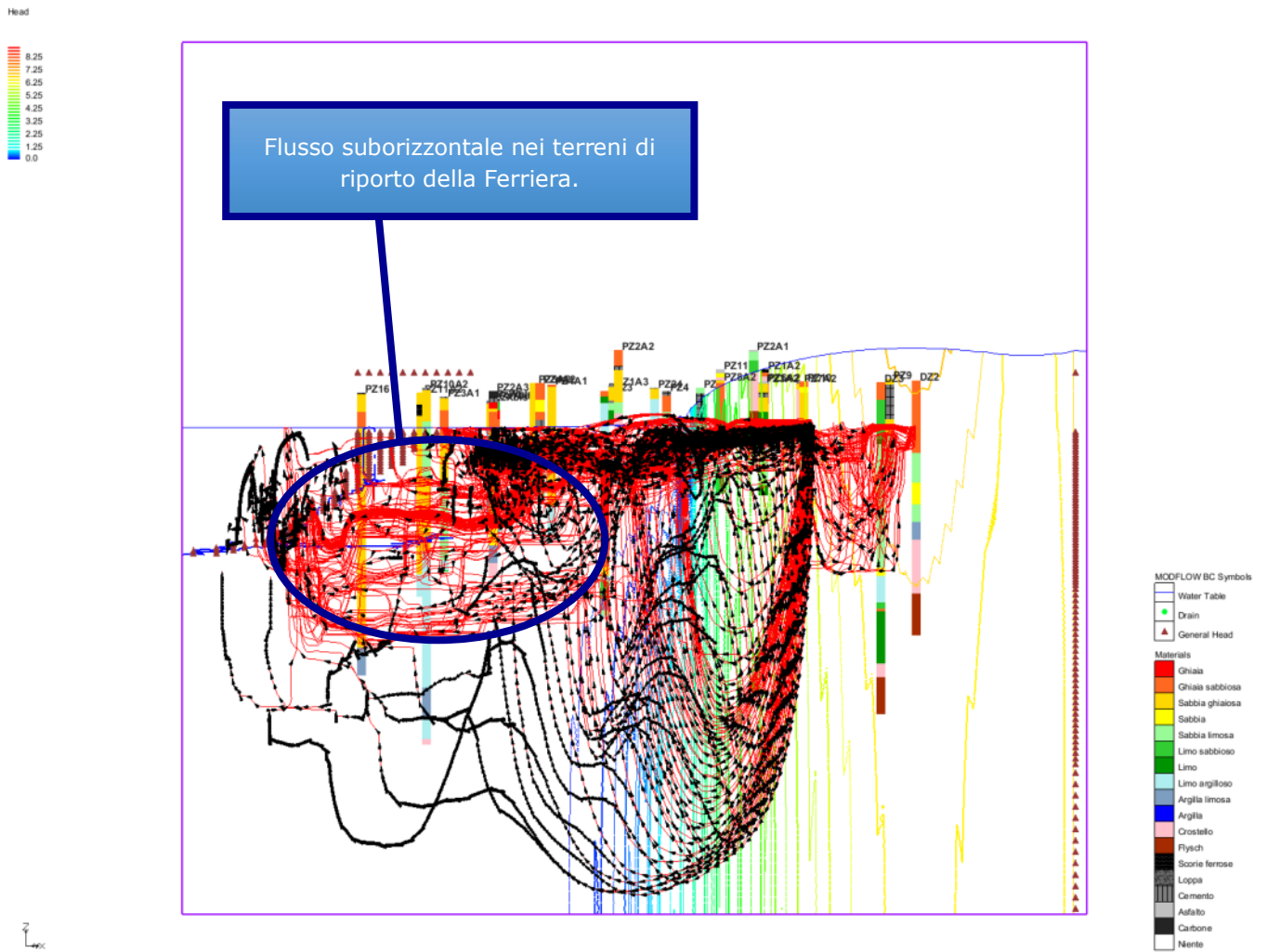


Figura 3-21: Linee di flusso relative al Modello "Mandracchio". Notare come già visto per il modello precedente le linee di flusso si approfondiscono in corrispondenza del Flysch per poi risalire nel corpo della discarica dove il flusso è estremamente più rapido e tendente all'orizzontale.

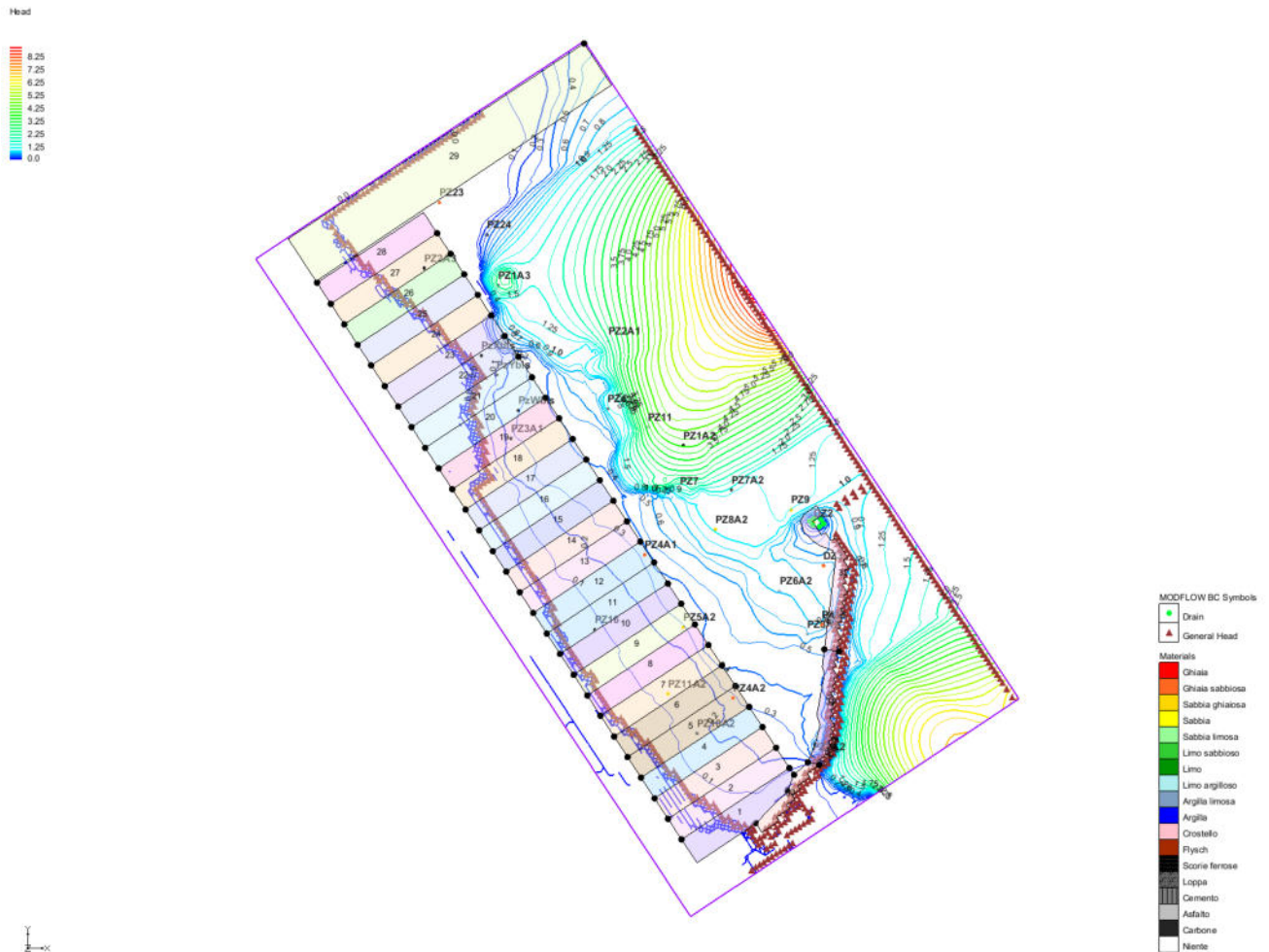


Figura 3-22: Aree per le quali è stata calcolata la portata, relative al modello "Mandracchio", verso mare (aree da n. 1 a 28) in sezioni di larghezza pari a 50 m ognuna, verso la zona della Piattaforma Logistica (area n. 29) e verso il Rio Primario (aree dalla 30, verso valle, alla 32, verso monte). Tali aree sono le stesse utilizzate per il modello "Rio Primario".

Le portate verso mare di questo modello sono sostanzialmente identiche al modello precedente in tutto il settore NO e O lato mare della Ferriera, dove la diversità tra i due modelli non può essere considerata sostanziale, mentre differisce alquanto nel settore di S e SE, nei quali il modello "Rio Primario" ha portate che sono quadruple di quelle del modello "Mandracchio". Infatti, mentre nel primo modello queste erano calcolate pari a circa 3,63 l/s, in questo secondo modello tali portate sono calcolate pari a circa 0,82 l/s. Una restante portata di 1,34 l/s viene drenata da parte del drenaggio cosiddetto "Mandracchio" (Figura 3-23), e tuttavia non meglio identificato, nella zona del piezometro DZ2bis.

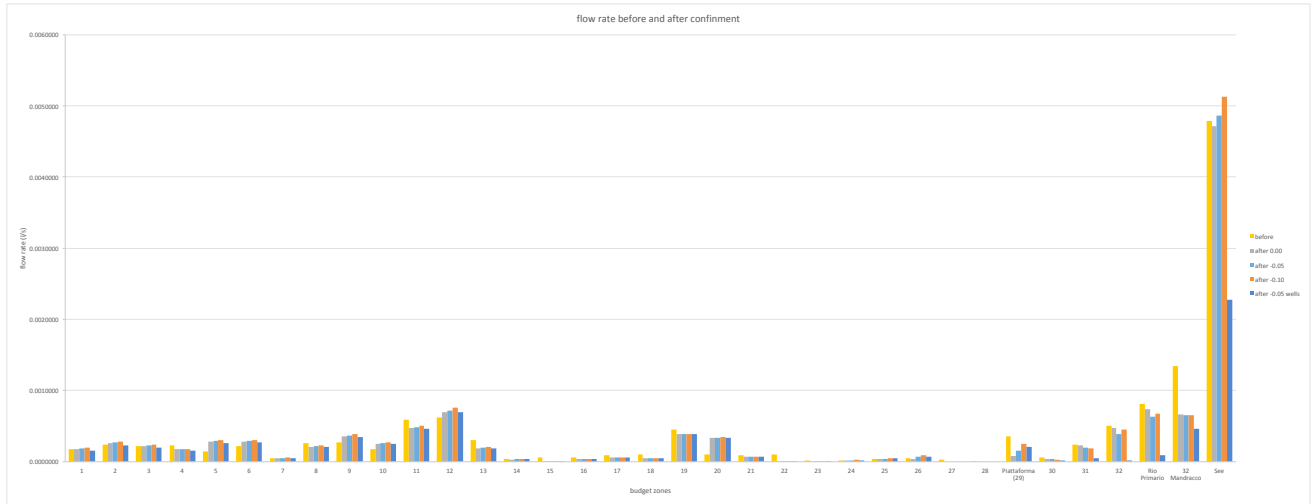


Figura 3-23: Portate calcolate per il modello calibrato "Mandracchio" in ognuna delle aree di flusso (vedi Figura 3-22) prima (before) e dopo (after) la messa in sicurezza della Ferriera di Servola per tre differenti livelli della falda all'altezza del drenaggio di confinamento.

5.5 Modelli idrogeologici a seguito degli interventi di messa in sicurezza

La messa in sicurezza della falda della Ferriera di Servola prevede la realizzazione di un barrieramento fisico costituito da un diaframma che impedisca per quanto possibile il flusso delle acque sotterranee dalla zona dei riporti della Ferriera al mare. Inoltre, il barrieramento fisico è accompagnato sul lato della Ferriera da un drenaggio che appunto drena le acque sotterranee provenienti da monte, affinché queste possano venire coltettate all'impianto di trattamento delle acque.

Lo sviluppo planimetrico del diaframma è stato inserito nel modello geologico in modo da ricavare la profondità ottimale dello stesso in ogni tratta al fine di garantire la miglior tenuta conseguibile dello stesso diaframma. La sezione geologica lungo tale sviluppo planimetrico è riportata nelle Figura 3-24 e 3-25.

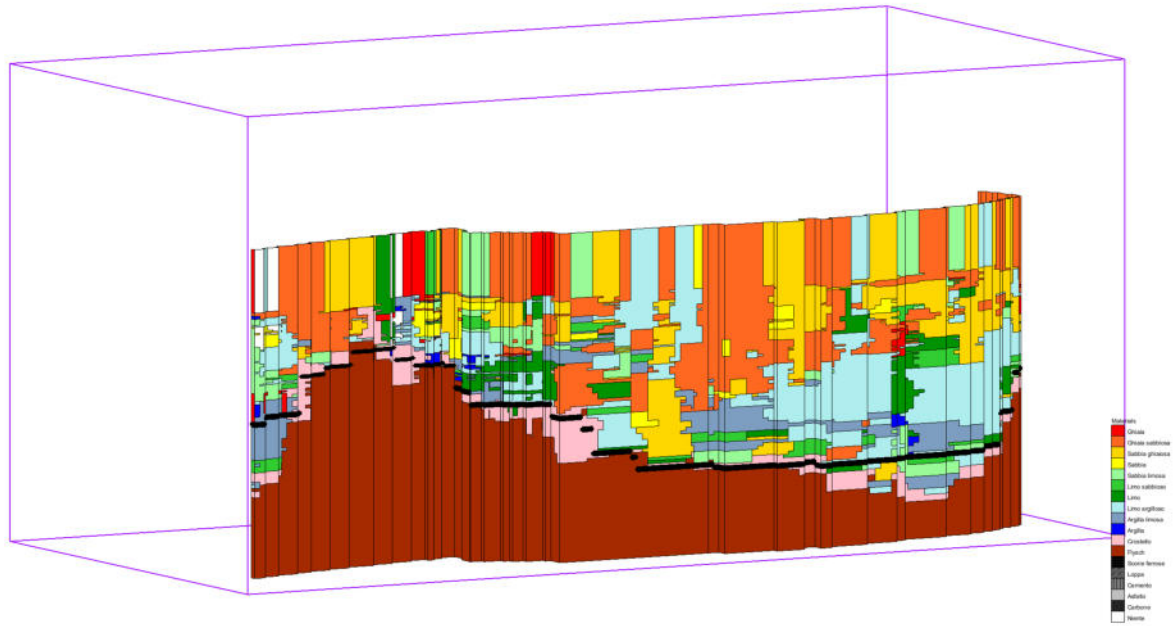


Figura 3-24: Sezione geologica lungo lo sviluppo planimetrico del diaframma come da progetto. Vista verso E-SE. Notare, spostandosi da NO verso SE (sinistra verso destra), come il Flysch risalga rapidamente fin quasi ad arrivare al livello del mare, per poi riapprofondirsi raggiungendo quote di anche -36 m s.l.m.m.. In nero è indicato il livello in profondità su cui si attesta il diaframma impermeabile, che risulta essere continuo da tale livello fino alla superficie. Notare che spessi banchi di sedimenti limo-argillosi esistono soltanto in corrispondenza del paleoalveo del Rio Primario e che gli stessi sono in pratica quasi completamente attraversati dal diaframma in modo da garantirne la massima tenuta conseguibile.

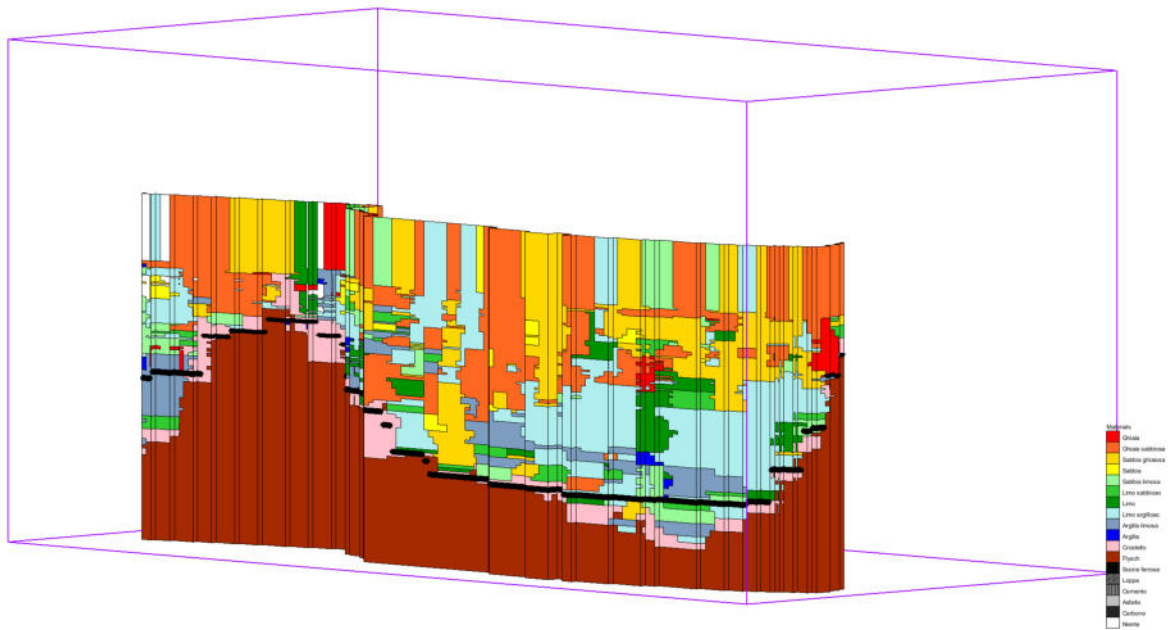


Figura 3-25: Sezione geologica lungo lo sviluppo planimetrico del diaframma come da progetto. Vista verso N-NO. Notare come il Flysch risalga rapidamente fin quasi ad arrivare al livello del mare, per poi riapprofondirsi, raggiungendo quote di anche -36 m s.l.m.m., e successivamente risalire fino a pochi metri sotto al livello del mare alla terminazione del diaframma. In nero è indicato il livello in profondità su cui si attesta il diaframma impermeabile, che è continuo da tale livello fino alla superficie. Notare che spessi banchi di sedimenti limo-argillosi esistono soltanto in corrispondenza del paleoalveo del Rio Primario; essi sono totalmente attraversati dal diaframma in modo da garantirne la massima tenuta conseguibile.

La sezione geologica evidenzia che materiali meno permeabili (argille, argille limose, limi argillosi e limi) si riscontrano con una certa continuità soltanto in corrispondenza del paleoalveo del Rio Primario. Per tale motivo è stato deciso di impostare la barriera fisica almeno un metro dentro al Flysch o al "Crostello". Soltanto nell'area del paleoalveo del Rio Primario, a causa della grande profondità del Flysch il diaframma si attesta dentro ai depositi meno permeabili, i quali avendo spessori di molti metri sono in grado di garantire una adeguata tenuta del sistema di messa in sicurezza.

Infine, il dreno superficiale percorre il diaframma fisico, tra +0.00 e - 1.00 m s.l.m.m., per tutto il suo sviluppo, a meno di due tratti lunghi circa 100 m all'inizio ed alla fine del diaframma per cui è ritenuto che il drenaggio non sia opportuno. Infatti, per quanto riguarda il tratto NO, questa scelta progettuale consegue dalla esigenza di rendere indipendenti i due sistemi di drenaggio che opereranno nell'area e cioè quello relativo alla Piattaforma Logistica e quello relativo a questo progetto. Anche se sin d'ora si indica che i due sistemi drenanti dovrebbero operare alla stessa quota in modo da recepire tutte le acque che, per flusso naturale, andrebbero ad essere recapitate nei drenaggi stessi, tramite questo accorgimento i drenaggi delle due aree (Piattaforma Logistica e Ferriera di Servola) possono di fatto operare separatamente a quote di falda diverse almeno per periodi adeguati a non alterare eccessivamente le portate medie agli impianti di trattamento.

Le previsioni del modello idrogeologico (modello 1) per entrambe le tipologie di drenaggio del Rio Primario sono presentati di seguito.

5.5.1 Il modello "Rio Primario"

Il barrieramento fisico e la trincea drenante sono stati trasferiti alla griglia di calcolo. In prima approssimazione è stato ragionevolmente assunto un coefficiente nullo di permeabilità orizzontale attraverso la barriera. Il drenaggio è stato posizionato ad un livello -0.05 m s.l.m.m. come livello di progetto in gestione ordinaria. I risultati del modello "Rio Primario" sono riportati in Figura 3-26. Si nota come il livello piezometrico non sia sostanzialmente diverso dal precedente, a meno di un leggero arretramento delle isopieze dovuto alla somma delle due condizioni imposte nel modello e cioè che il barrieramento ha arretrato, rispetto alla riva attuale, il livello di conferimento delle acque al drenaggio lungo il diaframma che, in aggiunta, è posizionato ad una quota inferiore a quella del livello medio mare.

La Figura 3-27 mostra le linee di flusso per il modello a seguito della messa in sicurezza. Si nota come le stesse siano praticamente tutte "catturate" dal drenaggio realizzato a monte del barrieramento fisico. Questo risultato da conto, nei limiti della modellizzazione idrogeologica, della bontà dell'intervento progettato. Si nota, altresì, come il Rio Primario continui a drenare significativamente, anche se in misura minore, le acque contenute nei terreni di riporto della Ferriera di Servola.

Notare come la Figura 3-28 mostri che la barriera fisica lato mare (linea verticale marrone), in aggiunta al drenaggio, blocchi sostanzialmente il propagarsi verso mare delle linee di flusso, efficientemente riducendo praticamente a zero il trasporto degli inquinanti verso mare. Il modello evidenzia altresì come le linee di flusso risalgano dal Flysch verso l'alto confinando il flusso all'interno dei materiali di riporto.

Come riportato nella Figura 3-17, le portate totali alla trincea drenante nel modello "Rio Primario" sono pari a 4.99 l/s (pari a circa 431 m³/d), mentre dal Rio Primario risultano