



Trans Adriatic
Pipeline


Revisionato dove indicato

TAP AG Project Title / Facility Name:
Trans Adriatic Pipeline Project

Document Title:
**Approdo italiano
Potenziale interferenza del microtunnel
sull'assetto idrogeologico locale**

saipem spa
Il Progettista
Dott. Ing. A. NAPOLITANO Iscritto all'Ordine
degli Ingegneri di Foggia al n. 2285
Tel. 0721-148237 Fax 0721-999019
P. e R. IVA 00825760157

Rev/	Revision Date (dd-mm-yyyy)	Reason for issue and Abbreviation for it		Prepared by	Checked by	Approved by
3	11/01/2017	Emissione per Costruzione	IFC	Marchionni	Napolitano	Zenobi
02	23/05/2016	Ri-Emissione per Approvazione	IFA	Onori	Napolitano	Zenobi
01	06/05/2016	Ri-Emissione per Approvazione	IFA	Onori	Napolitano	Zenobi
00	19/11/2015	Emissione per Approvazione	IFA	Onori	Napolitano	Zenobi
0A	02/10/2015	Emissione per Commenti	IFR	Guidotti	Napolitano	Zenobi
A	28/09/2015	Emissione per Verifica Disciplinare Interna	IR	Guidotti	Marchionni	Badalini

	Contractor Name:	SAIPEM
	Contractor Project No/:	022720
	Contractor Doc/ No/:	01-LA-E-80018
	Tag No's/:	

TAP AG Contract No/: C14758	Project No/: 022720
-----------------------------	---------------------

PO No/:	RD Code:	Page: 1 of 86
---------	----------	---------------

TAP AG Document No/:

OPL00-SPF-200-G-TRX-0019

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	2 of 86

INDICE

1.	INTRODUZIONE	4
1.1	Descrizione del progetto TAP	4
1.2	Descrizione della condotta nel tratto offshore	4
2.	SCOPO DEL DOCUMENTO	5
3.	METODOLOGIA	6
4.	RIEPILOGO E CONCLUSIONI	7
4.1	1° set di analisi	7
4.2	2° set di analisi	10
5.	DEFINIZIONE, ABBREVIAZIONI E UNITÀ DI MISURA	11
5.1	Definizioni	11
5.2	Abbreviazioni	11
5.3	Unità di misura	11
6.	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	12
6.1	Documenti progettuali	12
6.2	Codici e standard di progetto	13
6.3	Pubblicazioni	13
6.4	Altri documenti	14
7.	ATTIVITÀ SUL CAMPO	15
7.1	Indagine geofisica	15
7.2	Indagine geologica - geotecnica	16
7.3	Indagine idrogeologica	17
8.	GEOLOGIA	18
8.1	Assetto regionale	18
8.2	Assetto strutturale	19
8.3	Geomorfologia	20
8.3.1	Morfologia	20
8.3.2	Idrografia	20
8.4	Assetto geologico del sito	21
9.	IDROGEOLOGIA	22
9.1	Assetto regionale	22
9.1.1	Strato acquifero dei carbonati del Mesozoico	22
9.1.2	Strato acquifero superficiale a più livelli	22

	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	3 of 86

9.2	Assetto idrogeologico del sito	23
9.2.1	Introduzione	23
9.2.2	Limiti dello strato acquifero	23
9.2.3	Parametri idrodinamici	23
9.2.4	Carta piezometrica	24
9.2.5	Interazione tra acque di superficie e acque di falda	26
10.	SIMULAZIONE DEL FLUSSO COL MODELLO NUMERICO	27
10.1	Scenario 1	28
10.1.1	Scenario 1a: effetto di un pozzo impermeabile (condizioni <i>post-operam</i>)	28
10.2	Scenario 2	29
10.2.1	Scenario 2a: effetto di un pozzo impermeabile (condizioni <i>post-operam</i>)	29
10.3	Scenario 3	29
10.3.1	Scenario 3a: effetto di un pozzo impermeabile (condizioni <i>post-operam</i>)	30
10.4	Scenario 4	30
10.4.1	Scenario 4a: effetto di un pozzo impermeabile (condizioni <i>post-operam</i>)	30
10.5	Scenario 5	31
10.5.1	Scenario 5a: effetto di un pozzo impermeabile (condizioni <i>post-operam</i>)	31
10.6	Scenario 6	31
10.6.1	Scenario 6a: effetto di un pozzo impermeabile (condizioni <i>post-operam</i>)	32
11.	INTEGRAZIONI ED APPROFONDIMENTI	32
11.1	Modello numerico	32
11.1.1	Scenario 7a: effetto di un pozzo impermeabile (condizioni <i>post-operam</i>)	34
11.2	Scenario 8	35
11.2.1	Scenario 8a: effetto di un pozzo impermeabile (condizioni <i>post-operam</i>)	35
12.	MAPPE E FIGURE	36
13.	DETTAGLIO DELLE REVISIONI	86

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	4 of 86

1. INTRODUZIONE

1.1 Descrizione del progetto TAP

Il Trans Adriatic Pipeline (TAP) è un progetto per la costruzione di un nuovo gasdotto per il trasporto del gas naturale dalla Regione Caspica all'Europa Centrale e Meridionale (Figura 1).

Il gasdotto, lungo circa 871 km, partirà dalla Grecia, in prossimità del confine con la Turchia, attraverserà l'Albania e il Mar Adriatico per raggiungere nuovamente la terra ferma all'altezza dell'Italia meridionale. In questo modo il gas confluirà direttamente dalla regione del Mar Caspio ai mercati europei.

1.2 Descrizione della condotta nel tratto offshore

Il sistema offshore copre il gasdotto sottomarino attraverso il mare Adriatico dalla costa albanese fino alla Puglia, regione dell'Italia meridionale, per il successivo trasporto verso l'Europa occidentale. Il sistema offshore consiste in un gasdotto di circa 105 km di lunghezza in mare aperto, con approdi sia in Albania sia in Italia.

L'approdo italiano del gasdotto è ubicato sulla costa tra San Foca e Torre Specchia Ruggeri nel comune di Melendugno, mentre la zona di approdo albanese si trova a nord-ovest di Fier.

Il progetto prevede anche la posa di un cavo in fibra ottica, installato parallelamente al gasdotto, atto a consentire la comunicazione tra il terminale di ricezione TAP, le stazioni di compressione in Albania e Grecia, nonché tra le stazioni delle valvole di sezionamento realizzate lungo i circa 871 km del gasdotto.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	5 of 86

2. SCOPO DEL DOCUMENTO

Lo scopo di questo documento è quello di valutare, per mezzo di un codice di simulazione 3D, l'influenza esercitata dal pozzo di spinta/microtunnel sul deflusso idrico sotterraneo.

Il pozzo di spinta è una struttura temporanea, funzionale all'esecuzione delle attività di micro-tunnelling, al tiro della condotta ed alle attività di collaudo idraulico e sarà parzialmente demolito e completamente riempito al termine dei lavori.

Il progetto del pozzo di spinta del microtunnel prevede una struttura impermeabile realizzata con diaframmi costruiti mediante pali secanti e tappo di fondo ottenuto mediante jet-grouting [Rif. [6], [7]]. Tale metodologia è efficace nelle condizioni di terreno previste, ed è in grado di garantire la tenuta all'acqua, realizzando una struttura impermeabile sia durante la sua costruzione (ossia durante lo scavo del pozzo) sia durante lo svolgimento delle successive operazioni ed evitando di drenare l'acqua di falda. Non è previsto, pertanto, l'emungimento della falda. Il tunnel sarà completamente impermeabilizzato durante tutte le sue fasi costruttive adottando una postazione di trivellazione a tenuta idraulica, una fresa "a bilanciamento" delle pressioni idrostatiche esterne e giunti di tenuta idraulica tra gli elementi tubolari posati.

Il documento ha avuto una prima stesura nel Novembre 2015 sulla base di dati di survey iniziali (Rif. [1], [2] e [3]) e delle relative simulazioni numeriche, i cui risultati sono riportati nella sezione 10. Successivamente, nel Maggio 2016, il documento è stato aggiornato sulla base di ulteriori test e misurazioni del livello della falda (Rif. [13] e [14]), le cui simulazioni numeriche e risultati sono riportate nella sezione 11.

La revisione attuale del documento riporta l'aggiornamento dovuto alla realizzazione nel periodo compreso fra Ottobre e Dicembre 2016 di ulteriori due sondaggi (STBH3, STBH6 - Rif. [16], [17]), tre piezometri (Piezo 7,9,10 - Rif. [15]) e un nuovo "single point dilution test" eseguito nel Piezo 7 a profondità maggiori rispetto a quanto fatto precedentemente (Rif. [19]).

Il documento è stato inoltre aggiornato rimuovendo il caso contingente che prevedeva, a seguito di una eventuale filtrazione d'acqua nel pozzo di spinta, la necessità di eseguire interventi di ripristino dell'impermeabilizzazione dello stesso pozzo. Il progetto costruttivo del Microtunnel (Rif. [8]), infatti, non prevede nessun emungimento della falda freatica e, pertanto, tale scenario non è applicabile.

La struttura idrogeologica è stata desunta dai dati bibliografici disponibili relativi alla geologia e all'idrogeologia dell'area e dall'attività sul campo eseguita da URS lungo il percorso della condotta onshore e nel settore dell'approdo - Rif.[1], [2], [3], [13] e [14].

L'assetto idrogeologico regionale e locale e i relativi dati forniscono le informazioni necessarie sulle quali si basa il modello concettuale della simulazione numerica in 3D delle acque di falda. Sono qui descritte l'impostazione e la calibrazione del modello numerico per la simulazione di scenari *ante-operam* e *post-operam*; sono inoltre trattati i risultati in termini di variazione piezometrica tra lo scenario *ante-operam* e quello *post-operam*.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	6 of 86

3. METODOLOGIA

La presente relazione è stata concepita adottando la seguente metodologia:

- *Attività 1: Site Survey Assessment (SSA), Valutazione delle indagini in sito*, con lo scopo di determinare l'assetto idrogeologico esistente nei pressi dell'area del microtunnel/pozzo e di caratterizzare la conducibilità idraulica della matrice della falda acquifera. L'attività 1 comprende quanto segue:
 - la selezione di dati bibliografici (principalmente geologici e idrogeologici) riguardanti il sito, su scala regionale e locale (vedere Sez. 6.3);
 - la raccolta e l'esame dell'attività sul campo svolta da URS nell'area del progetto (vedere Sez.7);
 - la messa a punto di una definizione globale dell'idrogeologia e della geologia dell'area, sulla base delle informazioni riportate nei punti precedenti (vedere Sez. 8 e 9);
 - la definizione del modello concettuale del sistema idrogeologico (vedere Sez. 10);

- *Attività 2: Soil Response Assessment (SRA), Valutazione della risposta del suolo*, con lo scopo di determinare la deviazione del flusso idrico sotterraneo attorno al pozzo. L'attività 2 comprende quanto segue:
 - la quantificazione dei parametri idrodinamici del sistema idrogeologico per l'implementazione di un modello 3D (vedere la Sez. 10 per ciascun caso analizzato);
 - l'analisi di sensitività e simulazione numerica tramite codice di modellazione 3D agli elementi finiti (vedere Sez. 10 per ogni caso analizzato);

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	7 of 86

4. RIEPILOGO E CONCLUSIONI

In questo documento la sezione 10 contiene le conclusioni relative al primo set di analisi effettuate sulla base di dati ottenuti dalle survey iniziali nel 2015.

Successivamente, mantenendo lo stesso approccio metodologico, il documento è stato aggiornato sulla base di ulteriori test e misurazioni del livello della falda ottenute nel periodo Marzo-Aprile 2016. Questi dati sono stati utilizzati per aggiornare i casi con i valori più elevati di conducibilità idraulica: le relative conclusioni sono riportate nella sezione 11 e forniscono al progetto le indicazioni più aggiornate.

Il nuovo set di dati disponibili a valle dei nuovi piezometri realizzati nel Dicembre 2016 non ha alterato quanto modellato precedentemente, bensì ha avvalorato le ipotesi di base sulle condizioni al contorno del modello numerico e pertanto non è stato necessario effettuare nuove simulazioni.

4.1 1° set di analisi

Nell'area del sito, che si estende dall'approdo alla palude di Cassano e all'impianto di fitodepurazione, URS ha eseguito rilevamenti geologici, geotecnici, geofisici e idrogeologici per raccogliere i dati necessari alla progettazione del gasdotto TAP. Le informazioni bibliografiche e i dati dell'indagine hanno consentito di delineare il quadro dell'assetto idrogeologico locale e regionale.

Il quadro paesaggistico del sito consta di una piana leggermente ondulata che degrada dolcemente verso il mare Adriatico. L'unico specchio d'acqua significativo nell'area dell'approdo è l'area paludosa nota come palude di Cassano, una vasta depressione di probabile origine carsica che contiene acque continentali e ospita la vegetazione tipica delle zone acquitrinose. La palude di Cassano è una zona acquitrinosa dominata principalmente dalle acque di falda.

L'area appartiene interamente allo strato acquifero superficiale rappresentato, da un punto di vista litologico, dalla sequenza superiore delle "calcareniti del Salento". La sequenza sedimentaria dell'area del sito è composta prevalentemente di sabbia, limo sabbioso e calcareniti. Gli strati di calcarenite, spesso molto fratturati, sono comuni nella parte alta della sequenza sedimentaria o, meno frequentemente, si presentano interstratificati con sedimenti sabbiosi. A causa della mancanza di strati a bassa permeabilità, l'intero deposito può essere considerato uno strato acquifero di tipo freatico dalle caratteristiche fondamentalmente uniformi fino alla profondità di 30 m, investigata dalla campagna di perforazione, e probabilmente fino ad una profondità maggiore (45-50 m).

Durante le indagini sul campo è stata effettuata una valutazione dei parametri idrodinamici dello strato acquifero di tipo freatico. Dalle prove di permeabilità in foro, di tipo Lefranc e Lugeon, eseguite negli strati di limo sabbioso e sabbia, non sono state rilevate differenze significative e i valori di conducibilità idraulica si collocano in un intervallo che va da 2E-4 a 1E-5 m/s, con un valore medio di 1E-4 m/s.

Pertanto le simulazioni numeriche, con l'ottica di una analisi di sensitività rispetto all'effetto della conducibilità idraulica, sono state eseguite estendendo il valore di tale parametro tra un ordine di grandezza inferiore (1E-5 m/s) e uno maggiore (1E-3m/s) rispetto al valore medio (1E-4m/s).

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	8 of 86

Un valore di porosità efficace dell'ordine del 35-40% può essere assunto come valore appropriato. I livelli idrici misurati nei cinque piezometri installati durante l'attività sul campo indicano che la soggiacenza della falda varia da 2,31 a 6,3 metri dal piano campagna e sono stati utilizzati per realizzare una mappa della superficie freatica. La ricostruzione della superficie piezometrica mostra che il flusso delle acque di falda è orientato in direzione sudovest - nordest verso la linea costiera, confermando quella che è la tendenza regionale di detto flusso.

Le simulazioni numeriche del flusso nell'acquifero sono state eseguite utilizzando il codice di modellazione agli elementi finiti FEFLOW 6.2 FM3 del DHI Group (DHI-WASY GmbH, 2014; Diersch 2006).

Al fine di valutare l'influenza della costruzione del microtunnel TAP sulle condizioni della superficie freatica (detta anche tavola d'acqua) sono state analizzate varie configurazioni idrogeologiche, cambiando le condizioni al contorno ed il valore di conducibilità idraulica.

Lo scenario del progetto, che prevede la presenza di un pozzo impermeabile, contempla modifiche trascurabili sulla piezometria dell'area, con variazioni dell'altezza piezometrica effettiva *ante-operam* e *post-operam* dell'ordine di ± 10 cm.

In questo caso, infatti, il pozzo costituisce un ostacolo che modifica il flusso idrodinamico nel sottosuolo, producendo un leggero innalzamento della quota piezometrica a monte (+ 10 cm) e un leggero abbassamento a valle (- 10 cm).

La seguente tabella sinottica (Tabella 1) riassume le ipotesi e i risultati delle analisi di sensibilità eseguite.

Gli scenari 1, 2 e 3 simulano esplicitamente un'interazione tra la palude di Cassano e le acque di falda, imponendo condizioni al contorno che prevedono una "seepage face" per la palude ed il relativo canale di drenaggio (la "seepage face" è una condizione al contorno ottenuta combinando un carico imposto fissato pari alla quota di fondo della palude e del canale e contemporaneamente un vincolo sul flusso del tipo di sola uscita dal sistema, al fine di prevenire apporti di alimentazione esterna).

Gli scenari 4, 5 e 6 simulano l'assenza di interazioni dirette tra la palude di Cassano e le acque di falda, rimuovendo la condizione di "seepage face". In tali casi la superficie piezometrica è libera di evolversi e fornisce valori piezometrici più elevati nell'area del pozzo.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	9 of 86

Scenario	Conducibilità idraulica [m/s]	Condizioni al contorno	Variazioni dell'altezza piezometrica effettiva tra le condizioni <i>ante-operam</i> e quelle <i>post-operam</i>
Scenario 1	1E-4	Carico piezometrico imposto lungo la linea di costa e lungo il confine di monte. Condizione di <i>seepage face</i> imposta per la palude di Cassano e per i nodi del canale di drenaggio	± 10 cm
Scenario 2	1E-3	Carico piezometrico imposto lungo la linea di costa e lungo il confine di monte. Condizione di <i>seepage face</i> imposta per la palude di Cassano e per i nodi del canale di drenaggio	± 10 cm
Scenario 3	1E-5	Carico piezometrico imposto lungo la linea di costa e lungo il confine di monte. Condizione di <i>seepage face</i> imposta per la palude di Cassano e per i nodi del canale di drenaggio	± 10 cm
Scenario 4	1E-4	Carico piezometrico imposto lungo la linea di costa e lungo il confine di monte. Nessuna condizione imposta per la palude di Cassano o per i nodi del canale di drenaggio	± 10 cm
Scenario 5	1E-3	Carico piezometrico imposto lungo la linea di costa e lungo il confine di monte. Nessuna condizione imposta per la palude di Cassano o per i nodi del canale di drenaggio	± 10 cm
Scenario 6	1E-5	Carico piezometrico imposto lungo la linea di costa e lungo il confine di monte. Nessuna condizione imposta per la palude di Cassano o per i nodi del canale di drenaggio	± 10 cm

Tabella 1: Tabella sinottica di ipotesi e risultati in ogni scenario simulato.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	10 of 86

4.2 2° set di analisi

A seguito della richiesta di integrazioni fatta dall'Autorità di Bacino della Puglia (Rif. [45]), sono stati simulati 2 scenari integrativi che recepiscono le indicazioni contenute all'interno della richiesta di integrazioni ed i nuovi dati di campo ottenuti con le campagne di misura effettuate nei mesi di Dicembre 2015-Aprile 2016 (Rif. [13], [14]).

Questi due scenari sono riferiti al caso con conducibilità idraulica pari a 1 E-3 m/s ; la seguente tabella sinottica (Tabella 2) riassume le ipotesi ed i risultati per gli scenari integrativi 7 ed 8.

Anche negli scenari integrativi che prevedono la presenza esplicita del pozzo impermeabile e del microtunnel, risultano modifiche trascurabili alla piezometria dell'area, con variazioni dell'altezza piezometrica effettiva *ante-operam* e *post-operam* dell'ordine di $\pm 10 \text{ cm}$.

Scenario	Conducibilità idraulica [m/s]	Condizioni al contorno	Variazioni dell'altezza piezometrica effettiva tra le condizioni <i>ante-operam</i> e quelle <i>post-operam</i>
Scenario 7	1E-3	Carico piezometrico imposto lungo la linea di costa e lungo il confine di monte. Condizione di <i>seepage face</i> imposta per la palude di Cassano e per i nodi del canale di drenaggio	$\pm 10 \text{ cm}$
Scenario 8	1E-3	Carico piezometrico imposto lungo la linea di costa e lungo il confine di monte. Nessuna condizione imposta per la palude di Cassano o per i nodi del canale di drenaggio	$\pm 10 \text{ cm}$

Tabella 2: Tabella sinottica di ipotesi e risultati negli scenari integrativi simulati

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	11 of 86

5. DEFINIZIONE, ABBREVIAZIONI E UNITÀ DI MISURA

5.1 Definizioni

- Azienda TAP AG
- Appaltatore Appaltatore della costruzione

5.2 Abbreviazioni

Abbreviazione	Descrizione
DL	Decreto Legge
DLgs	Decreto Legislativo
dm	Decreto ministeriale
DP	Pressione di progetto (Design Pressure)
DPR	Decreto del Presidente della Repubblica
KP	Punto chilometrico, tratto onshore (Kilometer Point onshore section)
LCY	Cantiere di costruzione approdo (Landfall Construction Yard)
LTE	Punto di connessione condotta offshore-onshore (Land Terminal End)
MT	Microtunnel
MTBM	Perforatrice microtunnel (Microtunnel Boring Machine)
PRT	Terminale di ricezione della condotta (Pipeline Receiving Terminal)
SG	Peso specifico (Specific Gravity)
TAP	Trans Adriatic Pipeline
TIE-IN	Punto di connessione offshore-onshore

5.3 Unità di misura

Si utilizzeranno le unità di misura del Sistema Internazionale (SI).

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	12 of 86

6. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

La documentazione di riferimento è stata raggruppata come segue:

- Documenti progettuali
- Codici e standard di progetto
- Pubblicazioni
- Altri documenti

Tranne ove specificamente indicato, si applica l'ultima revisione.

6.1 Documenti progettuali

[1]	IPL00-URS-000-Q-TRG-0001	Relazione geotecnica & geofisica – Condotta
[2]	IPL00-URS-000-Q-TRG-0002	Relazione geotecnica & geofisica – Microtunnel
[3]	IPL00-URS-000-Q-TRS-0001	Relazione idrogeologica per condotta e microtunnel
[4]	OPL00-SPF-200-Q-DQP-0001	Profilo e planimetria di installazione del microtunnel
[5]	OPL00-SPF-200-G-DXA-0013	Approdo Italiano – Planimetria generale
[6]	OPL00-C10713-160-C-DQT-0001-01	Pozzo di spinta: Sequenza costruttiva completa
[7]	OPL00-C10713-160-C-DQT-0001-02	Pozzo di spinta: fasi costruttive Jet Grouting
[8]	OPL00-SPF-200-Q-TRX-0001	Progetto costruttivo del microtunnel per l'approdo in Italia
[9]	OPL00-DAP-160-Y-TRE-0006	Relazione di indagine - Indagine geofisica, approdo italiano
[10]	OPL00-DAP-160-Y-TRE-0007	Relazione sul campo - Indagine geotecnica, approdo italiano
[11]	OPL00-DAP-160-Y-TRE-0008	Relazione fattuale - Indagine geotecnica, approdo italiano
[12]	OPL00-DAP-160-Y-TRE-0010	Relazione interpretativa - Indagine geotecnica, approdo italiano
[13]	IPL00-URS-000-Q-TRS-0002	Nota tecnica descrittiva del rilievo freaticometrico condotto nel mese di Marzo 2016
[14]	IPL00-URS-000-Q-TRS-0007	Nota tecnica: elaborazione dei risultati del "single point dilution test" eseguito nel punto ST_BH2 (Piezo 4)
[15]	IPL00-URS-100-F-TRG-5001	Nota tecnica descrittiva – Realizzazione piezometri Piezo 7, Piezo 9 e Piezo 10
[16]	IPL00-TPI-000-Q-TRG-0001	Report Indagine Geognostica Sondaggio STBH3
[17]	IPL00-URS-000-Q-TRG-5000	Studio geologico e geotecnico – Sondaggio STBH6
[18]	IPL00-URS-000-Q-TRJ-5001	Nota tecnica descrittiva del rilievo freaticometrico condotto nel mese di Gennaio 2017
[19]	IPL00-URS-100-F-TRG-5002	Nota tecnica: elaborazione dei risultati del "single point dilution test" eseguito nel punto Piezo 7

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	13 of 86

6.2 Codici e standard di progetto

- [20] D.M. 17.04.2008 Regola Tecnica per la progettazione, costruzione, collaudo, esercizio e sorveglianza delle opere e degli impianti di trasporto di gas naturale con densità non superiore a 0.8
- [21] D.L. 10.8.2012 n. 161 Disciplina dell'utilizzazione delle terre e rocce da scavo - Criteri qualitativi da soddisfare per essere considerati sottoprodotti e non rifiuti – Attuazione articolo 49 del DI 1/2012 ("DI Liberalizzazioni")
- [22] D.M. 11 Marzo 1988 Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione.

6.3 Pubblicazioni

- [23] Autorità di bacino della regione Puglia (2005) – Piano di bacino stralcio dell'assetto idrogeologico. Cartografia della pericolosità.
- [24] Autorità di bacino della regione Puglia (2009) – Carta idrogeomorfologica della regione Puglia.
- [25] Bossio A. et al. (2005) - Stratigrafia del neogene e quaternario del Salento sud-orientale (con rilevamento geologico alla scala 1:25.000). *Geologica Romana* 38, 31-60.
- [26] Bossio A. et al. (2006) - Stratigrafia neogenico-quaternaria del settore nord - orientale della provincia di Lecce (con rilevamento geologico alla scala 1:25.000). *Geologica Romana* 39, 63-87
- [27] Bruno et al. (2008) - Applicazione di un modello geolitologico per la gestione della qualità delle acque di falda nell'area costiera del Salento (Italia). 3rd IASME / WSEAS Int. Conf. on Water Resources, Hydraulics & Hydrology (WHH '08), University of Cambridge, UK, Feb. 23-25.
- [28] Calò G. C. et al. (2005) - Riscontri delle oscillazioni eustatiche Flandriane nelle acque profonde degli acquiferi Salentini (Puglia). *Giornale di Geologia Applicata* 2 (2005) 341–347, doi: 10.1474/GGA.2005–02.0–50.0076.
- [29] Calò G., et al. (1990) – Caratteri idrogeologici delle falde superficiali della Penisola Salentina e valutazione della vulnerabilità degli acquiferi. Amministrazione provinciale di Lecce, 31 pp.
- [30] Cherubini C. et al. (2011) - Scenari critici di stress per uno strato acquifero costiero nell'Italia sudorientale . *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 1381–1393. www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/11/1381/2011/doi:10.5194/nhess-11-1381-2011
- [31] Ciaranfi N. et al. (1988) – Note alla carta geologica delle Murge e del Salento (Puglia centro meridionale). *Mem. Soc. Geol. It.*, 41, 449-460, 1 tav.
- [32] Delle Rose M. et al. (2005) - Speleogenesi e geomorfologia del sistema carsico delle grotte della poesia nell'ambito dell'evoluzione quaternaria della costa adriatica salentina. *Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan"* Vol. 40, pp. 153-173, Trieste.
- [33] Del Prete et al. (2006) – Aspetti idrogeologici e problemi di inquinamento salino della falda profonda del Salento. Dipartimento di Scienze Geologiche, Università della Basilicata.
- [34] Diersch, H.J.G. (2006) - FEFLOW, Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System, Reference Manual. Wasy, Institute for Water Resources Planning and Systems Research Ltd., Berlin, Germany.
- [35] Doglioni C. et al. (1996) - Sollevamento della Puglia nel medio-tardo Pleistocene: un'anomalia nell'avampaese appenninico. *Mem. Soc. Geol. It.*, 51, 101-117.
- [36] IRSA (2009) – Aggiornamento del bilancio idrogeologico dei corpi idrici sotterranei della regione Puglia – Dati meteo riguardanti anni siccitosi e piovosi tipo.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	14 of 86

- [37] Maggiore M. et al. (2004) – Circolazione idrica ed equilibri idrogeologici negli acquiferi della Puglia. Geologi e territorio.
- [38] Margiotta S. et al. (2006) - Ricerca geofisica e stratigrafica nelle acque di falda profonde e le acque marine di intrusione nell'area mediterranea (penisola del Salento). Natural Hazards and Earth System Sciences 5: 127–136 SRef-ID: 1684-9981/nhess/2005-5-127.
- [39] Parise M. et al. (2008) – Elementi di geomorfologia carsica della Puglia. Atti del 45° Corso CNSS-SSI di III livello “Geomorfologia Carsica”, Grottaglie.
- [40] Polemio M. et al. (2001) – L’evoluzione dell’inquinamento salino delle acque sotterranee della Murgia e del Salento. Mem. Soc. Geol. It., 56, 327-331.
- [41] Provincia di Lecce (2008)- Piano territoriale di coordinamento provinciale (PTCP). Lecce.
- [42] Sansò P. et al. (2004) - Caratterizzazione geomorfologica degli inghiottitoi carsici (vore) della provincia di Lecce. Università degli studi di Lecce. Dipartimento di Scienza dei Materiali.
- [43] Sogesid (2009) – Regione Puglia, Piano di tutela delle acque, Caratterizzazione climatologica, relazione. Regione Puglia.
- [44] DHI-WASY GmbH, 2014. Institute for Water Resources Planning and Systems Research Ltd. Company Web Site: <http://www.wasy.de>

6.4 Altri documenti

- [45] Lettera Autorità di Bacino della Puglia - Prot. Gen adbp A00_Aff_Gen 0000995 U 27/01/2016: Gasdotto TAP “Trans Adriatic Pipeline” – Verifica di ottemperanza alle prescrizioni del Decreto MATTM 0000223 dell’11/09/2014 – Prescrizioni A21 e A22.
- [46] Lettera Autorità di Bacino della Puglia - Prot. Gen adbp A00_Aff_Gen 0013978 U 26/10/2016: Gasdotto TAP “Trans Adriatic Pipeline” – Verifica di ottemperanza alle prescrizioni del Decreto MATTM 0000223 dell’11/09/2014 – Prescrizioni A21 e A22. Valutazione documentazione integrativa trasmessa con nota TAP del 22/07/2016 (Riferimento LT-TAPIT-ITSK-00810)

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	15 of 86

7. ATTIVITÀ SUL CAMPO

Nell'area della futura condotta TAP (tratto onshore e approdo offshore, compreso il sito del microtunnel, Rif. [5]), il Cliente ha richiesto a URS di condurre indagini geologiche e idrogeologiche e relativi rilevamenti geotecnici e geofisici, a partire dal Luglio del 2013. A seguire il dettaglio delle indagini e dei test effettuati:

- indagine per verificare l'eventuale presenza di ordigni bellici inesplosi,
- indagine geofisica: Tomografia a resistività elettrica (imaging ERT - Electrical Resistivity Tomography) e Sismica a rifrazione,
- indagini geologiche e geotecniche (sondaggi geognostici, raccolta di campioni e prove in situ),
- rilevamento topografico dei punti indagati,
- test di laboratorio sui campioni raccolti.

Le varie attività in campo eseguite nell'area del progetto sono descritte e valutate nei seguenti capitoli.

7.1 Indagine geofisica

Nell'area del microtunnel sono state realizzate due campagne geofisiche - Rif. [2] e [3]. Entrambe sono state condotte con due tecniche di indagine, l'imaging ERT, ovvero la tomografia a resistività elettrica, e la sismica a rifrazione, abitualmente utilizzate in combinazione per consentire la conferma incrociata dei risultati.

Nel corso del 2013, nell'area del microtunnel, sono stati realizzati 4 profili ERT e 5 profili di sismica a rifrazione; la lunghezza sottoposta ad indagine è stata, rispettivamente, di 2.21 km e 2.22 km.

Nel 2015 sono state effettuate ulteriori indagini geofisiche nell'area del microtunnel:

- sismica a rifrazione e prospezione geoelettrica, lungo n.2 linee, denominate PR_B e PR_D, posizionate vicino a due elementi geomorfologici superficiali di tipo carsico (doline di sprofondamento),
- un profilo ottenuto con il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves - Analisi multicanale di onde superficiali), denominato MASW-3 nei pressi del foro di trivellazione PIEZO-2,
- 2 prove down-hole, denominate DH-1 e DH-2, all'interno dei fori di trivellazione ST_BH4 e ST_BH5,
- 5 prove con il metodo VES (Vertical Electrical Sounding - Sondaggio elettrico verticale), denominate VES-1÷VES-5.

Nel corso dell'indagine del 2013 lungo il percorso della condotta, sono stati realizzati 32 profili geoelettrici ERT e 112 profili di sismica a rifrazione, la lunghezza sottoposta ad indagine è stata, rispettivamente, di 7.41 km e 7.36 km.

Nella seconda campagna (2015), lungo il percorso della condotta è stata realizzata un'indagine geofisica per un totale di circa 6.5 km, indagine che consta di 7 profili (da PR01 a PR07).

I profili geofisici effettuati nell'area del progetto sono rappresentati in Figura 4.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	16 of 86

7.2 Indagine geologica - geotecnica

L'indagine geologica - geotecnica nell'area del microtunnel e della condotta aveva lo scopo di:

- definire l'assetto geologico e idrogeologico al fine di ricostruire la stratigrafia locale;
- raccogliere campioni da analizzare in laboratorio ed eseguire test in loco per la caratterizzazione geotecnica del sottosuolo lungo il percorso della condotta.

L'indagine geologica - geotecnica nell'area del microtunnel e della condotta è stata effettuata nel periodo Aprile - Giugno 2015, perforando 24 sondaggi geognostici. I sondaggi sono stati ottenuti con la tecnica del carotaggio continuo con un diametro della carota di 101 mm. Durante la trivellazione sono stati eseguiti test SPT (Standard Penetration Test - Prova penetrometrica standard) e sono stati raccolti campioni indisturbati per l'analisi granulometrica e per la determinazione del peso di volume, del contenuto di acqua, dei limiti di Atterberg, della permeabilità (tramite prova edometrica).

Nel periodo compreso fra Ottobre e Dicembre 2016, sono stati realizzati due ulteriori sondaggi STBH3 e STBH6, al fine di verificare, lungo la verticale investigata, la natura dei terreni attraversati e l'eventuale presenza di cavità carsiche e/o sinkholes (Rif.[16], [17]).

Durante l'esecuzione del sondaggio geognostico a carotaggio continuo, STBH3, di sviluppo verticale pari a circa 25 ml sono state previste prove penetrometriche dinamiche del tipo SPT e prelievo di campioni di terreno da analizzare in laboratorio geotecnico. Lungo tutta la perforazione non sono state riscontrate fratture o cavità assimilabili a carsismo o a fenomeni di sinkholes.



Il sondaggio STBH6 è stato posizionato a pochi metri dalla linea di battigia ad una quota che posta a circa 0,30 m sul livello del mare. Lo sviluppo verticale è di circa 30ml e sono state previste prove penetrometriche dinamiche del tipo STP. Data la tipologia dei terreni attraversati, caratterizzata da materiale di natura incoerente, non è stato possibile prelevare campioni indisturbati da sottoporre a prove di laboratorio per la determinazione delle caratteristiche fisiche di taglio e di compressibilità. La sequenza litostratigrafica riscontrata ha permesso di individuare un unico litotipo, riferibile ad una sequenza di materiali incoerenti, in cui la frazione granulometrica predominante è quella delle sabbie, con frazioni secondarie di limo e ghiaia, e solo subordinatamente minime frazioni di argilla

I sondaggi presi in considerazione nel presente studio sono riportati in Tabella 3.

Sondaggio	Profondità (m)
ST-BH1	10
ST-BH2	20
ST-BH3	25
ST-BH4	30
ST-BH5	30
ST-BH6	30
BH3	10
BH4	10
BH5	10

Tabella 3: Sondaggi geognostici realizzati nell'area del sito

Le posizioni dei sondaggi nell'area interessata dallo studio sono illustrate in Figura 5.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	17 of 86

7.3 Indagine idrogeologica

L'attività idrogeologica sul campo ha incluso le seguenti attività:

- trivellazione a carotaggio continuo e installazione di nuovi piezometri superficiali, nelle posizioni dei sondaggi geotecnici (già inclusi nel programma di indagine geotecnica) e in nuove posizioni aggiuntive;
- prove di permeabilità in foro dello strato acquifero (prove di tipo Lefranc e Lugeon) durante le operazioni di trivellazione;
- misura dell'altezza piezometrica della superficie freatica, ovvero la cosiddetta tavola d'acqua, nei nuovi piezometri installati;
- ricostruzione della geometria dello strato acquifero superficiale e della direzione di flusso delle acque di falda.

Un numero totale di cinque piezometri (Piezo 2, Piezo 3, Piezo 4, Piezo 5, Piezo 6), aventi una profondità di 10 m, sono stati trivellati e dotati di tubi fessurati sul fondo nel corso della survey del 2015.

In corrispondenza dei piezometri Piezo 4, Piezo 6 e in BH4, sono state eseguite Nr. 6 prove di Lefranc e 1 prova di Lugeon. La posizione dei piezometri è rappresentata in Figura 5.

Nel mese di Marzo 2016 è stato inoltre eseguito un "single point dilution test" in corrispondenza del piezometro Piezo 4 (ST_BH2) al fine di determinare la velocità effettiva di filtrazione mediante la costruzione di profili verticali di velocità, definiti tramite misura della diluizione nel tempo di un tracciante a differenti profondità (Rif. [14]), così come indicato dall'Autorità di Bacino della Regione Puglia nell'ambito della richiesta di integrazioni presentata a Gennaio 2016 (Rif. [45]).

Nel mese di Dicembre 2016 sono stati realizzati ulteriori 3 piezometri di monitoraggio delle acque sotterranee, precisamente uno nell'area del Microtunnel, denominato Piezo 7, e due nell'area della condotta, immediatamente a sud della Palude di Cassano, denominati Piezo 9 e Piezo 10. In corrispondenza del Piezo 7 è stato inoltre eseguito un "single point dilution test" (Rif. [19]) al fine di determinare la velocità effettiva di filtrazione a profondità maggiori rispetto a quanto effettuato nel Piezo 4 (STBH2) (Rif. [14]), così come indicato dall'Autorità di Bacino della Regione Puglia nell'ambito della richiesta di integrazioni dell'Ottobre 2016 (Rif.[46]).

I valori ottenuti dall'interpretazione dei dati raccolti durante l'esecuzione del test sono simili a quelli acquisiti nel precedente test nel Piezo 4 (STBH2), infatti, la media dei valori delle velocità Darcyane, nel Piezo 7, tra il piano di falda e la profondità di 10m è uguale a 3×10^{-6} m/s (simile alle velocità misurate nel Piezo 4 pari a 5×10^{-6} m/s). Valori moderatamente più ridotti delle velocità darcyane sono stati registrati tra 10 m e 18 m di profondità. La media delle velocità Darcyane infatti è uguale a 6×10^{-7} m/s.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	18 of 86

8. GEOLOGIA

8.1 Assetto regionale

Il Salento appartiene all'avampese della regione Puglia (piattaforma apula), formata da una fitta sequenza, principalmente carbonatica dell'era del Mesozoico, coperta in trasgressione da depositi organogeni e calcarenitici (Paleocene - Oligocene) e da una sottile successione di tipo carbonatico - terrigeno risalente al Quaternario.

La successione stratigrafica, definita nel "Foglio 214 – Gallipoli della Carta geologica d'Italia a scala 1:100.000" e da Ciaranfi et al., Rif. [31], per la "Carta geologica delle Murge e del Salento", è stata di recente modificata dagli studi approfonditi di Bossio et al., Rif. [25], e Bossio et al., Rif. [26], eseguiti nell'area di Lecce e nella regione costiera del Salento, da Otranto a Santa Maria di Leuca.

Una breve descrizione delle unità rocciose sedimentarie del Salento orientale, che riepiloga lo stato delle conoscenze geologiche, è riportata qui di seguito. Una mappa geologica dell'area (da Bruno et al, Rif. [27]) è rappresentata in Figura 6.

Calcarea di Altamura

La sequenza di carbonati del Mesozoico affiora nella zona interna del Salento. La successione è costituita da una successione carbonatica con un'alternanza di strati di carbonati micritici e carbonati dolomitici (Bossio et al., Rif. [26]).

Formazione di Galatone (Oligocene Superiore) e Formazione di Lecce

La Formazione di Galatone (Oligocene Superiore) e la Formazione di Lecce (Oligocene Superiore-Miocene Inferiore) affiora a sudovest di Lecce. La Formazione di Galatone è composta da calcari compatti micritici, marne e depositi di argilla sabbiosa (Bossio et al. Rif. [26]). La Formazione di Lecce è caratterizzata da calcareniti che variano dal bianco al marrone chiaro.

Pietra Leccese

La "Pietra leccese" affiora in modo esteso attorno a Lecce. La formazione è costituita da due successioni leggermente differenti (Calò et al., Rif. [28]). La parte bassa è costituita da biomicrite marnosa detritica, la parte alta della successione è formata da calcari glauconitici. La datazione della Pietra Leccese si colloca nel Messiniano, l'ultimo dei sei piani in cui è suddiviso il Miocene.

Calcarenite di Andrano

La calcarenite di Andrano occupa ampie aree ad est e sudest di Lecce.

La formazione è composta da calcarea bioclastico, detritico o da calcarea oolitico, con una presenza ridotta di calcarea marnoso e marna. I depositi sono composti da sedimenti porosi e teneri alternati a strati compatti. La datazione si colloca nel Messiniano.

Formazione di Leuca

La formazione di Leuca (Pliocene Inferiore), spesso solo alcuni metri, forma una striscia continua tra la calcarenite di Andrano e la formazione delle Calcareniti del Salento. La formazione è costituita da brecce, conglomerati e, in modo subordinato, da biomicriti glauconitiche (Bossio et al., Rif. [26]).

Calcareniti del Salento

La formazione delle Calcareniti del Salento forma un'ampia striscia che delimita la linea costiera del Mare Adriatico. È costituita da calcari biodetritici fossiliferi, in genere teneri, e da sabbie calcaree giallognole, con uno spessore di circa 50 metri. La base della successione è caratterizzata da uno strato di conglomerati, costituiti da ciottoli fosfatici immersi in una matrice di tipo calcareo-fosfatico di colore chiaro. La sequenza inferiore è di norma a

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	19 of 86

granulometria fine e localmente presenta una composizione marnosa, mentre la sequenza superiore è costituita da sedimenti calcarei a granulometria da media a grossa. Nell'area di Lecce l'ambiente deposizionale indica l'esterno o l'interno della zona neritica (zona o regione del mare compresa fra 0 e 200 m di profondità) (Bossio et al., Rif. [26]). L'età si colloca nell'intervallo temporale che va dallo Zancleano al Piacenziano, ovvero i due piani in cui è suddiviso il Pliocene (Pliocene inferiore).

Calcarenite di Gravina

La calcarenite di Gravina (Plio – Pleistocene) è costituita da calcarenite detritica o organogena a granulometria grossa, mal stratificata; la sequenza di base è formata da argille e limo (silt).

Argilla subappenninica

L'argilla subappenninica (Pleistocene) è individuabile solo nel sottosuolo dell'area costiera, in varie registrazioni stratigrafiche (log) in pozzo. L'unità è composta principalmente da argilla stratificata e da argilla marnosa-limoso, con rare intercalazioni di sabbia (Ciaranfi et al., Rif. [31]).

Depositi continentali recenti

Lungo la linea costiera, i depositi continentali recenti comprendono sedimenti argillosi e limosi con strati di torba, di ambiente lagunare o acquitrinoso, e sabbie eoliche, che formano dune costiere.

8.2 Assetto strutturale

L'avampaese della Puglia è deformato da un'ampia piega antiforme con un orientamento Ovest-Nordovest - Est-Sudest, che si estende dal bacino del fiume Bradano al Mare Adriatico (Doglioni et al., Rif. [35]).

Nell'area oggetto dello studio l'assetto strutturale è localmente e irregolarmente monoclinale, con una lieve immersione verso la linea costiera ionica (Ciaranfi et al., Rif. [31]).

La struttura del Salento meridionale è sezionata da normali faglie con orientamento Nordovest - Sudest, risalenti a varie ere (dal Tardo Cretaceo al Pleistocene), che formano una serie di rilievi strutturali (*horst* o pilastri tettonici) e depressioni tettoniche (*graben*) estese lungo le linee assiali con direzione Nordovest - Sudest.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	20 of 86

8.3 Geomorfologia

8.3.1 Morfologia

Il quadro paesaggistico consta di una piana leggermente ondulata che degrada dolcemente verso il mare Adriatico. Una caratteristica tipica è rappresentata dalla mancanza di una rete di drenaggio ben sviluppata e dal paesaggio contraddistinto da pendii arrotondati, senza forme rilevanti, riconducibili a fenomeni di erosione.

Un tipico affioramento morfologico nell'area del sito sono le doline, caratterizzate da una pendenza di scarpata molto bassa e sottili depositi argillosi che coprono la depressione del settore centrale. Le doline presentano una distribuzione sparsa, con un'apparente assenza di organizzazione.

8.3.2 Idrografia

In questo settore della penisola salentina, l'idrografia è fondamentalmente rappresentata da un reticolo di vie idriche destinate al ruscellamento e inalveazione preferenziali in bacini endoreici dell'interno. Questo tipo di assetto idrografico non ha una chiara evidenza morfologica: Non si osservano canali o solchi di ruscellamento, se non localmente. La rete è suddivisa in alcuni sistemi separati e interconnessi con un disegno dendritico.

Nel sito si possono riconoscere due corsi d'acqua, meglio definiti di altri. Un breve canale artificiale, con un decorso rettilineo, drena l'area saturata di acqua della Palude di Cassano e la convoglia in mare dopo un percorso di circa 0.8 km. Un secondo breve corso d'acqua stagionale è posizionato a sudest della condotta. Il suo corso confina con l'agglomerato urbano dell'area di Santa Foca.

L'unico corpo d'acqua significativo è la "Palude di Cassano", che è un Sito di Interesse Regionale (SIR). La zona acquitrinosa denominata Palude di Cassano è una vasta depressione di probabile origine carsica (le elevazioni del fondo sono di 2 - 3 m più basse delle aree circostanti) che accoglie acque continentali e la tipica vegetazione delle aree paludose.

Inoltre, per valutare la recente evoluzione storica della Palude di Cassano, si è eseguita un'analisi della configurazione dell'area, utilizzando le immagini satellitari di Google Earth. Questa analisi mostra che, nel corso di 10 anni, l'area è stata soggetta ad alcuni cambiamenti; i cambiamenti principali si suppone siano prodotti dalle periodiche fluttuazioni della superficie freatica in corrispondenza della Palude di Cassano.

Il risultato dell'analisi è illustrato in Figura 39.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	21 of 86

8.4 Assetto geologico del sito

L'area del sito fa interamente parte della formazione nota come Calcarenite del Salento (Rif. [1], [2], [9], [10], [11] e [12]). Facendo riferimento alle registrazioni (log) stratigrafiche dei fori di sondaggio, il deposito è composto principalmente da sabbia di colore dal giallo al biancastro (circa il 65%) con strati minori di sabbia limosa (15%) e rari strati di ghiaia - sabbia grossa (5%).

I test di laboratorio riguardo la distribuzione delle dimensioni delle particelle indicano che la frazione sabbiosa oscilla dal 50% all'85%; il peso di volume secco è dell'ordine di 16-18 kN/m³.

Interstratificati con i sedimenti sabbiosi vi sono strati calcarenitici (15%), normalmente di spessore inferiore al metro e spesso molto fratturati. Nella parte occidentale dell'area del sito (BH4, BH5) e nei pressi dei piezometri Piezo 2 e Piezo 6, le calcareniti costituiscono lo strato superiore della sequenza, con uno spessore di 2-3 m massimo, e si può supporre una continuità locale, da verificare sperimentalmente.

Nessun'altra correlazione si può desumere dai dati geologici; pertanto a livello del sito, la sequenza di sabbia può essere considerata approssimativamente omogenea, alla profondità sottoposta ad indagine (30 m).

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	22 of 86

9. IDROGEOLOGIA

9.1 Assetto regionale

La successione dei carbonati del Mesozoico, affiorante nei rilievi occidentali del Salento, ma che forma il basamento dell'intera sequenza sedimentaria del post-Mesozoico anche nella piana adriatica orientale, rappresenta lo strato acquifero principale, denominato nella letteratura tecnica "Acquifero profondo", su scala regionale.

Il complesso assetto litostratigrafico e tettonico della sequenza sovrapposta di Terziario e Quaternario dà origine ad uno strato acquifero superficiale a più livelli (Cherubini et al., Rif. [30]), costituito principalmente da Pietra Leccese, Calcarenite di Andrano, Calcareniti del Salento e Calcarenite di Gravina.

Nello strato acquifero superficiale, a causa del vario grado di permeabilità delle diverse unità litologiche, la circolazione dell'acqua avviene su più livelli, spesso in modo abbastanza indipendente, supportata da strati marnosi o argillosi o, nelle vicinanze della costa, direttamente da acque di ingressione marina.

9.1.1 Strato acquifero dei carbonati del Mesozoico

Lo strato acquifero dei carbonati del Mesozoico è caratterizzato da una doppia porosità: una porosità secondaria (fratture), che dipende dalla passata attività tettonica e una porosità terziaria (canale) dovuta a processi di dissoluzione carsica. Nel Salento orientale, lo strato acquifero profondo, che si estende in modo più o meno continuo dal Mare Adriatico al Mar Ionio, con una forma lenticolare, è confinato in posizione direttamente sovrapposta ai carbonati del Mesozoico, a causa della bassa permeabilità della formazione di Galatone (depositi di marne e argille) e alle sequenze di base di Pietra Leccese.

Nel settore di S. Foca la parte superiore dello strato acquifero dei carbonati del Mesozoico, a causa dell'elevato dislocamento di faglie normali che sezionano l'area del Salento, è coperta da uno spesso ammasso di sedimenti che datano dal Terziario al Quaternario e raggiunge una profondità di oltre 200 m sotto al livello del suolo (Bruno, Rif. [27], Margiotta, Rif. [38]).

9.1.2 Strato acquifero superficiale a più livelli

Nello strato acquifero superficiale a più livelli, il grado di permeabilità varia in base alla composizione litologica, al grado di cementazione (quando la cementazione è bassa la porosità della matrice rocciosa è significativa), alla porosità di frattura e ai fenomeni carsici. Si possono riconoscere diversi strati acquiferi, soprattutto su base litologica.

La sequenza basale di Pietra Leccese (biomicrite marnosa) e la successione basale di argilla limosa di Calcarenite di Gravina hanno caratteristiche di acquitardo-acquicludo (Del Prete et al. Rif. [33]), contribuendo alla separazione della sequenza idrogeologica in diverse unità. Di conseguenza, la successione nella parte alta di Pietra Leccese e la Calcarenite di Andrano sovrapposta, la formazione delle Calcareniti del Salento, costituite principalmente da calcari biodetritici teneri e sabbie calcaree, nonché la successione superiore di Calcarenite di Gravina, possono tutte essere considerate come unità acquifere (Del Prete et al. Rif. [33]).

A causa dell'evoluzione sedimentaria e tettonica del Salento, relativamente complessa (struttura a pilastri tettonici (*horst*) e *graben*) alcune di queste unità acquifere (Pietra Leccese, Calcarenite di Andrano) diventano semi-confinate quando coperte da unità acquitarde - acquicludo (Cherubini et al. Rif. [30]). Questa struttura generale è complicata su scala locale dall'effetto di variazioni litologiche presenti anche nelle diverse unità acquifere.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	23 of 86

9.2 Assetto idrogeologico del sito

9.2.1 Introduzione

L'area del sito, comprendente la Palude di Cassano, l'impianto di fitodepurazione, ed il pozzo di ingresso del microtunnel appartengono interamente allo strato acquifero superficiale rappresentato, da un punto di vista litologico, dalla formazione nota come Calcareniti del Salento. La formazione è composta principalmente da sabbia di colore variabile dal giallo al biancastro, con strati di minore entità di sabbia limosa e calcareniti e strati più rari di ghiaia - sabbia grossa. La frazione sabbiosa oscilla dal 50% all'85%. Gli strati di calcarenite sono comuni nella parte alta della sequenza o, meno frequentemente, si presentano interstratificati con sedimenti sabbiosi. Le calcareniti hanno di regola uno spessore inferiore al metro e si presentano spesso molto fratturate. A seguito dell'assenza di strati a bassa permeabilità, la sequenza sabbiosa può essere considerata uno strato acquifero di tipo freatico.

Dall'indagine geofisica, non sono emersi dati pertinenti per migliorare il modello idrogeologico del sito.

9.2.2 Limiti dello strato acquifero

I limiti areali dello strato acquifero di tipo freatico vanno ben oltre l'area del sito. I dati stratigrafici raccolti nel corso dell'indagine sul campo indicano che, fino a 30 m di profondità sotto al livello del suolo, lo strato acquifero di tipo freatico è sostanzialmente uniforme, senza strati significativi a bassa permeabilità (Figura 7).

Per quanto riguarda il confine inferiore, i dati bibliografici suggeriscono per il sito questa stratigrafia:

- Sabbie e calcareniti (formazione delle Calcareniti del Salento), strato acquifero di tipo freatico con uno spessore di 45-50 m;
- Calcarenite di Andrano, strato acquifero con uno spessore di 50-60 m;
- Pietra Leccese, con caratteristiche di aquicludo-aquitardo;
- Strato acquifero profondo del Mesozoico.

Bruno (Rif. [27]) indica uno strato a bassa permeabilità nella parte inferiore della formazione delle Calcareniti del Salento, formato da livelli di argilla marnosa, siltiti marnose e arenarie glauconitiche, le ultime sperimentalmente correlate alla formazione di Leuca (Figura 8). Cherubini (Rif. [30]) asserisce che lo strato confinante sovrapposto alla calcarenite di Andrano sia costituito da argille subappenniniche di epoca più recente.

Margiotta (Rif. [38]) al contrario non fa cenno ad uno strato di confinamento tra la formazione delle Calcareniti del Salento e la calcarenite di Andrano, confermando comunque i dati di spessore sopra menzionati (Figura 9).

In conclusione, la natura del confine tra il primo strato acquifero (Calcareniti del Salento) e il secondo (calcarenite di Andrano) non è certa, anche se la presenza di uno strato di confinamento tra i due strati acquiferi appare l'ipotesi più probabile. In ogni caso, allo spessore dello strato acquifero di tipo freatico va attribuito un valore minimo di 45 m.

9.2.3 Parametri idrodinamici

Durante le indagini sul campo del 2015 è stata effettuata una valutazione dei parametri idrodinamici dello strato acquifero di tipo freatico superficiale.

	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	24 of 86

Sono stati eseguiti quattro test per determinare la porosità delle sabbie in campioni indisturbati provenienti dai sondaggi geognostici. I risultati sono elencati nella Tabella 4.

Sondaggio	STBH01	STBH02	STBH04	BH04
Profondità	3,0-3,5	2,0-2,6	28,0-28,5	3,5-4,0
n (%)	43.2	49.44	50.18	45.82

Tabella 4: Riepilogo dei valori di porosità

Questi risultati si riferiscono alla porosità totale del sedimento, che oscilla da circa il 43% al 50%. Pertanto si può stimare un valore di porosità efficace (nota in inglese come *specific yield* - resa specifica) dell'ordine del 35% - 40%.

Sono state eseguite cinque prove di tipo Lefranc in tre sondaggi, a diverse profondità, ottenendo i valori di permeabilità riportati in Tabella 5.

Sondaggio	STBH01	STBH01	STBH02	STBH02	STBH02	BH04	BH04
Profondità	4,0-5,0	9,5-10,0	4,1-5,0	9,5-10,0	18,8-20,0	4,0-5,0	9,5-10,0
K (m/s)	~3 E-04	~1 E-04	~5 E-05	~4 E-04	~2 E-04	~7 E-05	~2 E-04

Tabella 5: Riepilogo dei valori di conducibilità idraulica

Sono stati eseguiti tre test nello strato di sabbia limosa (STBH02 alla profondità di 4.1-5.0 m e 9.5-10.0 m, STBH01 alla profondità di 9.5-10.0 m), gli altri sono stati effettuati nelle sabbie. Da questi dati non si possono desumere significative differenze. Pertanto, per la sequenza di sabbia i test di conducibilità idraulica suggeriscono una sostanziale uniformità, con un valore medio di 2 E-04 m/s.

Una prova di tipo Lugeon eseguita in calcareniti fratturate ha fornito un valore di medio-bassa permeabilità (1 E-05 m/s).

Nel mese di Marzo 2016 URS ha eseguito un "single point dilution test" (Rif. [14]) in corrispondenza del piezometro Piezo 4 (ST_BH2) al fine di determinare la velocità effettiva di filtrazione mediante la costruzione di profili verticali di velocità, definiti tramite misura della diluizione nel tempo di un tracciante a differenti profondità, così come indicato dall'Autorità di Bacino della Regione Puglia nell'ambito della richiesta di integrazioni presentata a Gennaio 2016 (Rif. [14]).

Il risultato di tale prova ha indicato un valore medio di velocità effettiva di deflusso nell'acquifero pari a circa 3×10^{-5} m/sec, equivalente a circa 2,6 m/giorno; tale velocità di filtrazione si mantiene pressoché uniforme lungo tutto lo spessore investigato (sino ad una profondità di 10 m da piano campagna). Rapportando questo valore di velocità con il gradiente idraulico nell'area del punto di misura ed il valore di porosità efficace indicato nel documento in Rif. [14]), si può ricavare una stima della conducibilità idraulica dell'ordine di 6.5-7.7 E-4 m/s, quindi pienamente compatibile con i valori ricavati dalle altre prove eseguite.

9.2.4 Carta piezometrica

Nel luglio del 2015 URS ha eseguito un'indagine piezometrica nei cinque piezometri installati nell'area dell'approdo. Il risultati sono riportati nella Tabella 6.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	25 of 86

Questi risultati sono stati utilizzati per mettere a punto una carta della superficie freatica (anche detta tavola d'acqua, (Figura 10), che ricostruisce il flusso delle acque di falda lungo un ristretto tratto, comprendente il percorso della condotta (per una lunghezza di circa un chilometro) e il microtunnel.

La superficie piezometrica conferma l'andamento regionale del flusso, orientato in direzione sudovest - nordest, verso la linea costiera, con un gradiente idraulico compreso in un intervallo dallo 0,2 allo 0,5 %.

Il rilevante aumento del gradiente idraulico tra il Piezo 6 e il Piezo 4 non sembra corrispondere ad alcun confine o variazione delle proprietà dello strato acquifero, che possano desumersi dai dati idrogeologici locali.

Le piezometrie misurate nella campagna di Luglio 2015 sono state utilizzate per la calibrazione del modello numerico di flusso col codice FEFLOW per gli scenari 1÷6.

Sono state quindi effettuate altre quattro campagne di misura, nell'ambito del monitoraggio piezometrico dell'area, datate rispettivamente Dicembre 2015, Marzo 2016 ed Aprile 2016, Gennaio 2017; le piezometrie risultanti sono riportate in Tabella 6.

I risultati dei rilievi freaticometrici del Gennaio 2017 (Rif. [18]) sono altresì riportati in Tabella 6. Da tali rilievi, si evince un graduale abbassamento del piano di falda (aumento della soggiacenza).

ID	X	Y	Quota testa pozzo (m slm)	Superficie freatica Luglio 2015 (m slm)	Superficie freatica Dicembre 2015 (m slm)	Superficie freatica Marzo 2016 (m slm)	Superficie freatica Aprile 2016 (m slm)	Superficie freatica Gennaio 2017 (m slm)
Piezo 2	277683	4465001	8.88	6.571	6.521	6.591	6.26	6,09
Piezo 3	277639	4465156	8.64	6.092	6.072	6.112	5.85	5,71
Piezo 4 (ST_BH2)	277912	4465191	7.66	3.227	3.257	3.827	3.01	2,81
Piezo 5	276887	4464756	15.00	8.695	8.495	8.685	8.17	7,89
Piezo 6 (ST_BH1)	277804	4465092	8.30	5.638	5.598	5.758	5.37	5,15
Piezo 7	277899	4465215	7.480	-	-	-	-	2,89
Piezo 9	277394	4464999	8.528	-	-	-	-	6,39
Piezo 10	277216	4464914	9.093	-	-	-	-	6,63

Tabella 6: Misurazioni piezometriche (valori in m slm)

L'andamento temporale delle piezometrie risulta abbastanza stabile nel tempo, con oscillazioni mensili dell'ordine massimo di qualche decina di cm che non modificano però l'entità dei gradienti idraulici e la direzione del flusso, orientato verso la linea costiera. Anche dalle misurazioni di Dicembre 2015, Marzo 2016, Aprile 2016 e Gennaio 2017 risulta confermato l'aumento localizzato del gradiente idraulico tra il piezometro Piezo 6 (ST_BH1) ed il piezometro Piezo 4 (ST_BH2), già evidenziato con le misure di Luglio 2015.

La piezometria misurata a Marzo 2016, presentando i livelli più alti dell'intera serie storica, è stata utilizzata per la calibrazione del modello numerico di flusso col codice FEFLOW negli scenari integrativi 7 ed 8.

9.2.5 Interazione tra acque di superficie e acque di falda

La zona acquitrinosa della Palude di Cassano e il suo canale di drenaggio rappresentano l'unica acqua di superficie dell'area dell'approdo; il corso d'acqua che rasenta S. Foca è stato considerato non pertinente.

La Palude di Cassano è caratterizzata dall'assenza di corsi d'acqua affluenti; l'effluente è rappresentato da un canale artificiale di drenaggio che raggiunge il mare. Queste condizioni suggeriscono che, da un punto di vista idrogeologico, la zona acquitrinosa è dominata dalle acque di falda.

Il bilancio idrico, oltre ad essere controllato dall'afflusso delle acque di falda, è controllato periodicamente e irregolarmente da un afflusso di entità più ridotto proveniente dall'impianto di fitodepurazione. È difficile stabilire se questo afflusso può determinare situazioni nelle quali la palude ricarica localmente lo strato acquifero.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	27 of 86

10. SIMULAZIONE DEL FLUSSO COL MODELLO NUMERICO

Al fine di definire il modello concettuale del sito e calibrare lo schema numerico per la simulazione degli scenari *ante-operam* e *post-operam*, sono state eseguite le seguenti attività:

- Analisi dei documenti URS riguardanti gli aspetti geotecnici, geofisici e idrologici dei progetti del microtunnel e della condotta (Rif. [1], [2], [3]).
- Ricerca dei dati geografici per la costruzione del modello numerico: Modello Digitale del Terreno (DTM) in formato *raster*, ortofoto in formato *raster*, dati vettoriali in formato *shapefile* della Carta Tecnica Regionale (CTR), della linea di costa e degli elementi idrografici rilevanti; tutti questi dati sono stati scaricati dal sito web *Regione Puglia* (<http://www.sit.puglia.it/>)

Il Modello Digitale del Terreno (Digital Terrain Model - DTM, con risoluzione al suolo di 8 m e con accuratezza di ± 1 m) per l'area di studio è riportato in Figura 12.

Tutti i dati raccolti sono stati sistematizzati con i dati di progetto relativi alla dimensione e alla posizione del pozzo del microtunnel (Rif. [4] e [6]).

Successivamente alla definizione del modello concettuale del sito, sono state eseguite diverse simulazioni numeriche di flusso nell'acquifero utilizzando il codice di modellazione agli elementi finiti FEFLOW 6.2 FM3 del DHI Group (DHI-WASY GmbH, 2014; Diersch 2006)¹, nel rispetto delle seguenti assunzioni:

- Simulazione del solo acquifero freatico superficiale
- Acquifero omogeneo ed isotropo, con una profondità di 30 m
- Orientamento della superficie piezometrica in direzione della linea di costa, sulla base dell'unica indagine piezometrica disponibile
- Valore di porosità efficace imposto pari a 0.35
- Valori di conducibilità idraulica nel *range* da $2E-4$ a $1E-5$ m/s come emerso dalle prove di tipo Lugeon/Lefranc, con un valore medio di $1E-4$ m/s;
- Simulazioni numeriche di *sensitivity analysis* eseguite estendendo la conducibilità tra un ordine di grandezza inferiore ($1E-5$ m/s) e uno maggiore ($1E-3$ m/s) rispetto al valore medio ($1E-4$ m/s).

Negli scenari ipotizzati in questa prima fase, si sono considerati i risultati delle indagini idrogeologiche svolte in sito dalla URS fino al mese di Luglio 2015 (Rif. [3]).

Inoltre, la presenza del microtunnel all'interno delle simulazioni numeriche è stata considerata come trascurabile in quanto il manufatto si sviluppa in direzione parallela alle linee di flusso, non esercitando su di esse significative alterazioni.

Il dominio del modello numerico di calcolo è un box rettangolare i cui confini sono stati imposti a 2 km dal sito sul lato nord, lungo la linea di costa, ad 1 km dal sito sul lato sud, e a 2 km di distanza a monte (Figura 11).

Il modello è costituito da 6 layers di spessore pari a 5 m, per un totale di 652092 elementi e 390257 nodi; la Figura 13 e la Figura 14 riportano rispettivamente la vista in pianta e la vista tridimensionale della mesh di calcolo a base triangolare.

¹ DHI-WASY GmbH, 2014. Institute for Water Resources Planning and Systems Research Ltd. Sito web dell'azienda: <http://www.wasy.de> rif 14

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	28 of 86

Gli scenari 1, 2, 3 simulano esplicitamente un'interazione tra la palude di Cassano e le acque di falda, imponendo condizioni che prevedono una superficie di exfiltrazione (*seepage face*). La *seepage face* è una condizione al contorno ottenuta combinando un carico imposto (condizione del 1° tipo o di Dirichlet) corrispondente al fondo della palude o del canale di drenaggio (elevazione desunta dal Modello Digitale del Terreno) e contemporaneamente un vincolo sul flusso (condizione del 2° tipo o di Neumann) del tipo di sola uscita dal sistema, al fine di prevenire apporti di alimentazione esterna; con la condizione al contorno di *seepage face* (ovvero di exfiltrazione) è possibile descrivere una condizione tra il campo di flusso saturo e il piano campagna lungo la quale le acque di falda possono solo uscire dall'acquifero.

Gli scenari 4, 5, 6 simulano l'assenza di interazioni dirette tra la palude di Cassano e le acque di falda, rimuovendo la condizione di *seepage face*. In questo caso la superficie piezometrica risulta libera di evolvere, senza il vincolo imposto dalla presenza della Palude, ed al contempo fornisce valori piezometrici più elevati nell'area dello scavo.

Gli elementi di rilevanza idrogeologica considerati attualmente per le simulazioni sono la Palude di Cassano e il relativo canale di drenaggio (per gli scenari 1, 2 e 3).

Il carico piezometrico imposto sul confine di monte (17.55 m slm) va inteso esclusivamente come valore di calibrazione, ottimizzato per la migliore riproduzione dei valori piezometrici registrati nell'area di interesse, e non strettamente correlati ai (non certi) livelli piezometrici locali. Le condizioni al contorno, pertanto, sono state convenientemente posizionate ad una distanza adeguata dall'area di studio.

10.1 Scenario 1

Le condizioni imposte al modello per questo scenario sono:

- Condizioni al contorno: carico piezometrico imposto (condizione del 1° tipo o di Dirichlet) lungo la linea di costa (0 m slm) e lungo il confine di monte (17.55 m slm, valore ottimizzato durante la fase di calibrazione).
- Condizione di *seepage face* imposta per la palude di Cassano e per i nodi del canale di drenaggio
- Conducibilità idraulica pari a $1E-4$ m/s
- Porosità efficace pari a 0.35

La Figura 15 illustra la piezometria risultante in questo scenario. La piezometria derivante dall'interpolazione delle misure effettuate in loco mostra un brusco aumento locale del gradiente (Rif. [3]), che non è legato a evidenti discontinuità o disomogeneità di tipo geologico. Il gradiente piezometrico simulato in questo scenario risulta invece più regolare; questo risultato di fatto risulta a favore di sicurezza, in quanto tende a sovrastimare localmente i livelli piezometrici nell'intorno dell'area di scavo.

La Figura 16 riporta sotto forma di *scatter plot* il confronto fra i valori piezometrici misurati e calcolati nella simulazione per lo scenario 1.

10.1.1 Scenario 1a: effetto di un pozzo impermeabile (condizioni *post-operam*)

A partire dalla piezometria simulata nello scenario 1, lo scenario 1a indaga gli effetti sulla piezometria dell'area conseguenti alla presenza del pozzo impermeabile (condizioni *post-operam*).

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	29 of 86

Partendo dal modello calibrato dello scenario 1, è stata eseguita una simulazione in condizioni stazionarie, considerando l'intero volume del pozzo come impermeabile; la piezometria risultante è stata confrontata con la piezometria dello scenario 1 (condizioni *ante-operam*, Figura 15). Calcolando le differenze tra le condizioni *post-operam* e *ante-operam*, le variazioni risultano confinate all'area circostante il pozzo, con valori dell'ordine di ± 10 cm (come illustrato in Figura 17). Una lieve perturbazione delle linee di flusso si rileva solamente nelle immediate vicinanze del pozzo, come riportato in Figura 18.

10.2 Scenario 2

Le condizioni imposte al modello per questo scenario sono:

- Condizioni al contorno: carico piezometrico imposto (condizione del 1° tipo o di Dirichlet) lungo la linea di costa (0 m slm) e lungo il confine di monte (17.55 m slm, valore ottimizzato durante la fase di calibrazione).
- Condizione di seepage face imposta per la palude di Cassano e per i nodi del canale di drenaggio
- Conducibilità idraulica pari a 1E-3 m/s
- Porosità efficace pari 0.35

La Figura 19 illustra la piezometria risultante in questo scenario. La piezometria derivante dall'interpolazione delle misure effettuate in loco mostra un brusco aumento locale del gradiente (Rif. [3]), che non è legato a evidenti discontinuità o disomogeneità di tipo geologico. Il gradiente piezometrico simulato in questo scenario risulta invece più regolare; questo risultato di fatto risulta a favore di sicurezza, in quanto tende a sovrastimare localmente i livelli piezometrici nell'intorno dell'area di scavo. La Figura 20 riporta sotto forma di *scatter plot* il confronto fra i valori piezometrici misurati e calcolati nella simulazione per lo scenario 2.

10.2.1 Scenario 2a: effetto di un pozzo impermeabile (condizioni *post-operam*)

A partire dalla piezometria simulata nello scenario 2, lo scenario 2a indaga gli effetti sulla piezometria dell'area conseguenti alla presenza del pozzo impermeabile (condizioni *post-operam*).

Partendo dal modello calibrato dello scenario 2, è stata eseguita una simulazione in condizioni stazionarie, considerando l'intero volume del pozzo come impermeabile; la piezometria risultante è stata confrontata con la piezometria dello scenario 2 (condizioni *ante-operam*, Figura 19). Calcolando le differenze tra le condizioni *post-operam* e *ante-operam*, le variazioni risultano confinate all'area circostante il pozzo, con valori dell'ordine di ± 10 cm (come illustrato in Figura 21). Una lieve perturbazione delle linee di flusso si rileva solamente nelle immediate vicinanze del pozzo, come illustrato in Figura 22.

10.3 Scenario 3

Le condizioni imposte al modello per questo scenario sono:

- Condizioni al contorno: carico piezometrico imposto (condizione del 1° tipo o di Dirichlet) lungo la linea di costa (0 m slm) e lungo il confine di monte (17.55 m slm, valore ottimizzato durante la fase di calibrazione).
- Condizione di seepage face imposta per la palude di Cassano e per i nodi del canale di drenaggio

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	30 of 86

- Conducibilità idraulica pari a $1E-5$ m/s
- Porosità efficace pari a 0.35

La Figura 23 illustra la piezometria risultante in questo scenario. La piezometria derivante dall'interpolazione delle misure effettuate in loco mostra un brusco aumento locale del gradiente (Rif. [3]), che non è legato a evidenti discontinuità o disomogeneità di tipo geologico. Il gradiente piezometrico simulato in questo scenario risulta invece più regolare; questo risultato di fatto risulta a favore di sicurezza, in quanto tende a sovrastimare localmente i livelli piezometrici nell'intorno dell'area di scavo. La Figura 24 riporta sotto forma di *scatter plot* il confronto fra i valori piezometrici misurati e calcolati nella simulazione per lo scenario 3.

10.3.1 Scenario 3a: effetto di un pozzo impermeabile (condizioni *post-operam*)

A partire dalla piezometria simulata nello scenario 3, lo scenario 3a indaga gli effetti sulla piezometria dell'area conseguenti alla presenza del pozzo impermeabile (condizioni *post-operam*).

Partendo dal modello calibrato dello scenario 3, è stata eseguita una simulazione in condizioni stazionarie, considerando l'intero volume del pozzo come impermeabile; la piezometria risultante è stata confrontata con la piezometria dello scenario 3 (condizioni *ante-operam*, Figura 23). Calcolando le differenze tra le condizioni *post-operam* e *ante-operam*, le variazioni risultano confinate all'area circostante il pozzo, con valori dell'ordine di ± 10 cm (come illustrato in Figura 25). Una lieve perturbazione delle linee di flusso si rileva solamente nelle immediate vicinanze del pozzo, come illustrato in Figura 26.

10.4 Scenario 4

Le condizioni imposte al modello per questo scenario sono:

- Condizioni al contorno: carico piezometrico imposto (condizione del 1° tipo o di Dirichlet) lungo la linea di costa (0 m slm) e lungo il confine di monte (17.55 m slm, valore ottimizzato durante la fase di calibrazione).
- Nessuna condizione al contorno imposta per la palude di Cassano o per i nodi del canale di drenaggio
- Conducibilità idraulica pari a $1E-4$ m/s
- Porosità efficace pari a 0.35

La Figura 27 illustra la piezometria risultante in questo scenario. La piezometria derivante dall'interpolazione delle misure effettuate in loco mostra un brusco aumento locale del gradiente (Rif. [3]), che non è legato a evidenti discontinuità o disomogeneità di tipo geologico. Il gradiente piezometrico simulato differisce solo marginalmente da quello degli scenari 1÷3, mentre i valori assoluti di piezometria risultano maggiori, riproducendo meglio le misure piezometriche a monte (punti 2, 3, 6) e fornendo anche in questo caso una sovrastima (a favore di sicurezza) dei livelli idraulici nell'area del pozzo (Figura 28).

La Figura 28 riporta sotto forma di *scatter plot* il confronto fra i valori piezometrici misurati e calcolati nella simulazione dello scenario 4.

10.4.1 Scenario 4a: effetto di un pozzo impermeabile (condizioni *post-operam*)

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	31 of 86

A partire dalla piezometria simulata nello scenario 4, lo scenario 4a indaga gli effetti sulla piezometria dell'area conseguenti alla presenza del pozzo impermeabile (condizioni *post-operam*).

Partendo dal modello calibrato dello scenario 4, è stata eseguita una simulazione in condizioni stazionarie, considerando l'intero volume del pozzo come impermeabile; la piezometria risultante è stata confrontata con la piezometria dello scenario 4 (condizioni *ante-operam*, Figura 27). Calcolando le differenze tra le condizioni *post-operam* e *ante-operam*, le variazioni risultano confinate all'area circostante il pozzo, con valori dell'ordine di ± 10 cm (come illustrato in Figura 29). Una lieve perturbazione delle linee di flusso si rileva solamente nelle immediate vicinanze del pozzo, come illustrato in Figura 30.

10.5 Scenario 5

Le condizioni imposte al modello per questo scenario sono:

- Condizioni al contorno: carico piezometrico imposto (condizione del 1° tipo o di Dirichlet) lungo la linea di costa (0 m slm) e lungo il confine di monte (17.55 m slm, valore ottimizzato durante la fase di calibrazione).
- Nessuna condizione al contorno imposta per la palude di Cassano o per il canale di drenaggio
- Conducibilità idraulica pari a 1E-3 m/s
- Porosità efficace pari a 0.35

La Figura 31 illustra la piezometria risultante in questo scenario. La piezometria derivante dall'interpolazione delle misure effettuate in loco mostra un brusco aumento locale del gradiente (Rif. [3]), che non è legato a evidenti discontinuità o disomogeneità di tipo geologico. Il gradiente piezometrico simulato differisce solo marginalmente da quello degli scenari 1÷3, mentre i valori assoluti di piezometria risultano maggiori, riproducendo meglio le misure piezometriche a monte (punti 2, 3, 6) e fornendo anche in questo caso una sovrastima (a favore di sicurezza) dei livelli idraulici nell'area del pozzo (Figura 32).

La Figura 32 riporta sotto forma di *scatter plot* il confronto fra i valori piezometrici misurati e calcolati nella simulazione dello scenario 5.

10.5.1 Scenario 5a: effetto di un pozzo impermeabile (condizioni *post-operam*)

A partire dalla piezometria simulata nello scenario 5, lo scenario 5a indaga gli effetti sulla piezometria dell'area conseguenti alla presenza del pozzo impermeabile (condizioni *post-operam*).

Partendo dal modello calibrato dello scenario 5, è stata eseguita una simulazione in condizioni stazionarie, considerando l'intero volume del pozzo come impermeabile; la piezometria risultante è stata confrontata con la piezometria dello scenario 5 (condizioni *ante-operam*, Figura 31). Calcolando le differenze tra le condizioni *post-operam* e *ante-operam*, le variazioni risultano confinate all'area circostante il pozzo, con valori dell'ordine di ± 10 cm (come illustrato in Figura 33). Una lieve perturbazione delle linee di flusso si rileva solamente nelle immediate vicinanze del pozzo, come illustrato in Figura 34.

10.6 Scenario 6

Le condizioni imposte al modello per questo scenario sono:

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	32 of 86

- Condizioni al contorno: carico piezometrico imposto (condizione del 1° tipo o di Dirichlet) lungo la linea di costa (0 m slm) e lungo il confine di monte (17.55 m slm, valore ottimizzato durante la fase di calibrazione).
- Nessuna condizione al contorno imposta per la palude di Cassano o per il canale di drenaggio
- Conducibilità idraulica pari a 1E-5 m/s
- Porosità efficace pari a 0.35

La Figura 35 illustra la piezometria risultante in questo scenario. La piezometria derivante dall'interpolazione delle misure effettuate in loco mostra un brusco aumento locale del gradiente (Rif. [3]), che non è legato a evidenti discontinuità o disomogeneità di tipo geologico. Il gradiente piezometrico simulato differisce solo marginalmente da quello degli scenari 1÷3, mentre i valori assoluti di piezometria risultano maggiori, riproducendo meglio le misure piezometriche a monte (punti 2, 3, 6) e fornendo anche in questo caso una sovrastima (a favore di sicurezza) dei livelli idraulici nell'area del pozzo (Figura 36).

La Figura 36 riporta sotto forma di *scatter plot* il confronto fra i valori piezometrici misurati e calcolati nella simulazione dello scenario 6.

10.6.1 Scenario 6a: effetto di un pozzo impermeabile (condizioni *post-operam*)

A partire dalla piezometria simulata nello scenario 6, lo scenario 6a indaga gli effetti sulla piezometria dell'area conseguenti alla presenza del pozzo impermeabile (condizioni *post-operam*).

Partendo dal modello calibrato dello scenario 6, è stata eseguita una simulazione in condizioni stazionarie, considerando l'intero volume del pozzo come impermeabile; la piezometria risultante è stata confrontata con la piezometria dello scenario 6 (condizioni *ante-operam*, Figura 35). Calcolando le differenze tra le condizioni *post-operam* e *ante-operam*, le variazioni risultano confinate all'area circostante il pozzo, con valori dell'ordine di ± 10 cm (come illustrato in Figura 37). Una lieve perturbazione delle linee di flusso si rileva solamente nelle immediate vicinanze del pozzo, come illustrato in Figura 38.

11. INTEGRAZIONI ED APPROFONDIMENTI

Le precedenti valutazioni modellistiche, non considerano l'effettiva presenza del microtunnel, in quanto la sua presenza (manufatto di diametro massimo pari a 3 metri, orientato in direzione sub-parallela rispetto alle linee di flusso) non costituisce una barriera trasversale al naturale deflusso della falda.

Al fine di verificare tale assunzione e di tener conto anche dei più aggiornati dati di campo (Rif. [13] e [14]) e delle integrazioni richieste dall'AdB, in particolare per quanto riguarda proprio l'esplicito inserimento del microtunnel all'interno del modello di flusso (Rif. [45]), sono stati simulati due scenari integrativi (scenari 7a ed 8a).

11.1 Modello numerico

Il modello numerico per la simulazione del flusso nell'acquifero (implementato con il codice di modellazione agli elementi finiti FEFLOW 7.0 FM3 del DHI Group) è stato integrato con l'esplicito inserimento del tracciato tridimensionale del microtunnel, che si estende dalla base del pozzo di spinta sino al confine a mare. Questa operazione ha richiesto una ridefinizione della *mesh* di calcolo, sia dal punto di vista planimetrico, sia per quanto riguarda la discretizzazione verticale.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	33 of 86

Il dominio del modello numerico di calcolo, analogamente agli scenari 1÷6, è un box rettangolare i cui confini sono stati imposti a 2 km dal sito sul lato nord, lungo la linea di costa, ad 1 km dal sito sul lato sud, e a 2 km di distanza a monte. Tale estensione è infatti ritenuta adeguata alla verifica degli effetti sulla falda indotti dal manufatto, allontanando le condizioni al contorno sino ad aree non influenzate dagli interventi in progetto.

Il modello risulta costituito da 7 *layers* di spessore variabile, funzionale alla corretta localizzazione verticale degli elementi progettuali, per un totale di 630889 elementi e 371120 nodi; la Figura 40 e la Figura 41 riportano rispettivamente la vista in pianta e la vista tridimensionale della *mesh* di calcolo a base triangolare.

Le simulazioni numeriche di flusso nell'acquifero sono state implementate, negli scenari integrativi, mantenendo le stesse assunzioni del modello originale, in particolare:

- Simulazione del solo acquifero freatico superficiale
- Acquifero omogeneo ed isotropo, con una profondità di 30 m
- Orientamento della superficie piezometrica in direzione della linea di costa, sulla base dell'unica indagine piezometrica disponibile
- Valore di porosità efficace imposto pari a 0.35


Per quanto riguarda il valore della conducibilità idraulica, la prova coi traccianti (Rif. [14], cap. 9.2.3) ha evidenziato una conducibilità nell'area dell'ordine di $6.5\div 7.7 \text{ E-4 m/s}$; per coerenza con gli scenari precedentemente simulati viene in questo caso considerato il valore di conducibilità all'estremo superiore del *range* indagato tramite l'analisi di sensitività effettuata, e cioè 1E-3 m/s .

Relativamente alla presenza di una eventuale salinizzazione all'interno del corpo acquifero superficiale, oggetto della presente modellazione, questa eventualità era stata in un primo momento esclusa, in mancanza di misure dirette di concentrazione delle acque di falda, sulla base di una valutazione teorica speditiva fondata sulla legge di Ghyben-Herzberg, che considera l'equilibrio delle pressioni esercitate dall'acqua dolce e dall'acqua salata. Secondo tale formulazione, lo spessore della zona satura di acqua dolce al di sopra del livello del mare e lo spessore di acqua dolce al di sotto del livello medio del mare sono legati fra di loro dal rapporto esistente tra le densità dell'acqua dolce e dell'acqua salata. Tale rapporto risulta pari a circa 40, il che significa che in condizioni indisturbate l'interfaccia fra acqua dolce e salata nell'area in esame, caratterizzata da piezometrie dell'ordine di $3\div 4 \text{ m slm}$, risulta localizzata a profondità ben inferiori rispetto allo spessore di falda interessato dalle opere in progetto. Questa indicazione teorica risultava confermata dalle informazioni bibliografiche che non indicano evidenze di salinizzazione dell'acquifero in esame.

Nel corso della prova coi traccianti (Rif.[14]), sono state eseguiti *log* verticali di conducibilità che hanno evidenziato nello spessore indagato (profondità di 10 m da piano campagna) “una condizione omogeneamente distribuita con valori di conducibilità elettrica di circa $1,2 \text{ mS/cm}$ ”; tali misure di conducibilità non evidenziano salinizzazione dell'acquifero, e pertanto nella modellazione non sono stati considerati gli effetti del flusso a densità variabile.

Si riportano di seguito i risultati delle simulazione degli scenari integrativi 7 ed 8.

Il valore di carico piezometrico imposto sul confine di monte (distante 2 km dal sito) risulta pari al valore di 17.55 m s.l.m. anche negli scenari 7 ed 8. La calibrazione del modello negli scenari 7-8 non ha evidenziato nessuna necessità di modifica al carico di monte rispetto agli scenari precedenti 1-6 (si vedano la Figura 43 e la Figura 50).

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	34 of 86

Scenario 7

Le condizioni imposte al modello per questo scenario sono:

- Condizioni al contorno: carico piezometrico imposto (condizione del 1° tipo o di Dirichlet) lungo la linea di costa (0 m slm) e lungo il confine di monte (17.55 m slm, valore ottimizzato durante la fase di calibrazione).
- Condizione di seepage face imposta per la palude di Cassano e per i nodi del canale di drenaggio
- Conducibilità idraulica pari a 1E-3 m/s
- Porosità efficace pari a 0.35

La Figura 42 illustra la piezometria risultante in questo scenario. La piezometria derivante dall'interpolazione delle misure effettuate in loco mostra un brusco aumento locale del gradiente che non è legato a evidenti discontinuità o disomogeneità di tipo geologico. Il gradiente piezometrico simulato in questo scenario risulta invece più regolare; questo risultato di fatto risulta a favore di sicurezza, in quanto tende a sovrastimare localmente i livelli piezometrici nell'intorno dell'area di scavo.

La Figura 43 riporta sotto forma di *scatter plot* il confronto fra i valori piezometrici misurati nella campagna di Marzo 2016 e quelli calcolati nella simulazione dello scenario 7.

11.1.1 Scenario 7a: effetto di un pozzo impermeabile (condizioni *post-operam*)

A partire dalla piezometria simulata nello scenario 7, lo scenario 7a indaga gli effetti sulla piezometria dell'area conseguenti alla presenza del pozzo impermeabile e del microtunnel (condizioni *post-operam*).

Partendo dal modello calibrato dello scenario 7, è stata eseguita una simulazione in condizioni stazionarie, considerando l'intero volume del pozzo e del microtunnel come impermeabile; la piezometria risultante è stata confrontata con la piezometria dello scenario 7 (condizioni *ante-operam*, Figura 42). Calcolando le differenze tra le condizioni *post-operam* e *ante-operam*, le variazioni risultano confinate all'area circostante il pozzo, con valori dell'ordine di ± 10 cm (come illustrato in Figura 44). Una lieve perturbazione delle linee di flusso si rileva solamente nelle immediate vicinanze del pozzo e del microtunnel, come riportato in Figura 45.

Si riportano, inoltre, delle immagini che evidenziano sia il percorso delle linee di flusso (Figura 46) sia la distribuzione delle velocità darcyane (Figura 47) in prossimità del pozzo di spinta e del microtunnel nel caso base.

La restituzione grafica 3D permette di evidenziare gli effetti del tutto locali delle diversioni alle linee di flusso. La rappresentazione delle linee di flusso in sezione verticale è riportata in Figura 48, longitudinalmente all'asse del microtunnel. La presenza dell'opera impermeabile non comporta nessuna influenza sull'assetto piezometrico preesistente se non nell'intorno dei manufatti.

Dalle immagini 3D (Figura 48) si può altresì notare come il modello numerico (con valore di porosità efficace pari a 0.35, definita coerentemente alle indagini geotecniche e relative prove di laboratorio) fornisca valori delle velocità darcyane, analoghi a quelli osservati mediante i single point dilution tests.

Si noti che, nonostante nella Nota Tecnica (Rif. [14]) sia stato assunto un valore della porosità efficace (N_e) pari a 0.15, il risultato in termini di velocità darcyane (V_f) è analogo.

Infatti, il risultato effettivo della prova del "single dilution test", è la velocità di filtrazione o darcyana (V_r). Per stimare la velocità effettiva di deflusso nell'acquifero (V_r), basta dividere la velocità darcyana (V_f) per la porosità efficace (N_e). Nel caso specifico la Nota Tecnica (Rif. [14]), fornisce un valore medio di velocità effettiva di deflusso nell'acquifero (V_r) pari a circa 3×10^{-5} m/s con porosità efficace (N_e) assunta pari a 0,15.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	35 of 86

Pertanto la velocità darcyana è pari a $V_f = V_r \times N_e = 3 \times 10^{-5} \text{ m/s} \times 0.15 = 4.5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, analogo a quanto ottenuto dal modello numerico.

Anche i risultati del single point dilution test eseguiti in corrispondenza del Piezo 7 a profondità maggiori rispetto a quanto effettuato nel Piezo 4 (STBH2) (Rif. [14]), sono simili a quelli acquisiti precedentemente, infatti, la media dei valori delle velocità Darcyane, nel Piezo 7, tra il piano di falda e la profondità di 10m è uguale e $3 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ mentre i valori delle velocità darcyane registrati tra 10 m e 18 m sono uguali a $6 \times 10^{-7} \text{ m/s}$.

11.2 Scenario 8

Le condizioni imposte al modello per questo scenario sono:

- Condizioni al contorno: carico piezometrico imposto (condizione del 1° tipo o di Dirichlet) lungo la linea di costa (0 m slm) e lungo il confine di monte (17.55 m slm, valore ottimizzato durante la fase di calibrazione).
- Nessuna condizione al contorno imposta per la palude di Cassano o per i nodi del canale di drenaggio
- Conducibilità idraulica pari a $1 \text{ E-}3 \text{ m/s}$
- Porosità efficace pari a 0.35



La Figura 49 illustra la piezometria risultante in questo scenario. La piezometria derivante dall'interpolazione delle misure effettuate in loco mostra un brusco aumento locale del gradiente che non è legato a evidenti discontinuità o disomogeneità di tipo geologico. Il gradiente piezometrico simulato differisce solo marginalmente da quello dello scenario 7, mentre i valori assoluti di piezometria risultano maggiori, riproducendo meglio le misure piezometriche a monte (Piezo2, Piezo3, ST_BH1/Piezo6) e fornendo anche in questo caso una sovrastima (a favore di sicurezza) dei livelli idraulici nell'area del pozzo (Figura 50).

La Figura 50 riporta sotto forma di *scatter plot* il confronto fra i valori piezometrici misurati nella campagna di Marzo 2016 e quelli calcolati nella simulazione dello scenario 8.

11.2.1 Scenario 8a: effetto di un pozzo impermeabile (condizioni *post-operam*)

A partire dalla piezometria simulata nello scenario 8, lo scenario 8a indaga gli effetti sulla piezometria dell'area conseguenti alla presenza del pozzo impermeabile e del microtunnel (condizioni *post-operam*).

Partendo dal modello calibrato dello scenario 8 è stata eseguita una simulazione in condizioni stazionarie, considerando l'intero volume del pozzo e del microtunnel come impermeabile; la piezometria risultante è stata confrontata con la piezometria dello scenario 8 (condizioni *ante-operam*, Figura 49). Calcolando le differenze tra le condizioni *post-operam* e *ante-operam*, le variazioni risultano confinate all'area circostante il pozzo, con valori dell'ordine di $\pm 10 \text{ cm}$ (come illustrato in Figura 51). Una lieve perturbazione delle linee di flusso si rileva solamente nelle immediate vicinanze del pozzo, come illustrato in Figura 52.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	36 of 86

12. MAPPE E FIGURE



Figura 1 - Trans Adriatic Pipeline – Visione d'insieme

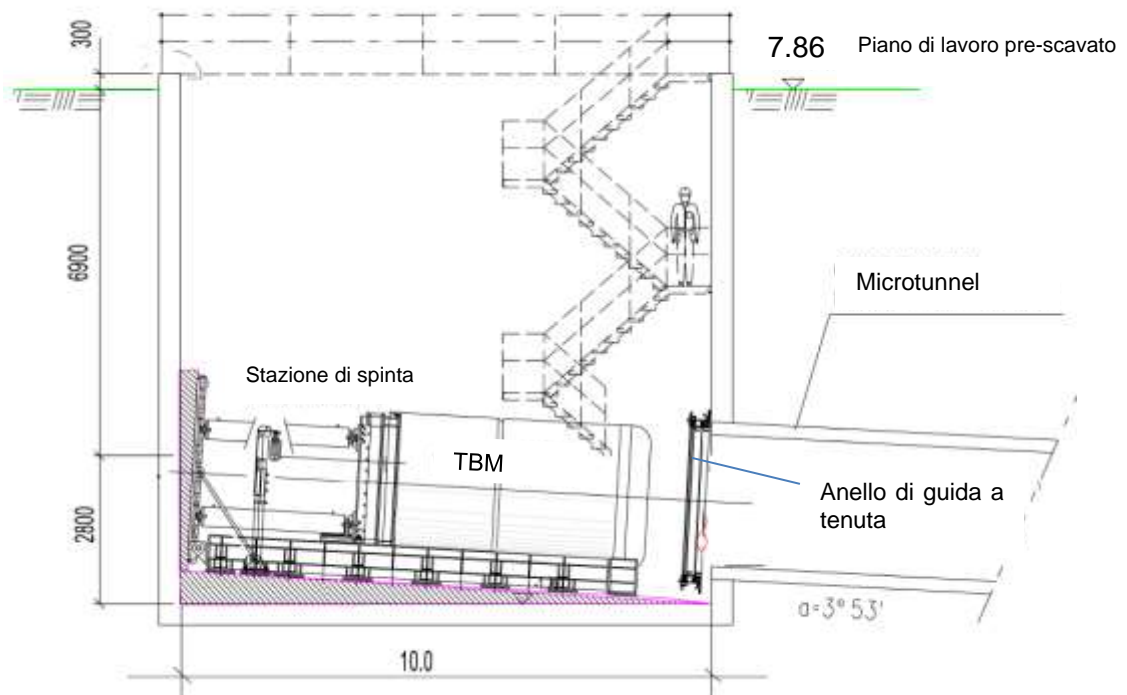


Figura 2 - Pozzo di spinta per costruzione microtunnel

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	37 of 86



Figura 3 - Vista generale dell'area in esame

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	38 of 86



Figura 4 – Ubicazione indagini geofisiche nell'area dell'approdo.

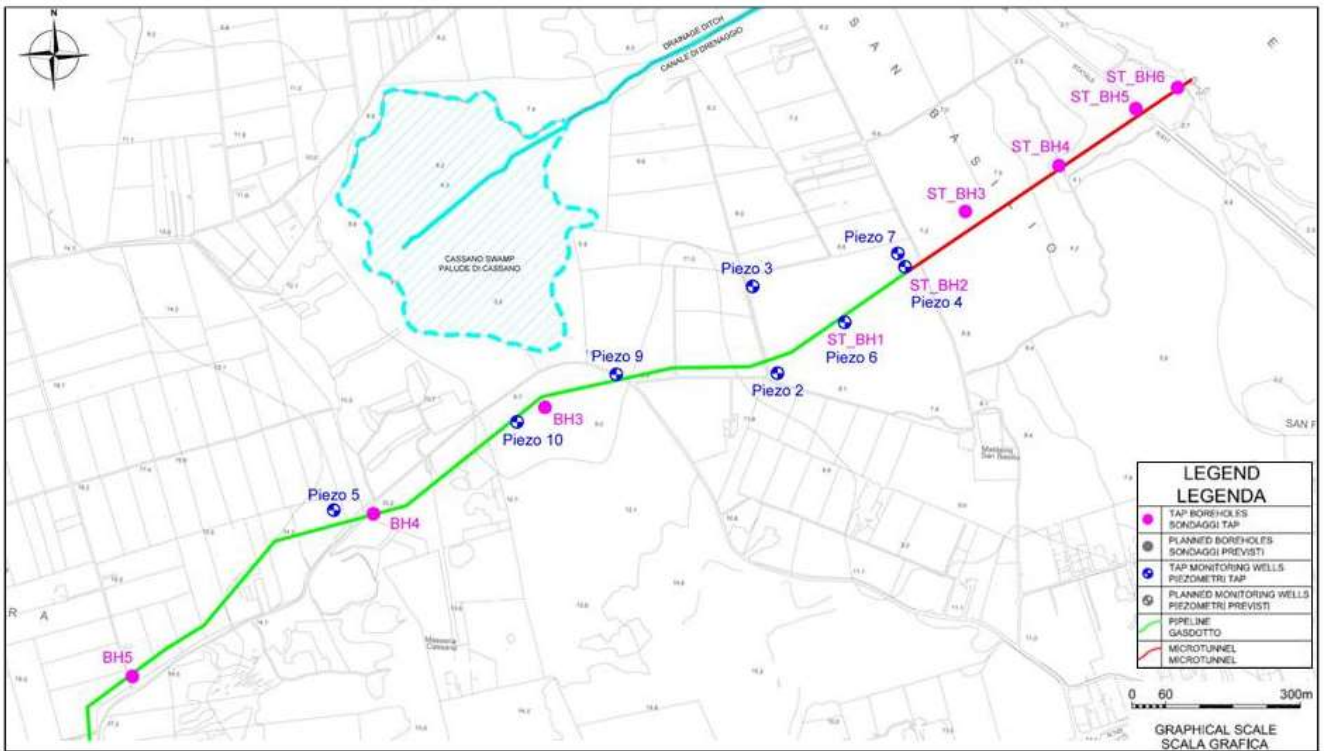


Figura 5 – Ubicazione sondaggi geognostici e piezometri nell'area dell'approdo.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Potenziale interferenza del microtunnel sull'assetto idrogeologico locale	Page:	40 of 86

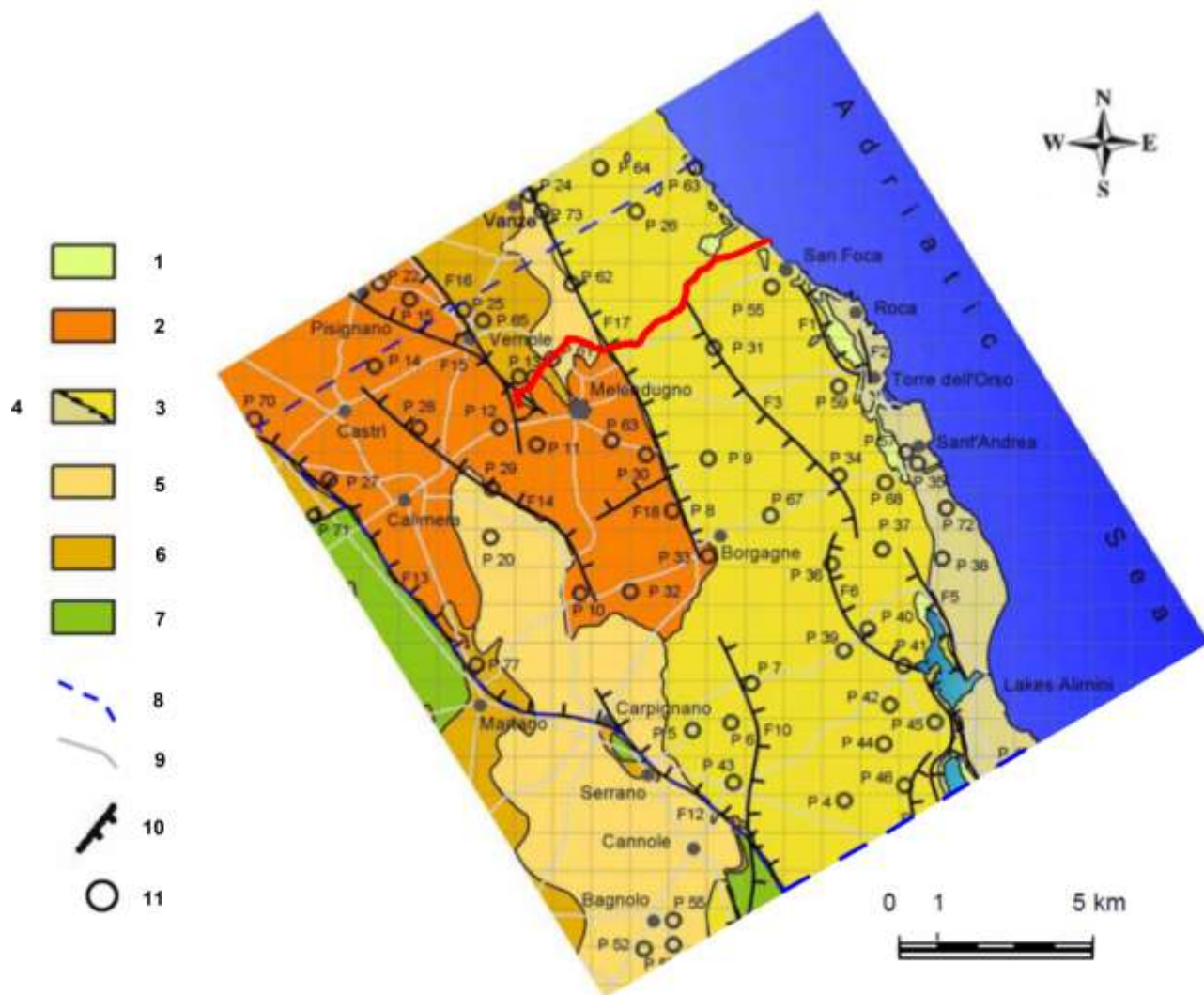




Figura 6 - Mappa geologica. Bruno 2008, modificata.

LEGENDA: (1) Sabbia alluvionale e argilla mista a sabbia (loam) (recenti); (2) Arenaria a grana grossa "Calcareni di Gravina" (Plio-Pleistocene); (3) Sabbia detritica con strati di calcarenite interstratificati, "Calcareni del Salento" (Pliocene inferiore); (4) Calcilutite glauconitica "Sabbie di Uggiano" (Pliocene); (5) Calcareni a grana media con strati di calcare marnoso interstratificati "Calcareni di Andrano" (Miocene superiore); (6) Calcareni marnosa a grana fine "Pietra Leccese" (Miocene superiore); (7) Calcare e calcare dolomitico "Calcari di Altamura" (Cretaceo superiore); (8) contorno dell'area investigata; (9) strade principali; (10) faglie; (11) registrazioni (log) di trivellazione.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	
 SAIPEM	Doc. Title:	Approdo Italiano Caratterizzazione geotecnica del tratto offshore del Microtunnel	Page:	41 of 86

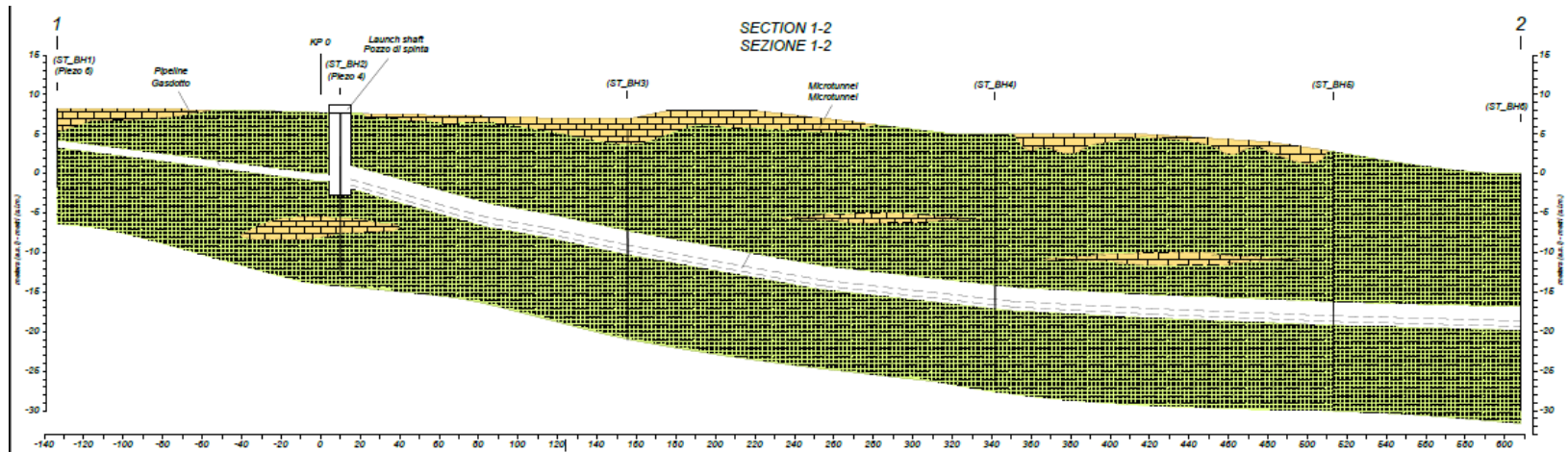




Figura 7 - Sezione idrogeologica del microtunnel, che attraversa ST BH1, ST BH2, ST BH3, ST BH4, ST BH5, ST BH6.

LEGENDA: calcareniti (giallo), sabbie (verde).

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	
 SAIPEM	Doc. Title:	Approdo Italiano Caratterizzazione geotecnica del tratto offshore del Microtunnel	Page:	42 of 86

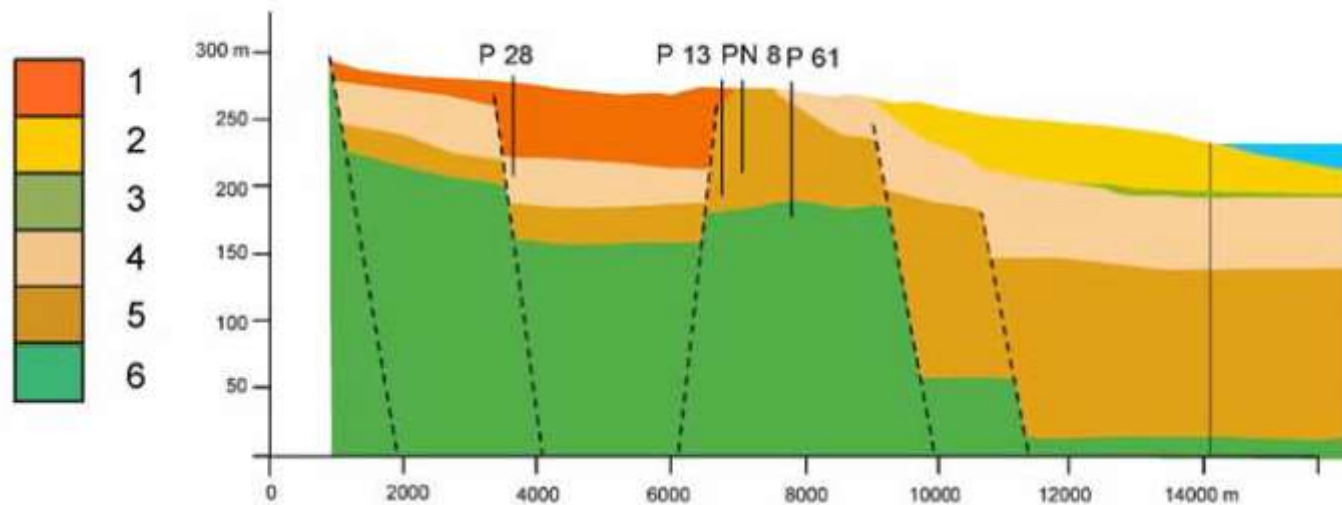


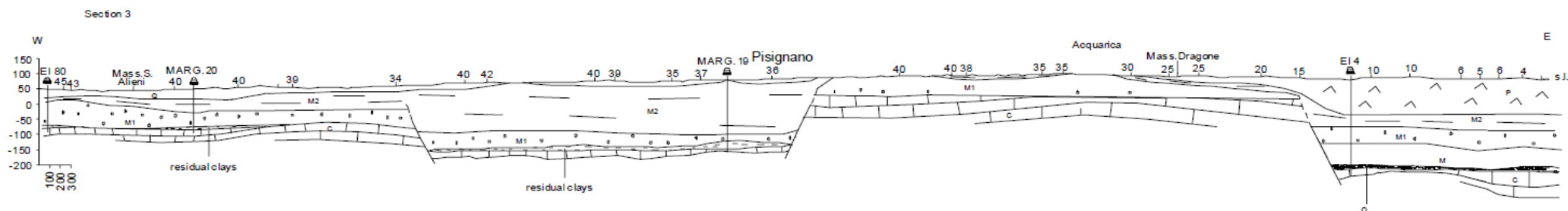


Figura 8 - Sezione trasversale est-ovest idrogeologica (situata a meno di 1 km a nord di S. Foca). Bruno 2008, modificata.

LEGENDA: (1) arenaria a grana grossa, (2) sabbia con strati di arenaria interstratificati, (3) argilla sabbiosa e marna argillosa, (4) calcarenite a grana media con strati di calcare marnoso interstratificati, (5) arenaria marnosa a grana fine, (6) calcare fratturato e calcare dolomitico.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	
 SAIPEM	Doc. Title:	Approdo Italiano Caratterizzazione geotecnica del tratto offshore del Microtunnel	Page:	43 of 86














	well
	fault
	Q : Gravina Calcarente (Pleistocene)
	P : Leuca Formation and Uggiano La Chlesa Formation (Lower-Upper Pliocene)
	M2 : Andrano Calcarente (Upper Miocene)
	M1 : Pietra leccese (Lower-Upper Miocene)
	M : Lecce Formation (Upper Oligocene-Lower Miocene)
	O : Galatone Formation (Upper Oligocene)
	C : Altamura Limestone (Cretaceous)

Figura 9 - Sezione trasversale idrogeologica (situata circa 2 km a nord di S. Foca). Margiotta 2005, modificato.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	
	Doc. Title:	Approdo Italiano Caratterizzazione geotecnica del tratto offshore del Microtunnel	Page:	44 of 86

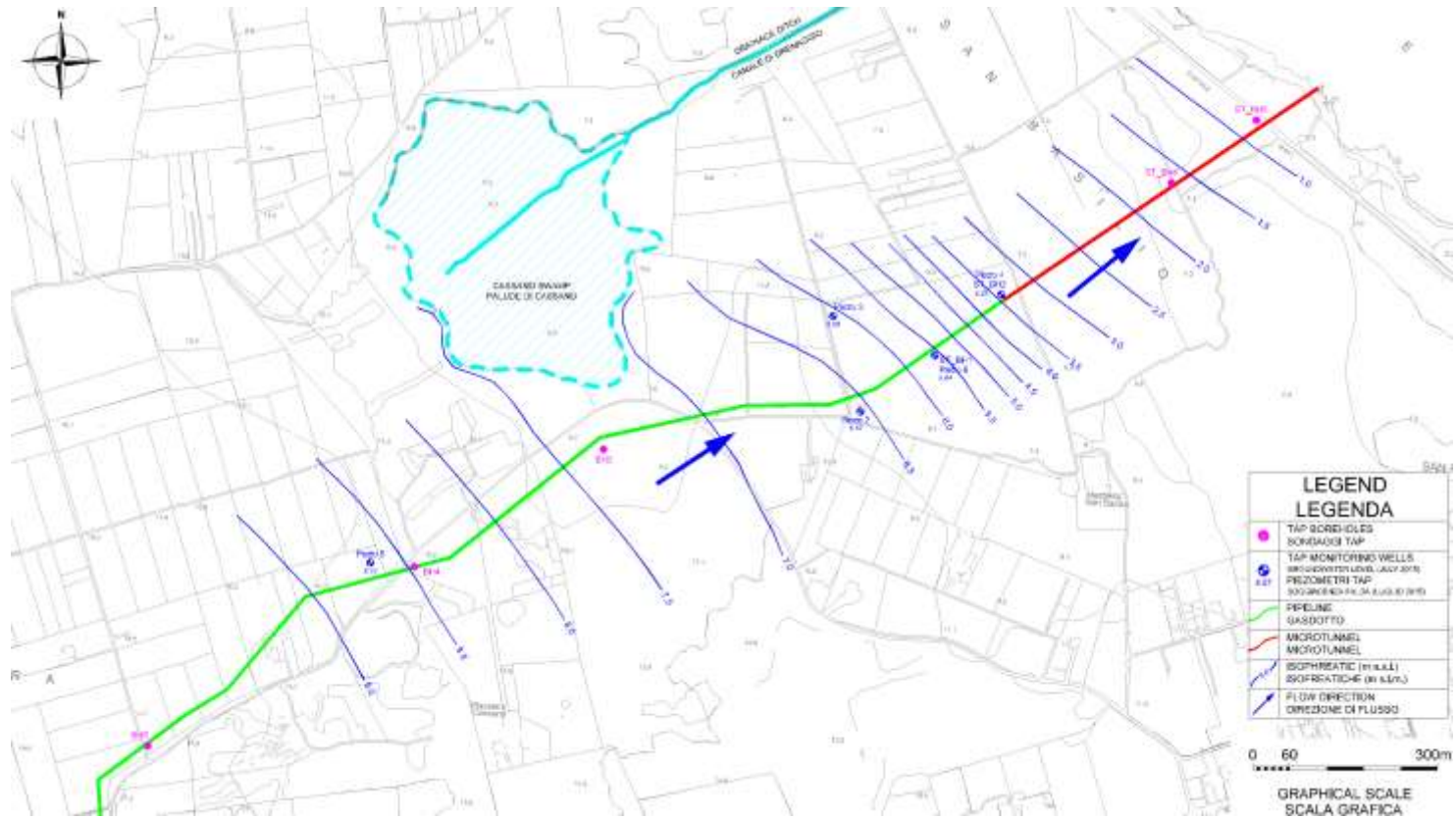




Figura 10 – Carta piezometrica (URS, 2015).

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Approdo Italiano Caratterizzazione geotecnica del tratto offshore del Microtunnel	Page:	45 of 86

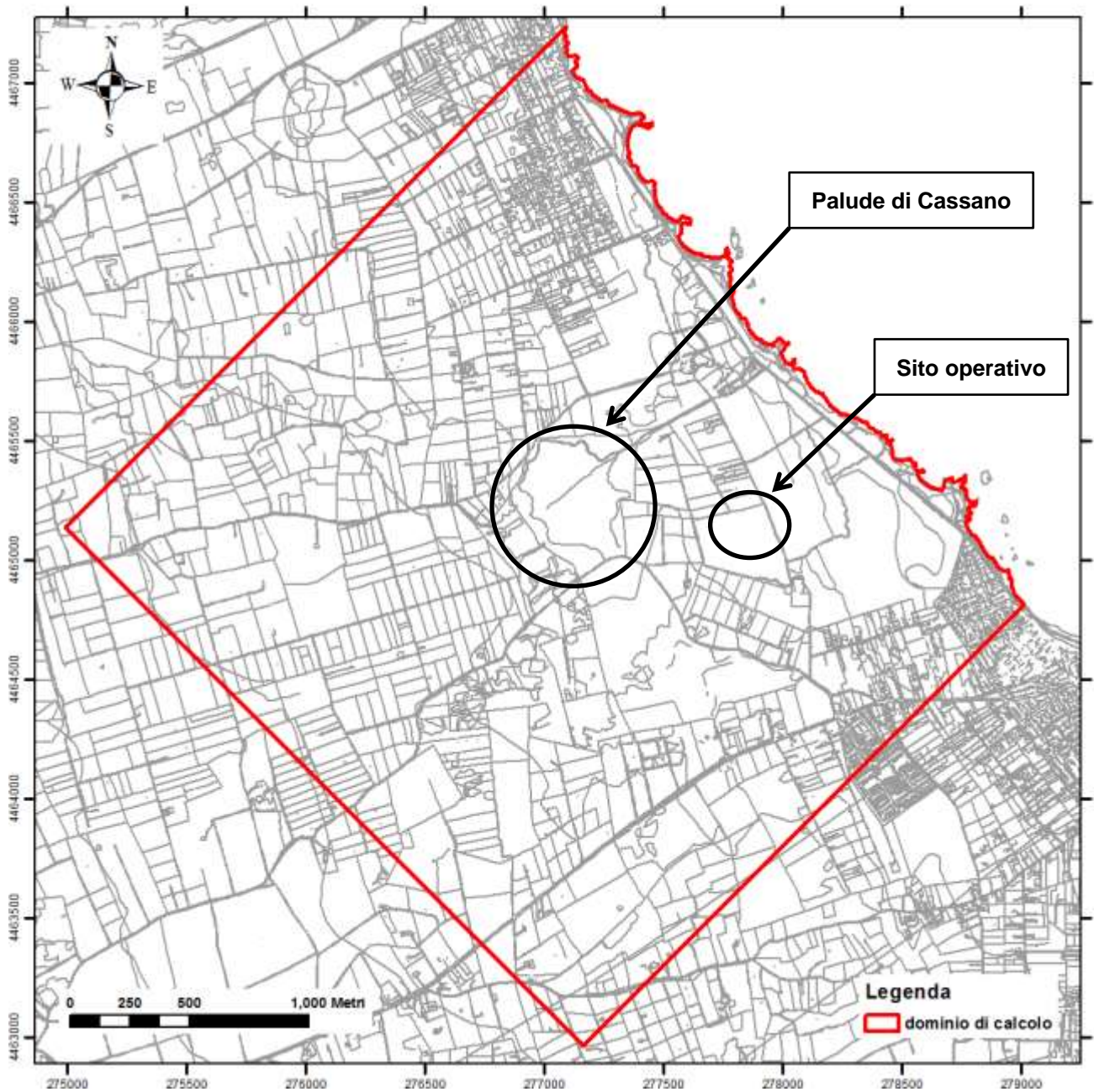




Figura 11 - Dominio di calcolo del modello numerico

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Approdo Italiano Caratterizzazione geotecnica del tratto offshore del Microtunnel	Page:	46 of 86

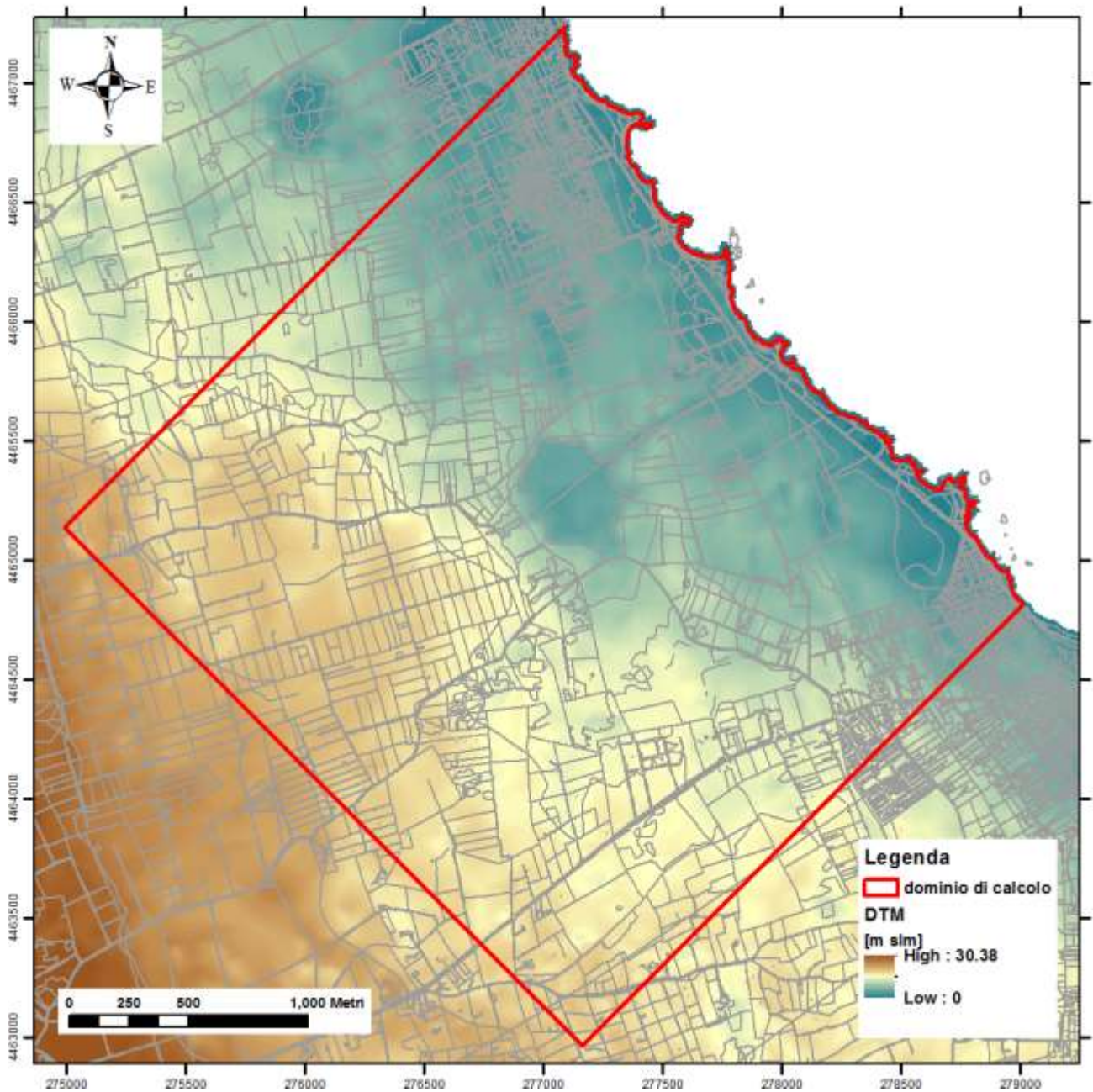




Figura 12 - Modello Digitale del Terreno

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Approdo Italiano Caratterizzazione geotecnica del tratto offshore del Microtunnel	Page:	47 of 86

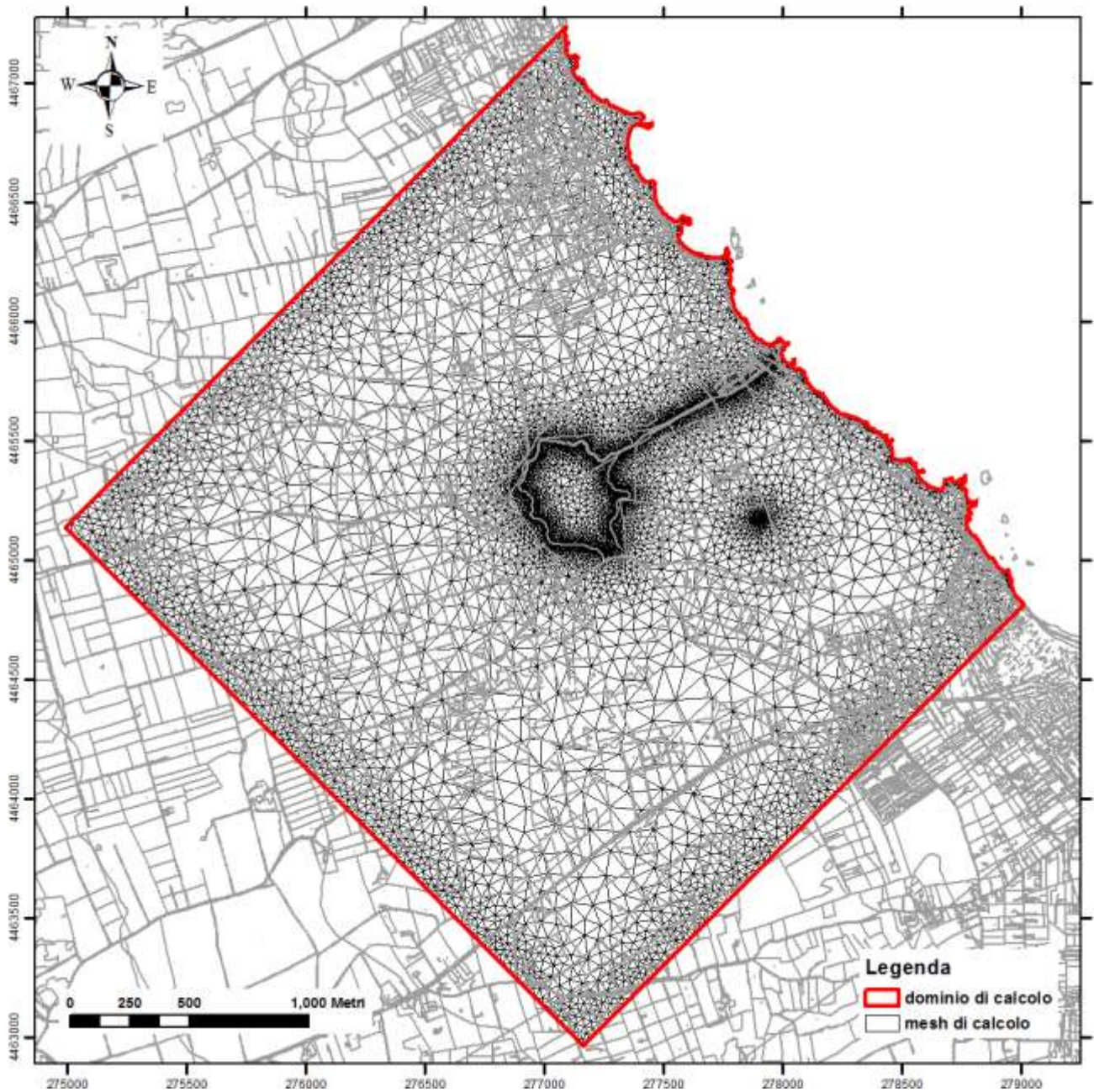




Figura 13 - Mesh triangolare

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
	Doc. Title:	Approdo Italiano Caratterizzazione geotecnica del tratto offshore del Microtunnel	Page:	48 of 86

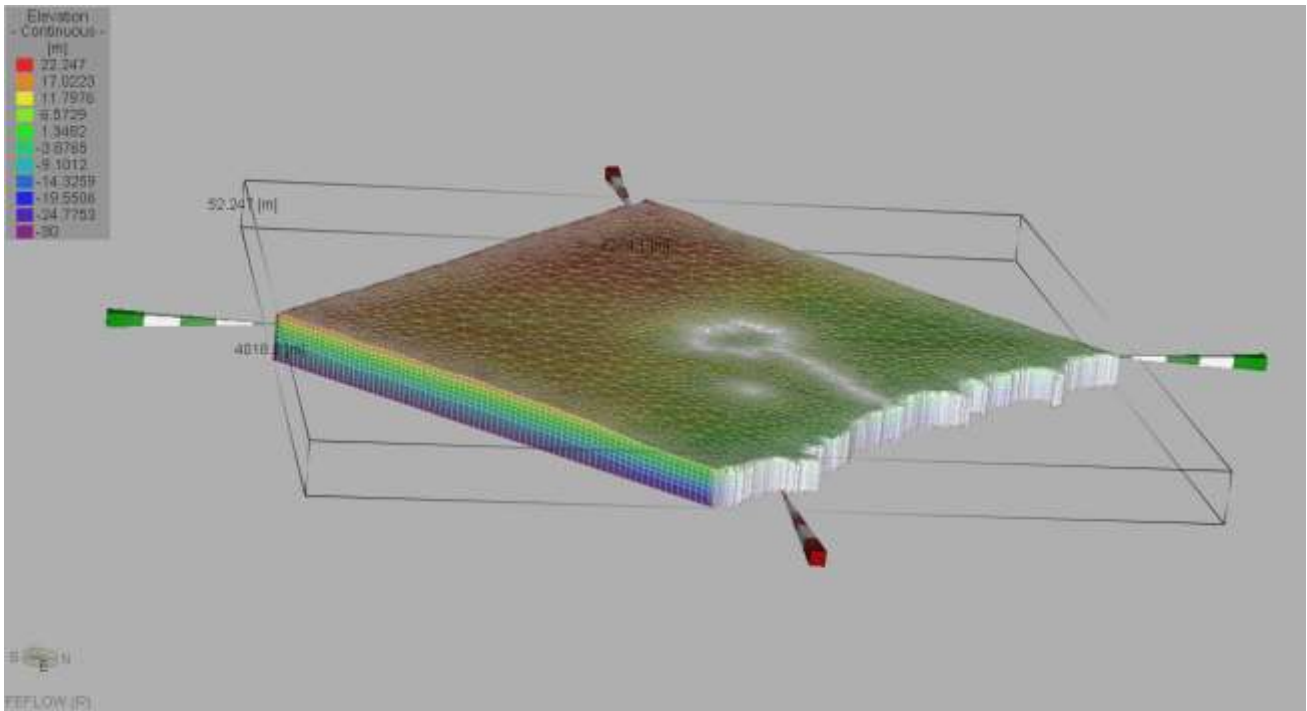




Figura 14 - Vista 3D della mesh triangolare (esagerazione verticale 5:1), particolare illustrativo fuori scala

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Approdo Italiano Caratterizzazione geotecnica del tratto offshore del Microtunnel	Page:	49 of 86

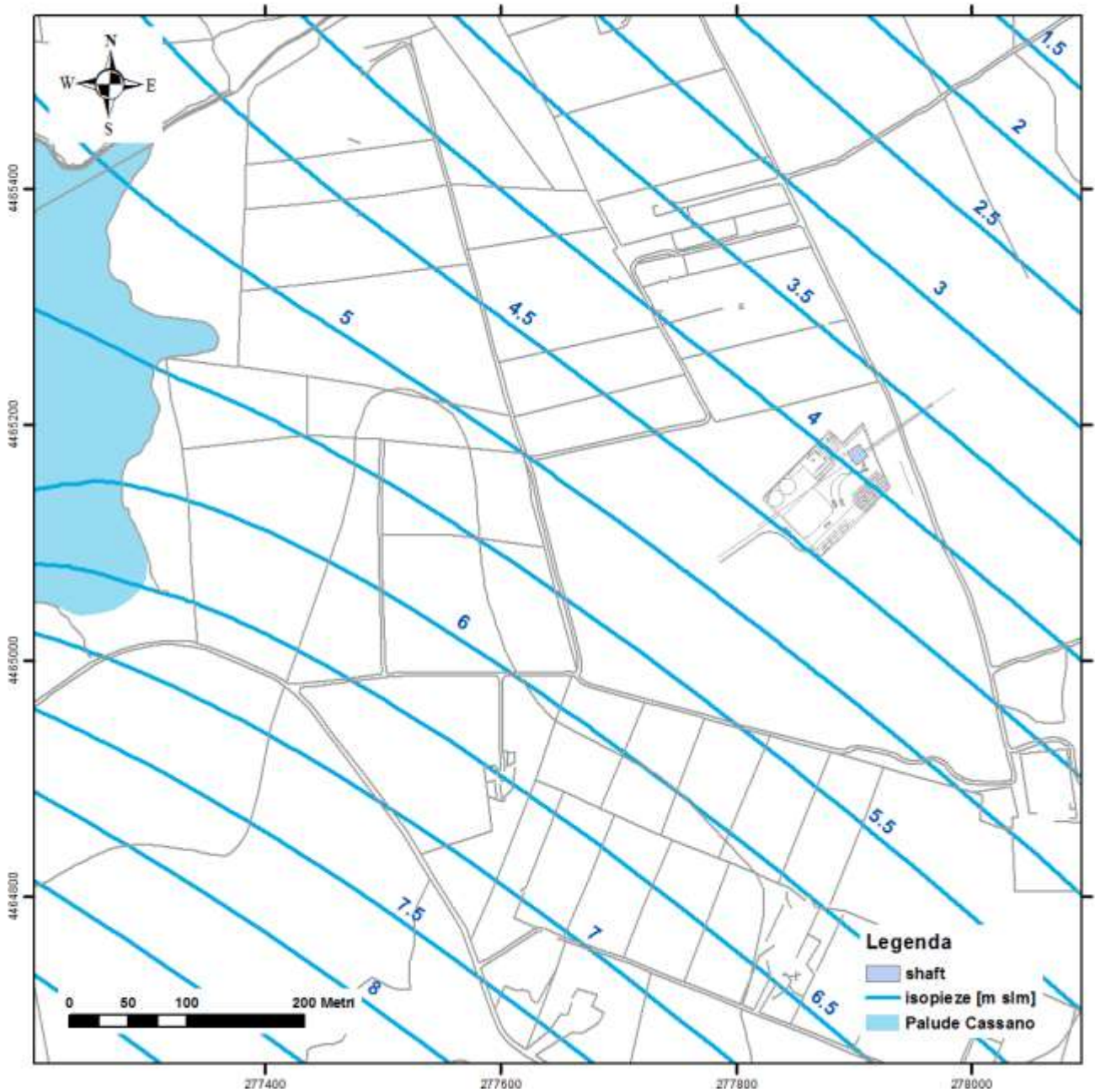


Figura 15 - Piezometria dello scenario 1

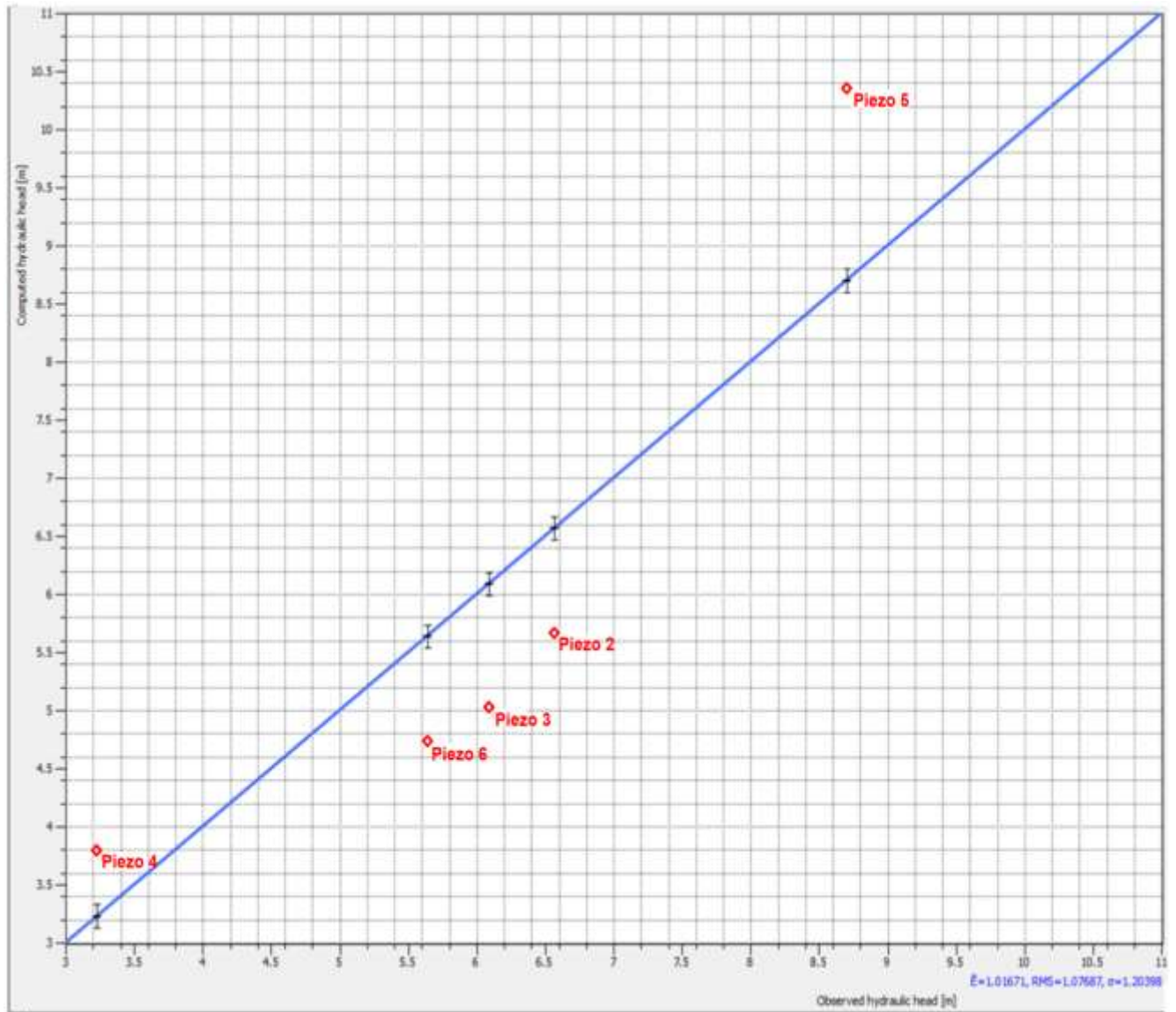


Figura 16 - Scatter plot relativo alla simulazione dello scenario 1 (valori in m slm)

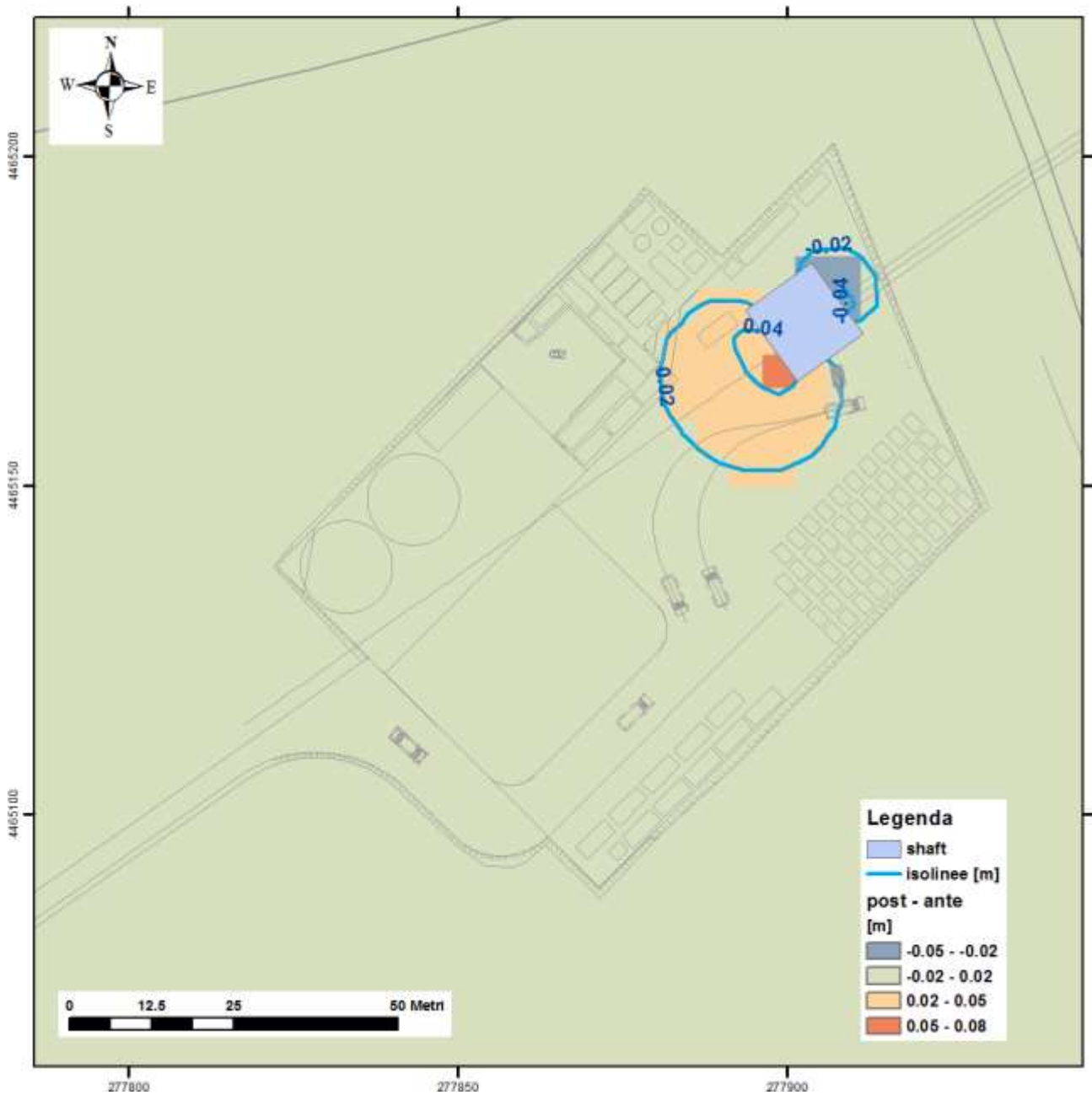




Figura 17 - Post-operam vs. ante-operam (valori in metri) per scenario 1a

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Approdo Italiano Caratterizzazione geotecnica del tratto offshore del Microtunnel	Page:	52 of 86

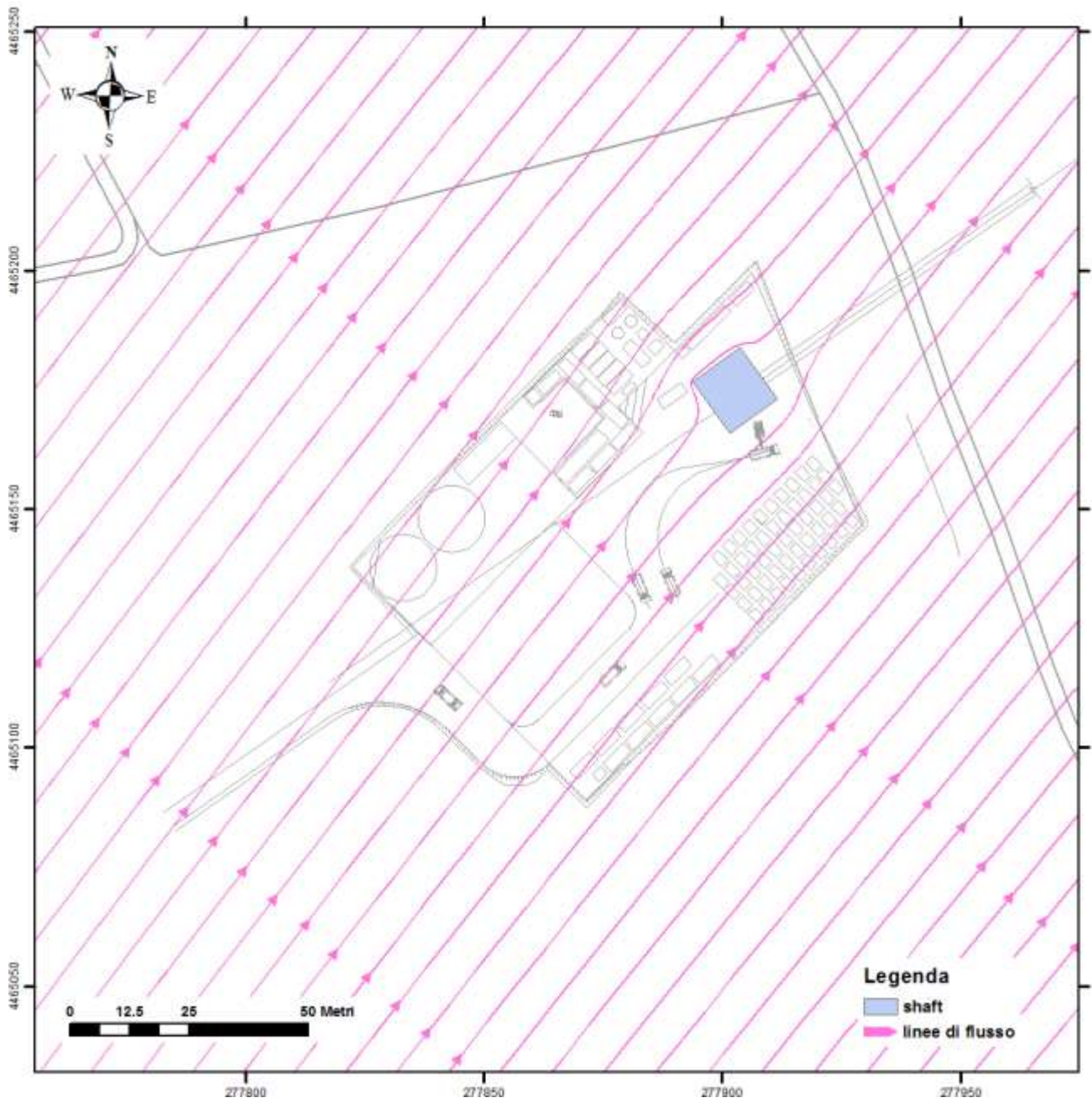




Figura 18 - Linee di flusso in prossimità dello scavo nello scenario 1a

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Approdo Italiano Caratterizzazione geotecnica del tratto offshore del Microtunnel	Page:	53 of 86

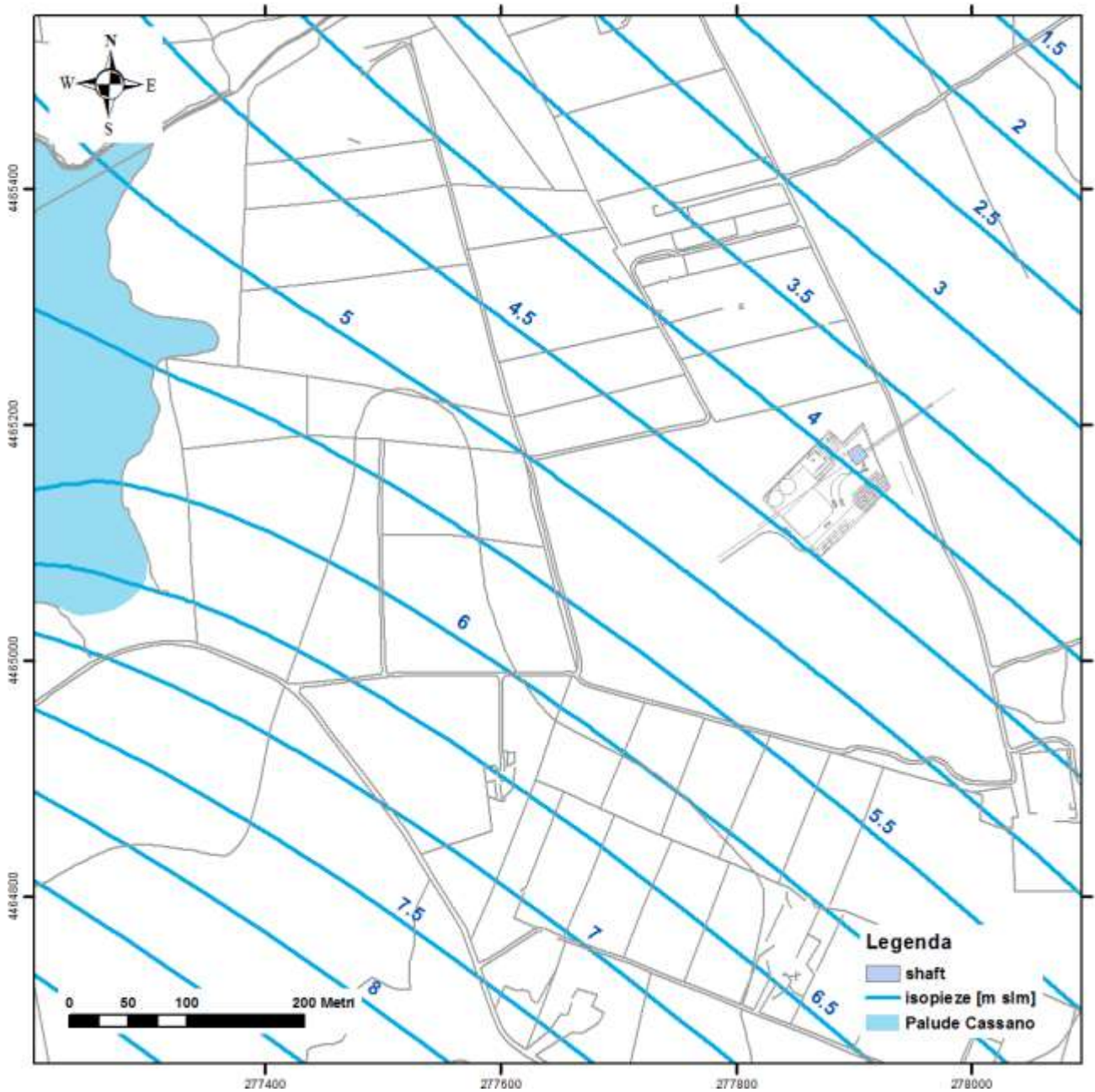


Figura 19 - Piezometria dello scenario 2

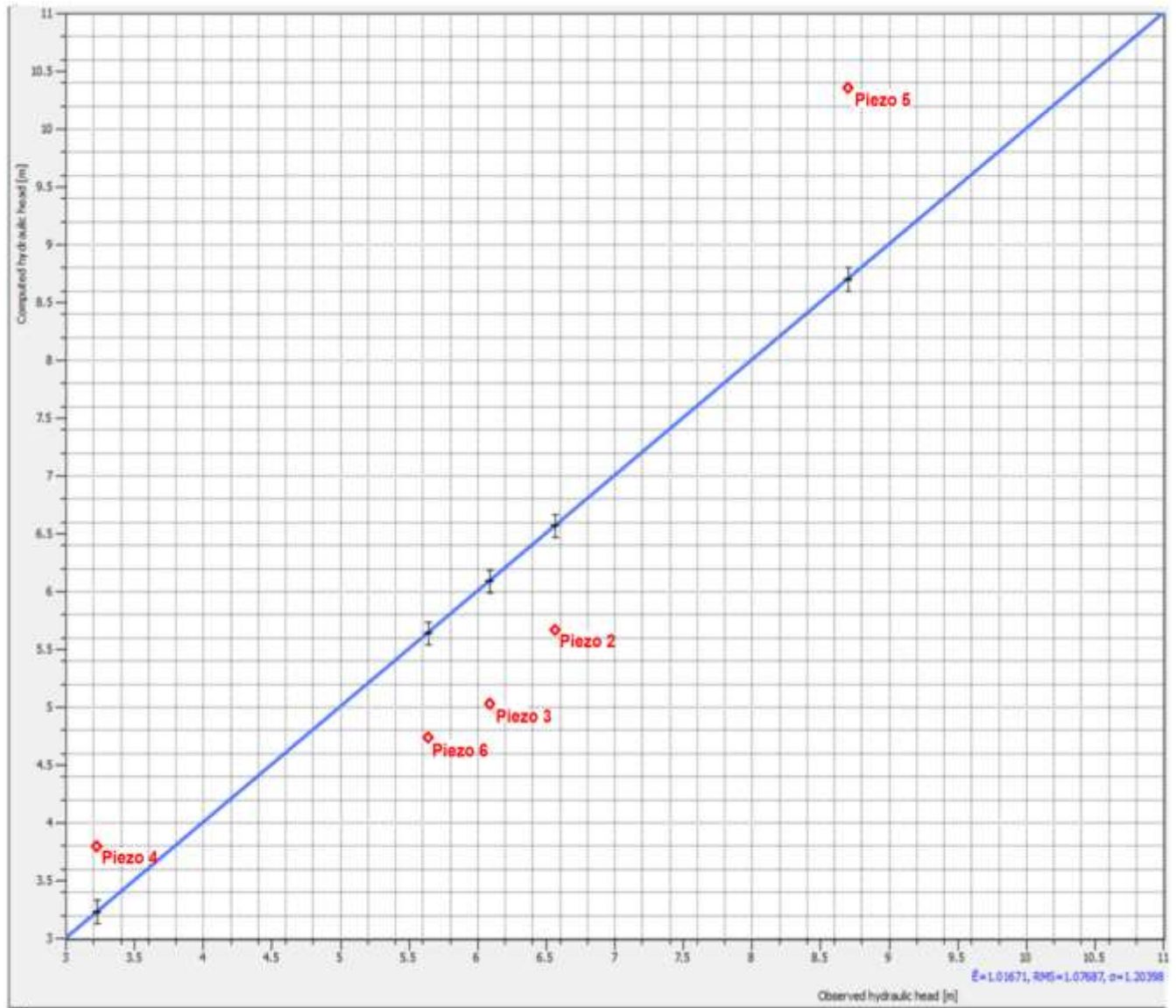


Figura 20 - Scatter plot relativo alla simulazione dello scenario 2 (valori in m slm)

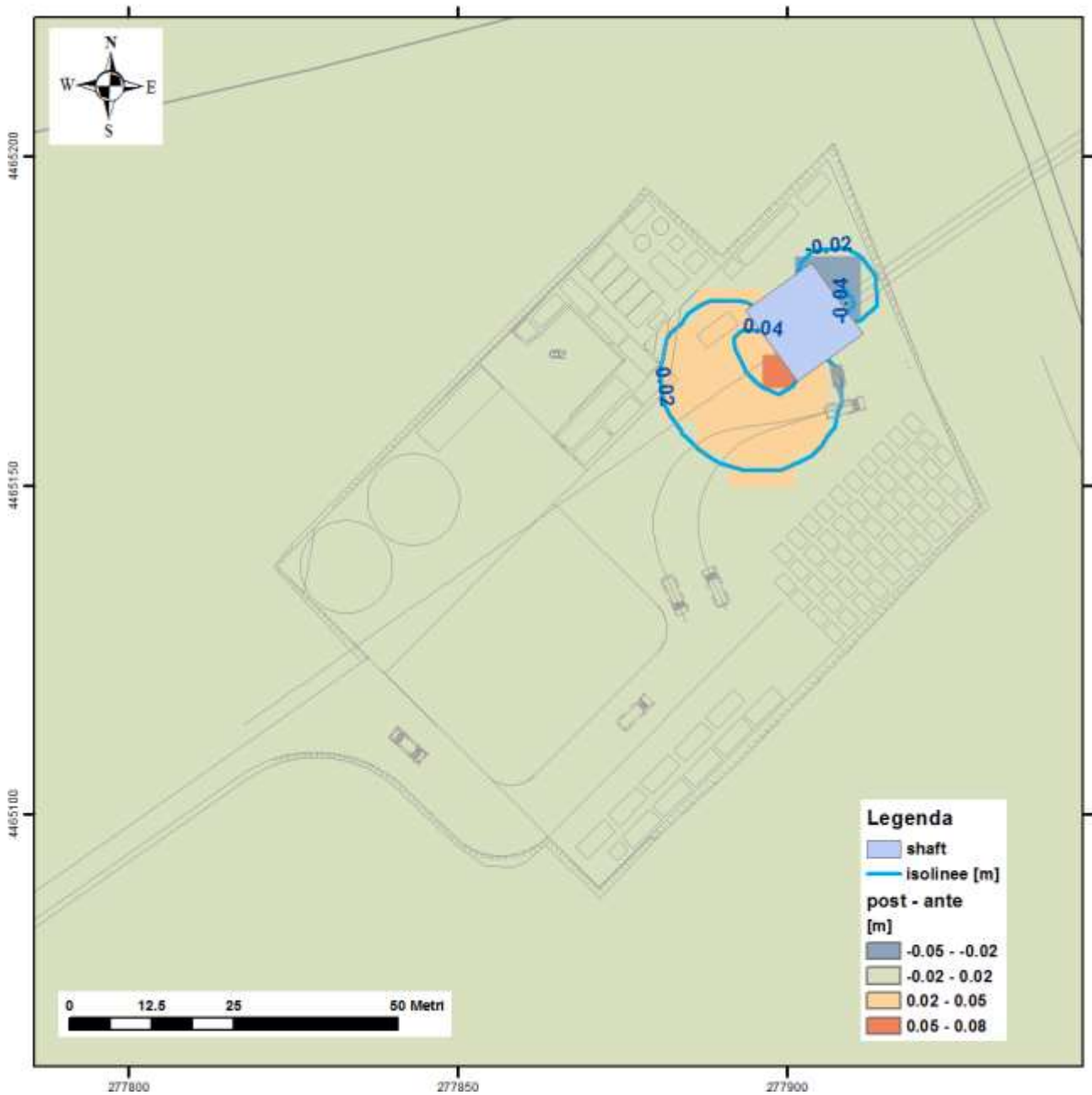




Figura 21 - Post-operam vs. ante-operam (valori in metri) per scenario 2a

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Approdo Italiano Caratterizzazione geotecnica del tratto offshore del Microtunnel	Page:	56 of 86

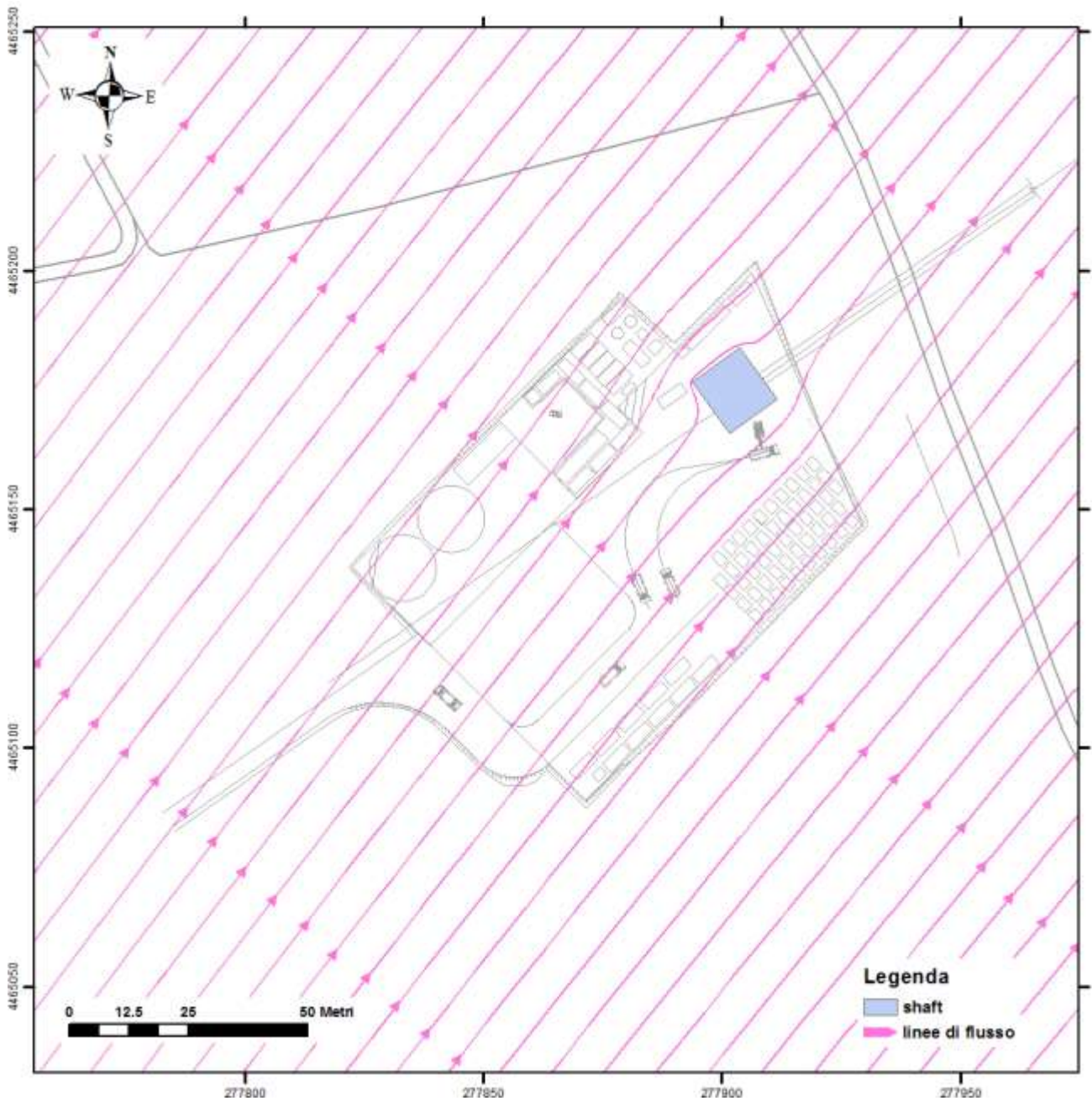




Figura 22 - Linee di flusso in prossimità dello scavo nello scenario 2a

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Approdo Italiano Caratterizzazione geotecnica del tratto offshore del Microtunnel	Page:	57 of 86

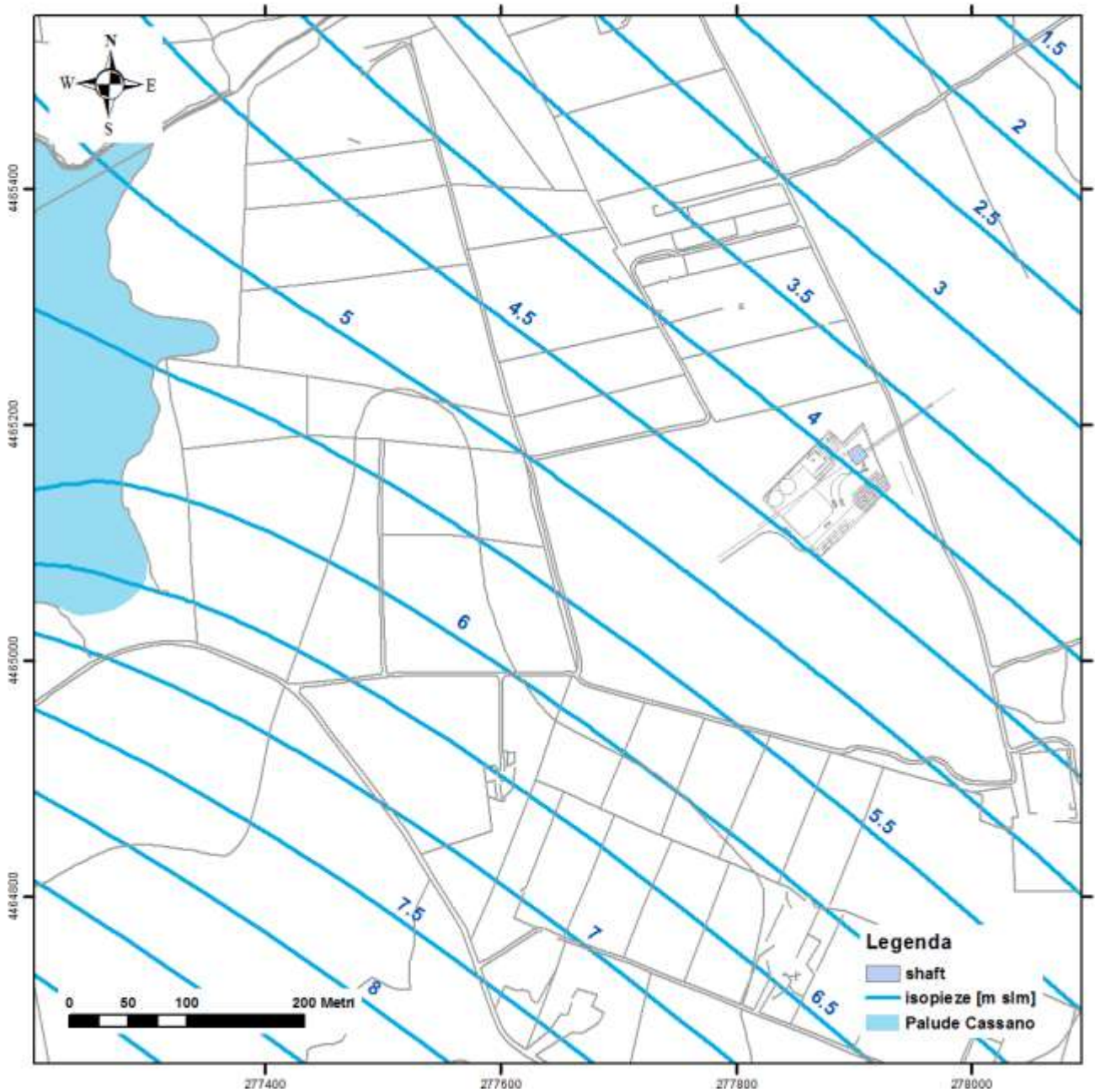


Figura 23 - Piezometria dello scenario 3

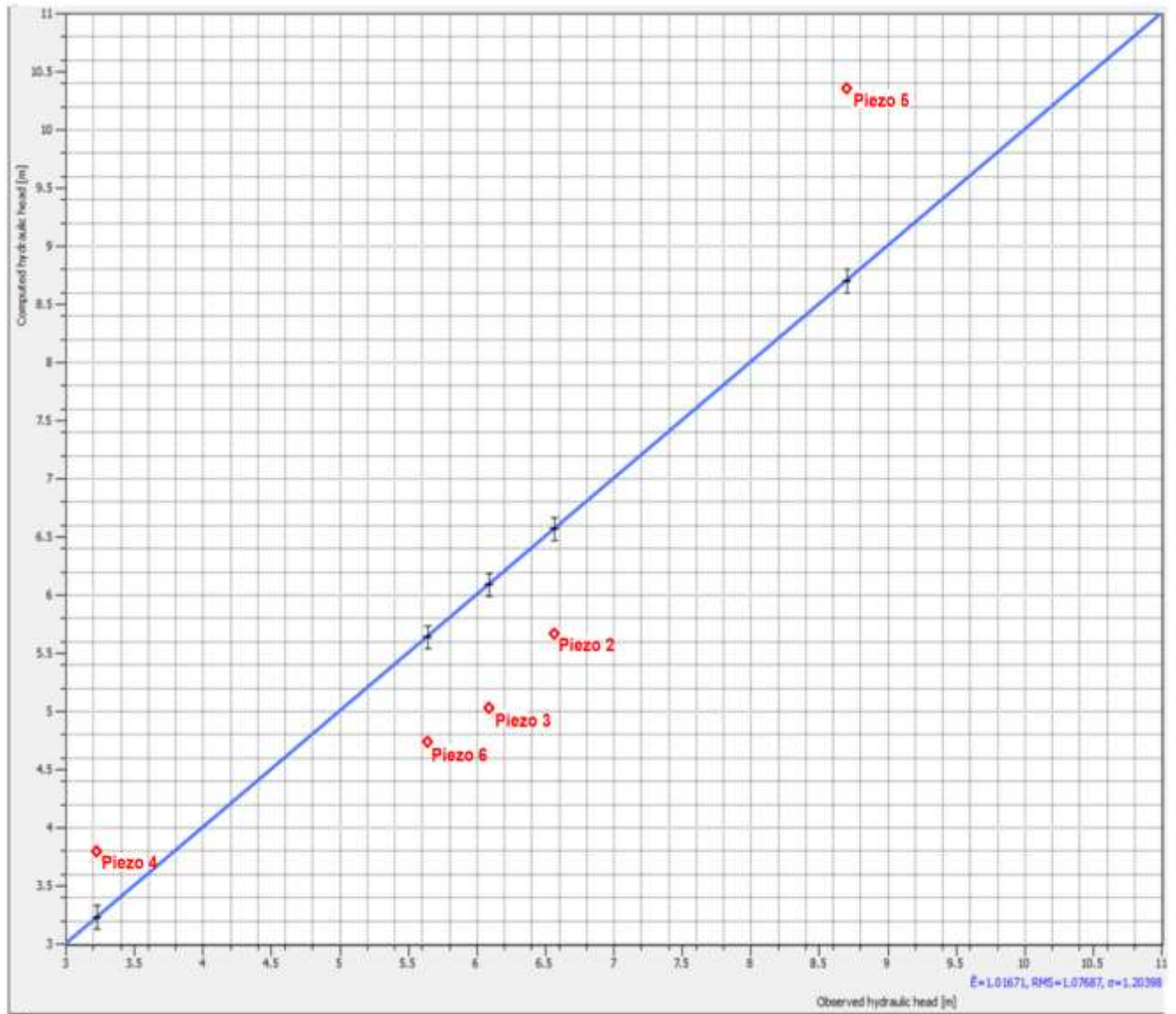


Figura 24 - Scatter plot relativo alla simulazione dello scenario 3 (valori in m slm)

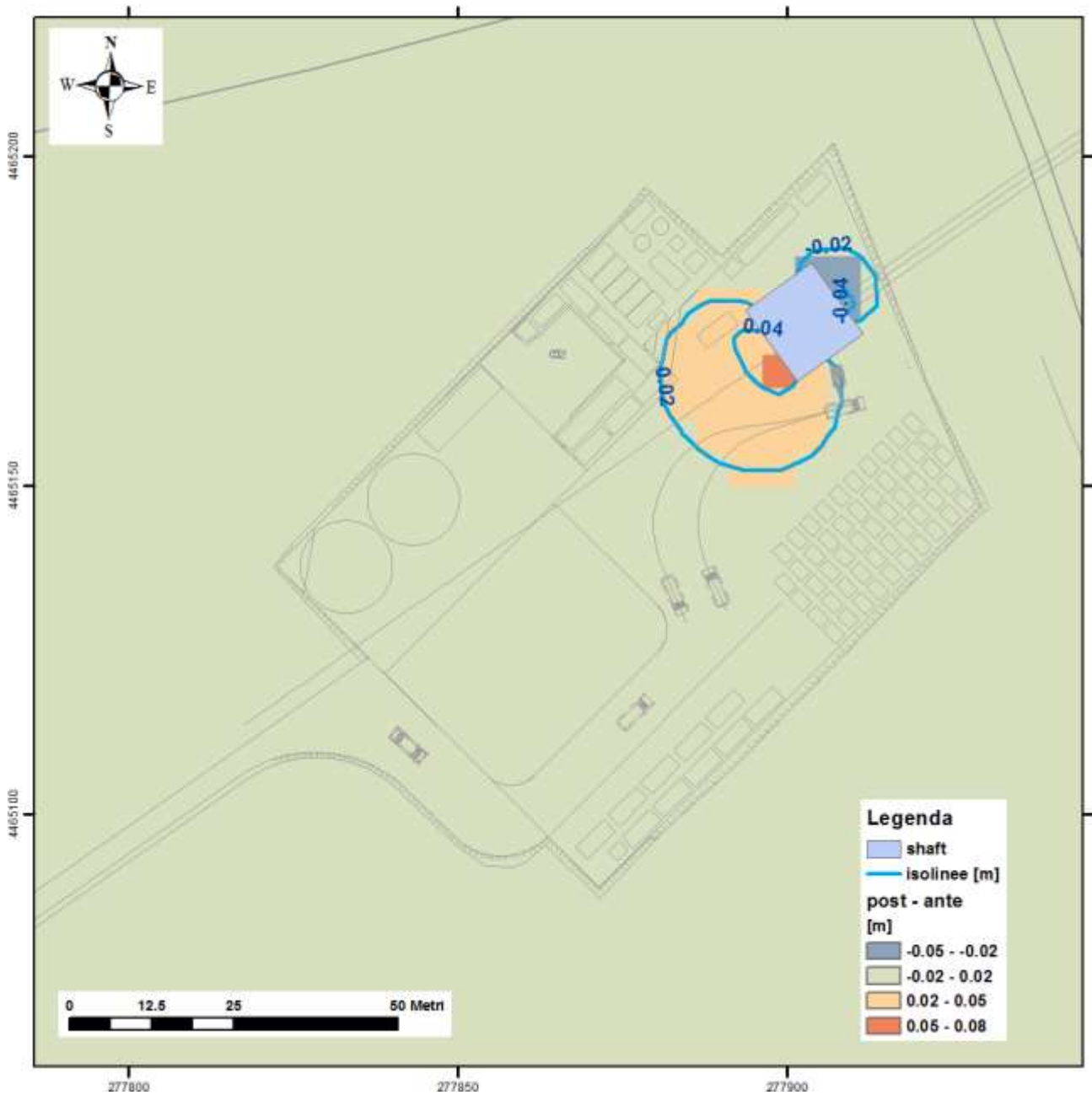




Figura 25 - Post-operam vs. ante-operam (valori in metri) per scenario 3a

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Approdo Italiano Caratterizzazione geotecnica del tratto offshore del Microtunnel	Page:	60 of 86

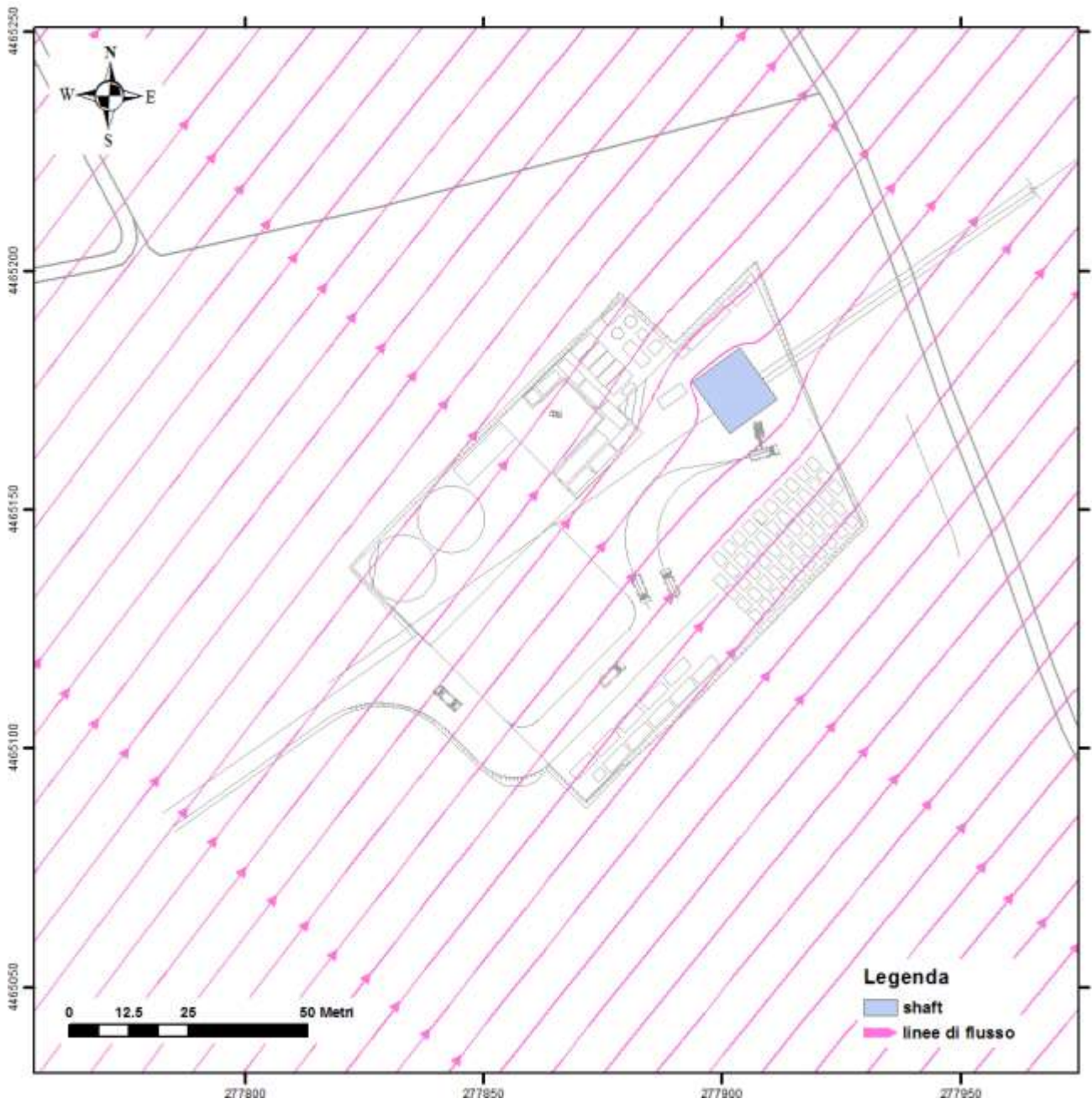


Figura 26 - Linee di flusso in prossimità dello scavo nello scenario 3a

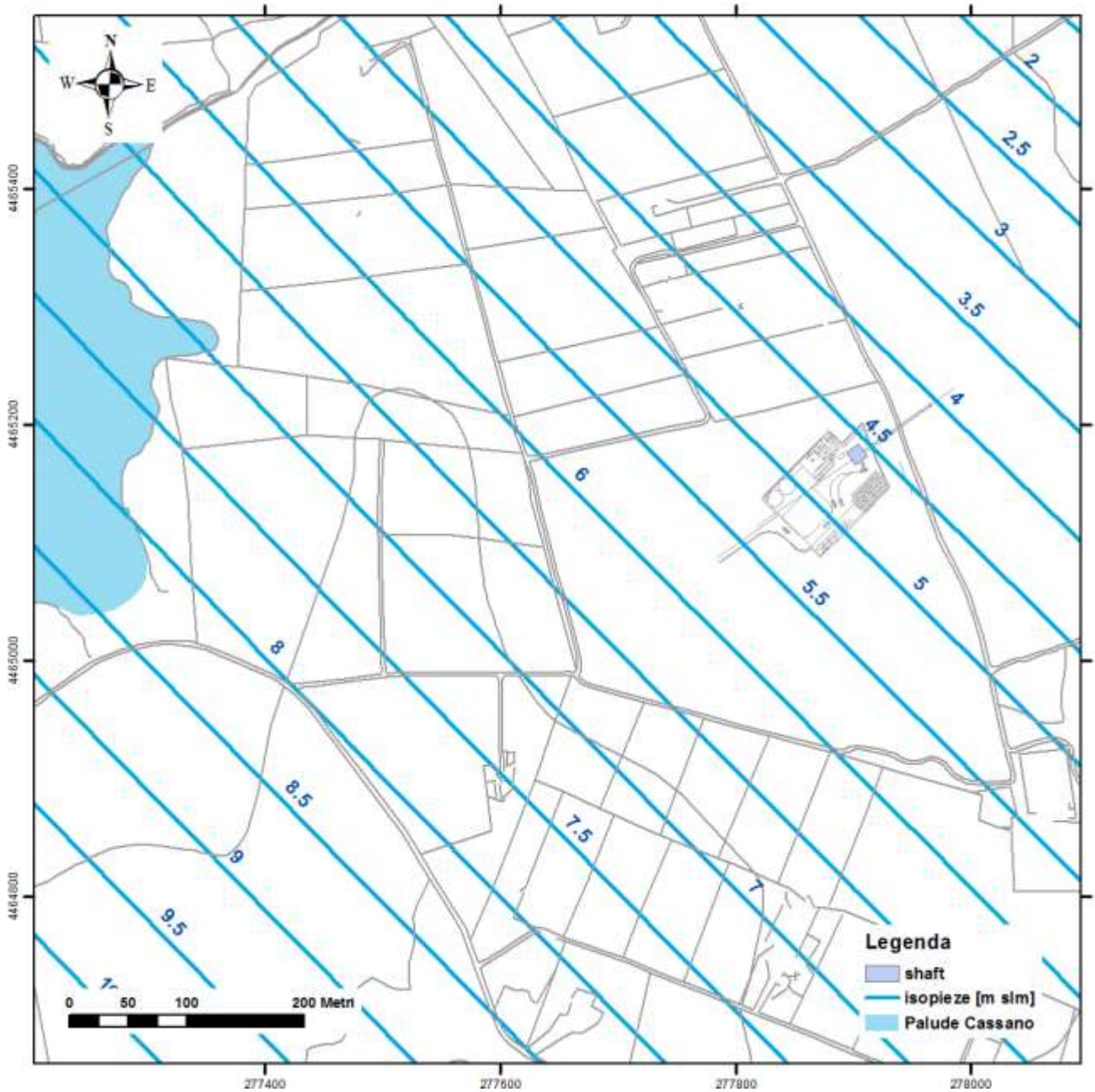


Figura 27 - Piezometria dello scenario 4

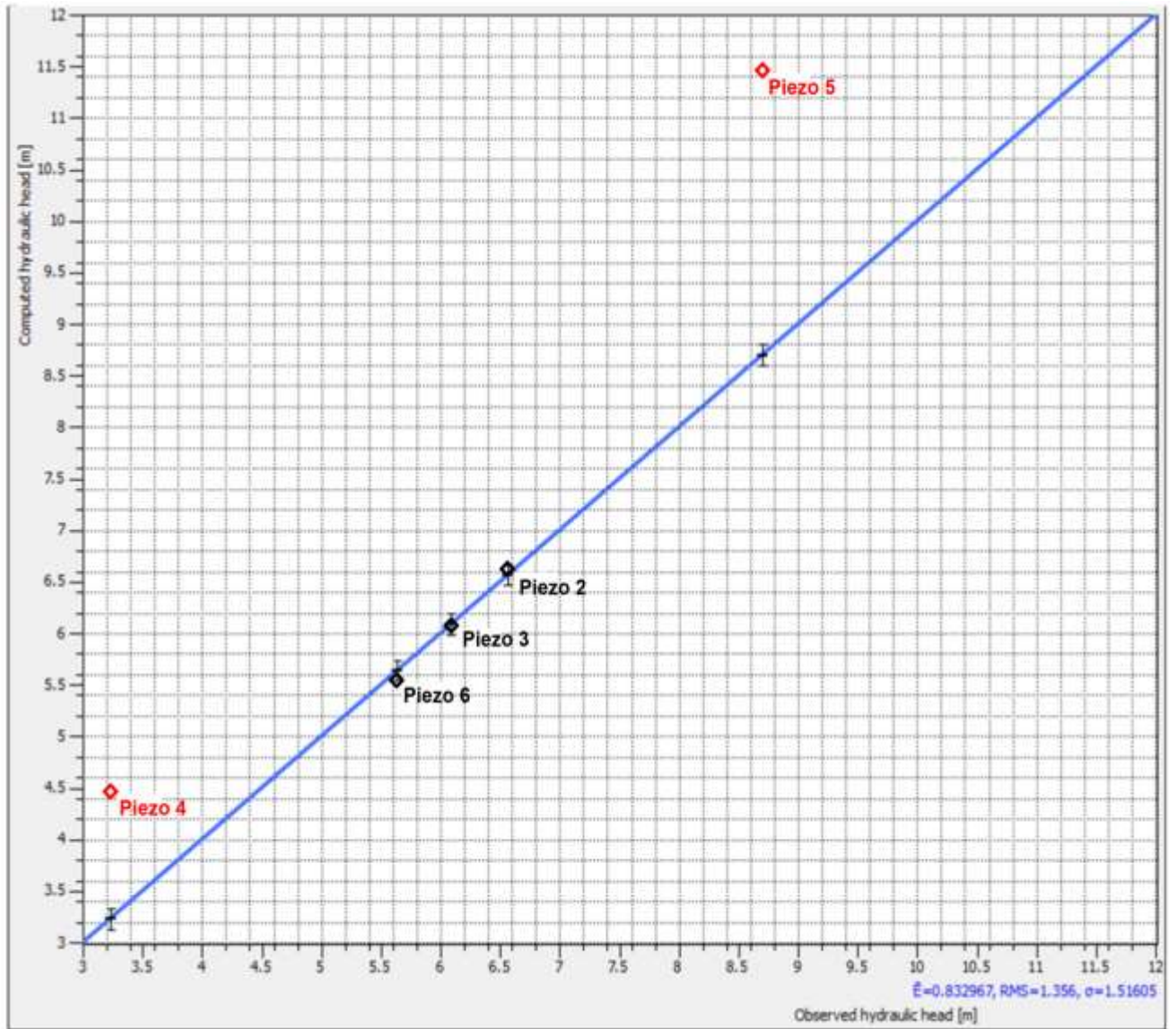


Figura 28 - Scatter plot relativo alla simulazione dello scenario 4 (valori in m slm)

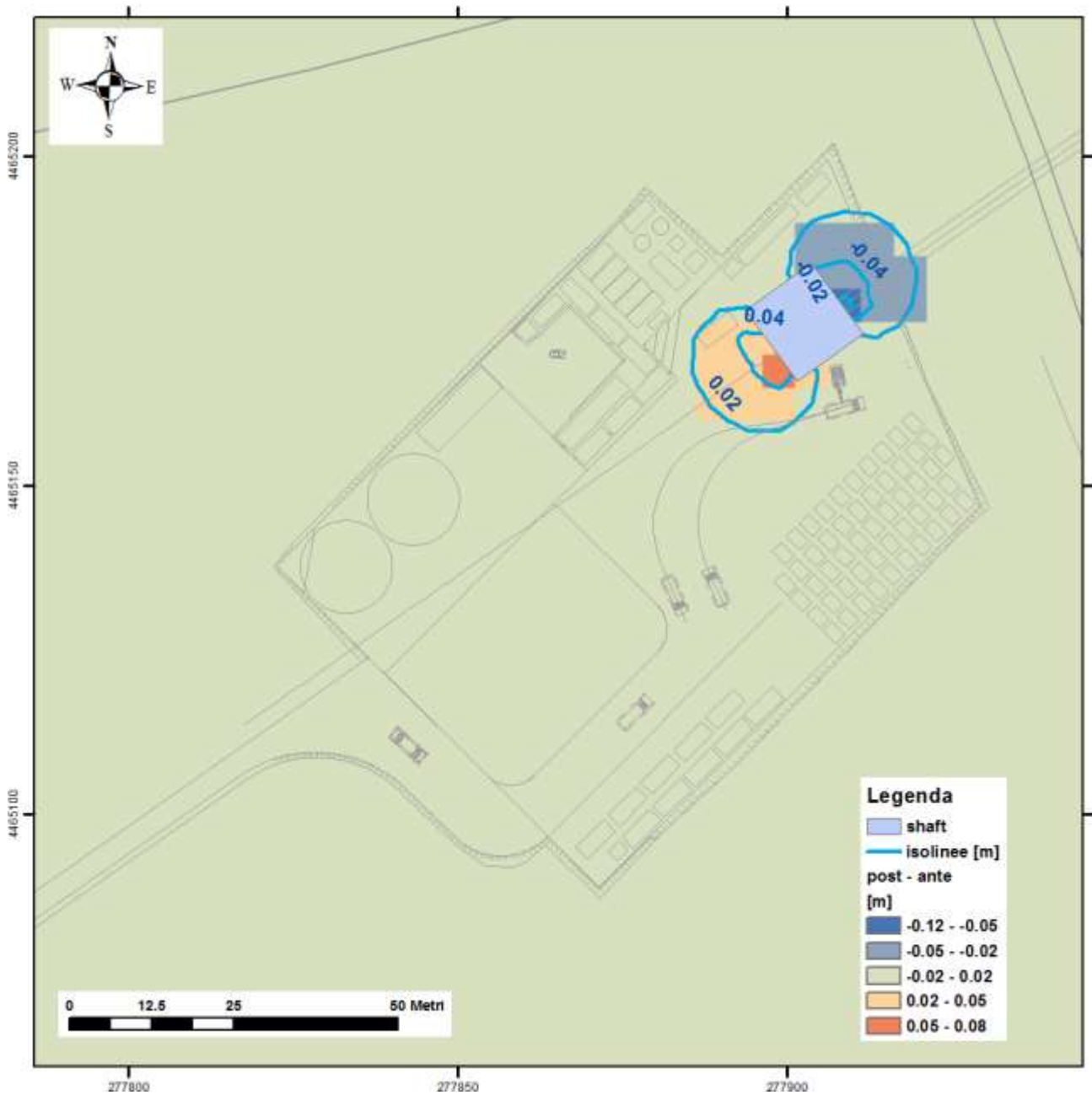




Figura 29 - Post-operam vs. ante-operam (valori in metri) per scenario 4a

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Approdo Italiano Caratterizzazione geotecnica del tratto offshore del Microtunnel	Page:	64 of 86

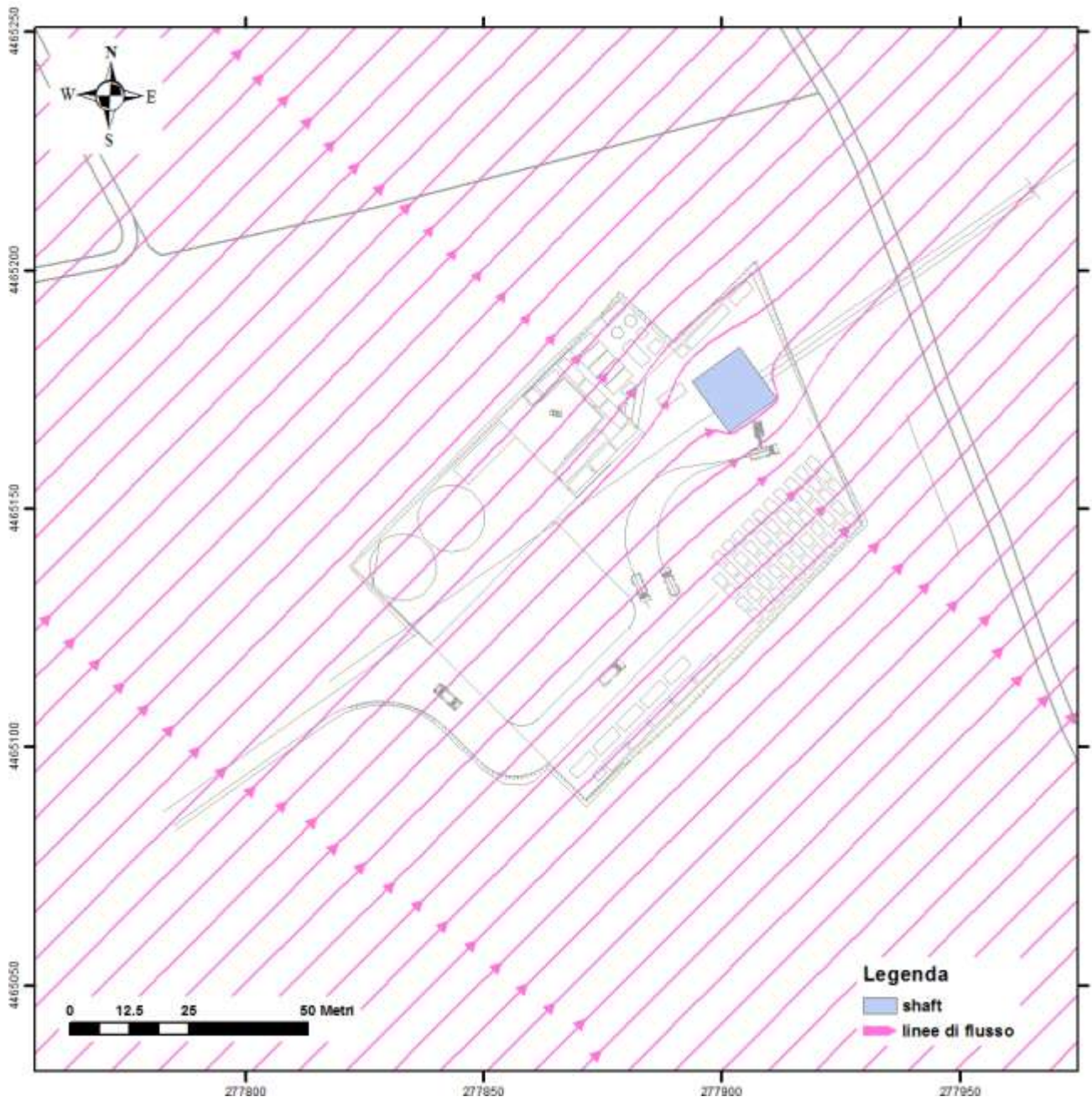


Figura 30 - Linee di flusso in prossimità dello scavo nello scenario 4a

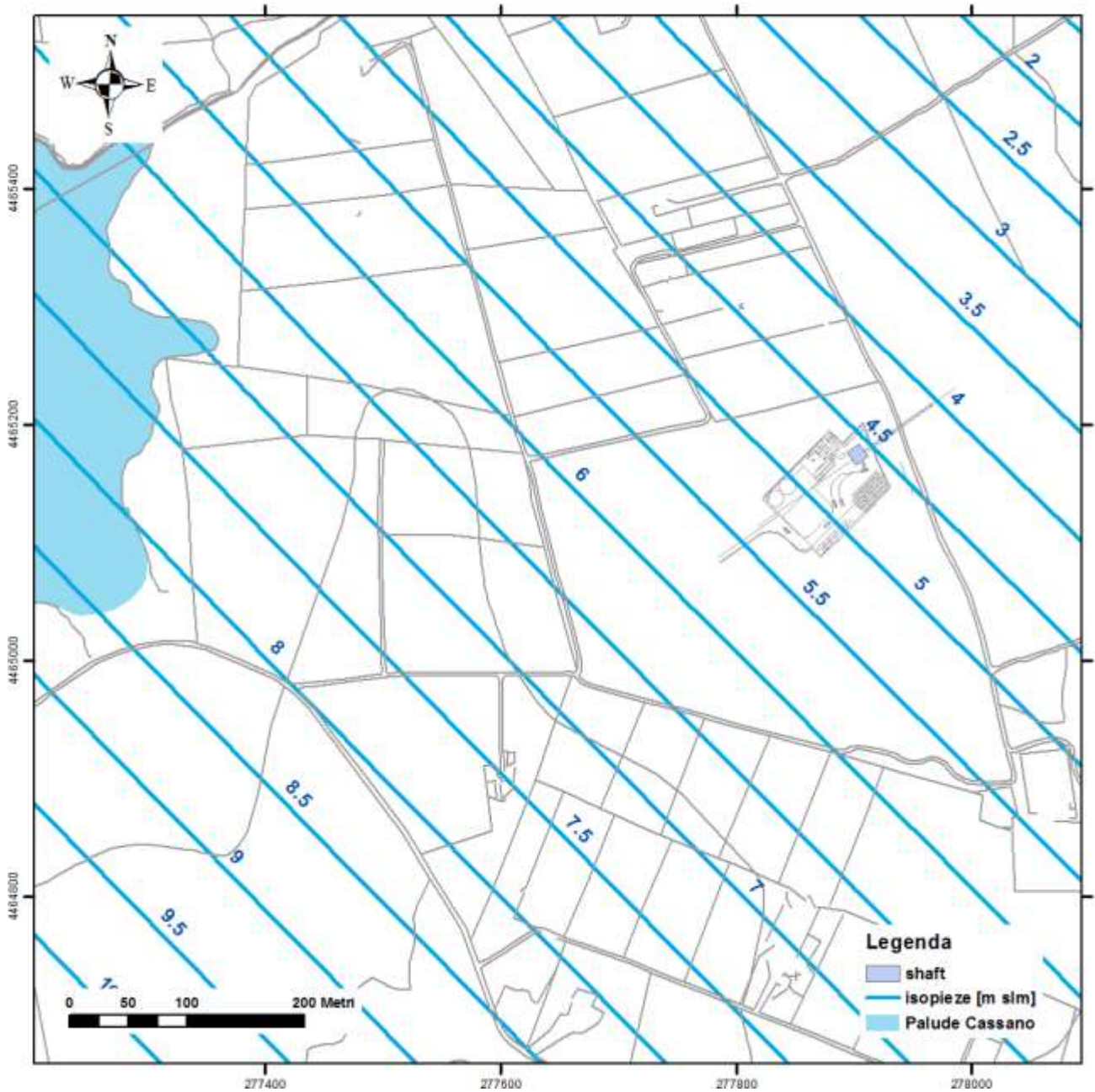


Figura 31 - Piezometria dello scenario 5

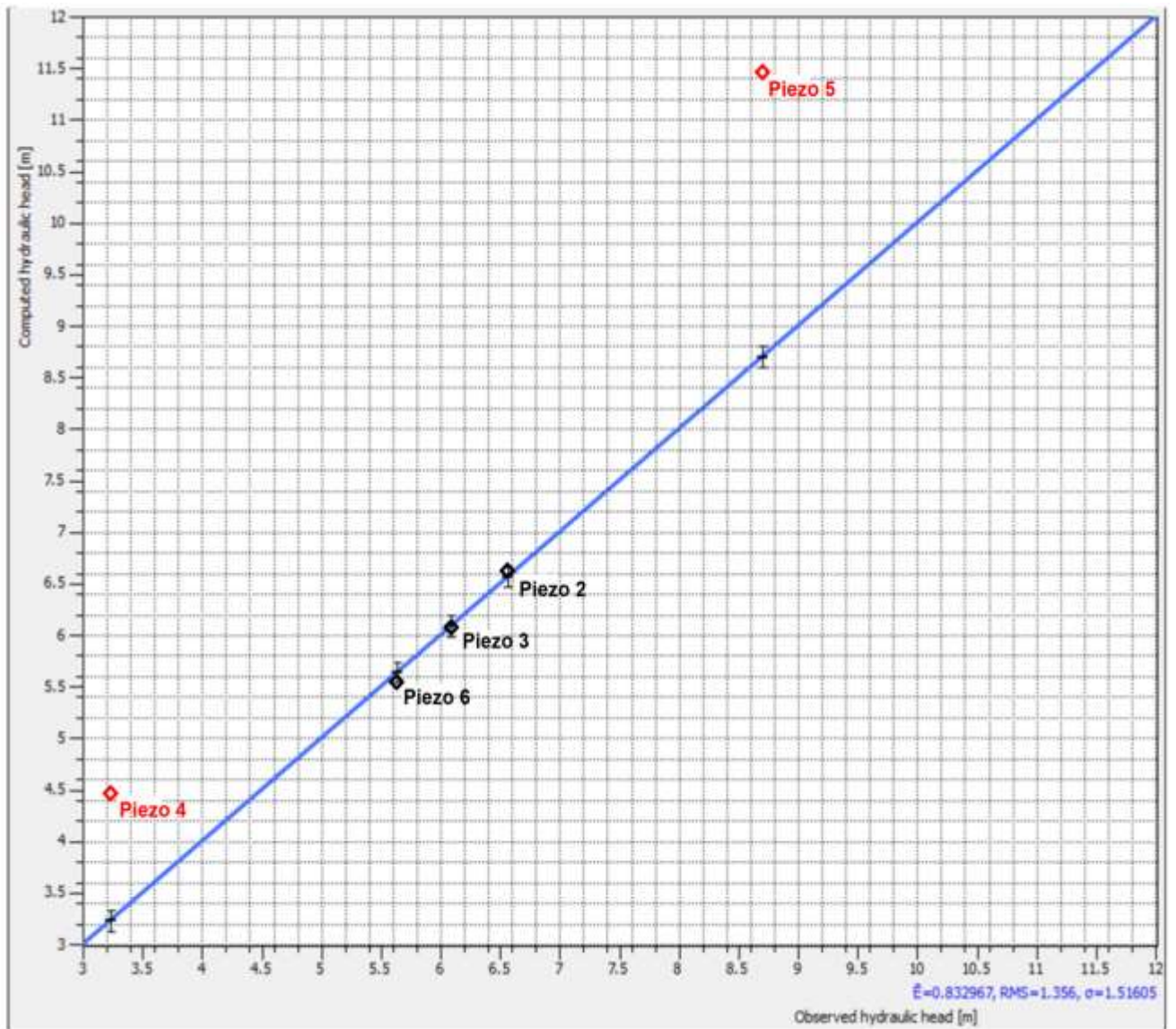


Figura 32 - Scatter plot relativo alla simulazione dello scenario 5 (valori in m slm)

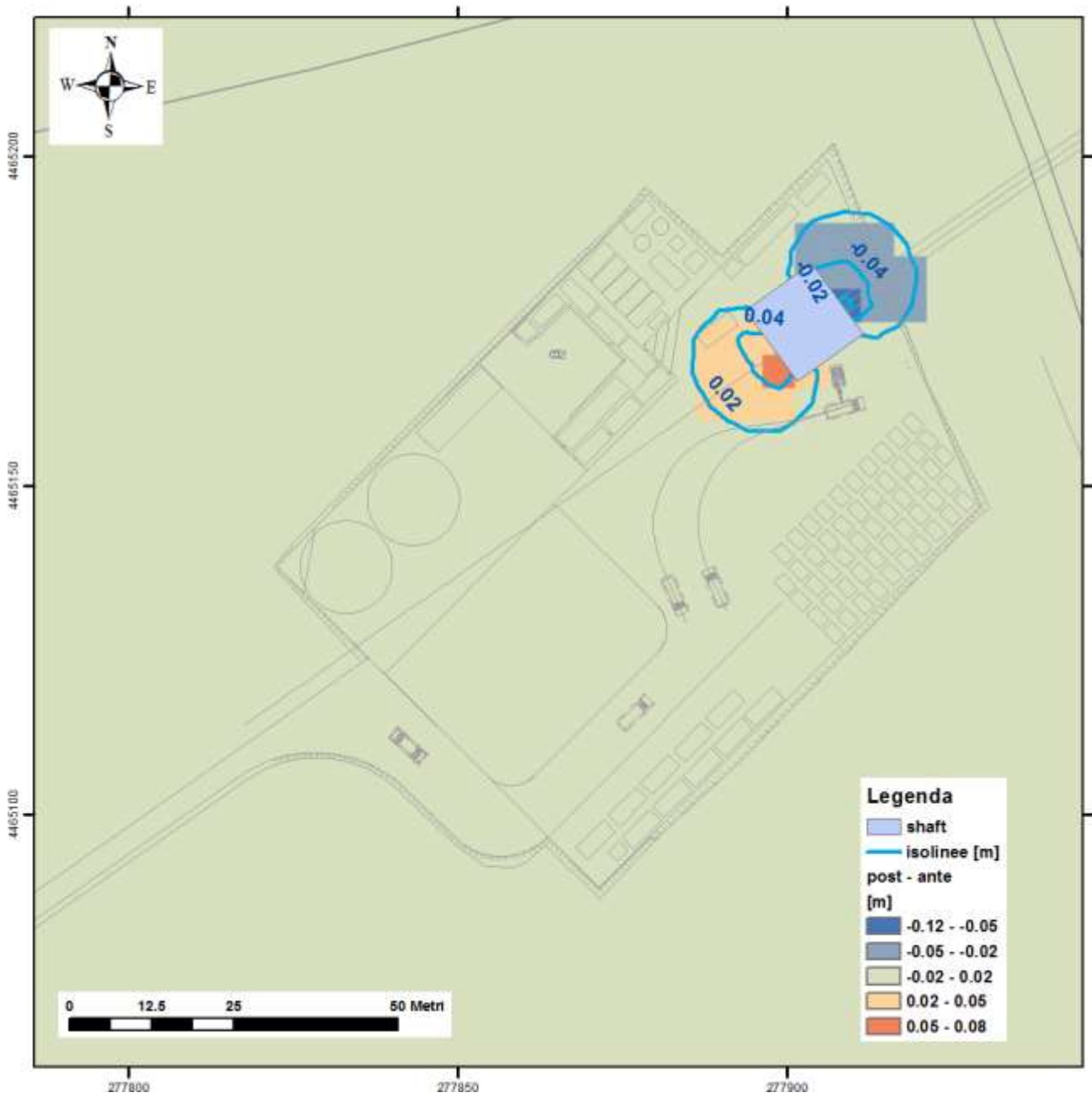


Figura 33 - Post-operam vs. ante-operam (valori in metri) per scenario 5a





 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Approdo Italiano Caratterizzazione geotecnica del tratto offshore del Microtunnel	Page:	68 of 86



Figura 34 - Linee di flusso in prossimità dello scavo nello scenario 5a

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Approdo Italiano Caratterizzazione geotecnica del tratto offshore del Microtunnel	Page:	69 of 86

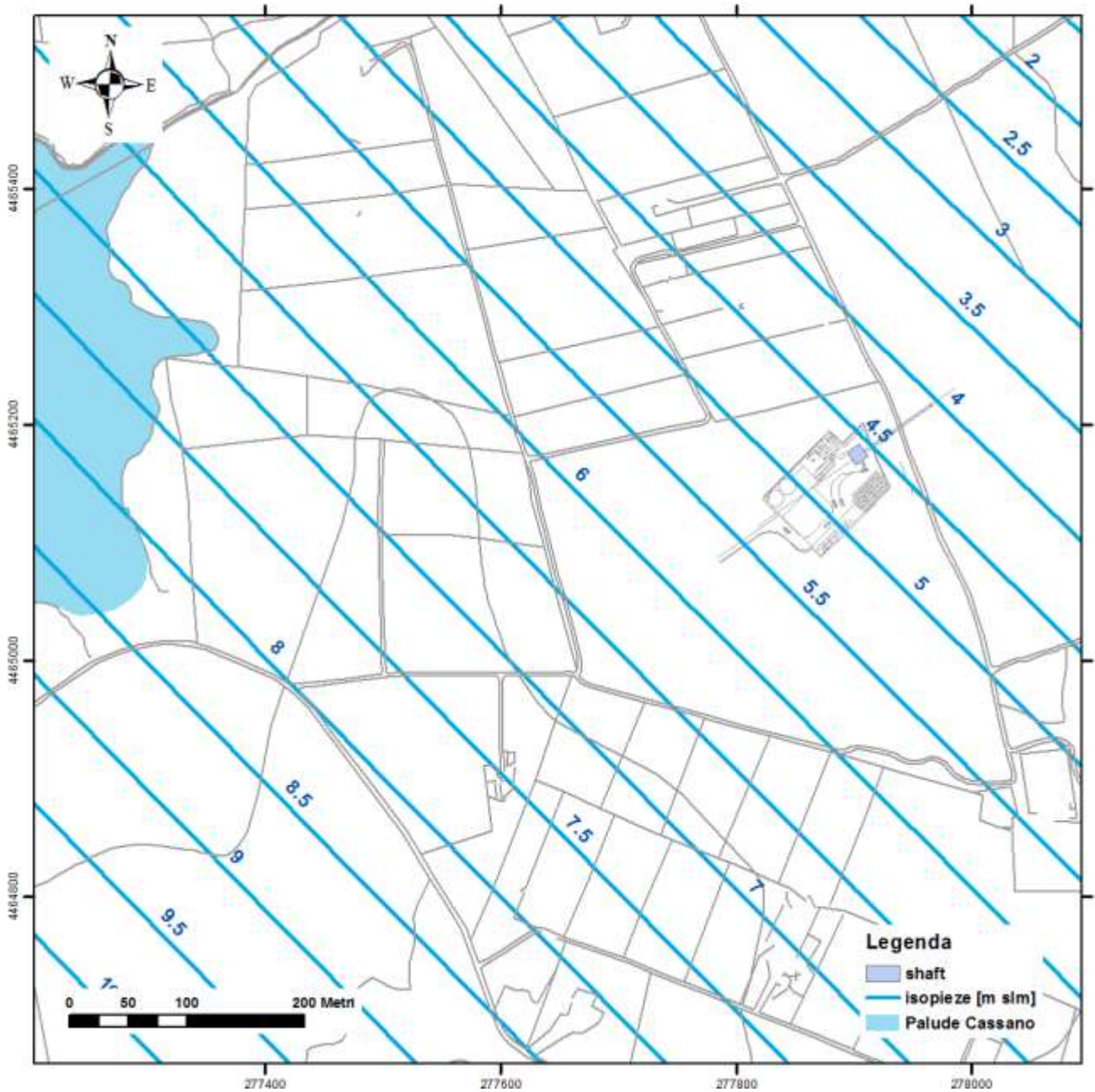


Figura 35 - Piezometria dello scenario 6

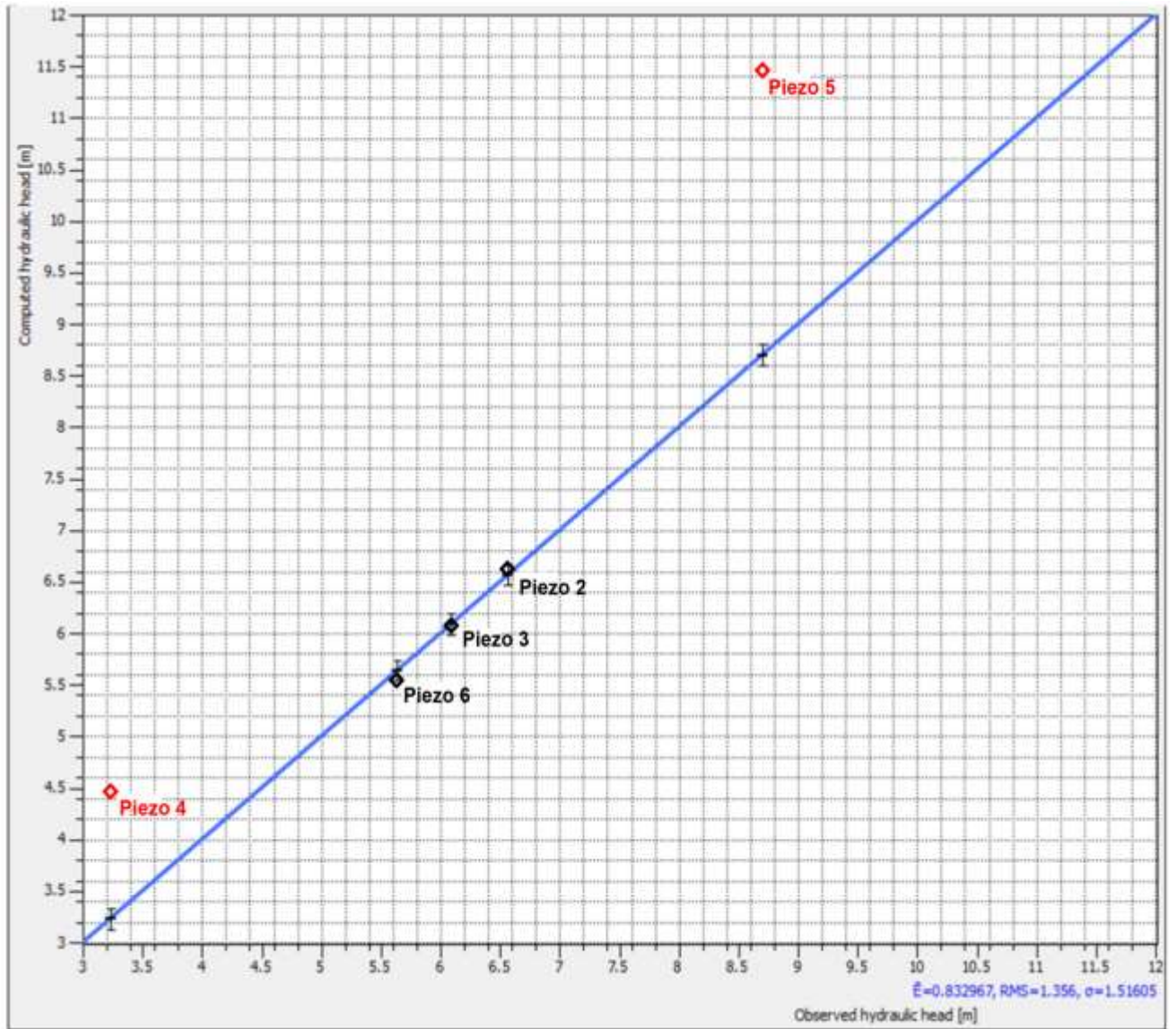


Figura 36 - Scatter plot relativo alla simulazione dello scenario 6 (valori in m slm)

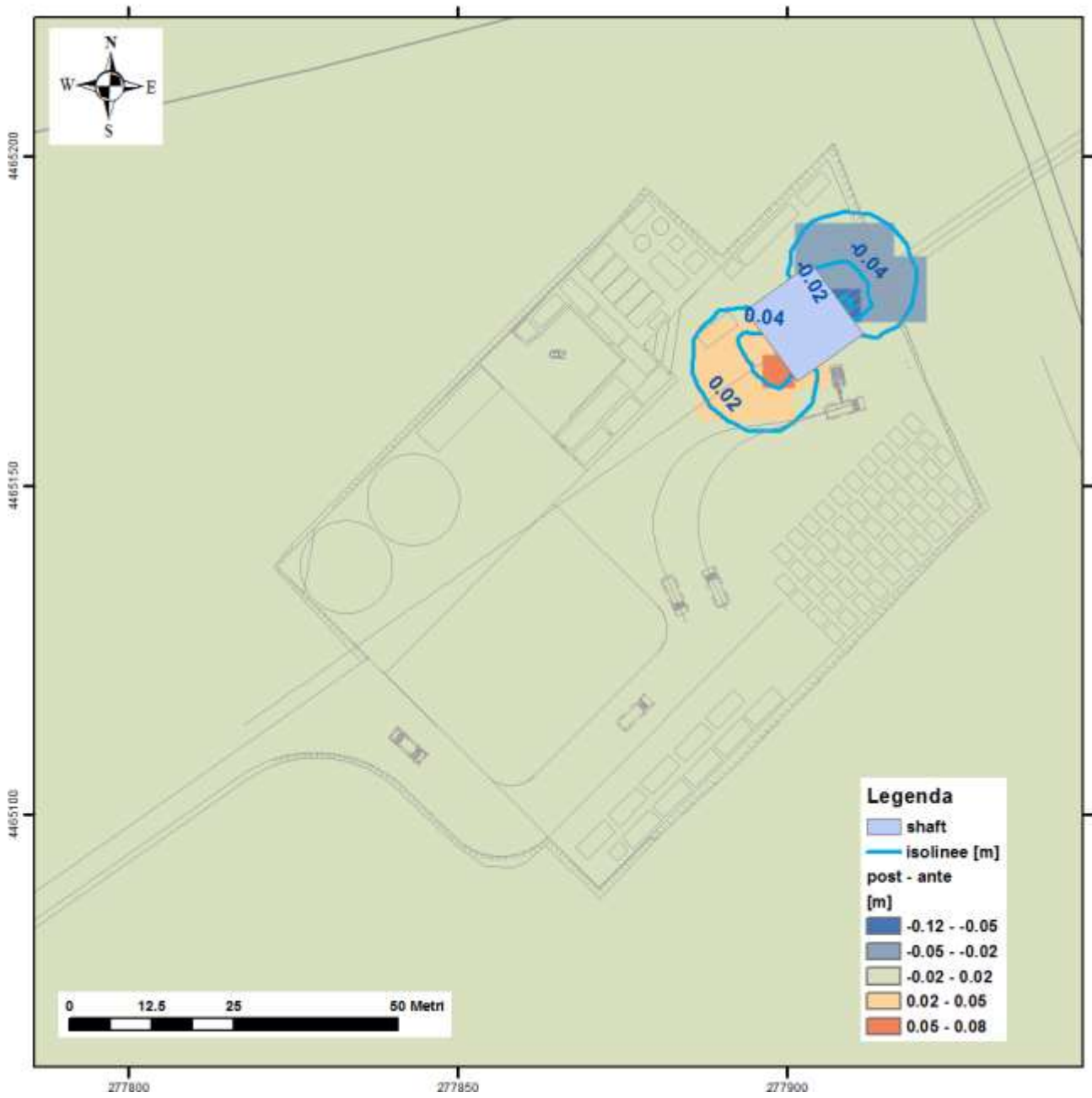




Figura 37 - Post-operam vs. ante-operam (valori in metri) per scenario 6a

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Approdo Italiano Caratterizzazione geotecnica del tratto offshore del Microtunnel	Page:	72 of 86

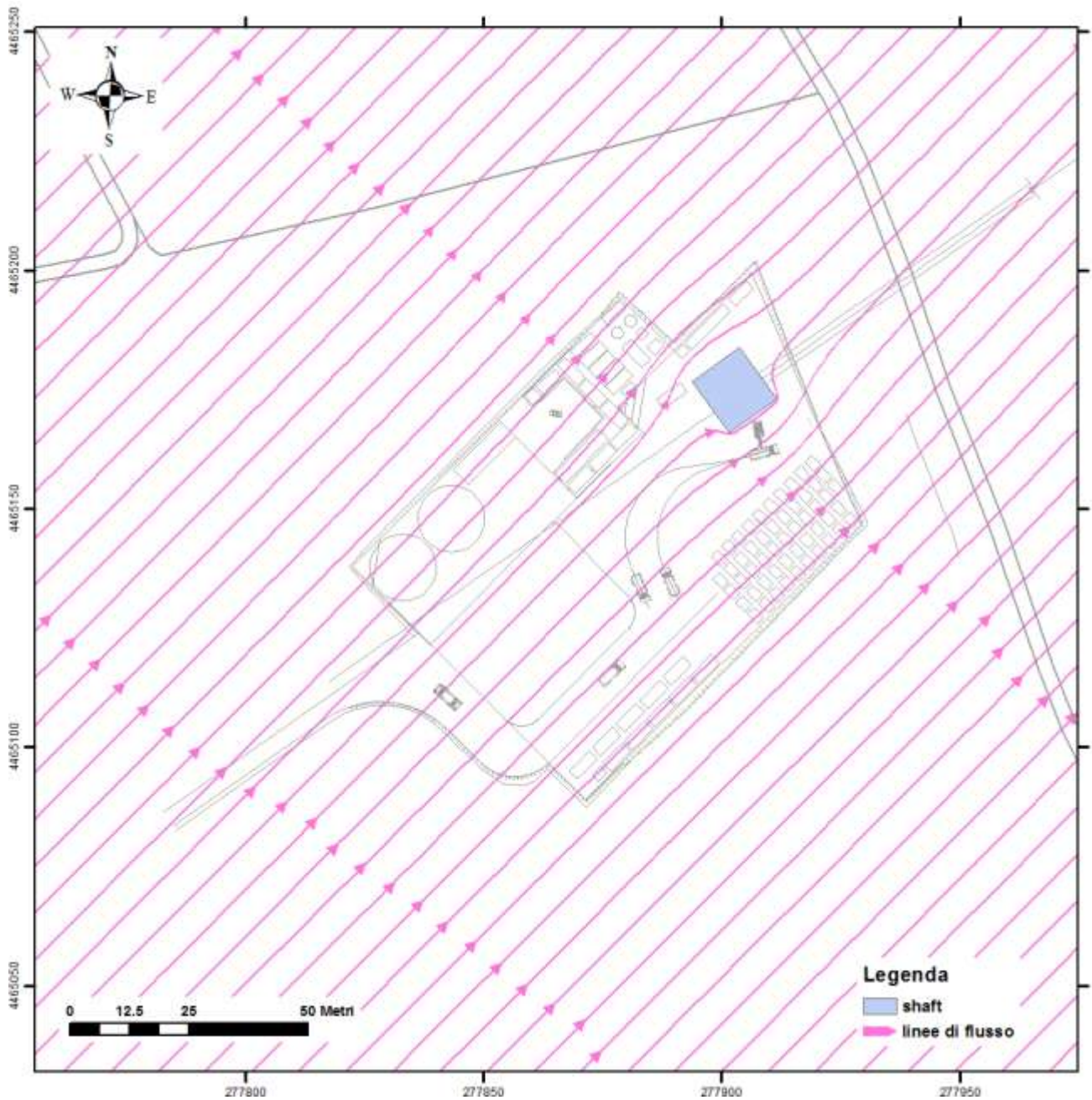




Figura 38 - Linee di flusso in prossimità dello scavo nello scenario 6a

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Approdo Italiano Caratterizzazione geotecnica del tratto offshore del Microtunnel	Page:	73 of 86

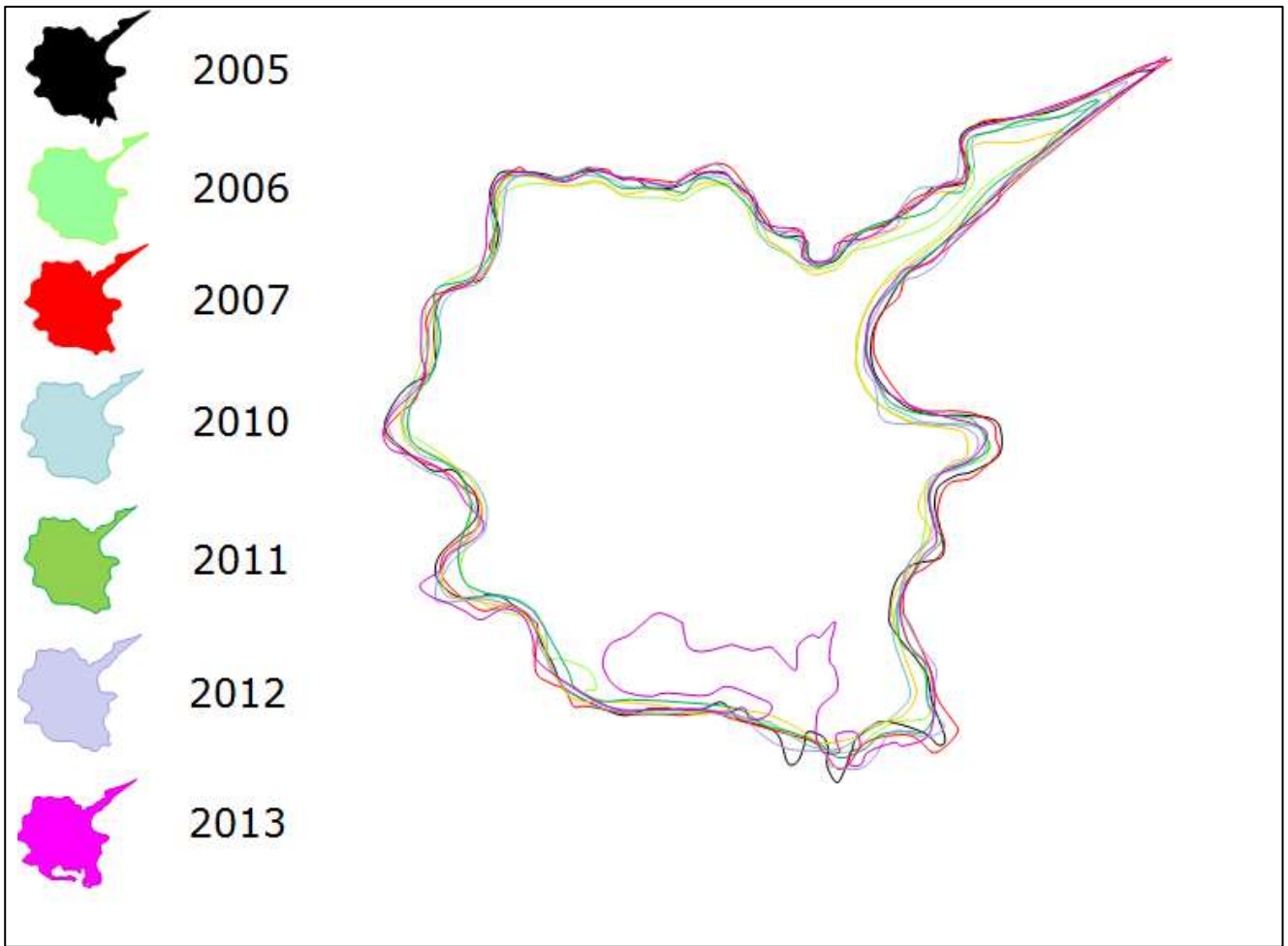




Figura 39 - Evoluzione storica della Palude di Cassano.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Approdo Italiano Caratterizzazione geotecnica del tratto offshore del Microtunnel	Page:	74 of 86

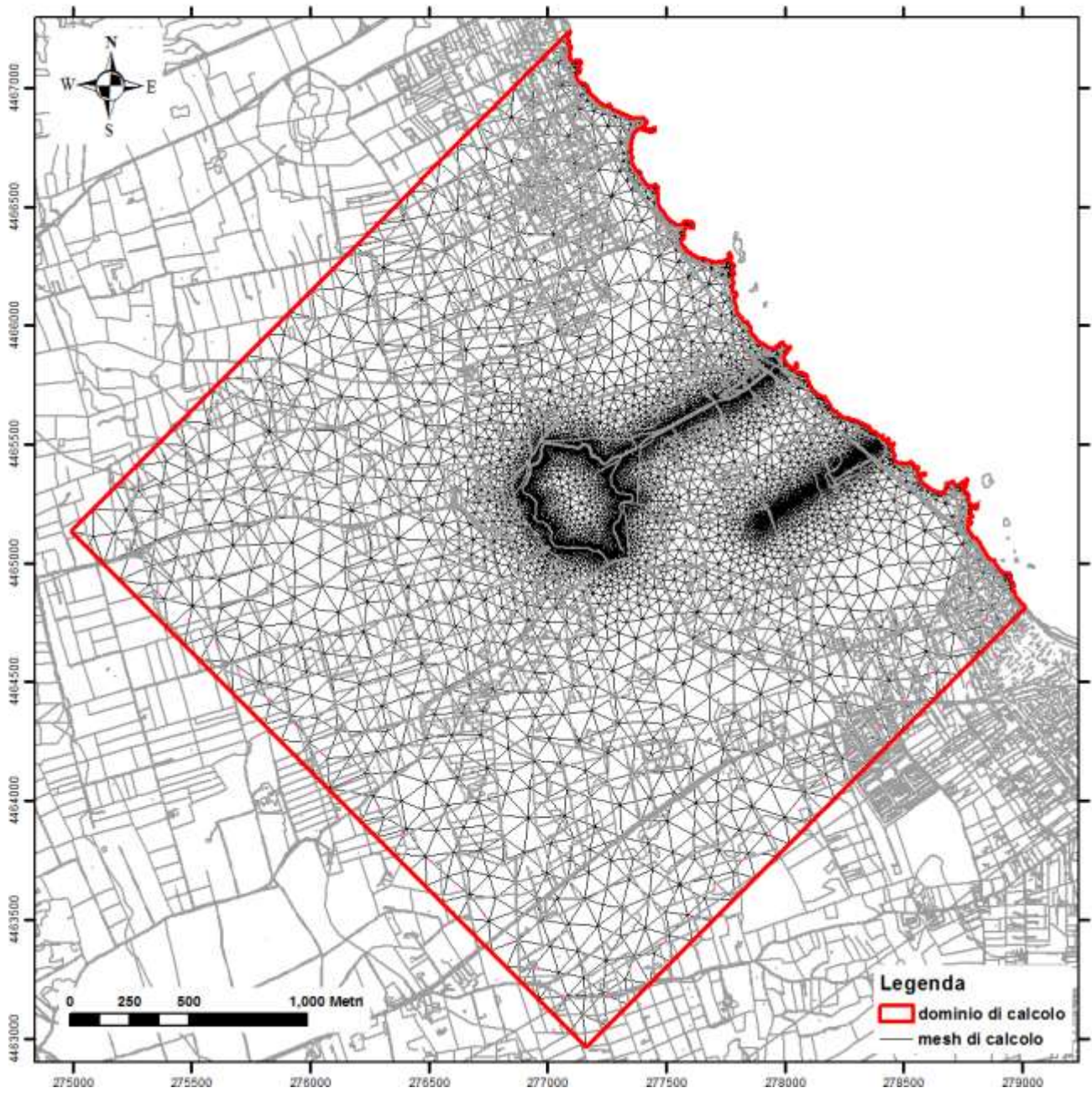




Figura 40 – Mesh di calcolo

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
	Doc. Title:	Approdo Italiano Caratterizzazione geotecnica del tratto offshore del Microtunnel	Page:	75 of 86

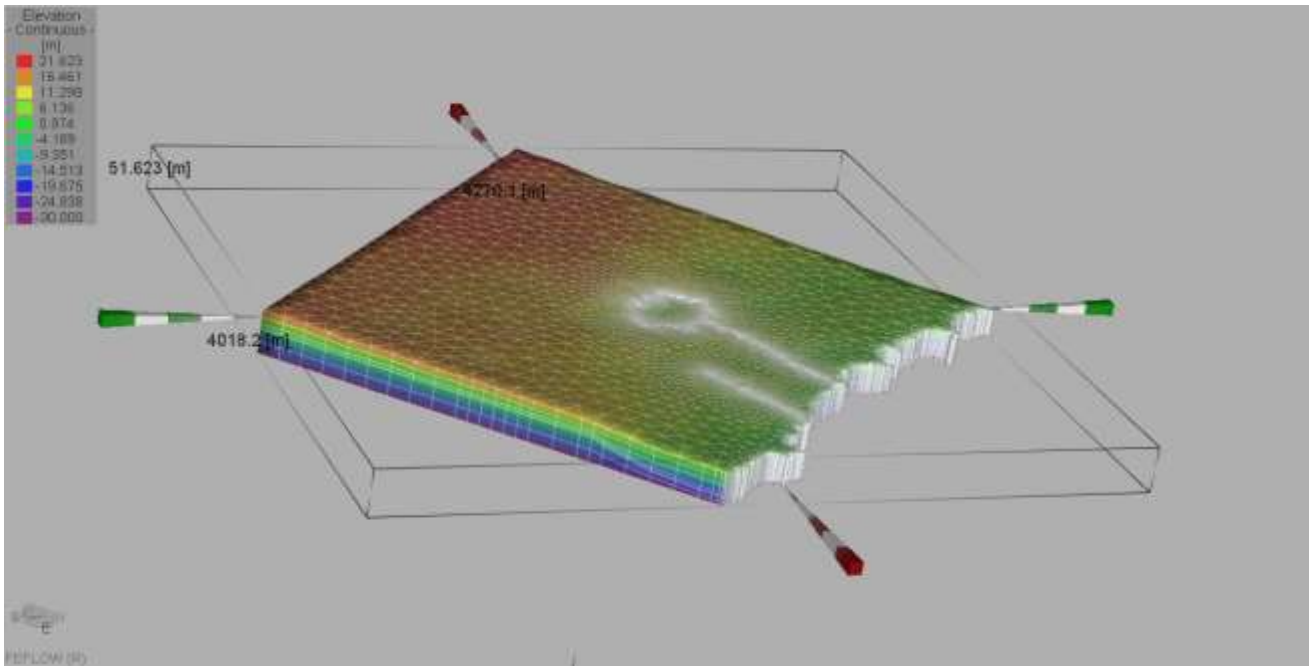


Figura 41 - Vista 3D della mesh triangolare (esagerazione verticale 5:1) particolare illustrativo fuori scala

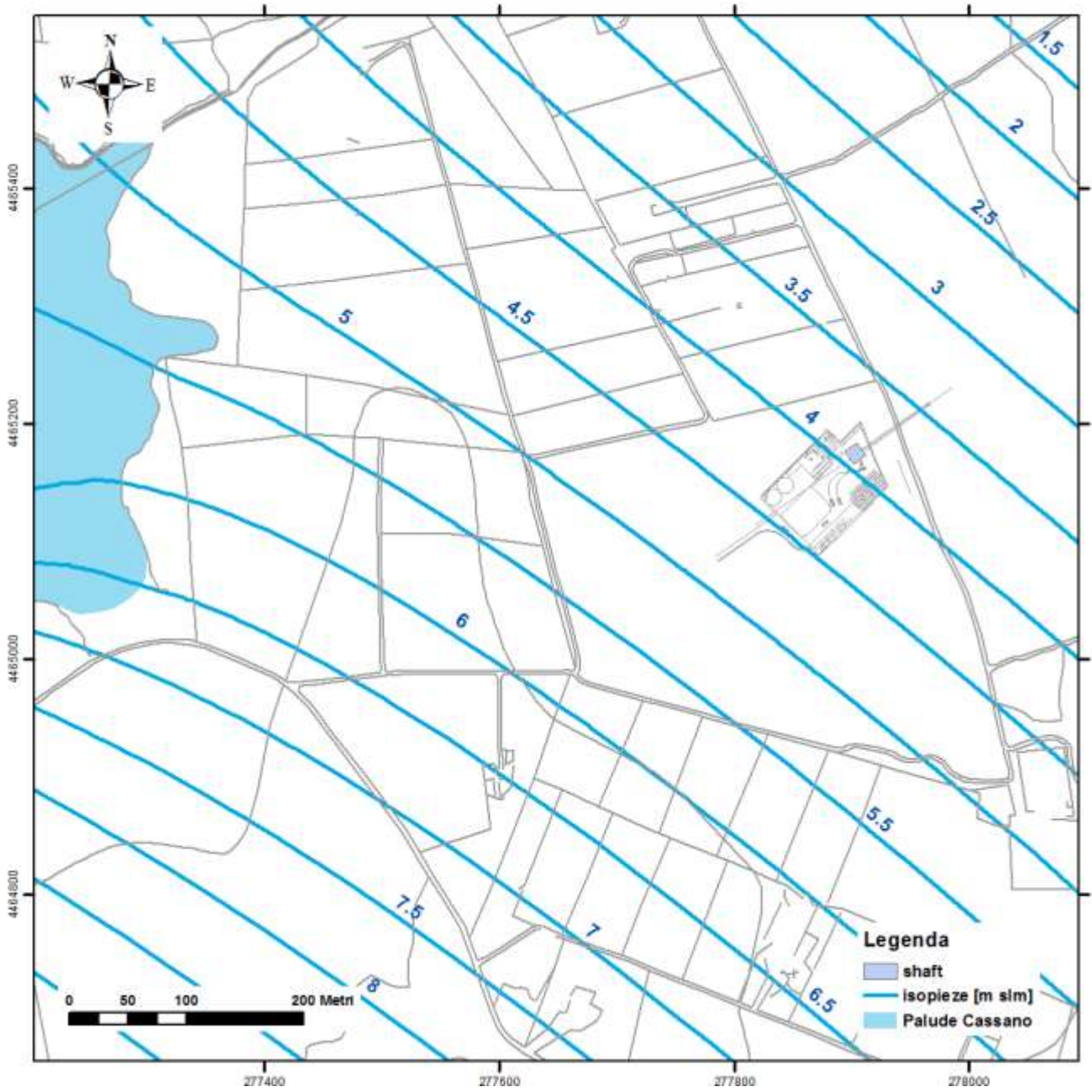


Figura 42 - Piezometria dello scenario 7

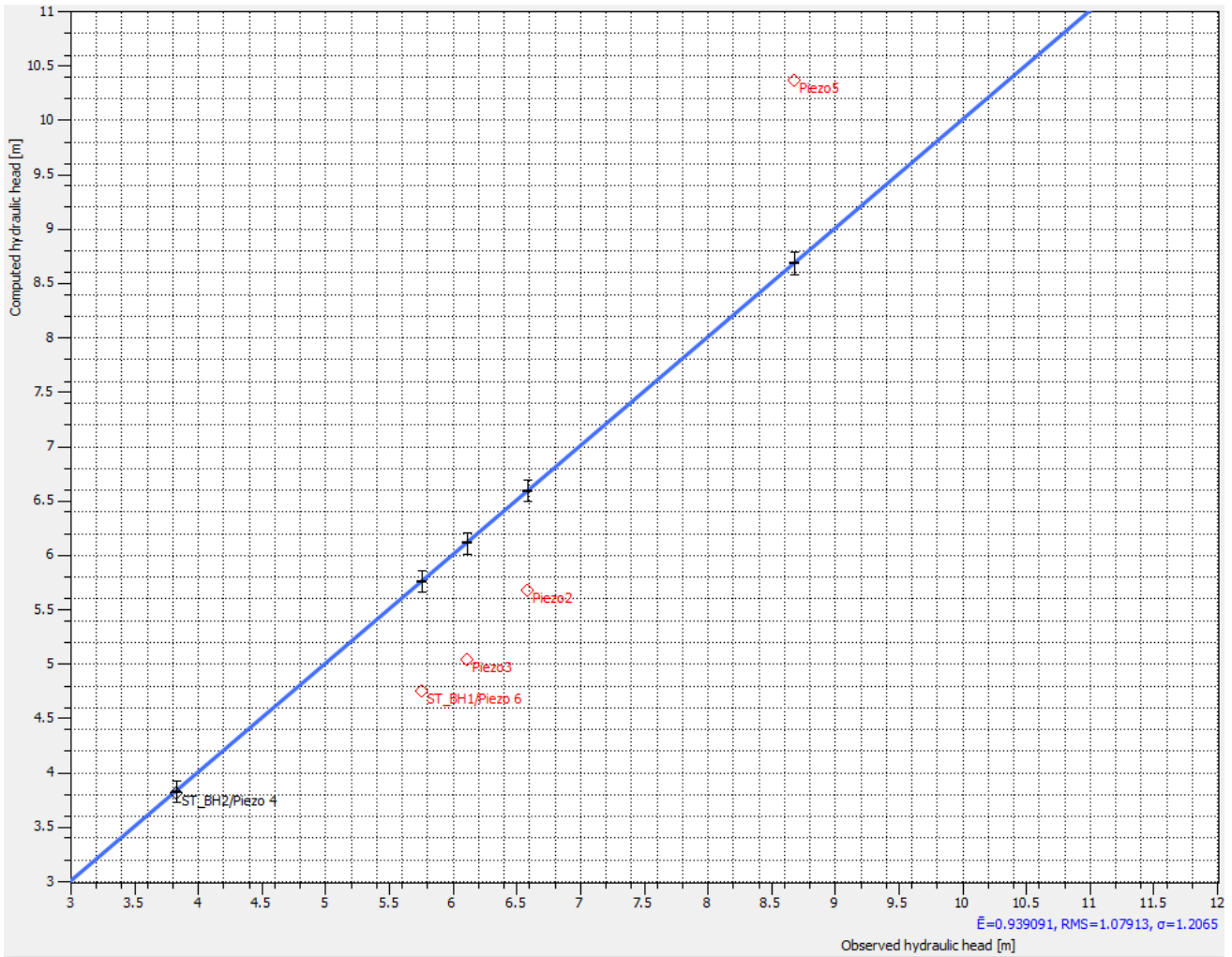


Figura 43 - Scatter plot relativo alla simulazione dello scenario 7 (valori in m slm)

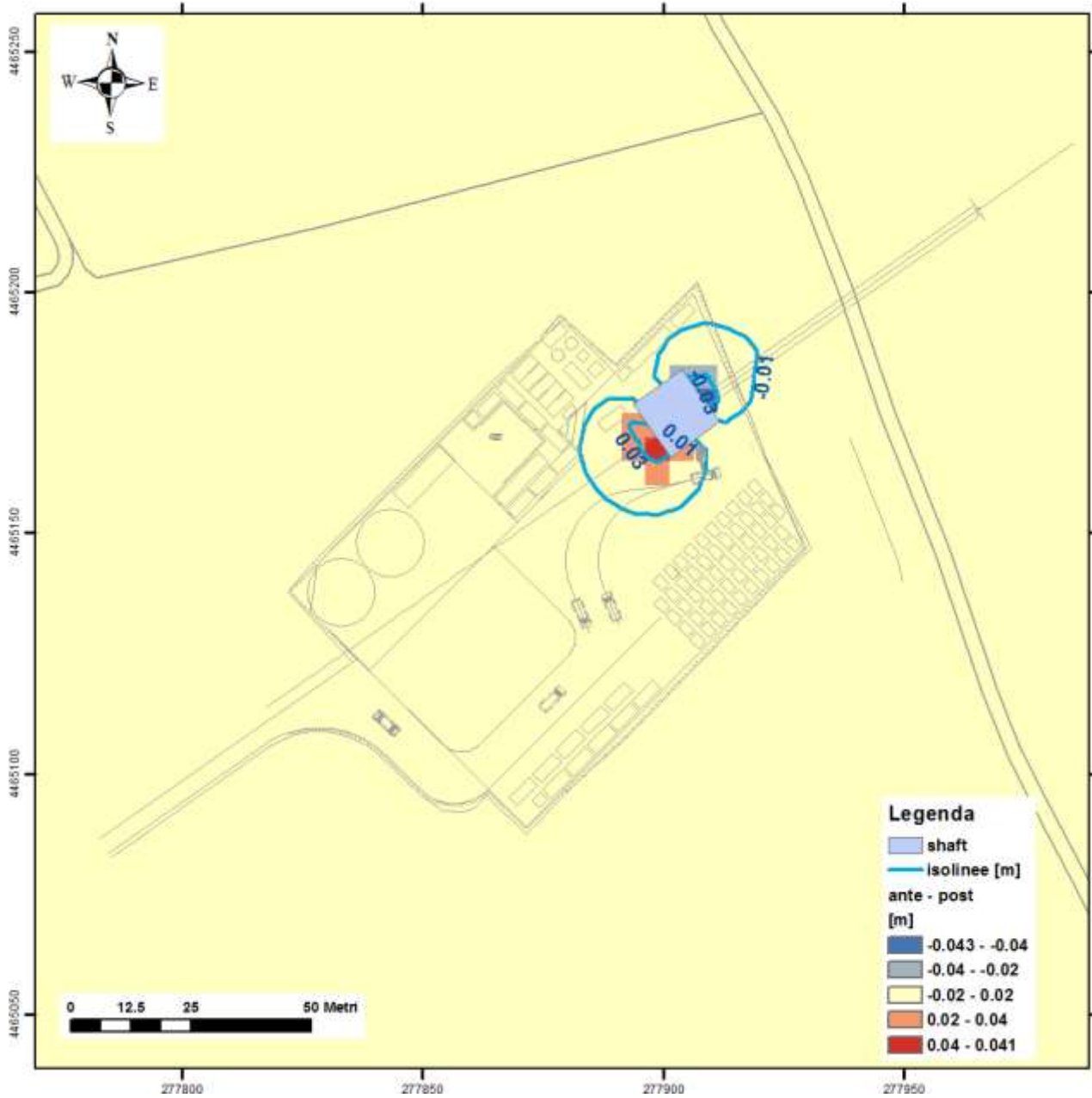




Figura 44 - Post-operam vs. ante-operam (valori in metri) per scenario 7a



Figura 45 - Linee di flusso in prossimità dello scavo nello scenario 7°

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Approdo Italiano Caratterizzazione geotecnica del tratto offshore del Microtunnel	Page:	80 of 86

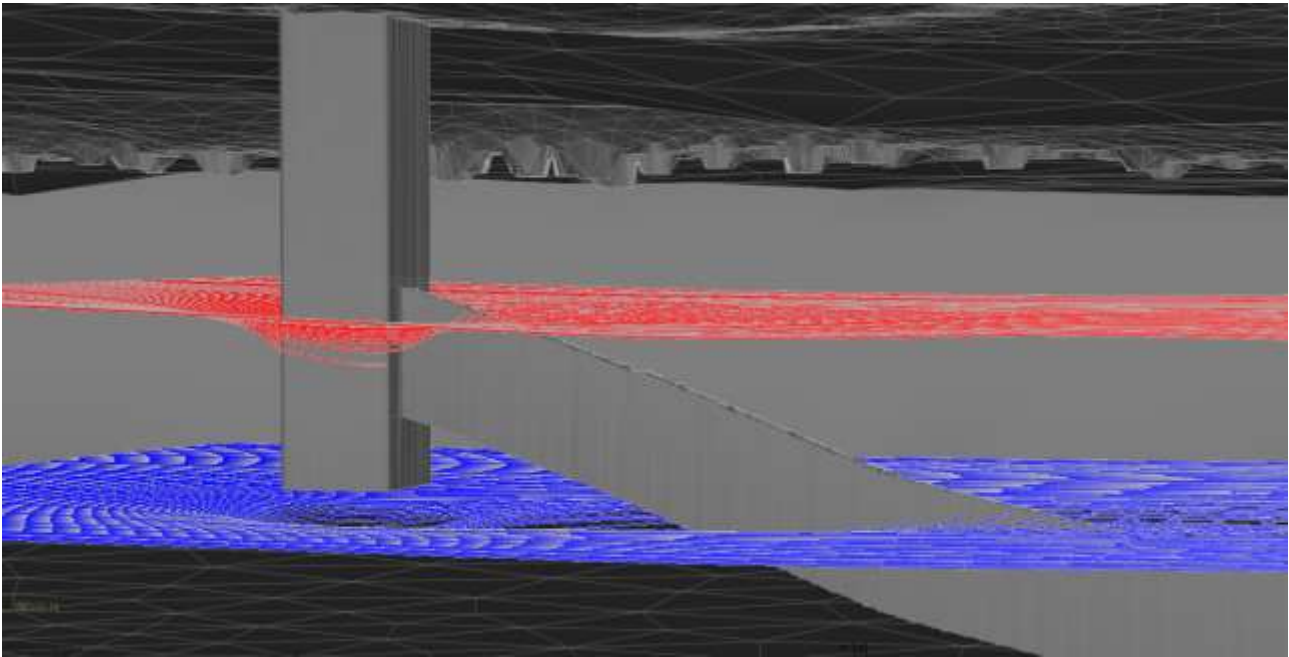


Figura 46 - Dettaglio 3D delle linee di flusso in prossimità dei manufatti impermeabili, esagerazione verticale 5:1 (particolare illustrativo fuori scala). Linee rosse a profondità 7 m circa dal piano campagna, linee blu a profondità 12 m circa dal piano campagna

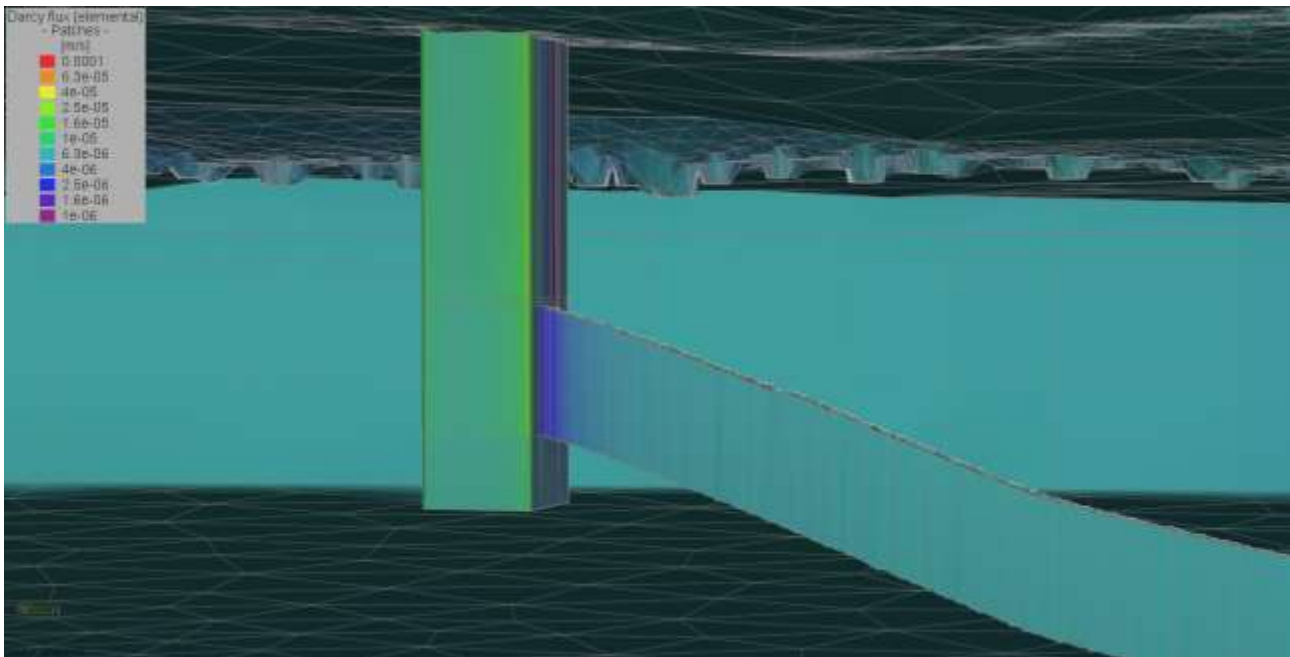


Figura 47: Distribuzione 3D delle velocità darcyane in prossimità dei manufatti impermeabili, esagerazione verticale 5:1 (particolare illustrativo fuori scala)





 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
	Doc. Title:	Approdo Italiano Caratterizzazione geotecnica del tratto offshore del Microtunnel	Page:	81 of 86



Figura 48: Direzioni e campo di velocità in una sezione trasversale al tracciato del microtunnel

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Approdo Italiano Caratterizzazione geotecnica del tratto offshore del Microtunnel	Page:	82 of 86

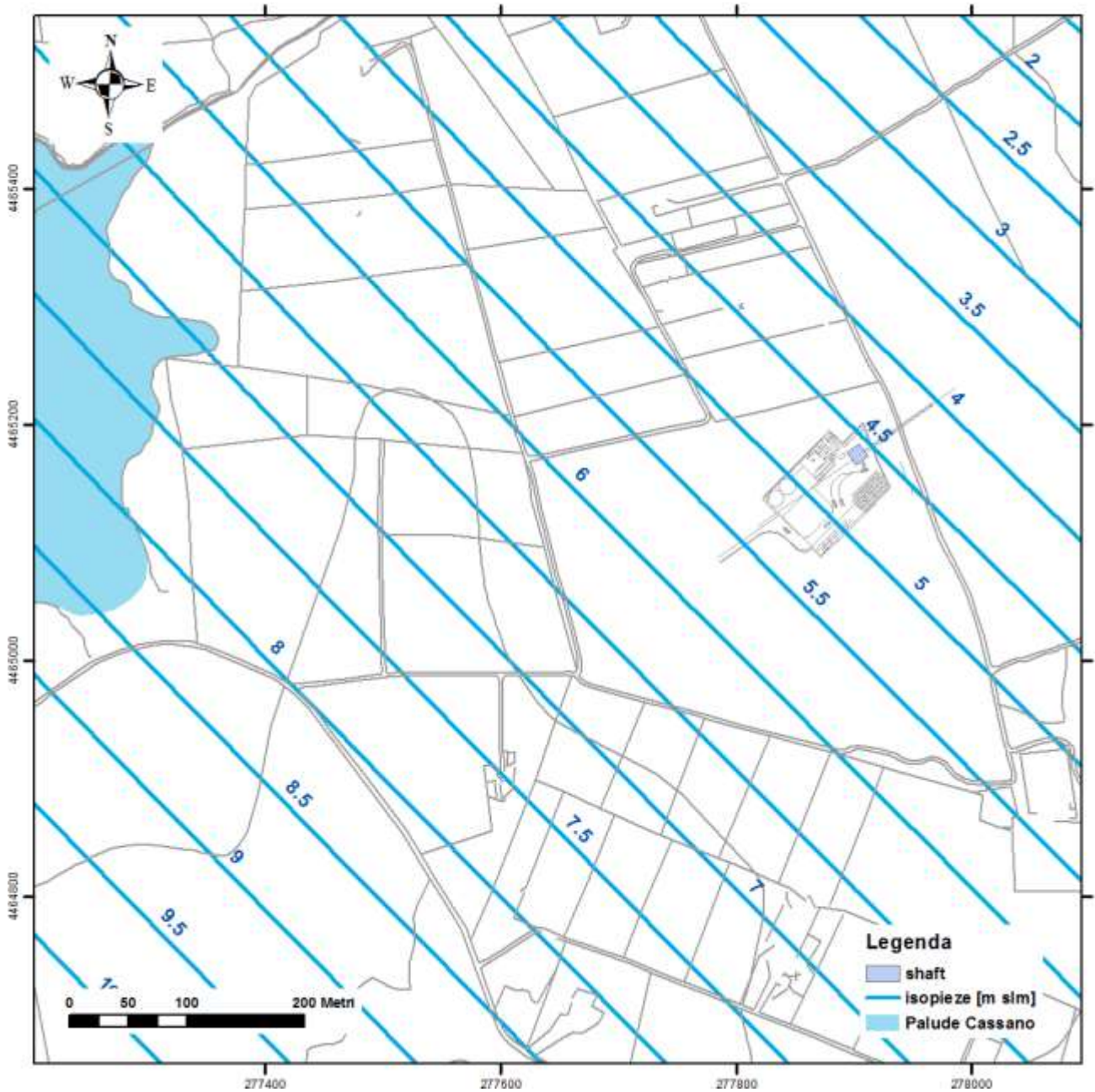


Figura 49 - Piezometria dello scenario 8

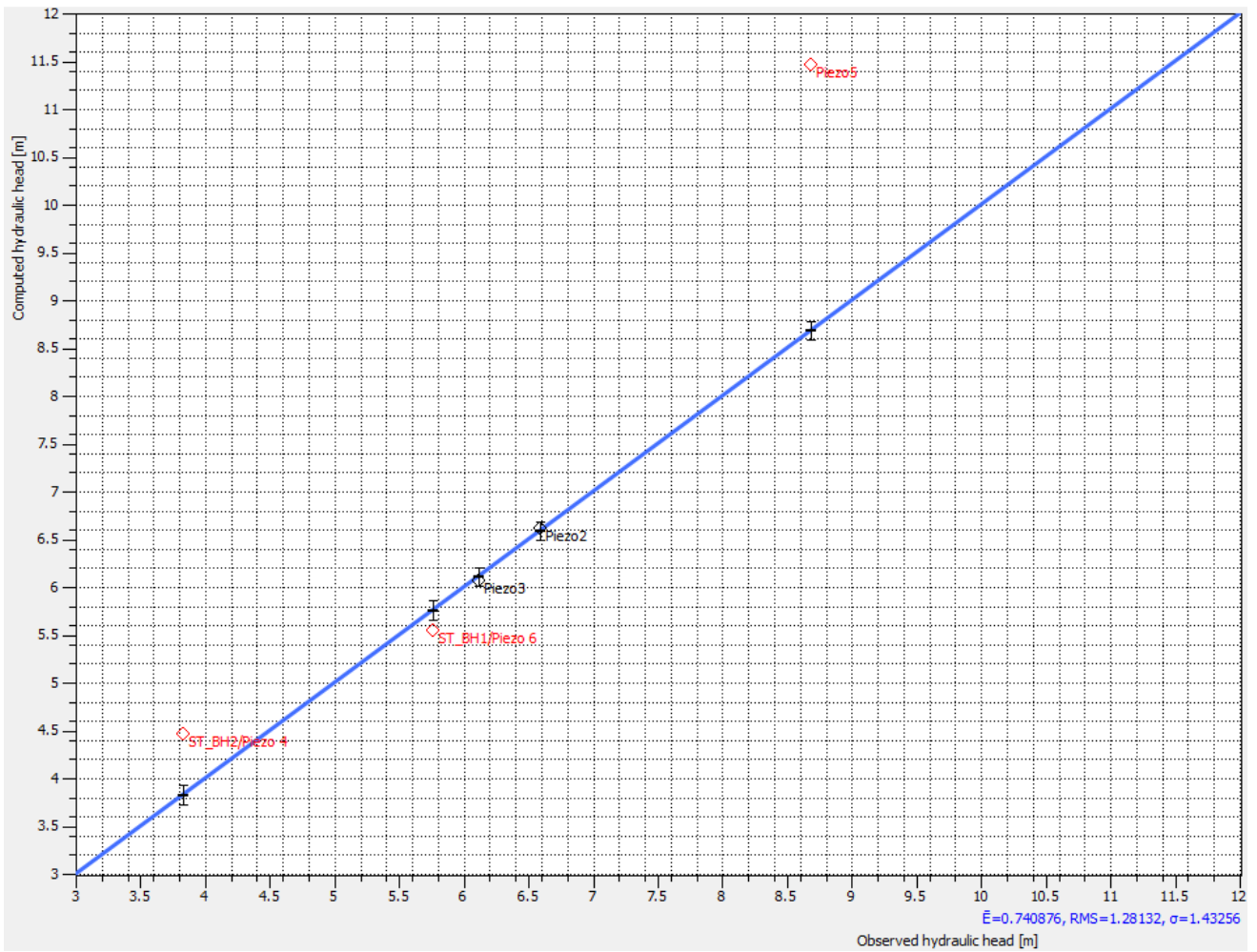


Figura 50 - Scatter plot relativo alla simulazione dello scenario 8 (valori in m slm)

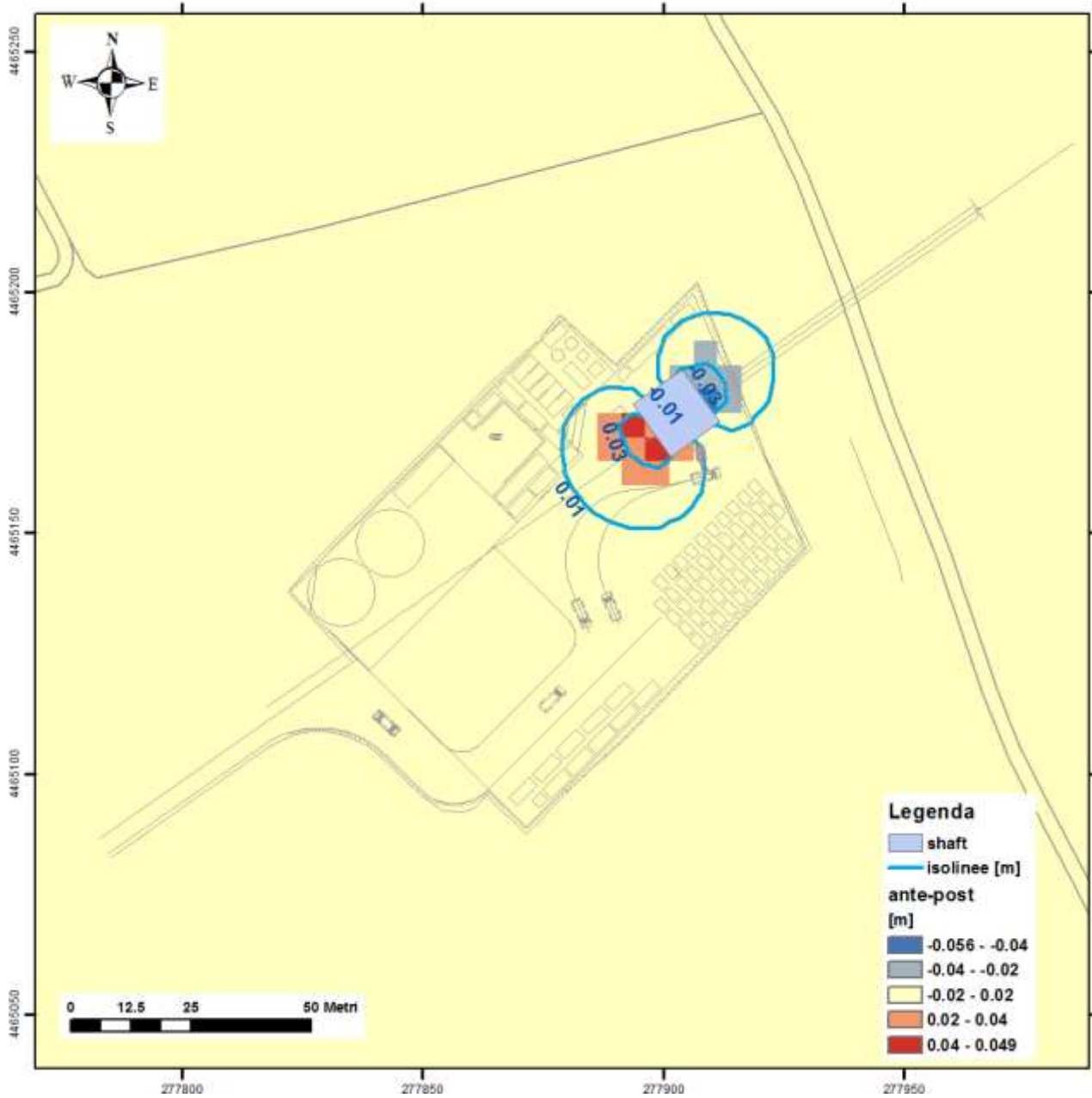


Figura 51 - Post-operam vs. ante-operam (valori in metri) per scenario 8a

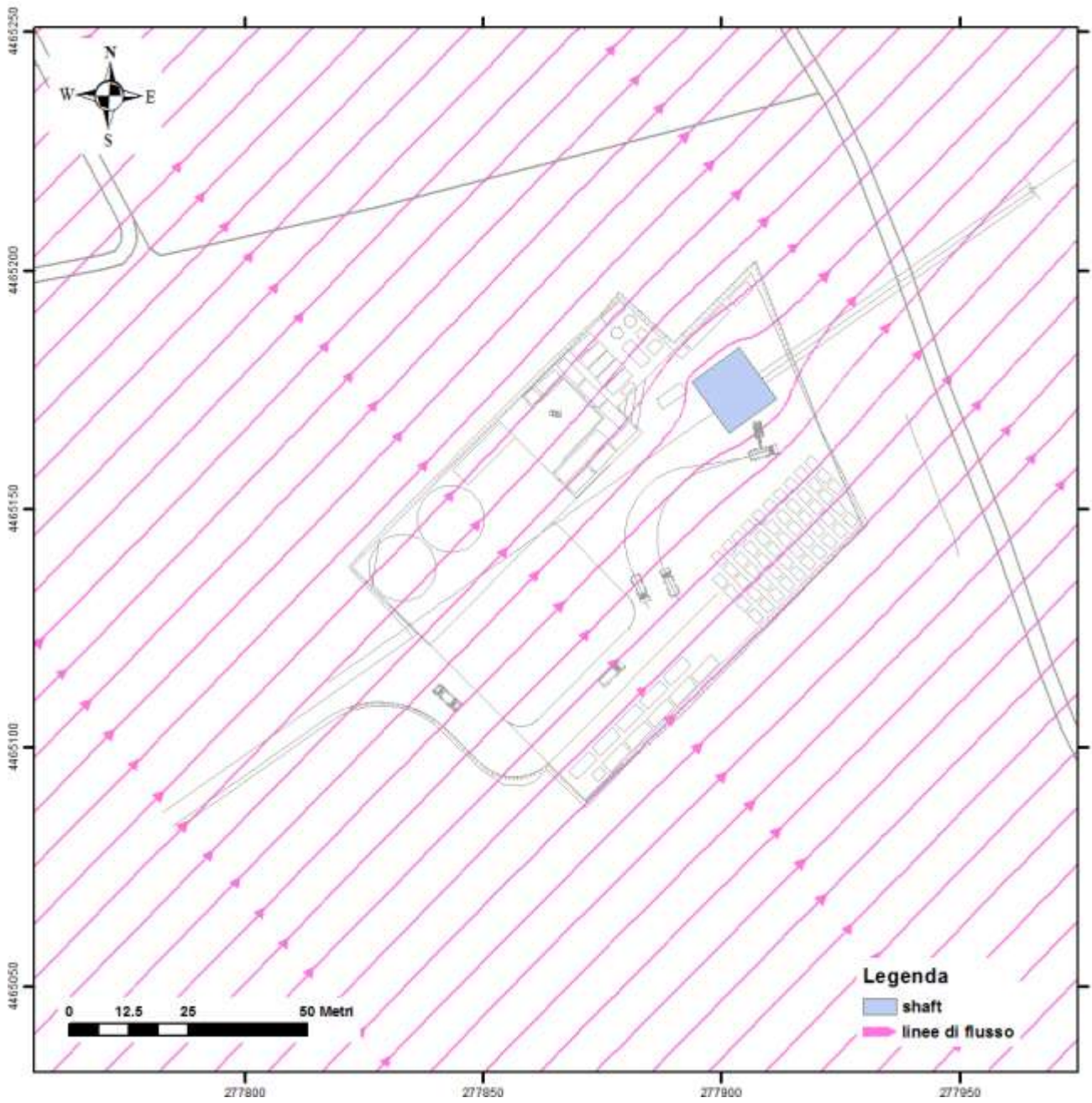




Figura 52 - Linee di flusso in prossimità dello scavo nello scenario 8a

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0019	Rev. No.:	3
 SAIPEM	Doc. Title:	Approdo Italiano Caratterizzazione geotecnica del tratto offshore del Microtunnel	Page:	86 of 86

13. DETTAGLIO DELLE REVISIONI

Rev.	Data	Descrizione
A	28.09.2015	Emissione per Verifica Disciplinare Interna
0A	02.10.2015	Emissione per Commenti
00	19.11.2015	Emissione per Approvazione
01	06.05.2016	Ri-Emissione per Approvazione
02	23.05.2016	Ri-Emissione per Approvazione
3	11.01.2017	Emissione per Costruzione