

**MINISTERO
DELLE INFRASTRUTTURE E DELLA MOBILITÀ SOSTENIBILI
STRUTTURA TECNICA DI MISSIONE**




COMUNE DI TORINO



**METROPOLITANA AUTOMATICA DI TORINO
LINEA 2 – TRATTA POLITECNICO – REBAUDENGO**

**PROGETTAZIONE DEFINITIVA
Lotto generale: Politecnico - Rebaudengo**


PROGETTO DEFINITIVO		 INFRA.TO <i>infrastrutture per la mobilità</i>										INFRATRASPORTI S.r.l.		
DIRETTORE PROGETTAZIONE Responsabile integrazione discipline specialistiche	IL PROGETTISTA													
Ing. R. Crova Ordine degli Ingegneri della Provincia di Torino n. 60385	Ing. F. Azzarone Ordine degli Ingegneri della Provincia di Torino n. 12287J	GEOTERMIA										RELAZIONE GENERALE		
		ELABORATO								REV.		SCALA	DATA	
		Int.	Est.									-	25/09/2023	
BIM MANAGER Geom. L. D'Accardi		MT	L2	T1	A0	D	GTR	COM	R	001	0	1	-	25/09/2023

AGGIORNAMENTI

Fg. 1 di 1


REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO	VISTO
0	EMISSIONE	20/02/23	GSO	FAz	FAz	RCr
1	EMISSIONE FINALE A SEGUITO DI VERIFICA PREVENTIVA	25/09/23	GSO	FAz	FAz	RCr
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-

<table border="1"> <tr> <td>LOTTO 1</td> <td>CARTELLA</td> <td>17</td> <td>1</td> <td>MTL2T1A0D</td> <td>GTRCOMR001</td> </tr> </table>						LOTTO 1	CARTELLA	17	1	MTL2T1A0D	GTRCOMR001	STAZIONE APPALTANTE DIRETTORE DI DIVISIONE INFRASTRUTTURE E MOBILITÀ Ing. R. Bertasio RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO Ing. A. Strozziro					
LOTTO 1	CARTELLA	17	1	MTL2T1A0D	GTRCOMR001												

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX


INDICE

1.	PREMESSA	6
1.1	SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE	6
1.2	DESCRIZIONE DEL TRACCIATO	6
2.	LE GEOSTRUTTURE ENERGETICHE	11
2.1	CONCI ENERGETICI	12
2.2	DIAFRAMMI ENERGETICI	15
3.	SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E STRUTTURA DELLA DOCUMENTAZIONE PROGETTUALE	19
3.1	STRUTTURA DELLA DOCUMENTAZIONE PROGETTUALE	19
3.2	DEFINIZIONE DEI CRITERI PROGETTUALI PER L'ATTIVAZIONE TERMICA DELLE STRUTTURE	20
3.3	DEFINIZIONE DEI PARAMETRI TERMO-IDRAULICI DEI TERRENI	21
3.4	INDIVIDUAZIONE DELLE SEZIONI OMOGENEE DA UTILIZZARE NELLE ANALISI NUMERICHE	24
3.5	MODELLAZIONE NUMERICA FEM-TH	27
3.6	CALCOLO DELLA POTENZA TERMICA ESTRAIBILE DAL TERRENO	31
3.7	DEFINIZIONE DEGLI IMPIANTI E DESTINAZIONE DEL CALORE ESTRATTO	33
4.	ANALISI DEI RISULTATI E CONFRONTO CON LE PREVISIONI DEL PFTE₃₅	
4.1	ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI	35
4.2	CONFRONTO CON LE PREVISIONI DEL PFTE	39
5.	EFFETTI DERIVANTI DALL'ATTIVAZIONE TERMICA DELLE OPERE DELLA LINEA 2	43
5.1	ASPETTI GENERALI	43
5.2	RISULTATI DELLE ANALISI NUMERICHE A SCALA URBANA	48
5.3	VALUTAZIONE DELL'ALTERAZIONE TERMICA	58
6.	SINTESI CONCLUSIVA	62
7.	BIBLIOGRAFIA	65

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.	Key-plan della ML2 - Tratta funzionale Politecnico-Rebaudengo.	7
Figura 2.	Suddivisione della ML2 in base alle modalità di scavo previste.	9
Figura 3.	La configurazione Ground (a), Air (b) e Ground & Air (c) (Barla and Di Donna 2018).	12
Figura 4.	Schema tecnico dell'inserimento delle tubazioni nei conci Enertun (Barla et al. 2018).	13
Figura 5.	Vista del campo sperimentale Enertun e posizione lungo la Linea 1 della Metropolitana di (Insana e Barla 2020).	14
Figura 6.	Esempio di concio energetico prima del getto con il particolare della predisposizione delle scatole per il collegamento idraulico tra i conci (Barla et al., 2018).	15
Figura 7.	Schema di diaframma energetico in calcestruzzo armato e particolare della disposizione delle tubazioni di scambio termico al suo interno (da Brandl, 2013).	16
Figura 8.	Particolare della disposizione delle tubazioni di scambio termico all'interno dell'armatura di un diaframma energetico.	17
Figura 9.	Sezione di un diaframma energetico con in evidenza in colore rosso la disposizione dei circuiti per lo scambio termico con il terreno (da Amis et al, 2010).	18
Figura 10.	Mappa di interpolazione delle temperature dell'acqua di falda lungo la ML2.	23
Figura 11.	Suddivisione della tratta Politecnico-Rebaudengo della ML2 in tratte omogenee: planimetria generale e dettaglio tra le stazioni Politecnico e Pastrengo.	25
Figura 12.	Matrice riepilogativa per le tratte in TBM con indicazione delle 3 differenti classi per i 5 parametri considerati nella metodologia adottata nel presente lavoro.	26
Figura 13.	Matrice riepilogativa per le tratte in C&C con indicazione delle 3 differenti classi per i 5 parametri considerati nella metodologia adottata nel presente lavoro.	26
Figura 14.	Estensione dell'area attorno al perimetro di una stazione (Verona) nella quale vengono definiti i parametri F, T, DF, I e GEO medi da utilizzare nei modelli numerici FEM-TH.	27
Figura 15.	Geometria del modello numerico adottato per le tratte in TBM.	28
Figura 16.	Geometria dei modelli numerici adottati per le tratte in Cut & Cover.	29
Figura 17.	Temperatura del fluido termovettore all'interno delle serpentine ottenuta al termine della simulazione invernale ed estiva per la stazione San Giovanni Bosco.	31
Figura 18.	Andamento delle potenze termiche specifiche in W/m per le tratte di galleria di linea in TBM (da PT1 a PNO) e in C&C (da PNO a PT2).	32
Figura 19.	Potenze complessive estive e invernali estraibili dagli impianti nelle stazioni e nel deposito-officina.	33
Figura 20.	Potenze termiche totali estraibili dagli impianti afferenti a ciascuna stazione di collegamento.	34
Figura 21.	Quadro sinottico delle potenze totali estraibili dalle stazioni di collegamento impianti in estate ed in inverno.	38
Figura 22.	Planimetria del piano banchina del Deposito-officina Rebaudengo con indicazione dei diaframmi termicamente attivabili.	39

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

- Figura 23. Potenza al metro lineare in W/m derivante dal PFTE per le tratte SO, Centrale e NE della ML2. Nel rettangolo rosso è indicata la tratta Politecnico-Rebaudengo oggetto del presente progetto definitivo. 41
- Figura 24. Rappresentazione dell'area di studio selezionata e delle linee isopiezometriche per la falda freatica (Politecnico di Torino, 2023). 44
- Figura 25. Impianti geotermici a circuito aperto e chiuso presenti nell'area di studio. 48
- Figura 26. Mappa termica del dominio del modello numerico al termine della stagione invernale alla profondità del tratto in C&C della ML2 (Politecnico di Torino, 2023). 50
- Figura 27. Mappa termica del dominio del modello numerico al termine della stagione invernale alla profondità del tratto in TMB della ML2 (Politecnico di Torino, 2023). 51
- Figura 28. Mappa termica del dominio del modello numerico al termine della stagione estiva alla profondità del tratto in C&C della ML2 (Politecnico di Torino, 2023). 52
- Figura 29. Mappa termica del dominio del modello numerico della stagione estiva alla profondità del tratto in TBM della ML2 (Politecnico di Torino, 2023). 53
- Figura 30. Area di Torino a Nord della Barriera di Milano, con indicazione del tracciato di Linea 2 e dell'impianto geotermico nr. 23. In planimetria è indicata la traccia delle sezioni A-A' e B-B'. (Politecnico di Torino, 2023). 54
- Figura 31. Sezione A-A': mappa di temperatura al termine della stagione invernale del quarto anno di attivazione termica della ML2. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5. (Politecnico di Torino, 2023). 54
- Figura 32. Sezione A-A': mappa di temperatura al termine della stagione estiva del quarto anno di attivazione termica della ML2. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5. (Politecnico di Torino, 2023). 55
- Figura 33. Sezione B-B': mappa della temperatura alla fine della stagione invernale del quarto anno di attivazione termica della ML2. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore di scala di 5. (Politecnico di Torino, 2023). 55
- Figura 34. Sezione B-B': mappa di temperatura al termine della stagione estiva del quarto anno di attivazione termica della ML2. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5. (Politecnico di Torino, 2023). 56
- Figura 35. Inquadramento dell'area di Torino circostante al tracciato della Linea 2, tra le stazioni Porta Nuova e Politecnico. In planimetria sono indicate la traccia della sezione G-G' e l'ubicazione degli impianti geotermici nr. 11, 12 e 14. (Politecnico di Torino, 2023). 56
- Figura 36. Sezione G-G': mappa delle temperature al termine dell'attivazione nella stagione invernale del quarto anno di simulazione. In figura sono indicati i plumi termici dovuti agli impianti nr. 11 e 14, entrambi del Politecnico di Torino. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5. (Politecnico di Torino, 2023). 57
- Figura 37. Sezione G-G': mappa delle temperature al termine dell'attivazione nella stagione estiva del quarto anno di simulazione. In figura sono indicati i plumi termici dovuti agli impianti nr. 11 e 14, entrambi del Politecnico di Torino. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5. (Politecnico di Torino, 2023). 57



 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

Figura 38. Zona di alterazione termica per la tratta di ML2 considerata nel presente studio. La linea nera tratteggiata delimita il confine entro il quale le variazioni di temperatura superano 1°C. (Politecnico di Torino, 2023). 60

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1. Acronimi utilizzati nel presente documento.	6
Tabella 2. Valori delle grandezze termo-idrauliche caratteristiche delle differenti unità termo-idrauliche individuate.	24
Tabella 3. Tabella riepilogativa delle potenze totali disponibili alle stazioni di collegamento in estate ed in inverno.	35
Tabella 4. Confronto tra le potenze totali per la stagione invernale ed estiva afferenti alle stazioni di collegamento impianti nel Progetto di Fattibilità Tecnico-economica (PFTE) e nel progetto definitivo (PD).	42
Tabella 5. Impianti a circuito aperto censiti nell'area oggetto dello studio.	45

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

1. PREMESSA

1.1 Scopo e campo di applicazione

La presente relazione generale si inserisce nell'ambito dell'affidamento dei servizi di ingegneria relativi alla Progettazione Definitiva della Tratta Politecnico-Rebaudengo della Linea 2 della Metropolitana, disciplinato dal Contratto tra la Città di Torino e la società Infratrasporti.TO s.r.l., ed ha per oggetto la sintesi delle considerazioni e delle analisi svolte per la progettazione dell'attivazione termica delle opere strutturali della Linea 2 nella tratta Politecnico-Rebaudengo.

Dopo un inquadramento dell'opera e delle geostrutture energetiche, la relazione sintetizzerà i risultati ottenuti dalle analisi e verifiche svolte, anche raffrontando tali risultati con quanto contenuto nel Progetto di Fattibilità Tecnico Economica (PFTE). Sarà poi fornita una indicazione sulla struttura dei documenti progettuali sviluppati nell'ambito della progettazione inerente all'attivazione geotermica delle opere, con indicazione dei relativi contenuti.

Nella Tabella 1 vengono riportati gli acronimi utilizzati nel presente documento.

Tabella 1. Acronimi utilizzati nel presente documento.

Acronimi	Definizioni
NAT	Modalità di scavo tradizionale con avanzamento a foro cieco
C&C	Modalità di scavo "Cut & Cover"
TBM	Tunnel Boring Machine
FEM TH	Modellazione numerica termo idraulica ad elementi finiti
ML2	Linea 2 della Metropolitana di Torino
PFTE	Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica
D-TRT	Test di Risposta Termica Distribuita del terreno
ZAT	Zona di Alterazione Termica

1.2 Descrizione del tracciato

La 1° tratta funzionale della Linea 2 della Metropolitana di Torino, inclusa tra le stazioni Rebaudengo e Politecnico, si colloca interamente nel territorio comunale di Torino, presenta una lunghezza di circa 9.7 km, e, procedendo da nord verso sud, si sviluppa a partire dal deposito-officina di Rebaudengo posto lungo l'asse ferroviario sotterraneo di penetrazione urbana, proseguendo poi lungo la ex trincea ferroviaria posta tra via Gottardo e via Sempione. Il tracciato, a partire dalla fermata Corelli passa lungo via Bologna con le fermate intermedie Cimarosa-Tabacchi, Bologna e Novara. Dopo la fermata Novara, il tracciato si allontana dall'asse di Via Bologna mediante una curva in direzione sud-est e si immette sotto l'asse di Corso Verona fino alla Stazione Verona ubicata in Largo Verona. Dopo la fermata Verona, sotto attraversato il fiume Dora e Corso Regina Margherita, la linea entra nel centro storico della città con le fermate Mole/Giardini Reali e Carlo Alberto, portandosi poi in corrispondenza di via Lagrange, sino ad



arrivare alla stazione Porta Nuova, posta lungo via Nizza, che sarà una fermata di corrispondenza sia con la linea F.S. che con la Linea 1 della metropolitana di Torino. Dalla fermata Porta Nuova il tracciato prosegue lungo l'allineamento di via Pastrengo, per poi curvare in direzione sud per portarsi su corso Duca degli Abruzzi fino alla fermata Politecnico. Nella Figura 1 viene riportato il tracciato complessivo della tratta oggetto della presente relazione.

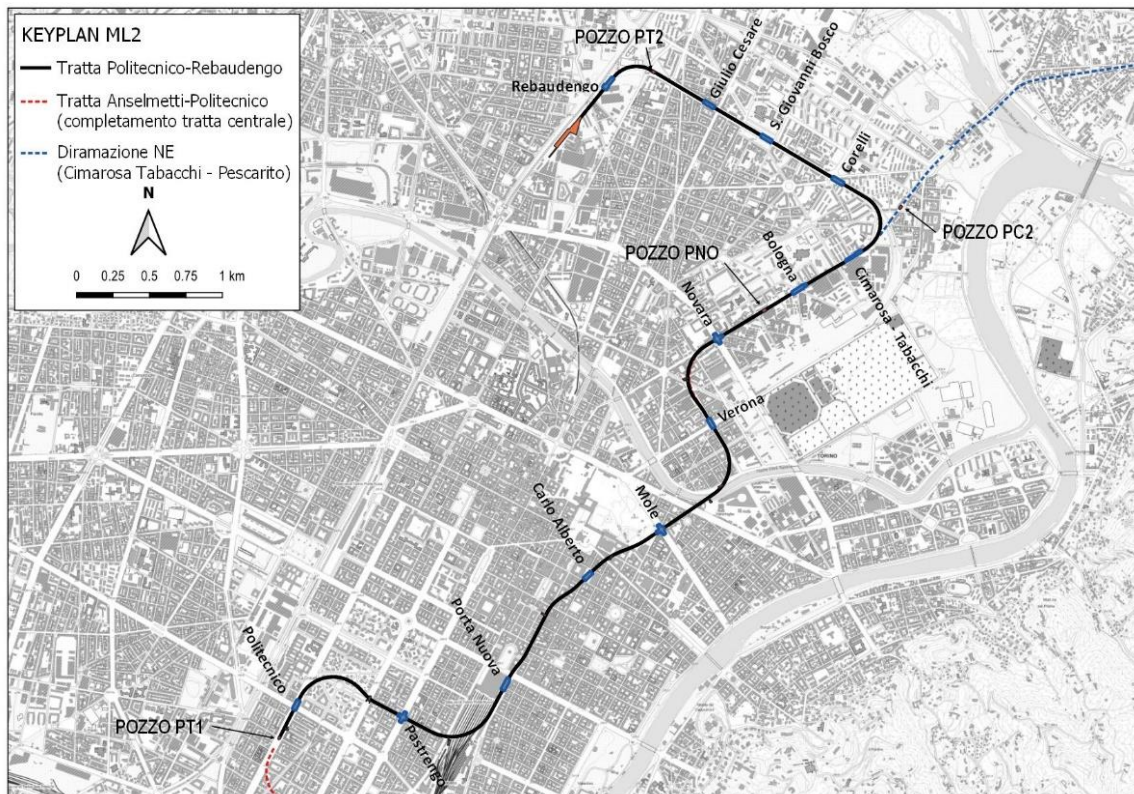



Figura 1. Key-plan della ML2 - Tratta funzionale Politecnico-Rebaudengo.

La progettazione definitiva della tratta Rebaudengo-Politecnico è articolata in due lotti costruttivi:

- 1° lotto costruttivo: "Rebaudengo-Bologna" che si sviluppa tra il deposito/officina Rebaudengo ed il pozzo Novara per una lunghezza complessiva di circa 4.0 km, comprende: un primo tratto di 570 m di galleria naturale a foro cieco realizzata con metodo tradizionale, il successivo tratto in galleria artificiale per una lunghezza pari a 2390 m, 6 stazioni (Rebaudengo, Giulio Cesare, San Giovanni Bosco, Corelli, Cimarosa/Tabacchi, Bologna), n. 6 pozzi intertratta aventi funzione di ventilazione della linea, un pozzo di inizio tratta ricavato all'interno del manufatto del deposito/officina Rebaudengo, un pozzo costruttivo ubicato tra la fine dello scavo a foro cieco e l'inizio della galleria artificiale, e la predisposizione di un manufatto per la realizzazione della futura diramazione nord verso San Mauro Torinese;
- 2° lotto costruttivo: "Bologna-Politecnico", che si sviluppa tra il pozzo Novara ed il pozzo terminale ubicato a fine tratta, nell'estremità sud del retrostazione Politecnico, comprende un

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

tratto di galleria di linea pari a 5.7 km, n. 7 stazioni (Novara, Verona, Mole/Giardini Reali, Carlo Alberto, Porta Nuova, Pastrengo, Politecnico), n. 7 pozzi di intercetta aventi funzione di ventilazione della linea, n. 1 avente funzione di uscita di emergenza ed un pozzo terminale per l'estrazione della TBM. In questo lotto la galleria di linea è realizzata a foro cieco con metodo meccanizzato con l'ausilio di una TBM-EPB, che avvierà gli scavi dal pozzo Novara (realizzato nell'ambito del 1° lotto costruttivo) dove è prevista l'installazione del cantiere della TBM fino al retrostazione Politecnico.

La prima tratta funzionale sarà costituita dalle seguenti opere:

- 13 stazioni sotterranee;
- 13 pozzi intertratta aventi funzione di ventilazione;
- 1 pozzo di ventilazione ad inizio tratta incluso nel manufatto del deposito/officina Rebaudengo;
- 1 uscita di emergenza ed accesso dei soccorsi;
- 2 pozzi terminali provvisori, di cui uno a fine tratta funzionale per l'estrazione della TBM, posto all'estremità del tronchino in retrostazione Politecnico e l'altro alla fine della galleria a foro cieco realizzata con metodo tradizionale.
- La galleria di linea (Figura 2) sarà costituita da:
 - la galleria naturale a foro cieco realizzata con scavo tradizionale per una lunghezza complessiva di 570 m circa, che va dal manufatto di retrostazione Rebaudengo alla Stazione Rebaudengo e da quest'ultima al pozzo terminale PT2 ubicato alla fine dello scavo a foro cieco e costituisce l'inizio della galleria artificiale;
 - la galleria artificiale in Cut & Cover da uno a tre livelli, per una lunghezza complessiva di circa 2390 m che collega il pozzo PT2 e le stazioni Giulio Cesare, San Giovanni Bosco, Corelli, Cimarosa/Tabacchi, Bologna fino al manufatto in retrostazione Bologna che include anche il pozzo Novara;
 - la galleria naturale realizzata in scavo meccanizzato mediante una TBM (Tunnel Borin Machine) avente diametro di 10.00 m, che andrà dal Pozzo Novara fino al tronchino in retrostazione Politecnico per una lunghezza complessiva di circa 5175 m;
- Il manufatto in retrostazione Rebaudengo, avente la funzione di deposito-officina, per la manutenzione ordinaria programmata sui treni, oltre che il parcheggio di 7 treni in stalli predisposti e complessivamente di 10 treni a fine servizio;
- La predisposizione per la realizzazione del manufatto di bivio nella diramazione nord verso San Mauro Torinese.

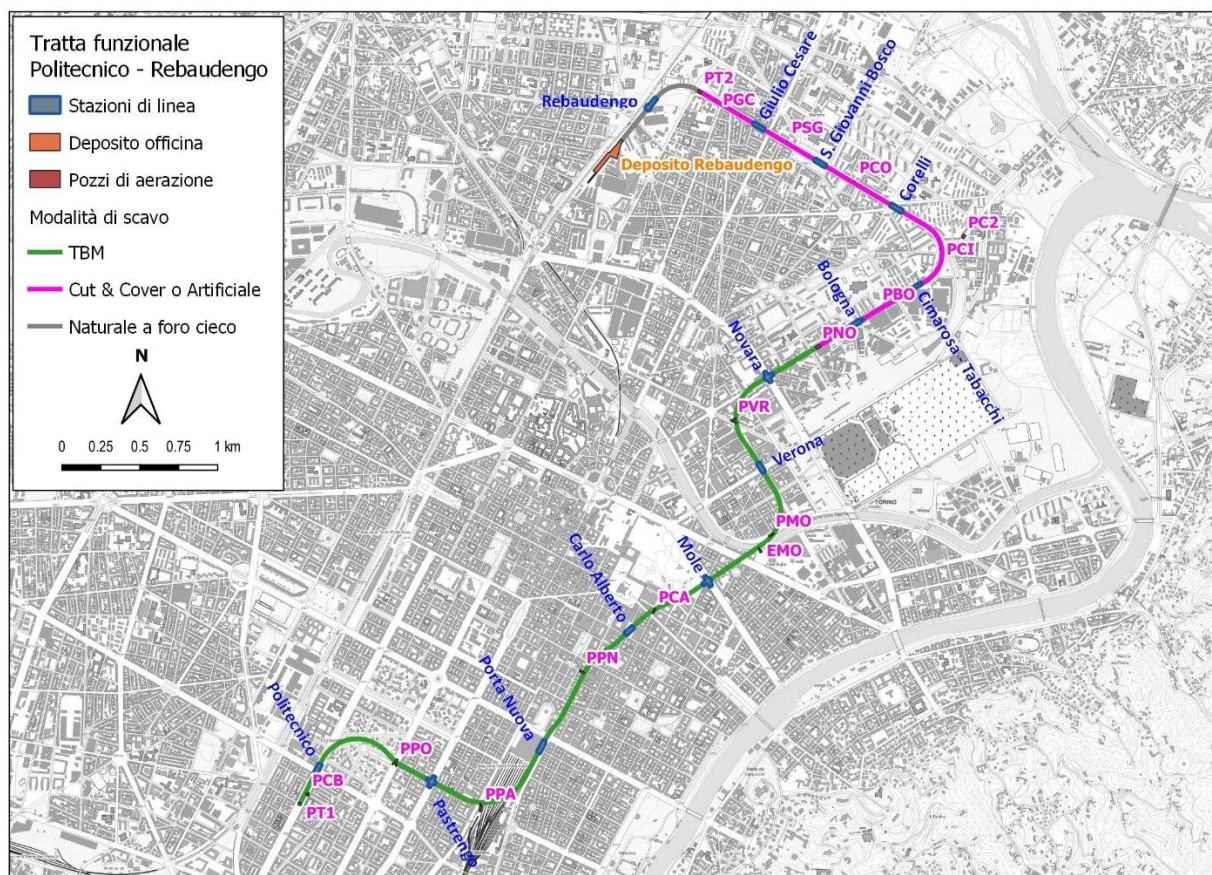




Figura 2. Suddivisione della ML2 in base alle modalità di scavo previste.

Per quanto riguarda la porzione di tracciato da realizzarsi in C&C/ART a livello progettuale sono state raggruppate in 6 tratte d'opera definite rispettivamente GA1, GA2, GA3, GA4, GA5 e GA6. Nel dettaglio le 6 tratte d'opera presentano le seguenti caratteristiche di massima:

- GA1 viene applicata nella tratta compresa tra il pozzo PT2 e la stazione Giulio Cesare e presenta diaframmi con spessore pari a 0.8 m, lunghezza totale variabile da circa 11.6 fino ad un massimo di 12.2 m, distanza tra le paratie pari a 10.8 m, soletta di copertura di spessore pari ad 1.3 m e solettone di fondo di spessore pari a 0.8 m.
- GA2 viene applicata nella tratta compresa tra la stazione Giulio Cesare e la stazione San Giovanni Bosco e presenta diaframmi con spessore pari a 0.8 m, lunghezza totale variabile da circa 12.2 fino ad un massimo di 12.3 m, distanza tra le paratie pari a 9.8 m, soletta di copertura di spessore pari ad 1 m e solettone di fondo di spessore pari a 0.8 m.
- GA3 viene applicata nella tratta compresa tra la stazione San Giovanni Bosco e la stazione Corelli e presenta diaframmi con spessore pari a 0.8 m, lunghezza totale variabile da circa 12.2 fino ad un massimo di 12.3 m, distanza tra le paratie pari a 9.8 m, soletta di copertura di spessore pari ad 1 m e solettone di fondo di spessore pari a 0.8 m.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

- GA4 viene applicata nella tratta compresa tra la stazione Corelli e la stazione Cimarosa Tabacchi comprensivo della predisposizione di un manufatto per la realizzazione della futura diramazione nord verso San Mauro Torinese. I diaframmi presentano uno spessore variabile da 1.0 a 1.2 m e lunghezza totale variabile da un minimo di circa 20.2 m fino ad un massimo di 33.3 m. La distanza tra le paratie è fortemente variabile da un minimo di 7.0 m fino ad un massimo di 21.0 m. La soletta di copertura ha uno spessore variabile da 1.3 a 1.5 m, il solettone di fondo ha uno spessore variabile da 0.8 a 1.5 m, mentre le solette intermedie presentano uno spessore variabile da 0.6 a 1.0 m.
- GA5 viene applicata nella tratta compresa tra le stazioni di Cimarosa Tabacchi e Bologna. I diaframmi presentano uno spessore pari a 1.2 m e lunghezza totale variabile minimo circa di 27.0 m fino ad un massimo di 34.0 m. La distanza tra le paratie è anch'essa variabile da un minimo pari a circa 6.7 m ad un massimo di 11.5 m. La soletta di copertura ha uno spessore pari a 1.2 m, le solette intermedie hanno spessore di 1.0 m mentre infine il solettone di fondo presenta spessore pari a 1.5 m.
- GA6 viene applicata nella tratta compresa tra le stazioni di Bologna ed il Pozzo PNO, ovvero fino al limite del Lotto Costruttivo 1 ove lo scavo della galleria della ML2 prosegue a mezzo TBM. I diaframmi presentano uno spessore di 1.2 m e lunghezza variabile da un minimo circa di 27.6 m fino ad un massimo di 31.5 m. La distanza tra le paratie è anch'essa variabile da un minimo pari a circa 14.8 m ad un massimo di 16.1 m con soletta di copertura e solettone di fondo di spessore pari a 1.5 m, e solette intermedie con spessore di 1.0 m.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

2. LE GEOSTRUTTURE ENERGETICHE

Con il termine geostrutture energetiche si intende quell'insieme di opere geotecnico-strutturali, come ad esempio le fondazioni o i rivestimenti di una galleria, capaci di coniugare in un unico elemento la duplice finalità di stabilità strutturale e di scambio di calore con il terreno circostante (Barla et al. 2016). Agli elementi costruttivi dell'opera geotecnica sono accoppiati sistemi chiusi in grado di assorbire il calore dal terreno con cui sono a contatto e di trasferirlo alla relativa pompa di calore grazie alla quale verrà successivamente utilizzato.

Le geostrutture energetiche non necessitano di elementi specifici nel sottosuolo per il solo sfruttamento geotermico, riducendo notevolmente i costi iniziali di costruzione rispetto a un impianto geotermico tradizionale. I vantaggi rispetto a quest'ultimo sono rappresentati dal fatto che non è richiesto lo scavo di trincee o pozzi in cui installare le sonde geotermiche e, inoltre, si rende possibile la realizzazione di impianti geotermici anche in zone altamente antropizzate dove finora, data la limitata disponibilità di spazio, non era di fatto possibile installarli.


L'utilizzo delle geostrutture energetiche come fonti di energia geotermica è iniziato una trentina di anni fa in Austria e si è poi esteso ad altri paesi europei: Svizzera, Germania, Gran Bretagna, Francia, Russia. Dapprima limitato alle piastre di fondazione e, in seguito, esteso ad altri elementi geostretturali quali pali di fondazione e paratie (Brandl 2006, Adam & Markiewicz 2009, Laloui & Di Donna 2013, Barla & Di Donna 2016a, Soga & Rui 2016).

Le strutture sotterranee possono essere attivate termicamente installando all'interno del calcestruzzo una rete di tubi in materiale plastico con un fluido che scorre al loro interno e che ne costituisce il mezzo per il trasferimento del calore dal terreno agli edifici e viceversa.

La costruzione di elementi strutturali in calcestruzzo armato quali scambiatori di calore, in sostituzione dei tradizionali impianti geotermici, è particolarmente conveniente non solo dal punto di vista economico, giacché, come già accennato, consente di sintetizzare in un unico elemento esigenze strutturali ed energetiche, ma anche dal punto di vista fisico, poiché il calcestruzzo è un materiale caratterizzato da buona conducibilità termica e capacità di immagazzinamento del calore. Quest'aspetto giustifica che il calcestruzzo, a tutti gli effetti, possa essere assunto come uno scambiatore di calore (Brandl 2006).

Con riferimento specifico alle opere strutturali previste per la Linea 2 della Metropolitana di Torino, l'attivazione termica può avvenire attrezzando le paratie di sostegno degli scavi, nelle tratte realizzate con tecnica Cut & Cover o per le stazioni, con tubi scambiatori oppure mediante conci energetici prefabbricati (Barla & Di Donna 2016), per le tratte realizzate mediante scavo con TBM.

Di seguito viene fornita una descrizione dei concetti generali che sono alla base delle geostrutture energetiche che saranno adottate nel presente progetto con particolare riguardo ai conci e ai diaframmi energetici. Entrambe queste tipologie di geostrutture son state ampiamente testate in casi reali e tra queste, alcune specifiche tipologie, sono state anche brevettate (Brandl 2006, Adam & Markiewicz 2009, Laloui & Di Donna 2013, Barla & Di Donna 2016b, 2018, Barla et al., 2018, 2019, Soga & Rui 2016).

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

Il concio energetico sarà utilizzato come scambiatore in tutte le tratte realizzate in TBM della linea 2, Lotto 1. Il diaframma energetico troverà invece applicazione in alcune tratte di gallerie realizzate in C&C e in corrispondenza delle stazioni di linea e del deposito-officina Rebaudengo.

2.1 Conci energetici

In continuità con gli input progettuali derivanti dalla precedente fase di PFTE, anche in questa fase di Progetto Definitivo, per lo sviluppo dei rivestimenti energetici delle gallerie in conci prefabbricati in calcestruzzo (come quelli previsti nel presente progetto), si è fatto riferimento agli studi condotti al Politecnico di Torino dal 2013 ad oggi che hanno consentito di sviluppare un brevetto di concio energetico (Barla e Di Donna 2016b) e di realizzare un campo sperimentale di galleria energetica realizzato nella galleria di prolungamento Sud della Linea 1 della Metropolitana di Torino (Barla et al. 2019), che rappresenta il primo caso di applicazione della tecnologia in Italia e il più documentato al mondo con riferimento al comportamento termomeccanico dei rivestimenti.

Il concio energetico di riferimento presenta una disposizione innovativa delle tubazioni di scambio termico consentendo di ridurre le perdite di carico di una quantità compresa tra il 20 e il 30% in ogni singolo anello di rivestimento e aumentare l'efficienza di scambio termico fino al 10%, rispetto a conci energetici con diverse disposizioni interne delle tubazioni di scambio. Lo stesso concio può anche essere utilizzato per raffreddare l'ambiente interno delle gallerie. Esistono tre diverse configurazioni del concio in base al posizionamento della rete di tubi (Figura 3). Essa può essere posizionata in prossimità dell'estradosso esterno (Ground), dell'intradosso interno (Air) oppure può comprendere due reti di tubi, una posizionata in prossimità dell'estradosso esterno e la seconda in prossimità dell'intradosso interno (Ground & Air). Nel primo caso, il rivestimento consente lo scambio termico prevalentemente con il terreno, nel secondo caso prevalentemente con l'ambiente interno della galleria mentre nel terzo caso lo scambio termico può avvenire sia con il terreno sia con l'ambiente interno della galleria.

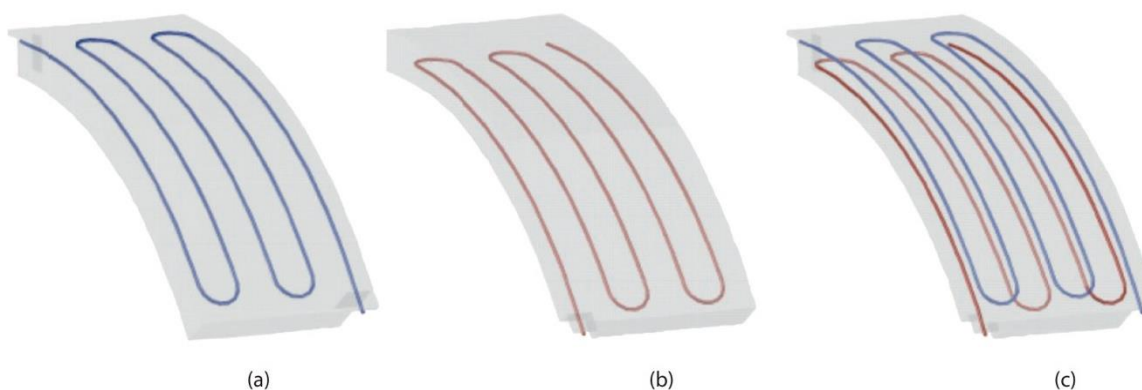


Figura 3. La configurazione Ground (a), Air (b) e Ground & Air (c) (Barla and Di Donna 2018).



La predisposizione della galleria per lo scambio termico avviene dunque attrezzando i conci con tubazioni scambiatori e realizzando un impianto di collegamento tra i conci e il sistema di collettamento e trasferimento presso i ricettori, siano essi le stazioni stesse o edifici posti in superficie. La Figura 4 mostra a titolo di esempio i disegni strutturali di un conco tipo Enertun e della relativa disposizione delle tubazioni nell'intero anello (Barla et al. 2018). La geometria dei conci considerata è quella del prolungamento Sud Lingotto-Bengasi della linea 1 della metropolitana di Torino dove tali conci sono stati installati e testati.

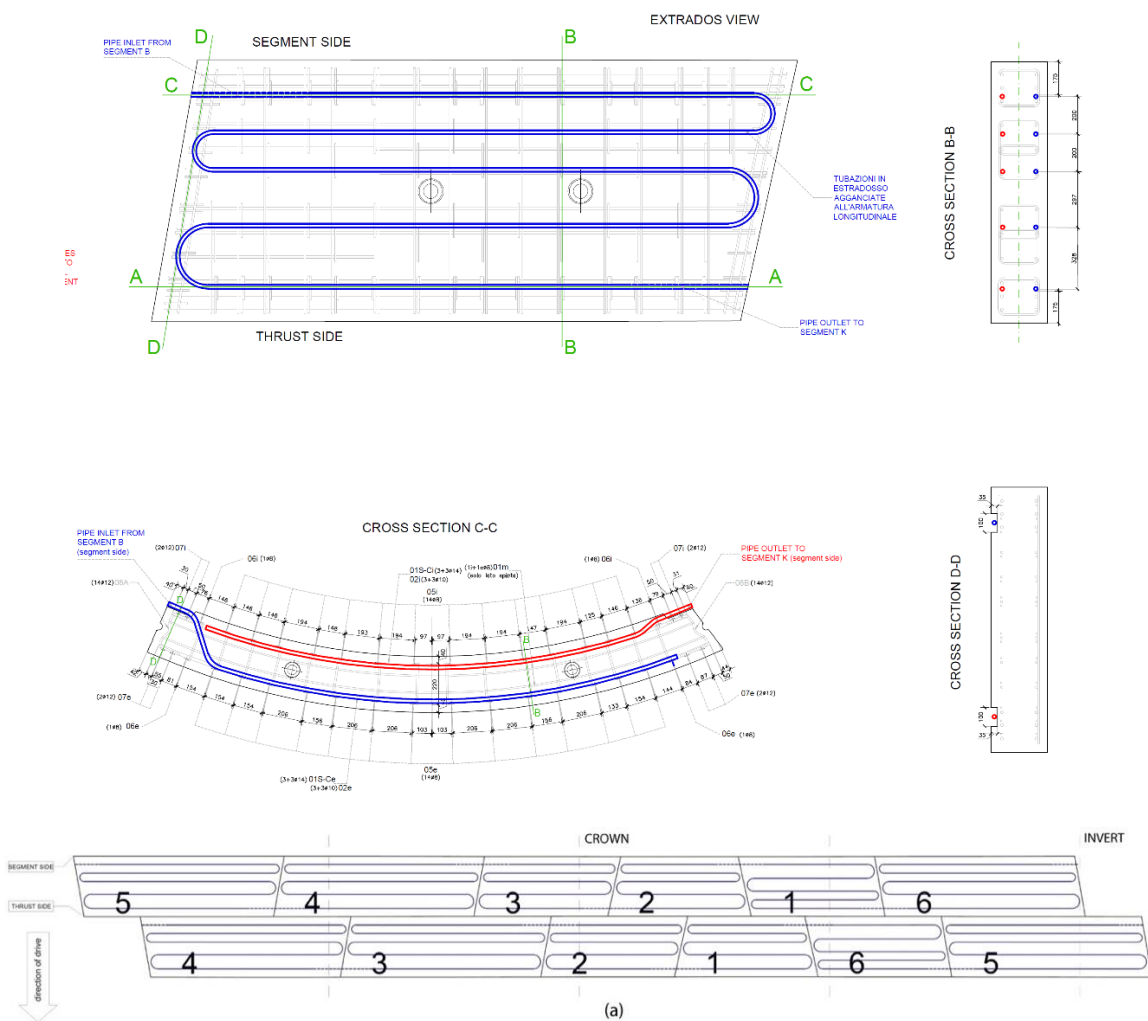


Figura 4. Schema tecnico dell'inserimento delle tubazioni nei conci Enertun (Barla et al. 2018).

Al fine di verificare il funzionamento del conco energetico Enertun, nel 2016 ha preso avvio un progetto di realizzazione di un prototipo sperimentale di galleria energetica nell'ambito di un protocollo di intesa tra il Politecnico di Torino, InfraTo e il Consorzio Integra. Il prototipo è stato realizzato nella galleria del prolungamento Sud della Linea 1 della Metropolitana di Torino durante le fasi di costruzione della stessa (Barla et al. 2019), a circa 42 m a Nord della stazione Bengasi, nel tratto di galleria Lingotto-Bengasi. Consiste di 12 segmenti Enertun equipaggiati con la



configurazione Ground & Air (Figura 5). Il rivestimento in conci prefabbricati ha uno spessore di 30 cm ed è costituito da 6 conci (5 più uno di chiave). Ogni anello è lungo 1,4 m con un diametro interno di 6,88 m. La falda si trova ad una profondità di circa 12 m da p.c.

La prefabbricazione dei conci è stata realizzata tra Dicembre 2016 e Maggio 2017 nello stabilimento di Generale Prefabbricati di Basaluzzo (AI). La Figura 6 mostra un esempio di un conchio prima del getto. Gli anelli sono stati montati in galleria dalla TBM nel Luglio 2017 e successivamente si è proceduto con la realizzazione delle connessioni idrauliche tra i conci e tra gli anelli e la pompa di calore. Tutte le tubazioni sono state opportunamente isolate per evitare dispersioni termiche. La pompa di calore e il dispersore termico sono stati installati in corrispondenza della zona di stazione.

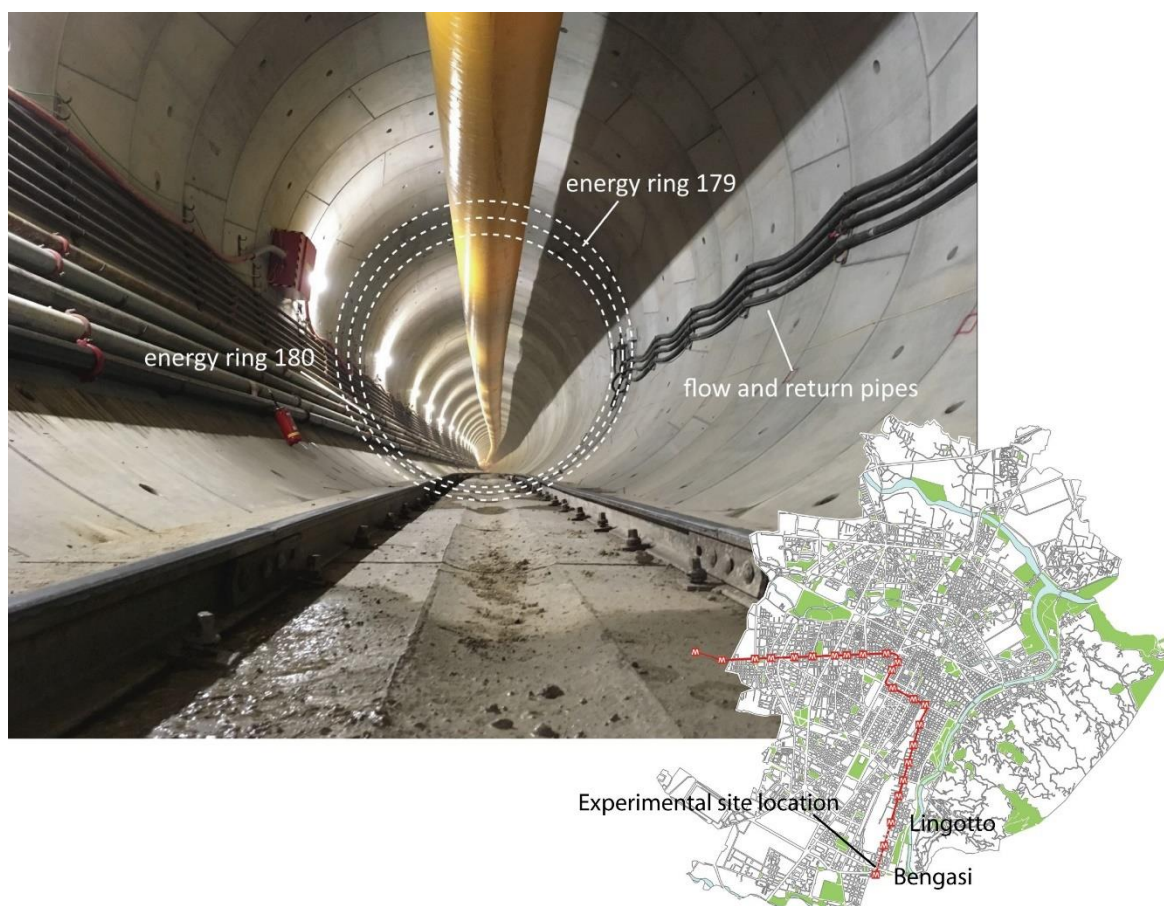



Figura 5. Vista del campo sperimentale Enertun e posizione lungo la Linea 1 della Metropolitana di (Insana e Barla 2020).

Vista la finalità sperimentale, è stato installato un importante sistema di monitoraggio per consentire di valutare il comportamento termico del sistema geotermico e il comportamento strutturale dei conci. Il sistema comprendeva sensori di deformazione, tensione e temperatura

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

annegati nei conci durante la prefabbricazione, sensori di temperatura lungo le tubazioni, misuratori di portata e contacalorie.

La sperimentazione è stata avviata a Settembre 2017 e si è protratta per un anno e ha consentito di studiare il comportamento in condizioni estive e in condizioni invernali. Sono state eseguite un totale di 12 prove di funzionamento in modalità di riscaldamento (invernale) e di raffreddamento (estiva) sia utilizzando il circuito di scambio Ground che quello Air. I risultati della sperimentazione sono stati oggetto di pubblicazioni scientifiche e hanno consentito di quantificare lo scambio termico in un intervallo compreso tra 40 e 66 W/m² a seconda della tipologia di applicazione (si veda ad esempio Barla et al. 2019 e Insana & Barla 2020).



Figura 6. Esempio di concio energetico prima del getto con il particolare della predisposizione delle scatole per il collegamento idraulico tra i conci (Barla et al., 2018).

2.2 Diaframmi energetici

I diaframmi energetici costituiscono l'equivalente del concio energetico descritto in precedenza e sono utilizzabili per lo scambio termico nei contesti ove per esigenze strutturali devono essere realizzati tali strutture di contenimento.

Le paratie in diaframmi di calcestruzzo armato, definiti nel seguito come "diaframmi", hanno il vantaggio di essere dotate di una modesta rigidità e possono essere utilizzate infatti non solo come elemento provvisorio per l'esecuzione degli scavi ma come vero e proprio elemento strutturale facente parte dell'opera medesima.

I diaframmi energetici, diversamente dai diaframmi classici, presentano fasci di tubi in polietilene necessari per il trasporto del fluido termovettore responsabile dello scambio di calore, che



vengono normalmente posati a meandro e fissati all'armatura tramite elementi di fissaggio o fascette (Figura 7). Successivamente l'armatura, unitamente alle tubazioni di scambio termico viene poi immersa nel calcestruzzo per assicurare un buon contatto termico.

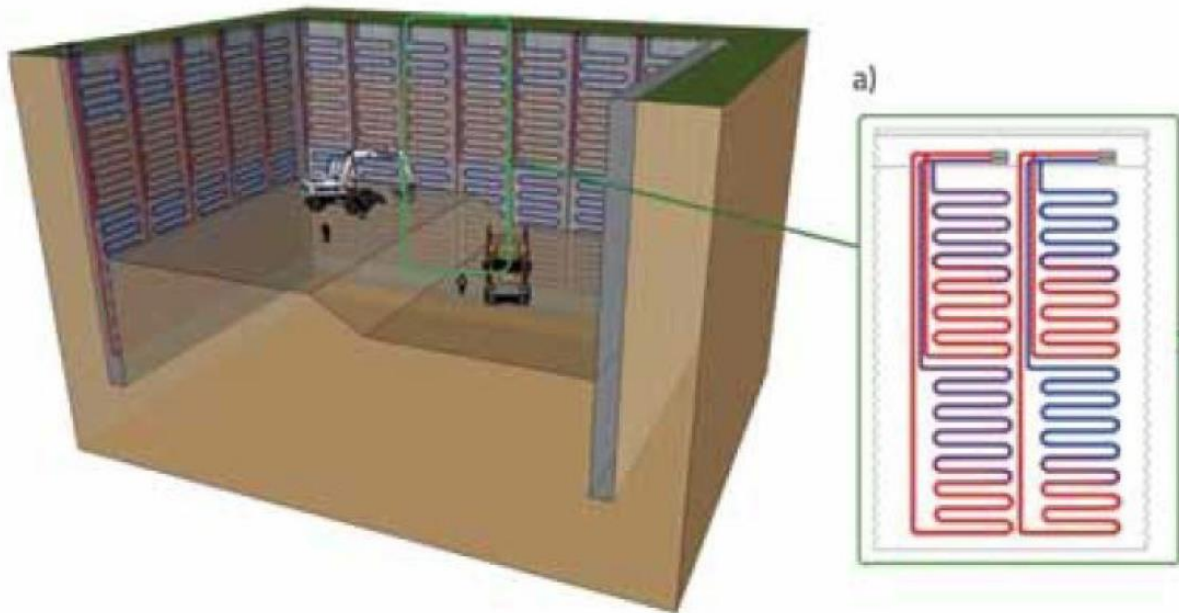



Figura 7. Schema di diaframma energetico in calcestruzzo armato e particolare della disposizione delle tubazioni di scambio termico al suo interno (da Brandl, 2013).

Numerosi tubi scambiatori vengono disposti lungo la parete del diaframma in direzione longitudinale. Generalmente le tubazioni vengono collocate solamente lungo la superficie a contatto col terreno in condizione di ammorsamento del diaframma limitato. Nel caso in cui vi sia presenza di ulteriori rivestimenti interni, i tubi scambiatori possono essere disposti anche su entrambe le facce del diaframma. Similmente a quanto già descritto per i conci energetici, le tubazioni per lo scambio termico possono essere fissate direttamente alle gabbie di armatura a mezzo di staffe o fascette. Come mostrato nella Figura 8 e nella sezione della Figura 9 le tubazioni sono poste all'esterno della gabbia di armatura in modo che, una volta che viene realizzato il getto, risultino ad una adeguata profondità entro il copriferro tale da assicurare un efficace scambio termico con il terreno circostante. Il diaframma, svolgendo la sua funzione strutturale, è soggetto principalmente alla pressione laterale del terreno che si traduce in sforzi interni di compressione dal lato del terreno e sforzi interni di trazione dal lato dello scavo. Una volta che i tubi scambiatori di calore sono stati inglobati nel calcestruzzo, il fluido termovettore al loro interno subisce variazioni di temperatura nel corso dell'anno che generano quindi uno stress termico localizzato attorno al tubo. In generale questi stress risultano comunque di entità molto limitata e non comportano particolari problematiche all'elemento strutturale.



Figura 8. Particolare della disposizione delle tubazioni di scambio termico all'interno dell'armatura di un diaframma energetico.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

3. SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E STRUTTURA DELLA DOCUMENTAZIONE PROGETTUALE

L'obiettivo principale della progettazione inerente all'attivazione termica delle opere strutturali a servizio della ML2 è stata la definizione della potenzialità termica ottenibile dalle geostrutture. Per giungere a tale risultato è stato richiesto lo sviluppo di una serie di attività specifiche che vengono riassunte nei capitoli seguenti.


3.1 Struttura della documentazione progettuale

La documentazione progettuale riguardante l'attivazione geotermica delle strutture della ML2 consta in dettaglio dei seguenti documenti:

- Geotermia - Relazione Generale (documento n° MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1);
- Geotermia - Caratterizzazione termo-idraulica dei terreni (documento n° MTL2T1A0DGTRCOMR002-0-1);
- Geotermia - Relazione tecnica e di calcolo (documento n° MTL2T1A0DGTRCOMR003-0-1);
- Geotermia - Individuazione dei ricettori per lo sfruttamento del calore estratto (documento n° MTL2T1A0DGTRCOMR004-0-1);

Il progetto è altresì completato dalle seguenti Tavole grafiche:

- Geotermia - Tipologico impianto geotermico galleria tratta TBM (documento n° MTL2T1A0DGTRCOMT001-0-1);
- Geotermia - Tipologico impianto geotermico galleria tratta C&C (documento n° MTL2T1A0DGTRCOMT002-0-1);
- Geotermia - Tipologico impianto geotermico deposito Rebaudengo (documento n° MTL2T1A0DGTRCOMT003-0-1);
- Geotermia - Tipologico impianto geotermico stazioni SSG, SGC E SCO (documento n° MTL2T1A0DGTRCOMT004-0-1);
- Geotermia - Tipologico impianto geotermico stazioni SMO, SPA e SNO (documento n° MTL2T1A0DGTRCOMT005-0-1);
- Geotermia - Tipologico impianto geotermico stazioni SVR, SPO e SCA (documento n° MTL2T1A0DGTRCOMT006-0-1);
- Geotermia - Impianto geotermico stazione speciale Cimarosa/Tabacchi (documento n° MTL2T1A0DGTRCOMT007-0-1);
- Geotermia - Impianto geotermico stazione speciale Bologna (documento n° MTL2T1A0DGTRCOMT008-0-1);
- Geotermia - Impianto geotermico stazione speciale Porta Nuova (documento n° MTL2T1A0DGTRCOMT009-0-1);
- Geotermia - Quadro sinottico impianto geotermico stazioni (documento n° MTL2T1A0DGTRCOMT0010-0-1).

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

3.2 Definizione dei criteri progettuali per l'attivazione termica delle strutture

In relazione ai criteri progettuali per l'attivazione termica delle strutture, l'analisi condotta ha consentito di individuare quali strutture sono da ritenersi idonee allo scambio termico.

I tratti di galleria realizzati in TBM e in C&C sono stati interamente ritenuti idonei all'attivazione termica eccettuate le porzioni interferenti con i pozzi di aerazione e con il pozzo di emergenza EMO collocato tra le Stazione di Mole-Giardini Reali e Verona. In questi tratti l'intersezione tra la galleria scavata sia in TBM che in C&C con i pozzi prevede la realizzazione di cunicoli o finestre laterali che interrompono la continuità degli anelli prefabbricati in cls o dei diaframmi e non consentono quindi l'inserimento delle tubazioni di scambio termico all'interno delle strutture. Per la tratta di galleria realizzata in scavo tradizionale compresa tra il pozzo PT2, e il deposito Rebaudengo non è invece stata prevista l'attivazione termica così come per i pozzi di inizio e fine tratta (PT1, PNO e PT2) (Figura 1 e Figura 2).


Riguardo all'attivazione termica delle stazioni è stato deciso in particolare di non attivare le strutture della stazione Rebaudengo in quanto è ubicata in adiacenza ai diaframmi della stazione Ferroviaria Rebaudengo-Fossata collegata al passante ferroviario urbano di Torino che di fatto fungono da schermatura nei confronti del flusso idrico sotterraneo. Per tutte le restanti 12 stazioni (su un totale di 13) sono stati attivati termicamente i diaframmi che presentano le seguenti caratteristiche:

- Assenza di interruzioni nel diaframma realizzate per mettere in comunicazione il vano principale della stazione con vani laterali secondari (locali tecnici, pozzi per ascensori, scale di accesso, ecc.);
- Assenza di vani e strutture esterne al diaframma da attivare che possono comportare una parziale o totale schermatura della struttura.

Per quanto riguarda infine il Deposito-officina Rebaudengo tutti i diaframmi perimetrali della struttura sono stati ritenuti termicamente attivabili.

Per i tratti di galleria realizzata in TBM si è previsto il collegamento in serie di due anelli del rivestimento della galleria consecutivi (ogni anello risulta composto da 7 conci oltre al concio chiave) per formare un unico circuito di scambio così come mostrato nella Tavola MTL2T1A0DGTRCOMT001.

I tratti di linea che saranno realizzati con il sistema C&C prevedono l'esecuzione di diaframmi con lunghezza del tratto attivabile, ovvero la lunghezza compresa tra l'intersezione con il solettone di copertura superiore e la base del diaframma variabile da circa 12 fino a 34 m. Ai fini dell'ottimizzazione dello scambio termico è stato definito di volta in volta il numero di diaframmi da collegare in un singolo circuito. In particolare, al crescere della profondità dei diaframmi, essi sono stati collegati in serie in modo da creare circuiti costituiti da 5, 3 o 2 diaframmi.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

I circuiti di scambio saranno poi collegati con le tubazioni di mandata, di ritorno e di ritorno inverso che convogliano il fluido di scambio di tutti i circuiti alla pompa di calore di riferimento. Ogni diaframma presenterà quindi una tubazione interna con un collegamento a 3U. I dettagli costruttivi vengono riportati per esteso nella Tavola MTL2T1A0DGTRCOMT001.

Nelle stazioni per la scelta dei diaframmi da attivare termicamente sono stati valutati le geometrie ed i dettagli costruttivi. Nelle Tavole MTL2T1A0DGTRCOMT004 - MTL2T1A0DGTRCOMT009 vengono riportati i tipologici per le stazioni tra loro assimilabili per struttura e disposizione dei diaframmi mentre nella Tavola MTL2T1A0DGTRCOMT0010 viene riportato un quadro sinottico di tutte le stazioni attivabili termicamente con la relativa disposizione dei diaframmi.

Sulla base dei dettagli costruttivi di ogni stazione ed in particolare in relazione alla presenza dei manufatti di accesso, ventilazione e dei locali tecnici previsti in adiacenza al corpo principale della stazione sono stati valutati i diaframmi che potranno essere attivati termicamente. A questo proposito, come riferimento dimensionale, per i diaframmi è stato considerato un pannello di larghezza pari a 2.8 m congruente con quanto indicato nelle tavole progettuali. La larghezza attivabile complessiva è stata quindi ottenuta considerando il numero intero di pannelli di larghezza pari a 2.8 m che è possibile includere in ciascun diaframma. Al tempo stesso lungo gli spigoli di ciascun diaframma è stato mantenuto un tratto non attivato (sterile) di lunghezza variabile in funzione della parte rimanente, comunque sempre inferiore a 2.8 m. Si sottolinea che queste lunghezze mantenute sterili rappresentano una porzione estremamente contenuta rispetto alla larghezza del diaframma e non si ritiene che possano influire in maniera negativa sul potenziale termico scambiabile con il terreno.


In termini generali il criterio adottato per il collegamento in serie dei diaframmi è lo stesso di quello adottato per la galleria in C&C salvo lievi modifiche per consentire l'adattamento alla geometria specifica della struttura.

3.3 Definizione dei parametri termo-idraulici dei terreni

Per la definizione dei parametri termo-idraulici dei terreni del sottosuolo di Torino sono state condotte specifiche prove in laboratorio (*needle probe*) e prove in sito (D-TRT).

Unitamente a tali prove è stata effettuata una campagna di misure della temperatura dell'acqua di falda volta alla individuazione ed alla ricostruzione spaziale delle variazioni di tale parametro nel sottosuolo dell'area che sarà interessata dalla realizzazione della ML2. Tutte le considerazioni svolte per la definizione dei parametri sono sviluppate nel dettaglio nella Relazione di caratterizzazione termo-idraulica dei terreni (MTL2T1A1DGTRCOMR002).

Sulla base di tutte le indagini geognostiche condotte nell'ambito del PFTE e del PD sintetizzate nella relazione tecnica descrittiva delle indagini condotte (documento n° MTL2T1A0DINDGENR002), e sulla base dei contenuti delle interpretazioni di queste ultime riportate nella relazione geologica ed idrogeologica (documento n° MTL2T1A0DGEOGENR001) e nella relazione geotecnica e sismica (documento n° MTL2T1A0DGEOGENR002), nel sottosuolo di Torino sono state riconosciute e descritte le seguenti Unità Geologiche:

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

- UID - complesso costituito da materiale di origine antropica (riporti);
- CSN - depositi fluviali attuali, recenti ed antichi dell'alveo del Fiume Dora Riparia;
- AFR - depositi appartenenti al sistema di Frassinere di età pleistocenica superiore;
- INS - depositi incertae sedis ricondotti alternativamente alla base dell'unità AFR o alla parte superiore dell'unità SFR;
- SFR - depositi ascrivibili alle Sabbie di Ferrere di età pliocenica media (Villafranchiano Auct.);
- FAA - depositi ascrivibili alle Argille Azzurre (o Argille di Lugagnano) di età Pliocenica inferiore (Zancleano);
- SAF - Marne di Sant'Agata Fossili di età Miocenica superiore (Tortoniano-Messiniano).

A partire dai valori di conducibilità locale del terreno e dai risultati delle prove di laboratorio misurate a mezzo delle prove D-TRT è stato possibile ottenere i valori di conducibilità della frazione solida del terreno mediante l'applicazione attraverso modelli di mescolamento tra le differenti fasi (mixing models) (De Vries, 1963, Dong et al., 2015) prendendo in considerazione la porosità ed il grado di saturazione del terreno. Le conducibilità termiche della fase solida così ottenute, comprese rispettivamente nell'intervallo 3.48-5.46 W/mK per i depositi fluvioglaciali (AFR) e 3.38-5.33 W/mK per le Argille Azzurre e le Marne di Sant'Agata Fossili (FAA/SAF), risultano essere più elevate rispetto alla conducibilità termica complessiva del terreno poiché quest'ultima risulta influenzata oltre che dalle particelle solide anche dalla presenza della porosità del materiale e quindi dall'aria e dall'acqua nei pori. A partire dai precedenti valori sono stati ottenuti infine i valori caratteristici di conducibilità termica della fase solida per l'Unità dei Depositi fluvioglaciali (AFR/INS) e per l'Unità delle Argille Azzurre e delle Marne di Sant'Agata Fossili (FAA/SAF), rispettivamente pari a 4.19 e 4.22 W/mK. Questi valori sono stati ulteriormente validati con un modello numerico tridimensionale FEM-TH a simulazione della prova D-TRT1 utilizzando il codice numerico agli elementi finiti FEFLOW (Diersch, 2014).

La ricostruzione della temperatura dell'acqua di falda nell'area del tracciato della ML2 è stata ottenuta attraverso una campagna eseguita il 23/09/2022 su 22 piezometri mediante l'utilizzo di freatimetro dotato di sonda termometrica. In ogni piezometro le misure sono state condotte a 3 differenti profondità all'interno della colonna d'acqua. Inoltre nel mese di luglio 2022, 4 piezometri a tubo aperto sono stati attrezzati ciascuno con un misuratore automatico del livello piezometrico e 3 termometri digitali posti a differenti profondità nell'orizzonte saturo al fine di approfondire le variazioni a breve e a lungo termine di livello e di temperatura.

A partire dai dati puntuali di temperatura misurati sui piezometri nella campagna del settembre 2022 e dalle misure continue dei piezometri SP-D03, SP13, SP-D17 e SA-D14, il dato di temperatura è stato esteso spazialmente in ambiente GIS lungo l'intero tracciato della ML2 mediante interpolazione con algoritmo a distanza inversa ponderata (IDW) come mostrato nella Figura 10.

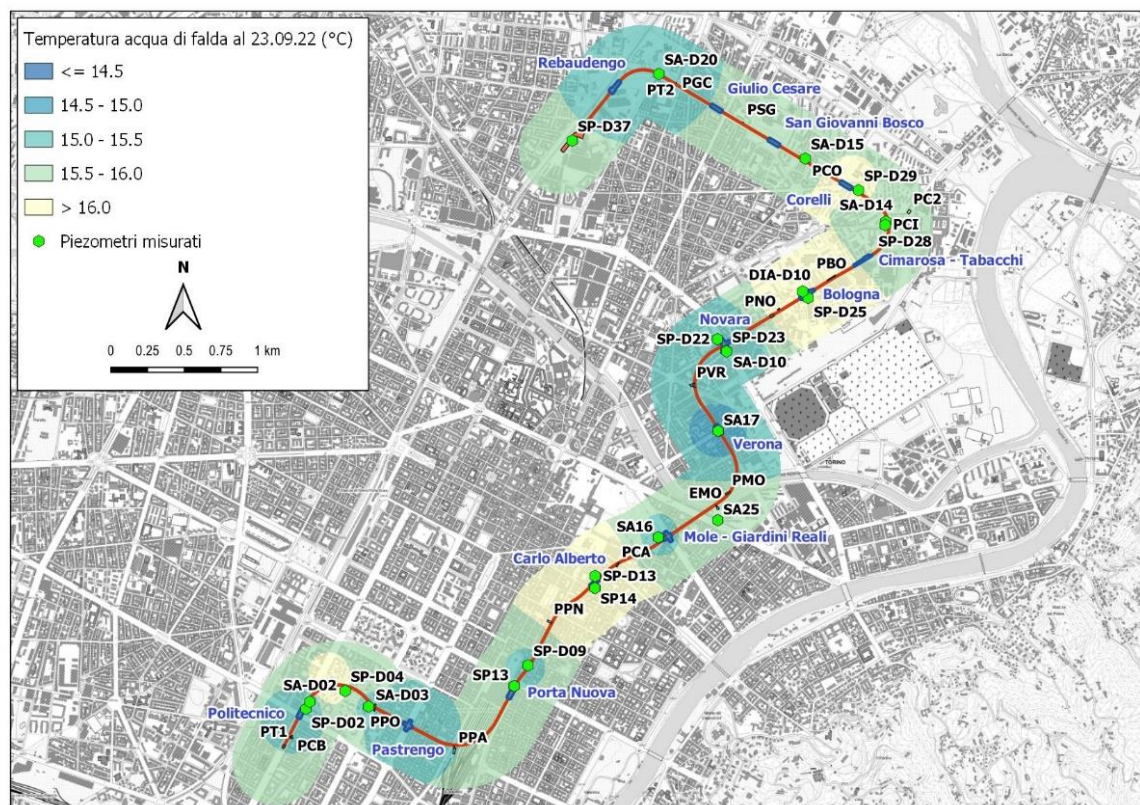


Figura 10. Mappa di interpolazione delle temperature dell'acqua di falda lungo la ML2.

Tramite l'analisi dei dati esistenti e delle nuove indagini sviluppate nella fase di progettazione definitiva si sono definiti i valori dei parametri necessari come dati di input dei modelli numerici agli elementi finiti sviluppati. È stato quindi possibile identificare 3 differenti unità termo-idrauliche che caratterizzano il sottosuolo di Torino ed in particolare:

- Unità AFR/INS che comprende i depositi alluvionali pleistocenici appartenenti al sub-sistema di Frassinere (AFR) unitamente ai depositi *incertae sedis* (INS);
- Unità SFR che comprende i depositi a prevalente granulometria sabbiosa delle Sabbie di Ferrere (SFR);
- Unità FAA/SAF comprendente i depositi a prevalente granulometria limoso-argillosa della Argille Azzurre plioceniche (FAA) unitamente ai livelli marnoso-argillosi del substrato pre-pliocenico caratterizzato nell'area dalle Marne di Sant'Agata Fossili (SAF).

Nella Tabella 2 per ognuna delle 3 unità individuate vengono riepilogati i valori caratteristici dei parametri termo-idraulici che saranno direttamente utilizzati nella modellazione FEM TH per calcolare la potenza termica estraibile dal terreno a seguito dell'attivazione delle strutture della ML2.


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

Tabella 2. Valori delle grandezze termo-idrauliche caratteristiche delle differenti unità termo-idrauliche individuate.

Unità termo-idraulica	Permeabilità orizzontale k_h [m/s]	Rapporto permeabilità verticale/Permeabilità orizzontale K_v/k_h [-]	Porosità totale n [-]	Porosità efficace n_e [-]	Conducibilità termica fase solida λ_s [$Wm^{-1}K^{-1}$]	Capacità termica ρ_c [$Jm^{-3}K^{-1}$]
AFR/INS	$1.93 \cdot 10^{-3}$	0.05	0.25	0.175	4.19	$2.60 \cdot 10^6$
SFR	$4.20 \cdot 10^{-4}$	0.05	0.25	0.125	3.30	$2.50 \cdot 10^6$
FAA/SAF	$1.00 \cdot 10^{-8}$	0.05	0.37	0.050	4.22	$2.30 \cdot 10^6$

3.4 Individuazione delle sezioni omogenee da utilizzare nelle analisi numeriche

Per l'individuazione delle sezioni tipo da utilizzare nelle analisi numeriche, considerata l'eterogeneità plano-altimetrica del tracciato, dell'altezza del livello di falda e delle condizioni geologiche-geotecniche del sottosuolo della città di Torino, nel presente lavoro è stata utilizzata la medesima metodologia di parametrizzazione che era stata adottata nel PFTE della ML2 (Barla et al., 2019; 2021). Questa metodologia è basata su una parametrizzazione a classi implementata e sviluppata su sistemi GIS Open Source (Software QGIS). Tramite opportune operazioni di geoprocessamento e map algebra è stato possibile confrontare a livello spaziale il tracciato della ML2 con la distribuzione e la variazione sia planimetrica che in profondità di tre parametri idrodinamici della falda (Livello direzione e gradiente di flusso), un parametro termico (temperatura dell'acqua di falda) ed un ulteriore parametro che tiene in considerazione le caratteristiche idrogeologiche del terreno in un intorno significativo delle opere in progetto.

Per la trattazione in dettaglio di ciascun parametro si rimanda al documento n° MTL2T1A0DGTRCOMR003.

La galleria di linea a partire dal pozzo di estrazione della TBM denominato PT1 fino al Deposito Rebaudengo è stata quindi suddivisa in tratte di lunghezza pari a 20 m, escludendo le 12 stazioni ed il deposito Rebaudengo che vengono analizzati separatamente ed il tratto di galleria di linea realizzato con scavo in tradizionale non attivabile termicamente. La lunghezza delle tratte pari a 20 m è stata scelta in modo da mantenere una sufficiente risoluzione spaziale in funzione della variazione dei parametri precedentemente descritti, evitando al tempo stesso di generare informazioni sovrabbondanti per gli scopi del presente studio. In prossimità delle stazioni, dei pozzi PT1 e PT2, del deposito Rebaudengo e del punto di passaggio tra la tratta realizzata in TBM e la tratta realizzata in C&C, i limiti tra le differenti tratte sono stati localmente spostati e adattati alla presenza di questi manufatti. Di conseguenza, alcune tratte possono presentare lunghezze leggermente superiori o inferiori di 20 m.

Complessivamente, dal pozzo PT1 di estrazione della TBM (posto nel tronchino in retrostazione Politecnico) fino al pozzo PT2 (posto tra le stazioni di Giulio Cesare e Rebaudengo) sono state individuate 375 tratte attivabili di cui 257 realizzate con TBM e 118 realizzate con C&C (Figura 11).

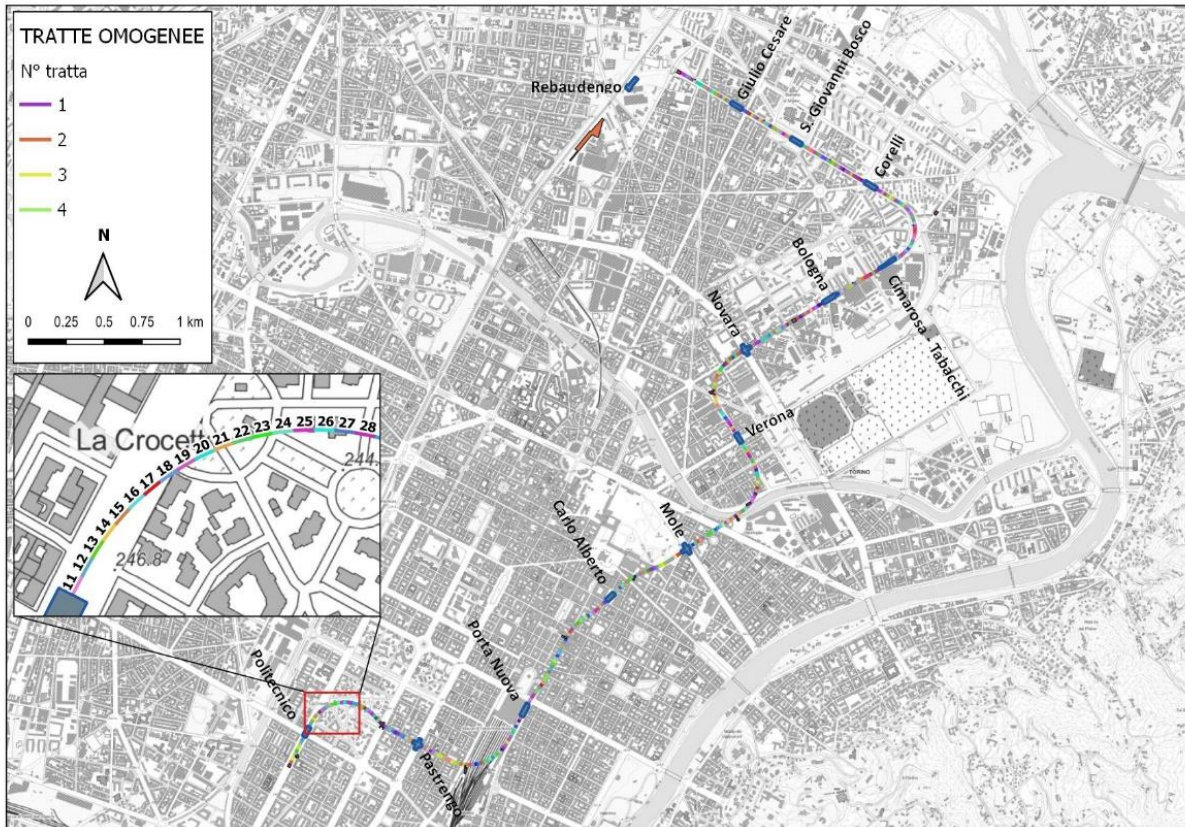



Figura 11. Suddivisione della tratta Politecnico-Rebaudengo della ML2 in tratte omogenee: planimetria generale e dettaglio tra le stazioni Politecnico e Pastrengo.

Per ciascuno dei parametri considerati nella metodologia (F, T, DF, I e Geo) la suddivisione in classi adottata viene schematizzata e riassunta nella Figura 12 e nella Figura 13, rispettivamente per le tratte che saranno realizzate in TBM e per le tratte in C&C con contestuale realizzazione di diaframmi.

Per il tratto Politecnico-Rebaudengo della ML2 sono state quindi individuate rispettivamente 22 sezioni omogenee per la porzione che sarà realizzata in TBM e 14 sezioni omogenee per la porzione che sarà realizzata in C&C. Il totale complessivo delle sezioni omogenee individuate è quindi pari a 36. A ciascuna sezione omogenea è stato infine assegnato un codice univoco che corrisponde ad uno specifico modello numerico FEM-TH.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX


	F	T	DF	I	Geo
	Posizione galleria rispetto falda [m]	Temperatura media acqua di falda [°C]	Direzione flusso falda [°]	Gradiente di flusso [%]	Unità geologico stratigrafiche
CLASSE 1	Livello falda > Calotta	$T < 15.0$ (14.5)	Ortagonale tracciato $\pm 30^\circ$ (90°)	$I \geq 0.40$ (0.65)	Interamente in AFR/INS
CLASSE 2	Calotta \leq Livello falda \leq Arco rovescio	$15.0 \leq T \leq 16.0$ (15.5)	Situazione Intermedia ($\pm 30^\circ < DF < \pm 60^\circ$)	$0.40 < I \leq 0.25$ (0.30)	Al contatto tra AFR/INS e FAA/SAF
CLASSE 3	Livello falda < arco rovescio	$T > 16$ (16.5)	Parallelo tracciato $\pm 30^\circ$ (0°)	$I < 0.25$ (0.23)	Interamente in FAA/SAF

Figura 12. Matrice riepilogativa per le tratte in TBM con indicazione delle 3 differenti classi per i 5 parametri considerati nella metodologia adottata nel presente lavoro.

	F	T	DF	I	Geo
	Posizione diaframma rispetto falda [m]	Temperatura media acqua di falda [°C]	Direzione flusso falda [°]	Gradiente di flusso [%]	Unità geologico stratigrafiche
CLASSE 1	Livello falda > punto mediano diaframma	$T < 15.0$ (14.5)	Ortagonale tracciato $\pm 30^\circ$ (90°)	$I > 0.4$ (0.65)	Interamente in AFR/INS
CLASSE 2	Punto mediano diaframma \leq Livello falda \leq Base diaframma	$15.0 \leq T \leq 16.0$ (15.5)	Situazione Intermedia ($\pm 30^\circ < DF < \pm 60^\circ$)	$0.40 \leq I \leq 0.25$ (0.30)	Contatto tra AFR/INS e SFR tra punto mediano e base diaframma
CLASSE 3	Livello falda < base diaframma	$T > 16.0$ (16.5)	Parallelo tracciato $\pm 30^\circ$ (0°)	$I < 0.25$ (0.23)	Contatto tra AFR/INS e FAA/SAF tra punto mediano e base diaframma

Figura 13. Matrice riepilogativa per le tratte in C&C con indicazione delle 3 differenti classi per i 5 parametri considerati nella metodologia adottata nel presente lavoro.

Oltre alla galleria di linea, l'attivazione termica riguarderà anche i diaframmi che saranno realizzati per la costruzione di 12 delle 13 stazioni previste lungo il tracciato della ML2 tra Politecnico e Rebaudengo (la stazione Rebaudengo non sarà infatti attivata) nonché per il deposito-officina Rebaudengo. Per le stazioni è stato adottato un differente approccio per la definizione dei modelli di riferimento e dei parametri necessari alla modellazione termo-idraulica ad elementi finiti delle strutture. In questo caso, per ogni stazione, è stato definito uno specifico modello di riferimento che ha incluso la determinazione esplicita (e non quindi per classi) dei medesimi parametri F, T, DF, I e GEO descritti in precedenza.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

I parametri F , T , DF , I e Geo sono stati calcolati come media dei valori presenti in un intorno significativo di dimensioni pari al doppio della massima larghezza (m) e della massima lunghezza (n) del manufatto di stazione secondo lo schema mostrato nella Figura 14.




Figura 14. Estensione dell'area attorno al perimetro di una stazione (Verona) nella quale vengono definiti i parametri F , T , DF , I e Geo medi da utilizzare nei modelli numerici FEM-TH.

3.5 Modellazione numerica FEM-TH

La determinazione della capacità di scambio termico con il terreno delle opere strutturali della Tratta Politecnico-Rebaudengo della Linea 2 della Metropolitana è stata condotta mediante modellazione numerica ad elementi finiti. La realizzazione dei modelli numerici corrispondenti alle stazioni, al deposito-officina Rebaudengo e alle sezioni caratterizzanti l'infrastruttura, sia in termini geometrici sia in termini di contesto idrogeologico e proprietà termiche, è stata effettuata con il codice di calcolo agli elementi finiti FEFLOW (Diersch, 2014), distribuito dalla DHI.

I modelli adottati hanno permesso di considerare il flusso di falda e di integrare le componenti advettive e idro-dispersive del trasporto di calore sia all'interno di mezzo saturo, sia di mezzo insaturo o parzialmente saturo.

Le analisi tridimensionali condotte hanno tenuto conto delle temperature dell'aria interna e dell'influenza dei parametri indicati nei capitoli precedenti per la definizione delle tratte omogenee ovvero:

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

- posizione relativa della superficie freatica rispetto alle parti strutturali oggetto di attivazione termica;
- temperatura pregressa del sottosuolo nel sito;
- angolo di incidenza del flusso di falda rispetto all'asse dell'infrastruttura;
- cadente piezometrica;
- stratigrafia termo-idro-geologica interessata dalle opere strutturali.

Tutte le tratte TBM, per un totale di 22 modelli FEM-TH, sono state modellate facendo riferimento alla medesima geometria tipo (Figura 15), definita come galleria profonda dal punto di vista termico. Sono state pertanto trascurate le oscillazioni termiche in superficie, le quali assumono rilevanza man mano che la galleria si colloca in prossimità del piano campagna.

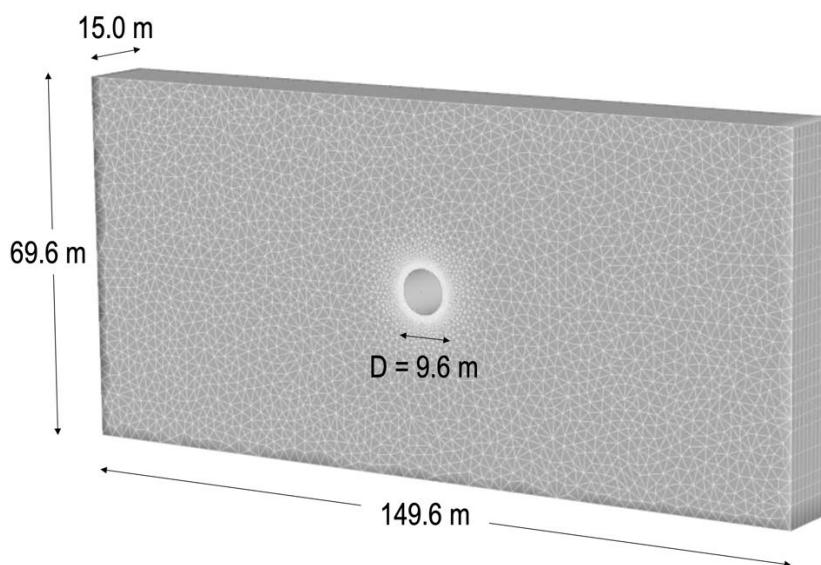
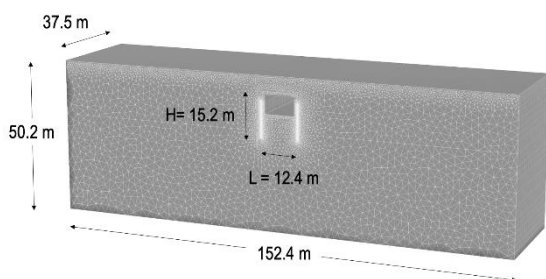
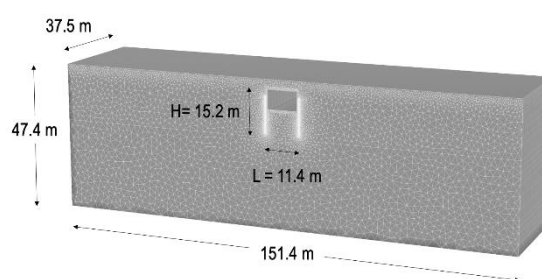


Figura 15. Geometria del modello numerico adottato per le tratte in TBM.

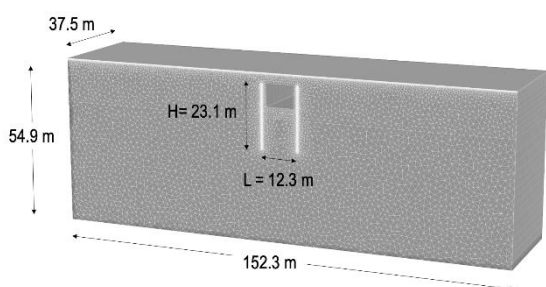
Per quanto invece riguarda le sezioni realizzate in C&C, queste sono risultate eterogenee per le profondità raggiunte, per le larghezze delle strutture e per la distribuzione interna degli spazi (quest'ultimo aspetto è stato tuttavia trascurato nelle analisi numeriche condotte in quanto non si ritiene possa avere influenza sul processo di scambio termico). Tutti i modelli numerici delle tratte C&C risultano essere superficiali e quindi è stato tenuto in considerazione l'effetto delle variazioni della temperatura atmosferica sulla struttura attivata. Nella Figura 16 vengono riportate le geometrie prese in considerazione per i modelli numerici FEM-TH delle tratte C&C.



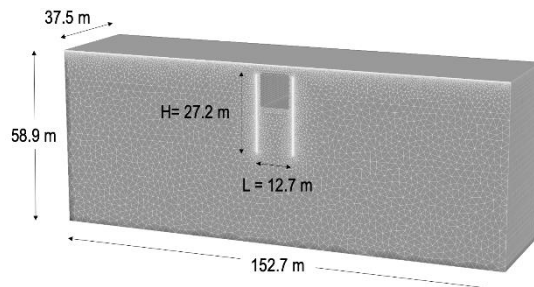
(a) Geometria GA1



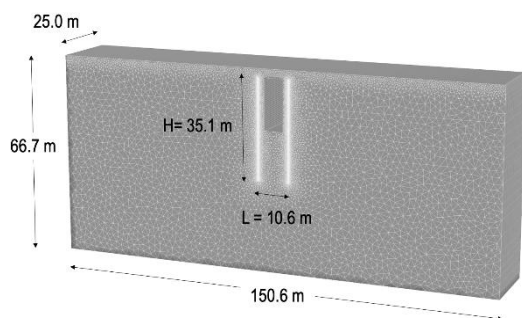
(b) Geometria GA2-3



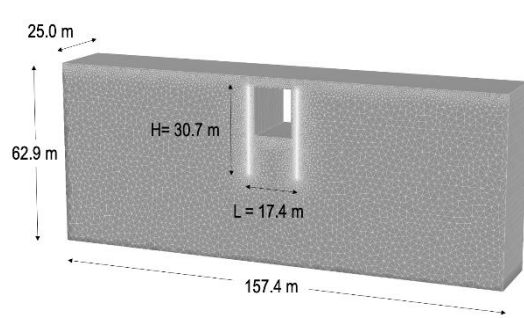
(c) Geometria GA4_1



(d) Geometria GA4_2



(e) Geometria GA5_2




(f) Geometria GA6

Figura 16. Geometria dei modelli numerici adottati per le tratte in Cut & Cover.

Per le stazioni è stato assunto un approccio che considerasse, quando possibile, le analogie fra le stazioni e determinati modelli "tipologici" al fine di ottimizzare e razionalizzare il numero di analisi numeriche da condurre. In particolare:

- 1) Le stazioni San Giovanni Bosco, Mole-Giardini Reali, Porta Nuova, Pastrengo e Politecnico sono state modellate interamente. Le assunzioni e gli esiti delle modellazioni numeriche sono discussi nei paragrafi successivi;

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

- 2) Per le stazioni Giulio Cesare e Corelli si sono considerati validi i risultati ottenuti dalla modellazione della stazione San Giovanni Bosco, essendo tutte e tre le stazioni molto simili per geometria e condizioni al contorno;
- 3) La stazione Cimarosa-Tabacchi è stata trattata considerando gli esiti dei modelli delle tratte in C&C immediatamente successive alla stazione stessa, ovvero il modello FEM-TH "F1T3D2I2G3";
- 4) La stazione Bologna è stata assimilata, per le analogie in fatto di lunghezza dei diaframmi, temperatura media del sito, profondità della falda, direzione e entità del flusso di falda e geologia, al modello FEM-TH "F1T2D2I2G1" della tratta in C&C;
- 5) Le stazioni Novara e Verona sono state assimilate alla stazione Mole-Giardini Reali;
- 6) La stazione Carlo Alberto è stata ritenuta adattabile alla stazione Politecnico.


Come per i modelli relativi alle sezioni costruite con metodo Cut & Cover, anche i modelli delle stazioni sono di tipo superficiale. Si è, cioè, tenuto conto dell'andamento della temperatura dell'aria in superficie e si è modellata l'effettiva posizione dei diaframmi rispetto al piano campagna.

Per la galleria di linea così come per le stazioni sono state eseguite analisi in condizioni estive ed in condizioni invernali imponendo differenti temperature iniziali del terreno ed all'interno della galleria. La procedura seguita per le analisi, sia per il caso estivo sia per il caso invernale ha previsto i seguenti step:

- Inizializzazione idraulica (analisi puramente idraulica di tipo steady-state);
- Inizializzazione termica (analisi termo-idraulica in condizioni transitorie della durata di 30 giorni);
- Attivazione termica delle geostrutture (analisi termo-idraulica in condizioni transitorie della durata di 30 giorni).

Le proprietà termiche ed idrauliche del terreno sono ricondotte alla parametrizzazione delle tre unità termo-idrauliche riconosciute nel sottosuolo di Torino descritte ampiamente nel documento n° MTL2T1A0DGTRCOMR002-0-0. Per gli ulteriori materiali non naturali che costituiscono il modello, ovvero il calcestruzzo, l'isolante e le serpentine del circuito di scambio termico, tutti i parametri termici sono stati desunti da letteratura facendo in particolare riferimento a prodotti commerciali ampiamente disponibili sul mercato.

Il risultato finale della analisi numeriche FEM-TH dopo l'attivazione termica delle geostrutture ed in condizioni di equilibrio risulta essere la distribuzione della temperatura per la condizione invernale e per quella estiva all'interno di tutti i circuiti idraulici nei quali è presente il fluido termovettore così come mostrato nella Figura 17.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

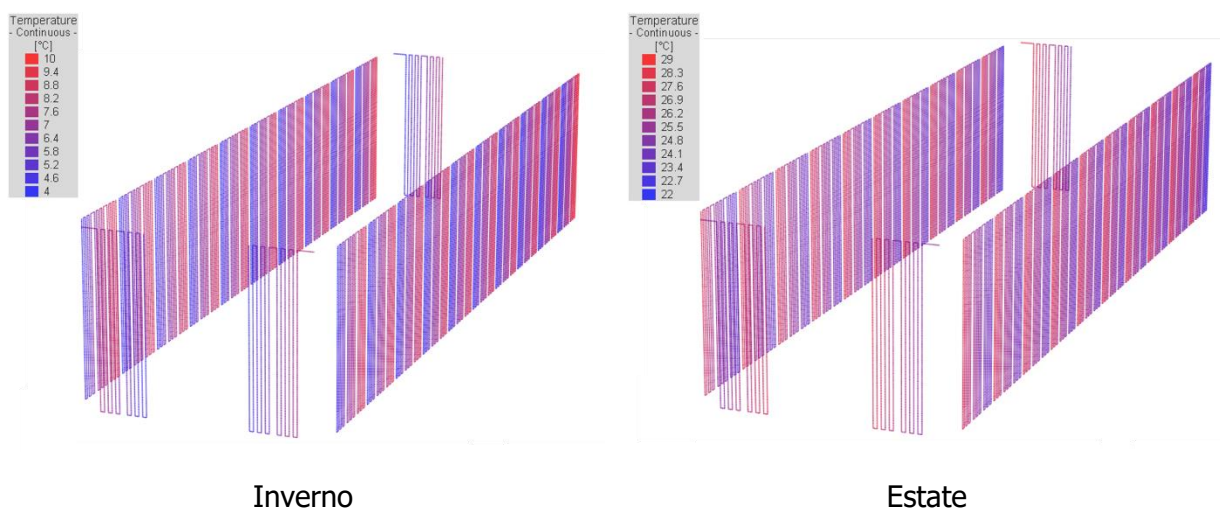


Figura 17. Temperatura del fluido termovettore all'interno delle serpentine ottenuta al termine della simulazione invernale ed estiva per la stazione San Giovanni Bosco.

3.6 Calcolo della potenza termica estraibile dal terreno

Da ciascuna delle analisi numeriche FEM-TH è stato possibile ottenere la differenza di temperatura a 30 giorni tra ingresso e uscita dal circuito di scambio termico nel caso estivo e nel caso invernale e da queste la potenza specifica espressa in W/m per ciascuna tratta della linea.

Le differenze di temperatura a 30 giorni derivanti dalle analisi numeriche rappresentano la condizione più conservativa per il calcolo della potenza estraibile tramite il rivestimento della galleria o dai diaframmi delle stazioni e della galleria artificiale.

La potenza termica in kW è stata ottenuta moltiplicando la potenza specifica per unità di lunghezza per la lunghezza della tratta in esame.

È opportuno specificare che nei casi in C&C i risultati vengono distinti per i diaframmi collocati rispettivamente a sinistra e a destra rispetto all'asse dell'infrastruttura, nel senso di denominazione delle tratte (ovvero da GA1 a GA6). La potenza complessiva della tratta sarà quindi data dalla somma dei due contributi.

I risultati ottenuti dalle analisi nei casi estivo e invernale per quanto concerne le potenze termiche specifiche (W/m) della galleria di linea sono mostrati nella Figura 18.

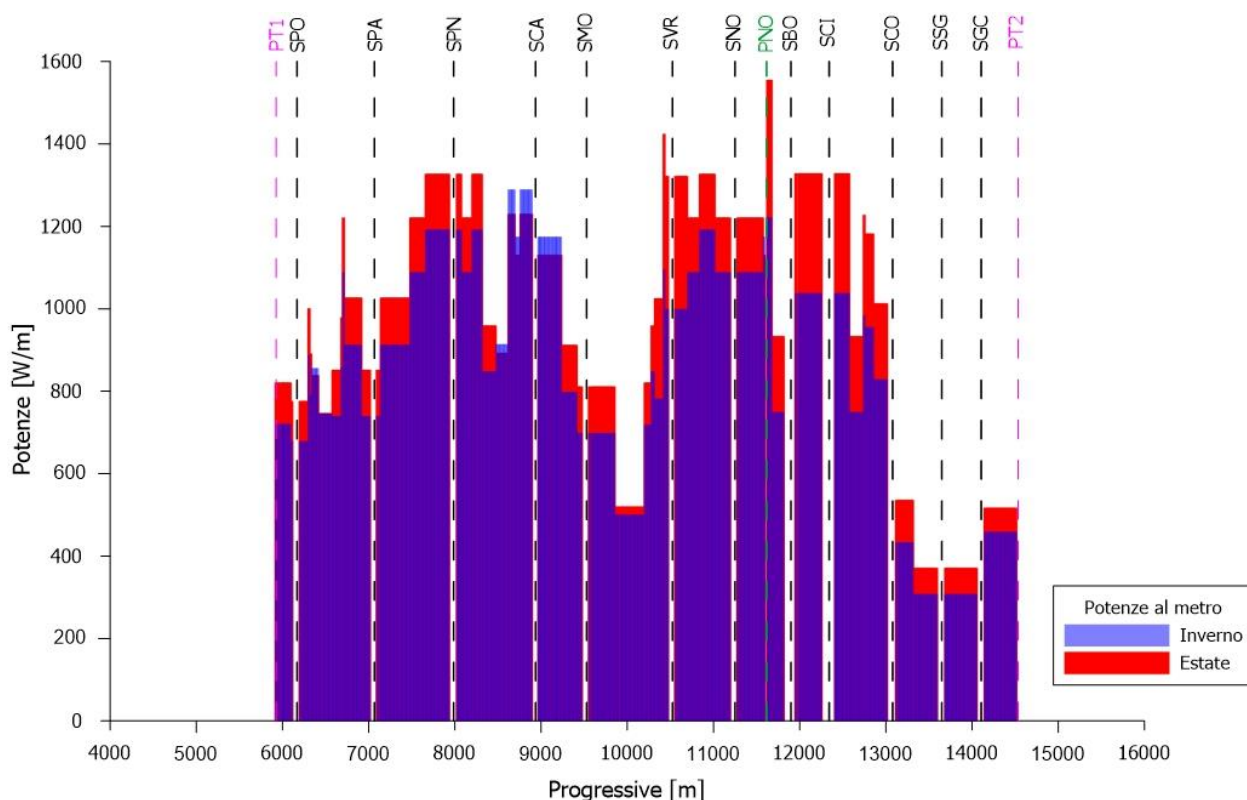


Figura 18. Andamento delle potenze termiche specifiche in W/m per le tratte di galleria di linea in TBM (da PT1 a PNO) e in C&C (da PNO a PT2).

Per quanto concerne invece le 12 stazioni attivate termicamente e per il Deposito-officina Rebaudengo, la sintesi dei risultati in termini di potenza termica complessiva espressa in kW per gli impianti delle stazioni e del deposito Rebaudengo viene mostrato nella Figura 19.

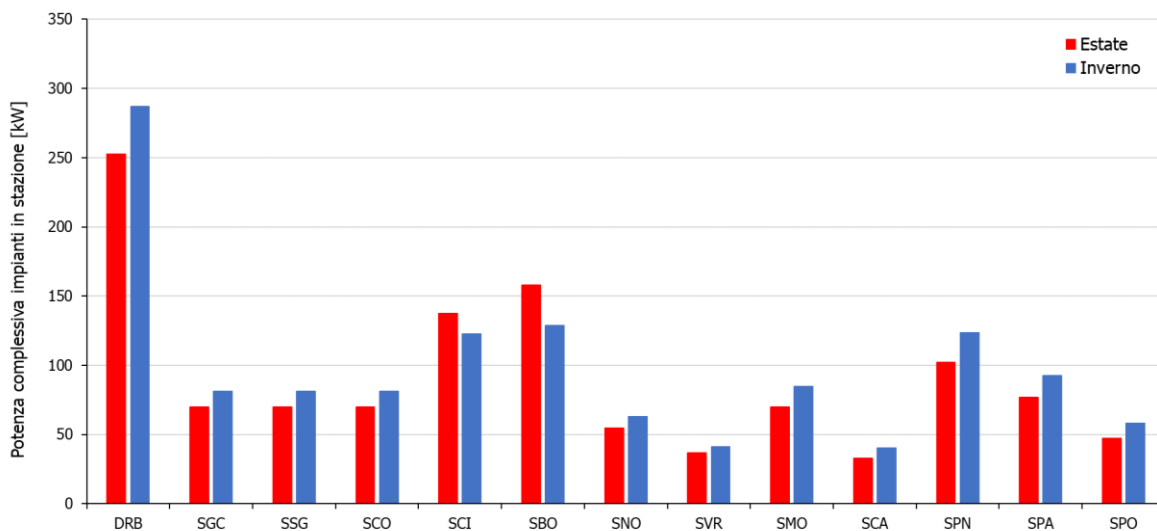


Figura 19. Potenze complessive estive e invernali estraibili dagli impianti nelle stazioni e nel deposito-officina.

3.7 Definizione degli impianti e destinazione del calore estratto

Nella Figura 20 viene mostrato il quadro complessivo delle potenze totali estraibili dal complesso degli impianti afferenti a ciascuna stazione di collegamento. Si ricorda infatti che tutti gli impianti sono stati progettati in modo da convogliare il calore verso i manufatti (definiti in tale contesto "stazioni di collegamento impianti") in cui è prevista la realizzazione di specifici locali tecnici che ospiteranno le apparecchiature per lo scambio termico. Si può notare come l'entità delle potenze del deposito Rebaudengo rimanga identica rispetto a quanto mostrato in precedenza in quanto in esso non convergono ulteriori impianti, mentre dalla stazione di Porta Nuova potrà essere estratta una grande quantità di energia termica, apportata dall'elevata capacità di scambio termico delle tratte attivate a valle e a monte della stazione stessa nonché dai medesimi diaframmi presenti nella stazione che tra l'altro presentano la profondità maggiore dell'intera tratta Rebaudengo-Politecnico.

Complessivamente sono stati individuati un totale di 59 impianti, a loro volta suddivisi tra 14 impianti derivanti dall'attivazione termica dei conci prefabbricati per la porzione di galleria scavata con TBM, 20 impianti derivanti dall'attivazione termica dei diaframmi per la porzione di galleria scavata con metodo C&C e 25 impianti relativi all'attivazione delle stazioni. I 34 impianti presenti lungo le gallerie di linea, sia in TBM che in C&C afferiscono alle stazioni di collegamento impianti. Per le tratte in C&C sono stati distinti due impianti indipendenti, uno per il diaframma di monte e l'altro per il diaframma di valle che delimita la galleria artificiale.

Di norma in ogni stazione è prevista la creazione di due impianti distinti (ad eccezione della stazione Carlo Alberto per cui si è previsto un solo impianto), collegati rispettivamente ai diaframmi posti lungo i lati opposti del perimetro della struttura in modo da minimizzare l'estensione delle tubazioni di mandata e di ritorno all'interno della stazione medesima.

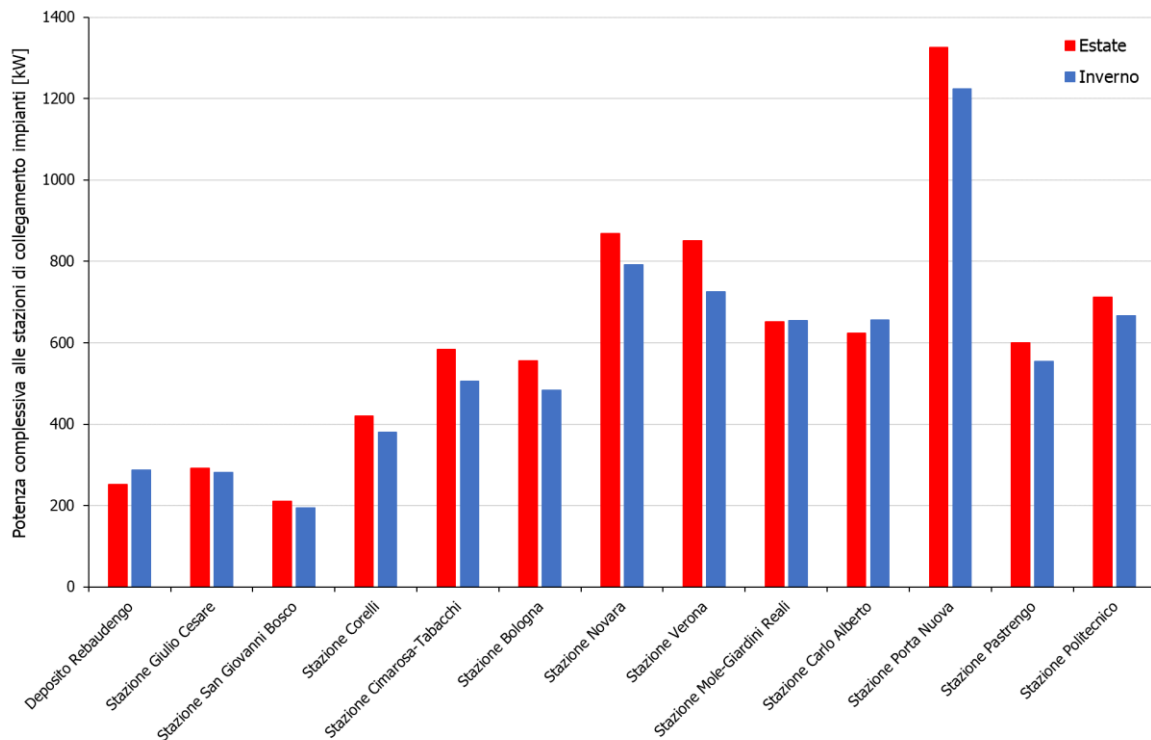



Figura 20. Potenze termiche totali estraibili dagli impianti afferenti a ciascuna stazione di collegamento.

Confrontando infine i dati di capacità termica disponibile agli impianti afferenti a ciascuna stazione di collegamento con i dati di fabbisogno delle strutture a servizio della ML2 (coincidenti in questo caso con le stazioni di linea e con il deposito-officina Rebaudengo) è stato possibile verificare la presenza di surplus termici che possono essere destinati ad altri ricettori esterni. L'attività svolta ed i risultati ottenuti sono ampiamente dettagliati nella relazione "Individuazione dei ricettori esterni per lo sfruttamento del calore estratto" (MTL2T1A1DGTRCOMR004).

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

4. ANALISI DEI RISULTATI E CONFRONTO CON LE PREVISIONI DEL PFTE

In questo capitolo vengono brevemente analizzati i risultati in termini di potenza totale ottenuti tramite l'insieme delle attività descritte ai capitoli precedenti adottati per questa fase progettuale. Tali risultati vengono successivamente confrontati con le previsioni contenute nel PFTE ai fini di evidenziarne le possibili analogie e differenze.

4.1 Analisi dei risultati ottenuti

La potenza termica scambiabile è determinata dalla combinazione di fattori quali il livello di falda, la sua velocità, la sua direzione di incidenza rispetto all'asse dell'infrastruttura e l'unità termoidraulica in cui è localizzata la struttura attivabile e la cui classificazione è presentata in dettaglio nel documento n° MTL2T1A0DGTRCOMR003.

Per analizzare i risultati ottenuti ed ai fini della valutazione del potenziale geotermico complessivo delle opere strutturali della Linea 2 della Metropolitana di Torino, i quantitativi di energia ottenuti mediante la modellazione numerica FEM-TH sono stati riportati sia sottoforma di tabella riassuntiva, sia rapportati alla loro collocazione spaziale lungo il tracciato. Infatti, la collocazione reciproca di potenzialità e di utilizzatori, siano essi le stazioni lungo la linea o altri recettori esterni, definisce la rispondenza tra domanda e offerta di calore.


Tutti i valori delle potenze termiche disponibili alle stazioni di collegamento impianti sono riportati in dettaglio nella Tabella 3.

Tabella 3. Tabella riepilogativa delle potenze totali disponibili alle stazioni di collegamento in estate ed in inverno.

Numero impianto	Stazione di collegamento impianti	Range $\Delta T/\Delta T_{media}$ estate [°C]	Range $\Delta T/\Delta T_{media}$ inverno [°C]	Potenza singoli impianti estate [kW]	Potenza singoli impianti inverno [kW]	Potenza totale estate [kW]	Potenza totale inverno [kW]
1	Deposito Rebaudengo	4.24	4.77	127.08	142.92	252.52	286.99
2		4.19	4.81	125.44	144.07		
3	Stazione Giulio Cesare	4.05-4.05	3.80-3.80	94.26	88.44	291.86	281.01
4		4.06-4.06	3.79-3.79	67.83	63.32		
5		4.04	4.61	36.82	42.07		
6		3.94	4.66	32.90	38.98		
7		3.24-3.24	2.60-2.60	40.35	32.38		
8	3.24-3.24	2.60-2.60	19.70	15.81	211.14	194.55	
9	3.24-3.24	2.60-2.60	32.22	25.85			
10	3.24-3.24	2.60-2.60	32.19	25.83			
11	Stazione San Giovanni Bosco	4.04	4.61	36.82	42.07		



Numero impianto	Stazione di collegamento impianti	Range $\Delta T/\Delta T_{media}$ estate [°C]	Range $\Delta T/\Delta T_{media}$ inverno [°C]	Potenza singoli impianti estate [kW]	Potenza singoli impianti inverno [kW]	Potenza totale estate [kW]	Potenza totale inverno [kW]
12		3.94	4.66	32.90	38.98		
13		3.24-3.24	2.60-2.60	44.85	35.99		
14		3.24-3.24	2.60-2.60	32.17	25.82		
15	Stazione Corelli	3.49-3.24	2.90-2.60	52.29	43.41	419.51	380.02
16		3.47-3.24	2.91-2.60	44.09	37.11		
17		4.04	4.61	36.82	42.07		
18		3.94	4.66	32.90	38.98		
19		3.11-4.97	2.78-4.13	123.24	106.59		
20		3.11-5.62	2.77-4.62	130.17	111.86		
21	Stazione Cimarosa-Tabacchi	4.78-3.11	3.88-2.78	150.71	124.44	583.87	505.38
22		4.03-3.11	3.39-2.78	152.43	130.65		
23		4.57	4.07	52.52	46.76		
24		3.91	3.49	84.87	75.75		
25		4.57-4.57	4.07-4.07	77.47	68.98		
26		3.91-3.91	3.49-3.49	65.87	58.79		
27	Stazione Bologna	4.57-4.57	4.07-4.07	73.60	65.53	555.25	483.77
28		3.91-3.91	3.49-3.49	120.02	107.13		
29		4.13	4.59	71.77	58.63		
30		4.97	5.62	86.12	70.35		
31		5.27-3.11	4.75-2.78	96.87	86.70		
32		4.00-3.11	3.58-2.78	106.87	95.43		
33	Stazione Novara	4.64-4.30	4.82-4.46	389.94	350.20	868.16	791.96
34		4.73	5.61	21.58	25.59		
35		3.98	4.46	33.23	37.29		
36		4.71-4.30	5.24-4.82	423.41	378.88		
37	Stazione Verona	4.71-3.95	5.24-4.82	396.47	327.53	850.67	724.74
38		4.50	4.68	13.67	14.24		
39		5.08	5.88	23.17	26.83		
40		4.32-1.98	5.62-2.05	417.35	356.13		
41	Stazione Mole-Giardini Reali	2.76-1.98	3.20-2.05	275.54	240.13	651.19	654.55
42		4.61	5.31	38.52	44.41		
43		3.77	4.83	31.52	40.38		
44		4.64-2.76	4.46-3.20	305.62	329.63		
45		4.64-4.64	4.47-4.47	186.61	193.88	623.71	655.32

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

Numero impianto	Stazione di collegamento impianti	Range $\Delta T/\Delta T_{media}$ estate [°C]	Range $\Delta T/\Delta T_{media}$ inverno [°C]	Potenza singoli impianti estate [kW]	Potenza singoli impianti inverno [kW]	Potenza totale estate [kW]	Potenza totale inverno [kW]
46	Stazione Carlo Alberto	4.74	5.96	32.81	40.08		
47		5.09-3.61	4.86-3.53	404.29	421.35		
48	Stazione Porta Nuova	4.71-3.35	5.24-3.53	574.66	518.11	1326.29	1223.19
49		3.15	3.69	76.57	89.62		
50		2.81	3.73	25.67	34.04		
51		4.71-3.60	5.24-4.05	649.39	581.41		
52	Stazione Pastrengo	3.60-2.92	4.05-3.36	312.03	276.55	599.36	554.63
53		4.32	5.32	36.12	44.46		
54		4.46	5.30	40.66	48.32		
55		3.60-2.92	4.05-3.36	210.55	185.30		
56	Stazione Politecnico	4.30-2.68	4.82-2.95	507.17	469.82	712.59	666.47
57		4.85	5.78	36.88	43.89		
58		4.62	6.17	10.53	14.07		
59		2.85-2.68	3.24-3.06	158.01	138.70		

Ai fini di una più diretta lettura dei dati riportati nella tabella precedente, nella Figura 21 è mostrato un quadro sinottico del tracciato in cui vengono riportati i valori delle potenze complessive convogliate ed utilizzabili dalle stazioni di collegamento nei casi estivo e invernale.

L'analisi dei dati mostrati nella tabella e nel quadro sinottico denota una potenza termica specifica lievemente inferiore in inverno rispetto all'estate per la maggior parte delle tratte della ML2 in virtù di una minore differenza in questa stagione tra la temperatura naturale del suolo, la temperatura all'interno della galleria (dedotti dai risultati dell'analisi termica svolta in condizioni di esercizio ordinario della linea 2 di Torino in condizioni di punta e di morbida) e le temperature del circuito di scambio. Le porzioni di tracciato che sono risultate nel complesso essere le più produttive sono due tratte in TBM rispettivamente comprese tra le stazioni di Porta Nuova e Carlo Alberto e tra la stazione di Verona ed il pozzo PNO e la tratta in C&C compresa tra il pozzo PNO e la stazione Cimarosa-Tabacchi. In queste tratte, le strutture attivabili della galleria risultano pressoché completamente all'interno dell'Unità termo-idraulica AFR/INS ed in particolare al di sotto del livello della falda. In queste condizioni, anche in condizioni di cadente piezometrica e di direzione del flusso di falda rispetto al tracciato variabili, si verificano le condizioni ideali per un elevato scambio termico tra circuito e terreno circostante. Viceversa nella tratta di galleria compresa tra Mole Giardini Reali e Verona la livelletta del tracciato si approfondisce per sottopassare con un maggiore franco il corso della Dora Riparia andando ad interessare i terreni dell'Unità termo-idraulica FAA/SAF. Questi terreni con la loro granulometria limoso-marnoso-argillosa costituiscono un orizzonte acquitardo/acquicludo. L'assenza del flusso di falda all'interno dell'unità FAA/SAF determina quindi un notevole decremento della capacità di scambio termico.

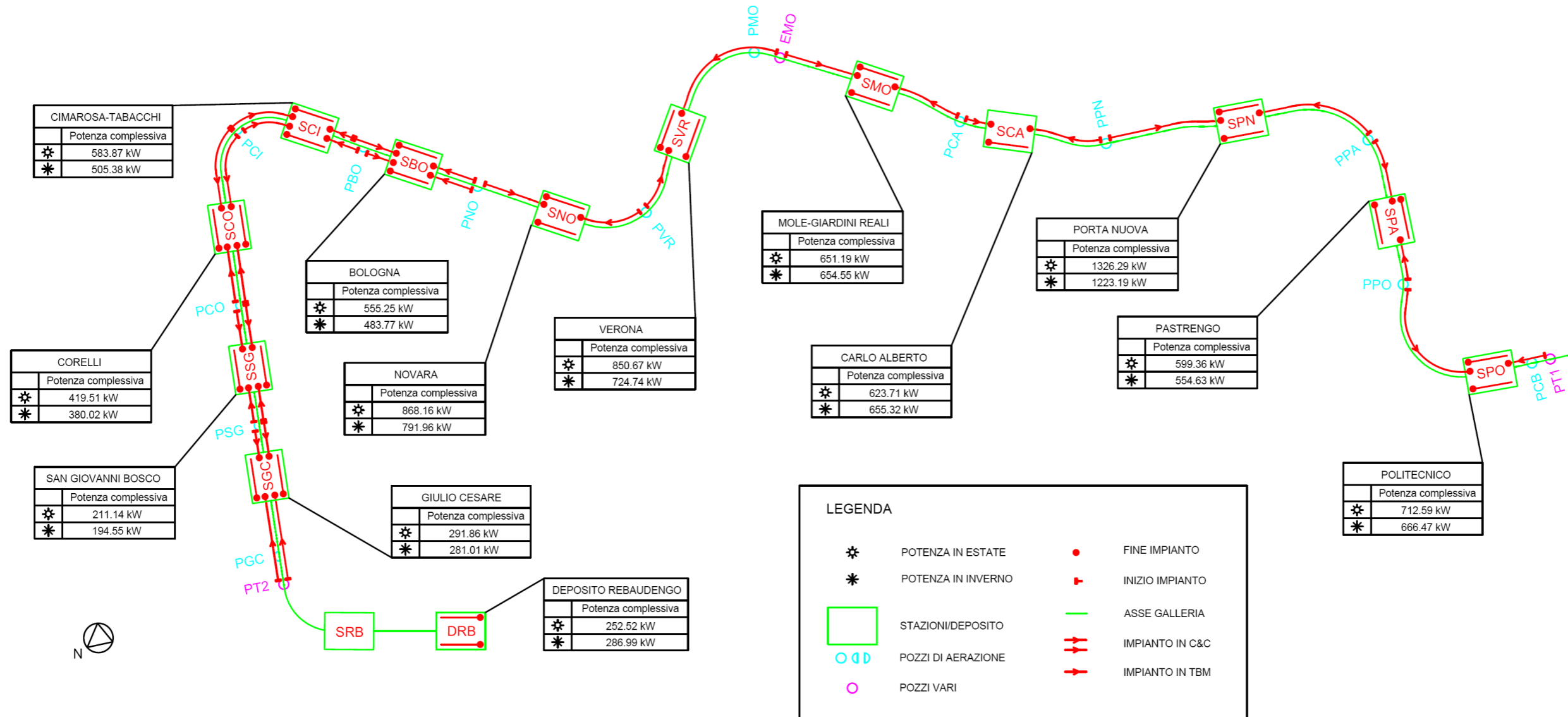



Figura 21. Quadro sinottico delle potenze totali estraibili dalle stazioni di collegamento impianti in estate ed in inverno.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

Per quanto riguarda invece la tratta in C&C compresa tra le Stazioni di Corelli e Giulio Cesare, dove la ML2 andrà ad occupare la trincea esistente (“Trincerone”), la relativamente bassa potenzialità di scambio termico deriva dalla limitata profondità attivabile dei diaframmi (pari a 12.2 m) in aggiunta al fatto che la falda freatica per la maggior parte del tratto in questione risulta al di sotto della base dei diaframmi medesimi.

Analizzando i risultati delle stazioni e del deposito-officina si può notare come quest’ultimo, a causa del grande numero di pannelli di diaframmi presenti e della loro estensione complessiva lungo l’intero perimetro della struttura (Figura 22), risulti il manufatto che fornisce il maggiore apporto energetico.

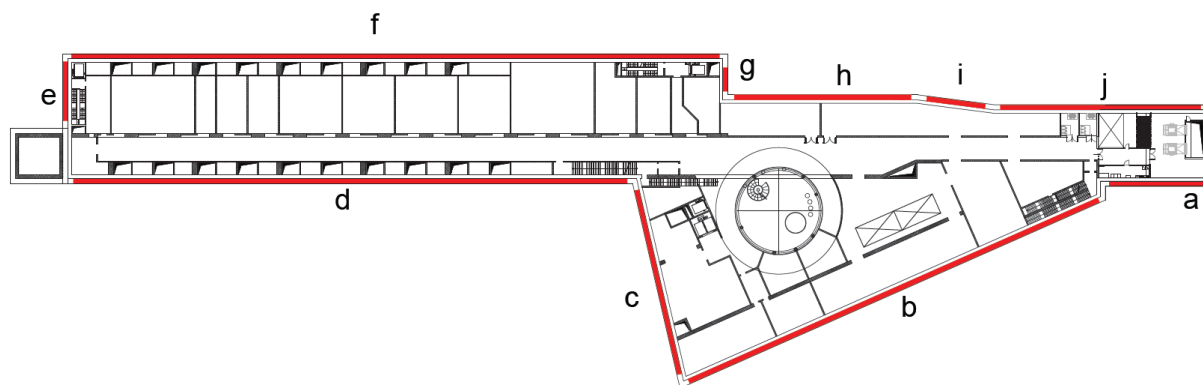



Figura 22. Planimetria del piano banchina del Deposito-officina Rebaudengo con indicazione dei diaframmi termicamente attivabili.

Una elevata capacità di scambio termico si riscontra inoltre per le stazioni Porta Nuova, Cimarosa-Tabacchi e Bologna, strutture caratterizzate da una elevata profondità dei diaframmi attivabili che permettono quindi di avere a disposizione un’ampia superficie di scambio con il terreno circostante nonché porzioni estese delle strutture al di sotto della superficie della falda freatica. Le stazioni Verona e Carlo Alberto al contrario risultano essere le opere per le quali si ottiene la potenza complessiva minore a causa della brevità delle lunghezze dei diaframmi attivati.

4.2 Confronto con le previsioni del PFTE

Nell’attuale livello progettuale tutti i dati utilizzati per le attività che sono state descritte al capitolo precedente derivano da prove o analisi specifiche e sono in generale da ritenersi maggiormente significative rispetto a quanto contenuto all’interno del PFTE. Anche le modalità di analisi che hanno visto la suddivisione dell’intero tracciato in porzioni di lunghezza pari a 20 m, maggiori rispetto a quelle utilizzate nel PFTE, consente un maggior livello di dettaglio e di conseguenza una maggiore affidabilità dei risultati ottenuti.

Ai fini di effettuare un confronto tra i risultati ottenuti nel presente PD rispetto alle previsioni del precedente livello progettuale è necessario considerare inoltre quanto segue:


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

- L'andamento del tracciato e soprattutto la livelletta delle gallerie nonché la profondità dei diaframmi delle gallerie di linea presentano alcune differenze tra PD e PFTE che si ripercuotono necessariamente sulle capacità di scambio delle geostrutture per le motivazioni descritte in precedenza;
- Nel PD la maggior parte dei dati riguardanti la caratterizzazione termo-idraulica dei terreni è stata ottenuta a mezzo di specifiche prove di laboratorio e prove in sito mentre nel PFTE tali dati erano stati interamente desunti da letteratura;
- I dati di funzionamento della linea ed in particolare le temperature dell'aria all'interno della galleria in condizioni di picco ed in condizioni di morbida presentano un maggior grado di approfondimento nel presente livello progettuale mentre in precedenza questi dati erano stati oggetto di una stima di massima;
- Nel PD sono state attivate termicamente anche le stazioni di linea che precedentemente non erano state prese in considerazione come strutture termicamente attivabili;
- Nel calcolo delle potenze estraibili nel PD è stata tenuta in considerazione la presenza dei pozzi di aerazione e degli altri manufatti non idonei per l'attivazione termica che, precedentemente trascurati.

È necessario inoltre ricordare che nel PFTE era stato valutato in termini preliminari il potenziale termico scambiabile tra terreno ed opera sotterranea prendendo in esame l'intero tracciato progettato della ML2, comprensivo quindi della tratta centrale tra le stazioni di Anselmetti e Rebaudengo ed i prolungamenti SO (Anselmetti-Orbassano) e NE (Cimarsa-Tabacchi – Pescarito). La tratta Politecnico-Rebaudengo oggetto della presente progettazione definitiva costituisce una porzione del tracciato originale analizzato all'interno del PFTE.

Nella Figura 23 vengono riportati i risultati espressi in W/m ottenuti nell'ambito del PFTE per la tratta centrale ed i prolungamenti SO e NE. La tratta Politecnico-Rebaudengo oggetto della presente progettazione definitiva è indicata nel rettangolo rosso.

In termini generali il confronto tra i grafici della Figura 18 e della Figura 23, relativi soltanto all'attivazione termica della galleria di linea, evidenzia range di variazione delle potenze estraibili in W/m comunque confrontabili come ordine di grandezza tra PFTE e PD. Per un confronto più dettagliato nella Tabella 4 vengono riportati le potenze totali disponibili alle stazioni di collegamento secondo le previsioni contenute nel PFTE e sulla base del lavoro della presente fase progettuale. Il confronto tra le potenze complessive disponibili alle stazioni di collegamento degli impianti evidenzia nella maggioranza dei casi e sia in estate che in inverno dei valori più elevati ottenuti nella presente fase progettuale. Questa maggiore disponibilità di potenza termica è in prima approssimazione legata al fatto che nel PD sono state attivate termicamente anche le strutture delle stazioni che quindi forniscono un contributo termico aggiuntivo agli impianti. Fanno eccezione le stazioni di collegamento impianti di San Giovanni Bosco, Mole Giardini Reali e Pastrengo (queste ultime due solo relativamente alla stagione invernale). In questi casi nel PFTE le tratte di galleria afferenti alle rispettive stazioni di collegamento risultavano più estese rispetto alla distribuzione degli impianti adottata nella presente fase progettuale. Di conseguenza ne è risultato una maggiore potenza termica disponibile verso la rispettiva stazione di collegamento, a discapito tuttavia degli impianti adiacenti. Si può notare infatti come gli impianti delle stazioni di

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

Giulio Cesare, Corelli, Verona e Politecnico in particolare presentano nel PFTE potenze decisamente limitate se confrontate con le potenze calcolate nel PD.

Dal confronto tra la Figura 18 e la Figura 23 si nota come nel PD il potenziale termico estraibile in estate risulta generalmente più elevato rispetto al potenziale invernale, situazione che si inverte invece nel PFTE ove il potenziale invernale risulta complessivamente superiore a quello estivo. Queste differenze possono essere principalmente ascritte ad una differente temperatura iniziale dell'aria (T_{air}) all'interno della galleria del modello e, limitatamente ai modelli numerici in C&C di tipo superficiale, ad una differente temperatura sulla superficie del modello pari rispettivamente a 6°C in inverno e a 25°C in estate. Questi valori sono stati dedotti dallo studio dei risultati dell'analisi termica svolta in condizioni di esercizio ordinario della linea 2 di Torino in condizioni di punta e di morbida in estate e in inverno, considerando sia i valori medi sia i valori massimi di temperatura. In precedenza, nel PFTE erano invece stati assunti valori pari a 13°C per la stagione invernale e 33°C per la stagione estiva. In conseguenza di queste differenze e considerando il fatto che sia le T del terreno che le T iniziali di ingresso e uscita dalle tubazioni sono sostanzialmente rimaste invariate tra le due fasi progettuali, nelle condizioni termiche modellate nel PFTE lo scambio termico con il terreno è risultato maggiormente efficiente in inverno rispetto all'estate. Ovviamente tale situazione si inverte utilizzando le condizioni termiche adottate nella presente fase progettuale.

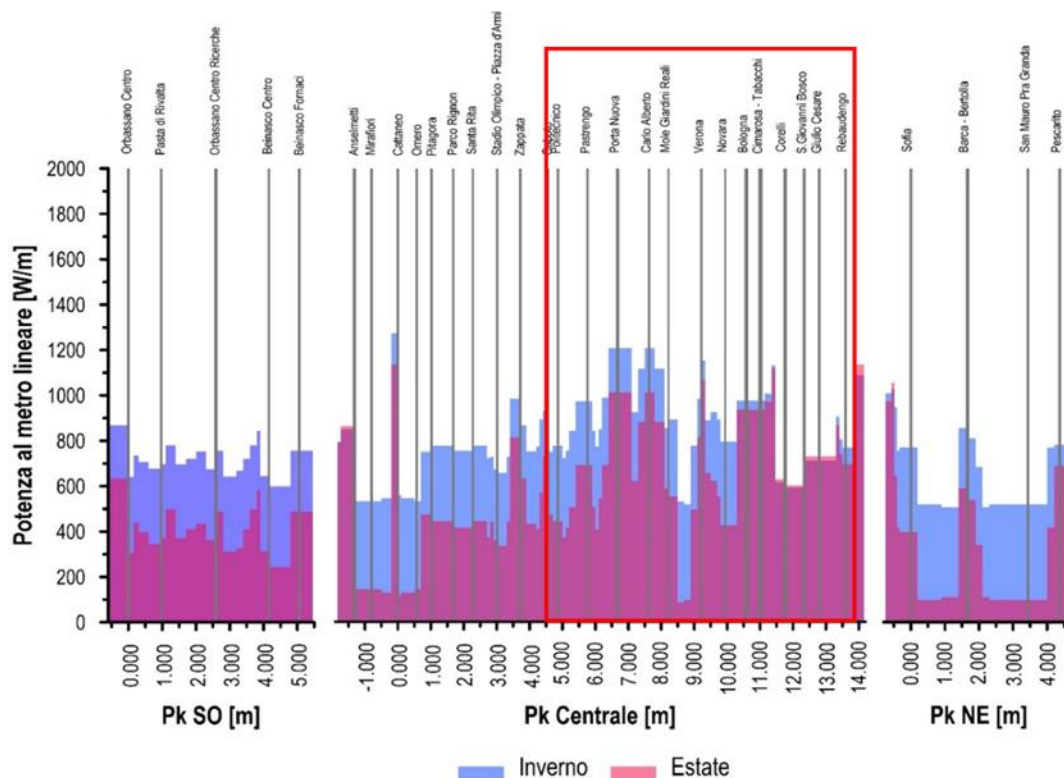




Figura 23. Potenza al metro lineare in W/m derivante dal PFTE per le tratte SO, Centrale e NE della ML2. Nel rettangolo rosso è indicata la tratta Politecnico-Rebaudengo oggetto del presente progetto definitivo.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

Al di là dei valori specifici analizzando l'andamento generale della distribuzione delle potenze al metro lineare si notano comunque delle importanti analogie tra i risultati ottenuti nel PFTE e nel PD. In particolare entrambe le analisi evidenziano come particolarmente favorevole per lo scambio termico il tratto di linea che sottoattraversa il centro storico della città di Torino (tra le stazioni di Porta Nuova e Carlo Alberto) sia in estate sia in inverno ed il tratto compreso tra la stazione di Verona la stazione Cimarosa-Tabacchi rispetto alle rimanenti tratte. Si riscontra una notevole analogia anche per le tratte meno vocate allo scambio termico che risultano essere quelle comprese tra la stazione di Mole Giardini Reale e la stazione di Verona unitamente alla tratta terminale di linea verso N che si sviluppa in trincea tra le stazioni di Corelli e Giulio Cesare.

Tabella 4. Confronto tra le potenze totali per la stagione invernale ed estiva afferenti alle stazioni di collegamento impianti nel Progetto di Fattibilità Tecnico-economica (PFTE) e nel progetto definitivo (PD).

Stazione di collegamento impianti	PFTE		PD	
	Potenza totale estate [kW]	Potenza totale inverno [kW]	Potenza totale estate [kW]	Potenza totale inverno [kW]
Stazione Giulio Cesare	131.7	128.5	291.9	281.0
Stazione San Giovanni Bosco	561.3	549.6	211.1	194.6
Stazione Corelli	160.0	156.9	419.5	380.0
Stazione Cimarosa-Tabacchi	385.8	397.1	583.9	505.4
Stazione Bologna	392.8	409.4	555.3	483.8
Stazione Novara	453.6	699.4	868.2	792.0
Stazione Verona	334.7	434.5	850.7	724.7
Stazione Mole-Giardini Reali	504.0	873.5	651.2	654.6
Stazione Carlo Alberto	570.3	732.7	623.7	655.3
Stazione Porta Nuova	755.3	933.0	1326.3	1223.2
Stazione Pastrengo	499.8	756.5	599.4	554.6
Stazione Politecnico	231.3	409.3	712.6	666.5
Totale	4980.6	6480.4	7693.8	7115.7

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

5. EFFETTI DERIVANTI DALL'ATTIVAZIONE TERMICA DELLE OPERE DELLA LINEA 2

Nell'ambito del progetto di fattibilità tecnico ed economica e nel corso della presente progettazione definitiva, sulla base dei risultati ottenuti dalla modellazione numerica FEM-TH sviluppata per la definizione della potenzialità termica estraibile dalle geostrutture energetiche attivate, sono state tratte alcune considerazioni preliminari sulla possibile fascia di alterazione termica dovuta all'attivazione delle strutture della ML2.

Nell'ambito della convenzione stipulata fra INFRA.TO e il Politecnico di Torino è stato sviluppato un modello numerico tridimensionale a scala urbana denominato "Studio numerico dell'influenza dell'attivazione termica della galleria della metropolitana nel sottosuolo attraversato". Nel presente paragrafo si riportano sinteticamente i risultati ottenuti dallo studio condotto dal Politecnico in quanto consente di trarre valutazioni maggiormente dettagliate sulla fascia di alterazione termica poiché prende in considerazione tutti gli elementi interessati dall'opera ed in particolare:

- attivazione termica delle opere strutturali della linea 2;
- impianti geotermici esistenti secondo i dati disponibili aggiornati a novembre 2022;
- condizioni litologiche, geologiche, idrogeologiche aggiornate dei terreni.

Lo studio è stato finalizzato ad indagare l'influenza dell'attivazione termica della galleria della metropolitana nel sottosuolo attraversato, individuando eventuali interferenze positive o negative con impianti geotermici preesistenti e/o altri utilizzatori della sorgente termica (impianti a circuito aperto e chiuso noti alla data di redazione della presente relazione).

5.1 Aspetti generali

Lo studio dell'attivazione termica delle opere strutturali e delle stazioni della tratta di Linea 2 della metropolitana di Torino, che si estende dal deposito Rebaudengo fino alla stazione Politecnico, è stato condotto dal Politecnico di Torino adottando una modellazione numerica FEM-TH.

A tal fine si è dapprima individuata l'area di studio in modo tale che comprendesse l'intera estensione della tratta funzionale della Linea 2 della metropolitana. Sono altresì stati individuati tutti gli elementi infrastrutturali principali presenti nell'area che influenzano il regime termico idraulico del sottosuolo, quali il passante ferroviario e la linea 1, i parcheggi interrati, parti interrate di edifici di grande altezza, gli impianti geotermici esistenti, ecc. Il modello numerico ha consentito di riprodurre le condizioni termiche e idrauliche del sottosuolo di Torino attuali, che sono state validate mediante confronto con i dati di monitoraggio disponibili. In ultima analisi, simulando l'attivazione dell'impianto geotermico della linea 2 della metropolitana, lo stesso modello ha consentito di valutare le alterazioni termiche eventualmente prodotte nel terreno circostante nonché le interazioni con gli impianti preesistenti.



Preliminarmente è stata valutata la porzione di area metropolitana di Torino da utilizzare come dominio del modello sulla base dell'andamento planimetrico del tracciato della Linea 2, definendo un'area sufficientemente ampia da permettere l'applicazione di idonee condizioni al contorno che non forzassero eccessivamente la soluzione termica e idraulica nell'area d'interesse. Nell'area di interesse è stato riprodotto il corpo idrico sotterraneo presente nella Pianura Torinese che viene attraversata dalla tratta della Linea 2; il contorno Ovest è stato scelto in corrispondenza di una linea isopiezometrica mentre i contorni Est e Nord seguono l'alveo dei fiumi Po e Stura di Lanzo rispettivamente. Il bordo Sud, infine, è stato scelto seguendo la direzione prevista del flusso di falda, ricavata grazie ai vettori di direzione di flusso di falda ottenuti mediante elaborazione in ambiente GIS a partire dal modello digitale della superficie piezometrica ottenuta per interpolazione dalle curve isopiezometriche (Figura 24).

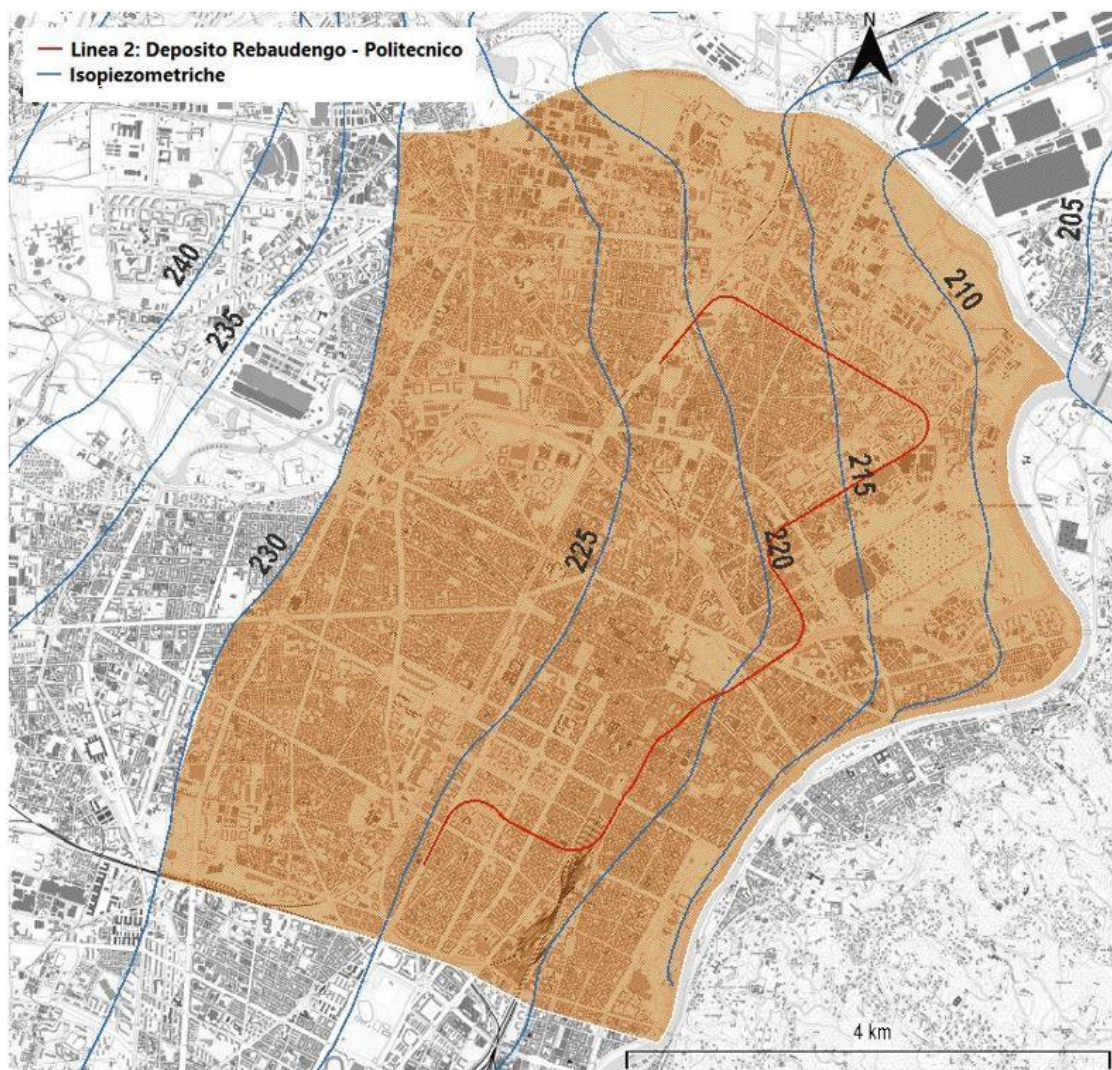



Figura 24. Rappresentazione dell'area di studio selezionata e delle linee isopiezometriche per la falda freatica (Politecnico di Torino, 2023).

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

Il modello numerico tridimensionale è stato costruito sulla base di tutte le informazioni georeferenziate relative all'area di studio. Dalla Base Dati Territoriale di Riferimento degli Enti piemontesi (BDTRE), ovvero la base dati geografica del territorio piemontese promossa dalla Regione Piemonte, sono stati scaricati i dati per poter ricavare il Modello Digitale del Terreno (DTM) riferito all'area urbana e il Modello Digitale d'Elevazione (DEM) della Base dell'Acquifero Superficiale (BAS).

Per la ricostruzione della stratigrafia si è fatto riferimento relazione tecnica descrittiva delle indagini condotte, alla relazione geologica ed idrogeologica ed alla relazione geotecnica e sismica del progetto definitivo della Linea 2 nonché allo studio condotto da Baralis (2020); per le aree esterne al tracciato della Linea si è fatto riferimento allo schema della stratigrafia del sottosuolo di Torino (modificata da Bottino & Civita, 1986). Per la definizione delle condizioni idrauliche dell'area di studio si sono considerati i dati della rete di monitoraggio ARPA Piemonte le cui informazioni sull'andamento temporale dei livelli piezometrici hanno permesso di costruire e applicare le adeguate condizioni al contorno al modello, variabili nel tempo.

Nel modello sono stati inseriti anche gli impianti geotermici presenti nell'area d'interesse. Per la raccolta delle informazioni sugli impianti a circuito aperto esistenti nell'area del dominio si è fatto riferimento al Catasto delle derivazioni, pozzi e sorgenti della Città Metropolitana di Torino, consultabile online al sito dell'ente (web GIS: <http://www.webgis.csi.it/derivb/gedeone.do>). Sono anche stati utilizzati i dati emersi dal censimento dei fabbricati adiacenti alla nuova linea effettuato da InfraTo nell'ambito delle attività di progettazione definitiva. Per i dati relativi agli impianti a circuito aperto, autorizzati, attivi e non attivi, e per quelli in fase di istruttoria presenti nelle vicinanze della Linea 2 della Metropolitana di Torino nella tratta Politecnico-Rebaudengo, Infra.To ha formulato una specifica richiesta di accesso agli atti alla Città Metropolitana di Torino, Servizio Risorse Idriche – Acque Meteoriche in data 28.10.2022, Prot. RC/Pv n. 11357. La Città Metropolitana in data 05.12.2022 ha trasmesso i dati relativi agli impianti richiesti che sono stati utilizzati per la definizione del modello a scala urbana sviluppato dal Politecnico di Torino e qui descritto.

Complessivamente nell'area urbana di Torino oggetto di studio sono stati censiti 35 impianti geotermici tra cui 33 a circuito aperto (elencati nella Tabella 5) e 2 a circuito chiuso (34 – Congregazione San Filippo Neri e 35 – Via Carlo Alberto 3). La Figura 25 mostra la posizione dei pozzi di presa e restituzione degli impianti a circuito aperto e le sonde degli impianti a circuito chiuso.


Tabella 5. Impianti a circuito aperto censiti nell'area oggetto dello studio.

NUMERO	DENOMINAZIONE
1	FABBRICA IMMOBILIARE
2	CONDOMINIO PALAZZO MARTINI DI CIGALA SAVOIA 7
3	CONDOMINIO VIA LAGRANGE 12 (EX. BUILDING)
4	CONDOMINIO IL GIRASOLE (IMMOBILIARE RIBAUDO)
5	REALE IMMOBILI



NUMERO	DENOMINAZIONE
6	IMMOBILIARE OPORTO
7	INTESA SAN PAOLO
8	TIKAL R.E. FUND - SAI INVESTIMENTI SGR
9	SAN CARLO 1973
10	FONDAZIONE MUSEO DELLE ANTICHITÀ EGIZIE DI TORINO
11	POLITECNICO DI TORINO (1)
12	POLITECNICO DI TORINO (2)
13	POLITECNICO DI TORINO (3)
14	POLITECNICO DI TORINO (4)
15	OGR-CRT S.C.P.A.
16	CONDOMINIO PALAZZO BARBAROUX (EX SECAP)
17	CITTÀ METROPOLITANA DI TORINO
18	CONDOMINIO PALAZZO VILLA (ATTUALE TITOLARE LARO)
19	COMPAGNIA SAN PAOLO
20	CONDOMINIO QUADRATO
21	VALFRÈ DI BONZO ANDREA
22	PICCOLA CASA DELLA DIVINA PROVIDENZA - COTTOLENGO
23	IMMOBILIARE DIORAMA SRL
24	COOPERATIVA SOCIALE BIOS
25	CONDOMINIO NUOVO PALAZZO SAN CARLO C/O STUDIO GOTRO (EX NEXITY)
26	COLLEGIO UNIVERSITARIO DI TORINO RENATO EINAUDI
27	CONDOMINIO PIAZZA BERNINI 2 / CSO TASSONI 2 (ATTUALE TITOLARE IMMOBILIARE BERNINI)
28	CONDOMINIO 25 VERDE
29	GIACOSA 38 SRL
30	SANTANDER CONSUMER BANK
31	PRIMULA COSTRUZIONI SRL
32	ERSEL IMMOBILIARE
33	SOCIETÀ CARLINA

Si specifica che ai pozzi geotermici per i quali erano a disposizione dati di monitoraggio, le temperature di scarico e le portate estratte ed immesse sono state assegnate secondo il reale andamento misurato durante il funzionamento (impianti n. 1, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 16, 17, 19, 24 e

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

33 della Tabella 5). Per quanto concerne gli impianti n. 3, 23 e 31 sono stati utilizzati i dati di progetto avendo avuto cura di verificare la loro sostanziale sovrapposibilità con i dati misurati.

Infine, gli impianti n. 18 e 25, sulla base delle informazioni pervenute dalla Città Metropolitana di Torino, risultano ad oggi non attivi, tuttavia sono stati comunque inclusi nel modello utilizzando i dati di progetto in quanto potrebbero essere attivati in futuro.

Per considerare il funzionamento e le condizioni al contorno degli altri pozzi geotermici, si è fatto riferimento ai dati di progetto (temperature stagionali massime e minime e portata media) segnalati dai gestori e dal catasto dei pozzi della Città Metropolitana di Torino.

Gli impianti sopradescritti costituiscono le utenze attive, in quanto scambiano il calore proveniente dal terreno e dalla falda reimmettendo, nel caso dei circuiti di tipo aperto elencati nella Tabella 5, acque di falda a differente temperatura rispetto alla temperatura di prelievo. Causa d'impatto termico e idraulico sono però anche ulteriori strutture antropiche (utenti passivi), rappresentate in ambito urbano prevalentemente dalle infrastrutture sotterranee, dagli edifici e dai parcheggi interrati, anch'essi inseriti nel modello numerico tridimensionale.

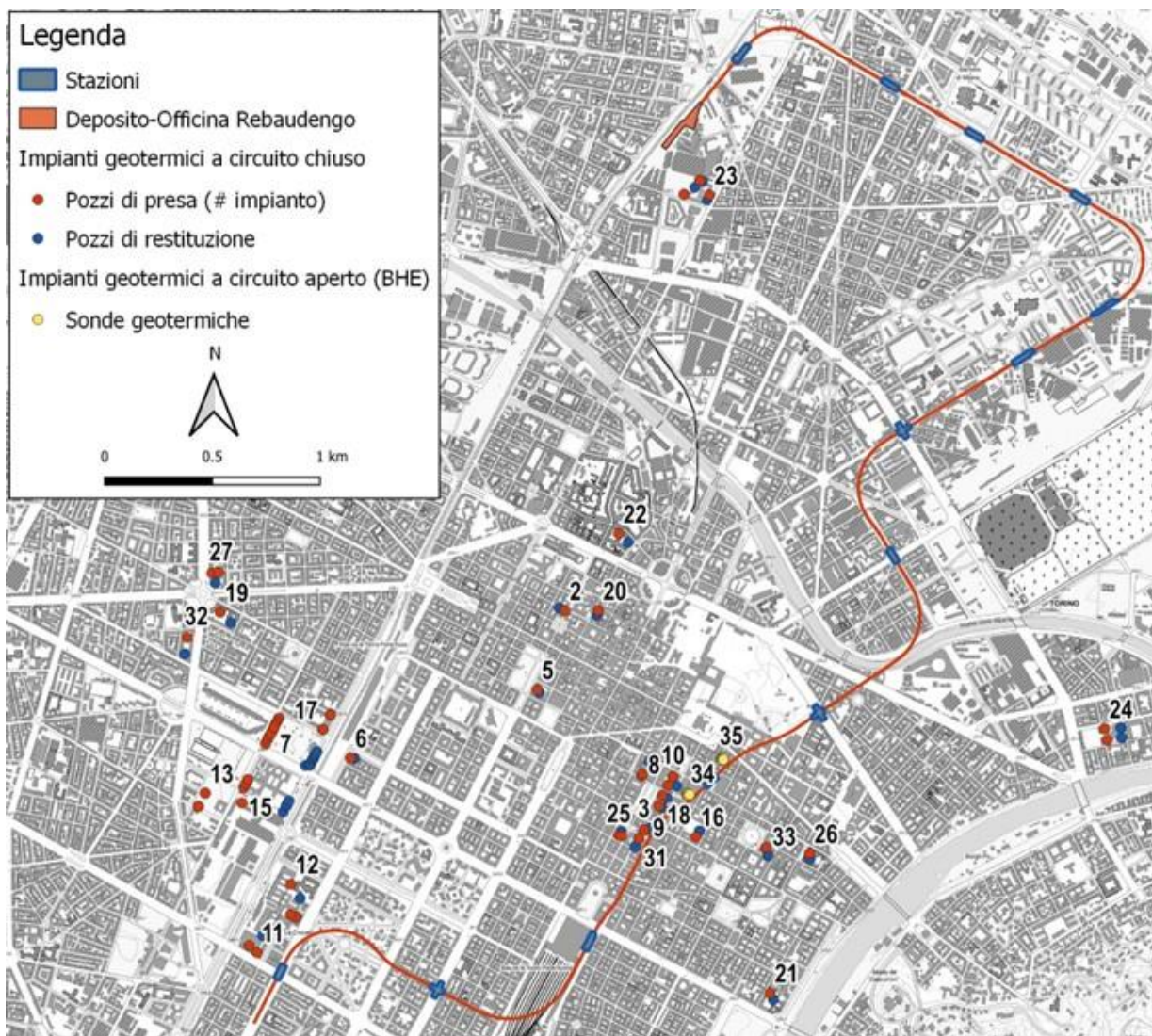



Figura 25. Impianti geotermici a circuito aperto e chiuso presenti nell'area di studio.

5.2 Risultati delle analisi numeriche a scala urbana

Il modello numerico tridimensionale implementato dal Politecnico di Torino include un ambiente molto esteso ed è stato in primo luogo necessario riprodurre uno stato iniziale termo-idraulico che fosse rappresentativo delle condizioni attuali, precedenti all'attivazione termica della ML2. La fase successiva è stata invece finalizzata a riprodurre lo scenario in cui si introduce l'effetto dell'attivazione termica della linea 2 della metropolitana in progetto. In questa fase è stato assunto che il funzionamento degli impianti geotermici a circuito aperto presenti nell'area studio sia quello dell'ultimo anno di esercizio, ripetuto ciclicamente. Gli scambiatori di calore inseriti nei rivestimenti della galleria della metropolitana sono stati assimilati ad un impianto geotermico a circuito chiuso (Ground Source Heat Pump, GSHP).

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

I risultati numerici descritti nella Relazione del Politecnico e qui riportati si riferiscono ad un orizzonte temporale di lungo termine e sono riferiti ad analisi termo idrauliche protratte per 4 anni (dal 2022 al 2025 inclusi) durante i quali le stagioni invernali ed estive si ripetono in maniera ciclica. Questa ciclicità porta alla generazione di ZAT che si distribuiscono in particolare negli orizzonti saturi di terreno secondo il gradiente e la direzione del flusso di falda che nell'area è orientato in direzione circa NO-SE.

Le Figure 26-29 mostrano i risultati in termini di temperature nell'area di studio al termine della stagione invernale e di quella estiva, in corrispondenza di due diverse profondità, una rappresentativa per il tratto in Cut & Cover (10 m da p.c.) e l'altra per la tratta scavata con TBM (25 m da p.c.).

L'estensione e la forma delle zone di alterazione attorno al tracciato della Linea 2 denotano che il terreno risulta maggiormente alterato attorno alle porzioni di infrastruttura termicamente attiva che si trovano quasi o del tutto sottofalda, condizione che è predominante nelle tratte di galleria scavate in TBM. Un altro fattore determinante è l'angolo d'incidenza del flusso di falda rispetto al tracciato dell'infrastruttura, che determina un'estensione maggiore della zona di alterazione per incidenze del flusso prossime all'ortogonalità.

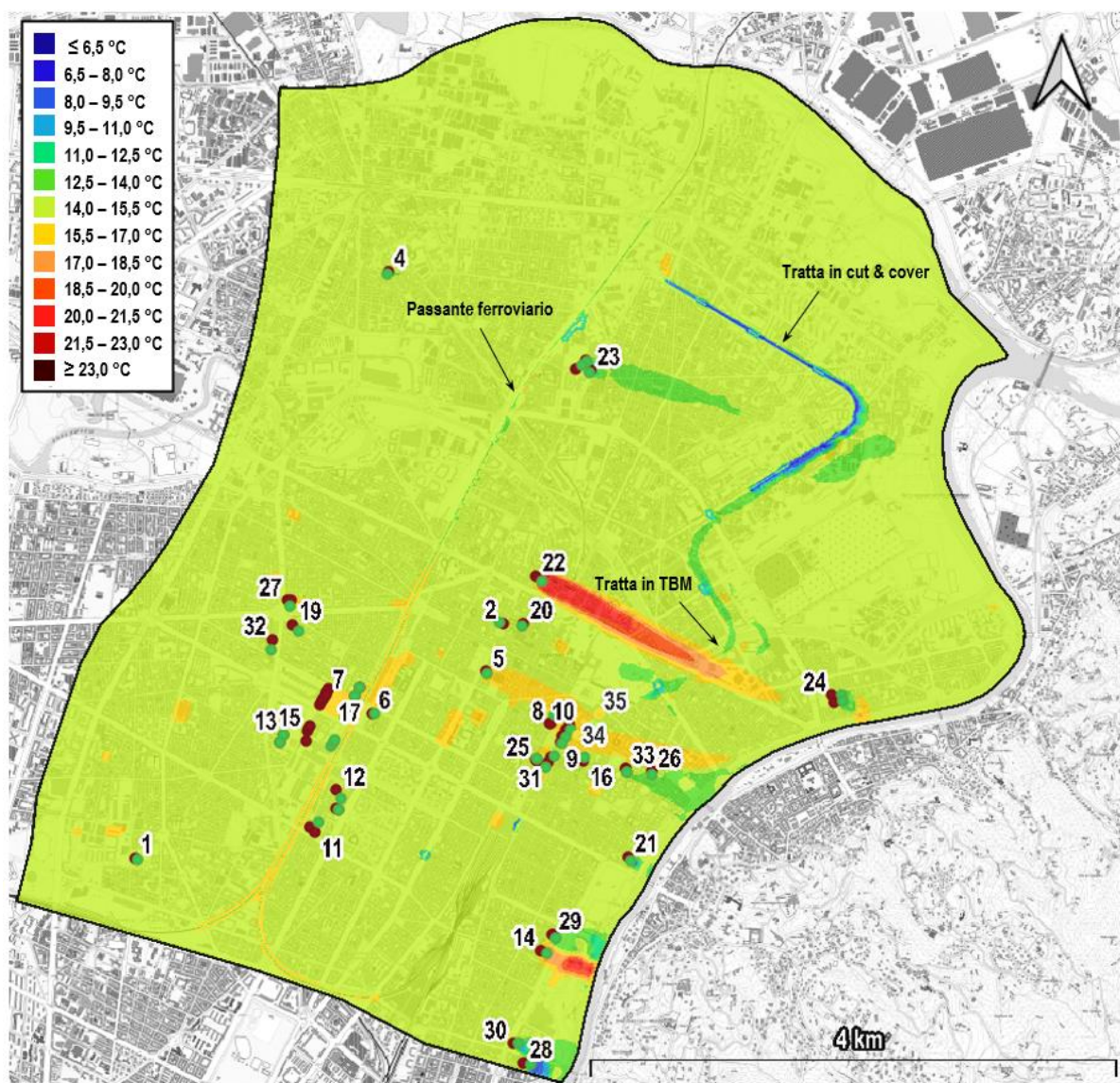


Figura 26. Mappa termica del dominio del modello numerico al termine della stagione invernale alla profondità del tratto in C&C della ML2 (Politecnico di Torino, 2023).

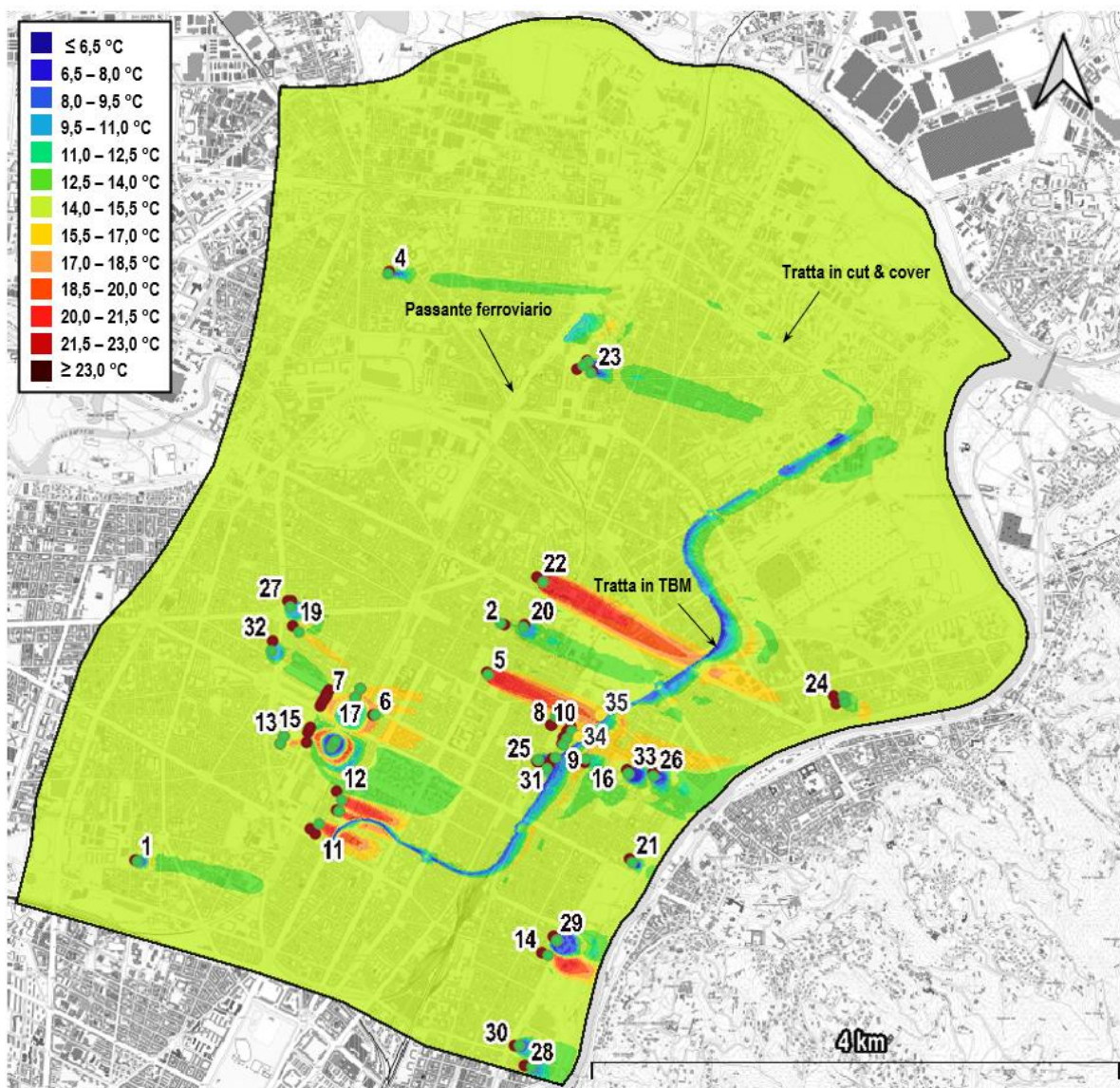


Figura 27. Mappa termica del dominio del modello numerico al termine della stagione invernale alla profondità del tratto in TBM della ML2 (Politecnico di Torino, 2023).

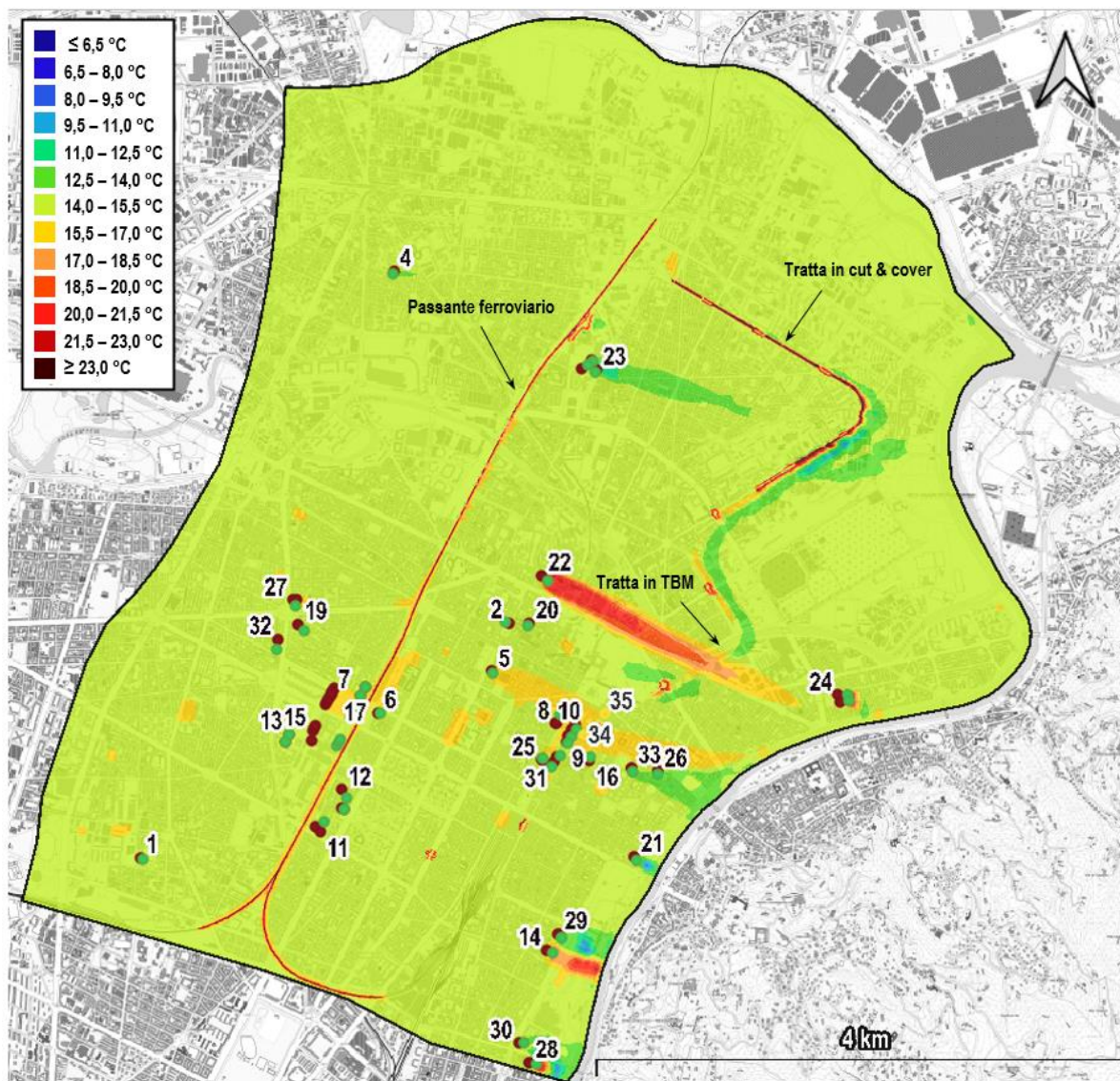


Figura 28. Mappa termica del dominio del modello numerico al termine della stagione estiva alla profondità del tratto in C&C della ML2 (Politecnico di Torino, 2023).

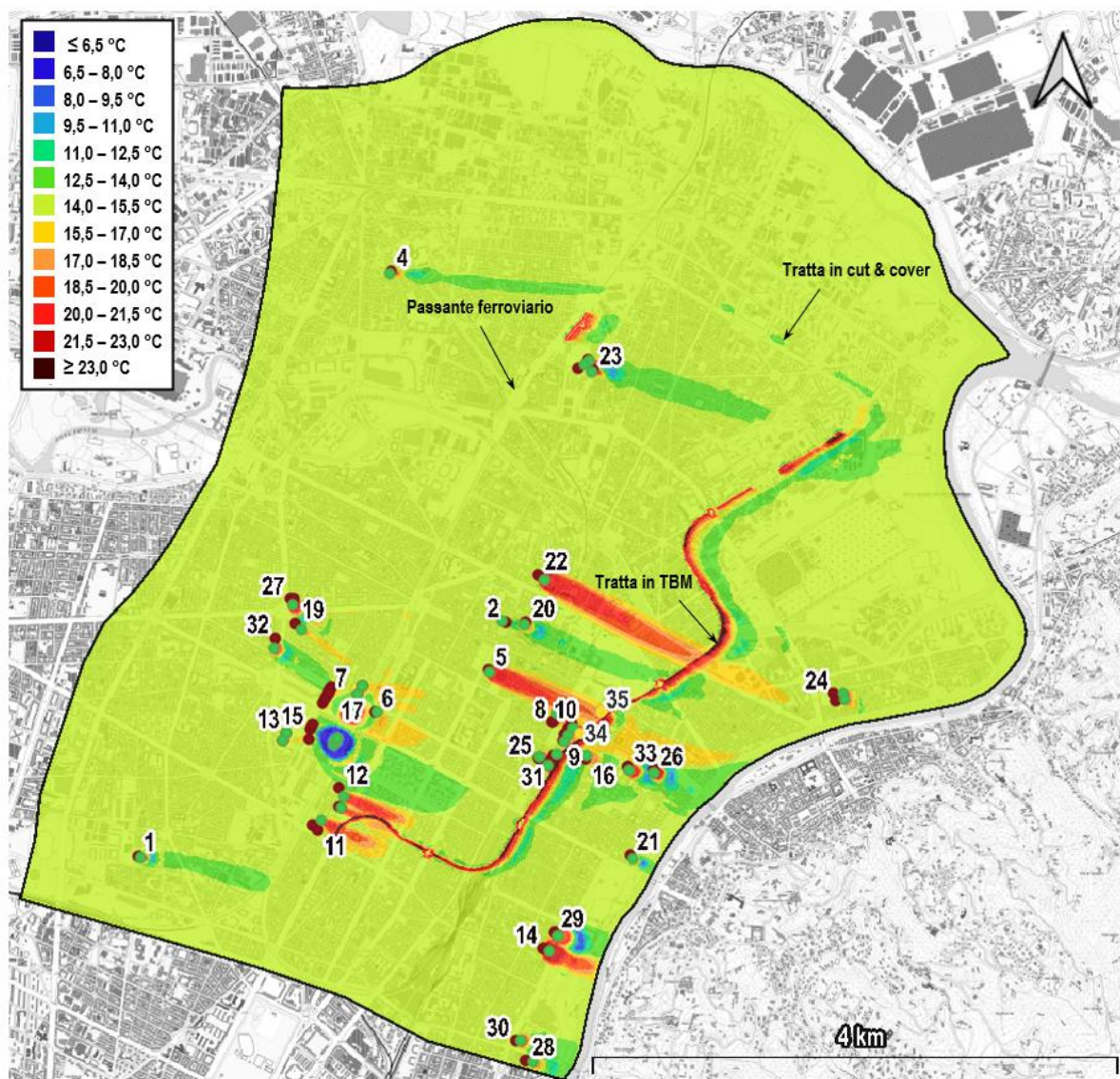


Figura 29. Mappa termica del dominio del modello numerico della stagione estiva alla profondità del tratto in TBM della ML2 (Politecnico di Torino, 2023).

A titolo di esempio si riportano alcuni risultati della modellazione numerica, con riferimento alle zone dell'area di Torino a Nord della Barriera di Milano (Figure da 30 a 34) e nel tratto tra la stazione Porta Nuova e Politecnico (Figure da 35 a 37).



Figura 30. Area di Torino a Nord della Barriera di Milano, con indicazione del tracciato di Linea 2 e dell'impianto geotermico nr. 23. In planimetria è indicata la traccia delle sezioni A-A' e B-B'. (Politecnico di Torino, 2023).

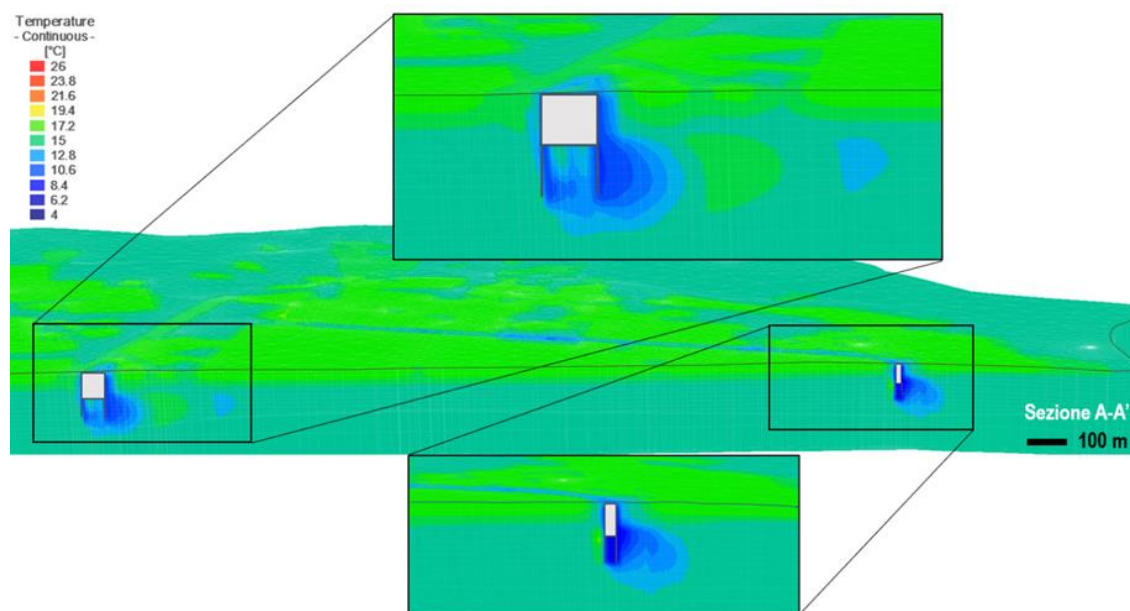


Figura 31. Sezione A-A': mappa di temperatura al termine della stagione invernale del quarto anno di attivazione termica della ML2. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5. (Politecnico di Torino, 2023).

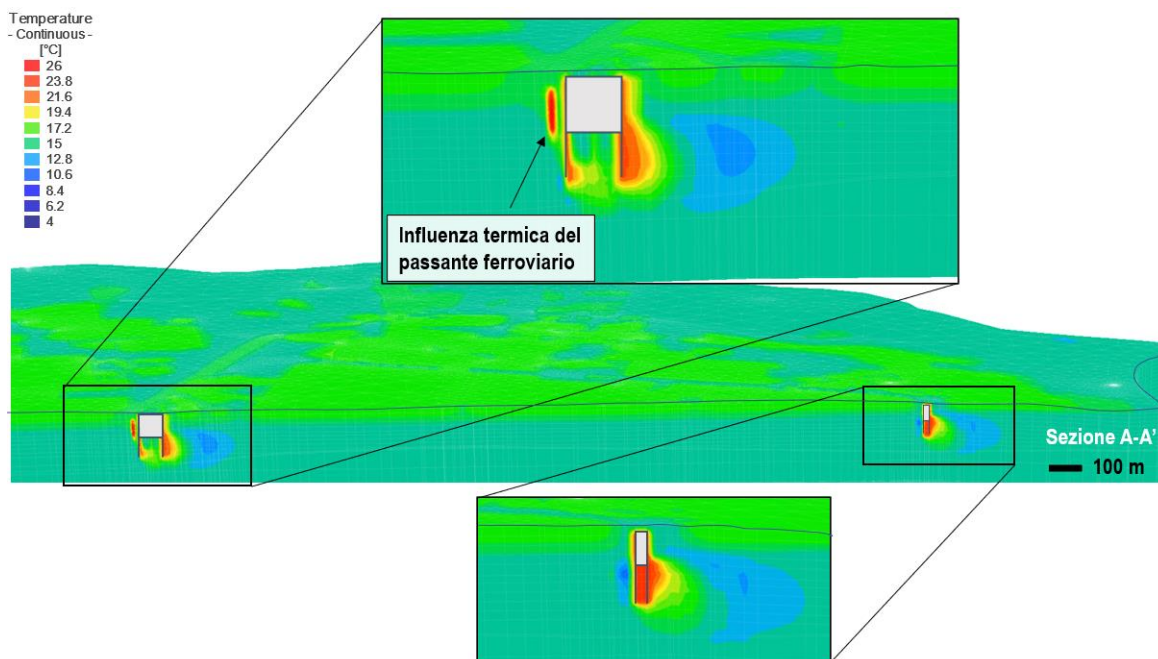


Figura 32. Sezione A-A': mappa di temperatura al termine della stagione estiva del quarto anno di attivazione termica della ML2. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5. (Politecnico di Torino, 2023).

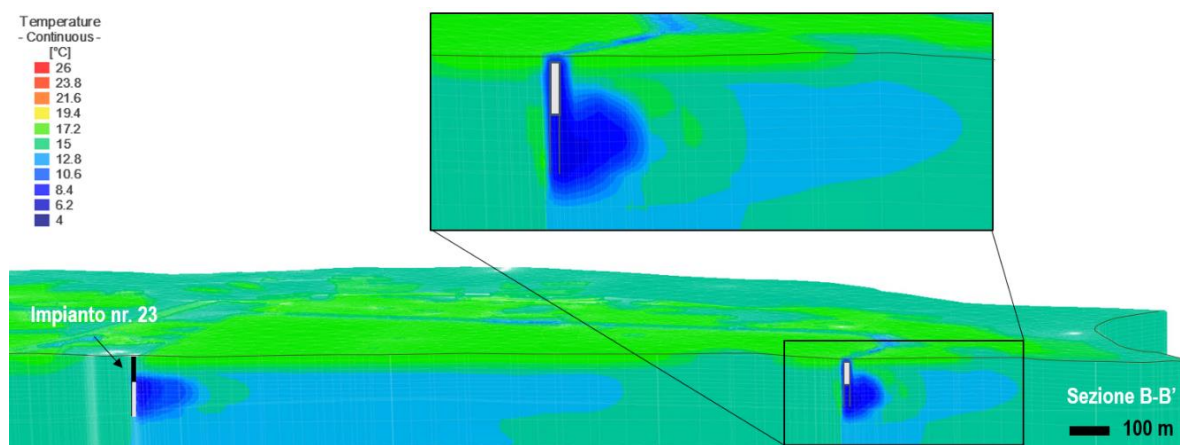


Figura 33. Sezione B-B': mappa della temperatura alla fine della stagione invernale del quarto anno di attivazione termica della ML2. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore di scala di 5. (Politecnico di Torino, 2023).

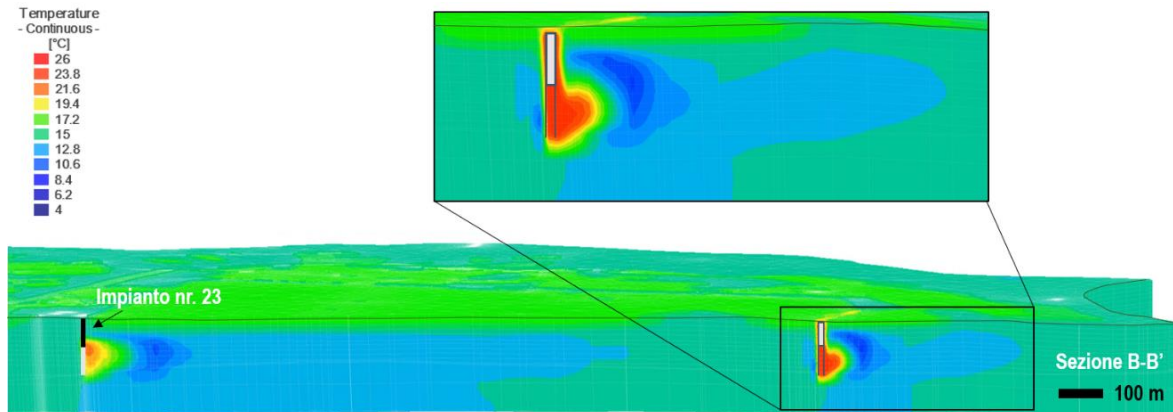


Figura 34. Sezione B-B': mappa di temperatura al termine della stagione estiva del quarto anno di attivazione termica della ML2. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5. (Politecnico di Torino, 2023).



Figura 35. Inquadramento dell'area di Torino circostante al tracciato della Linea 2, tra le stazioni Porta Nuova e Politecnico. In planimetria sono indicate la traccia della sezione G-G' e l'ubicazione degli impianti geotermici nr. 11, 12 e 14. (Politecnico di Torino, 2023).

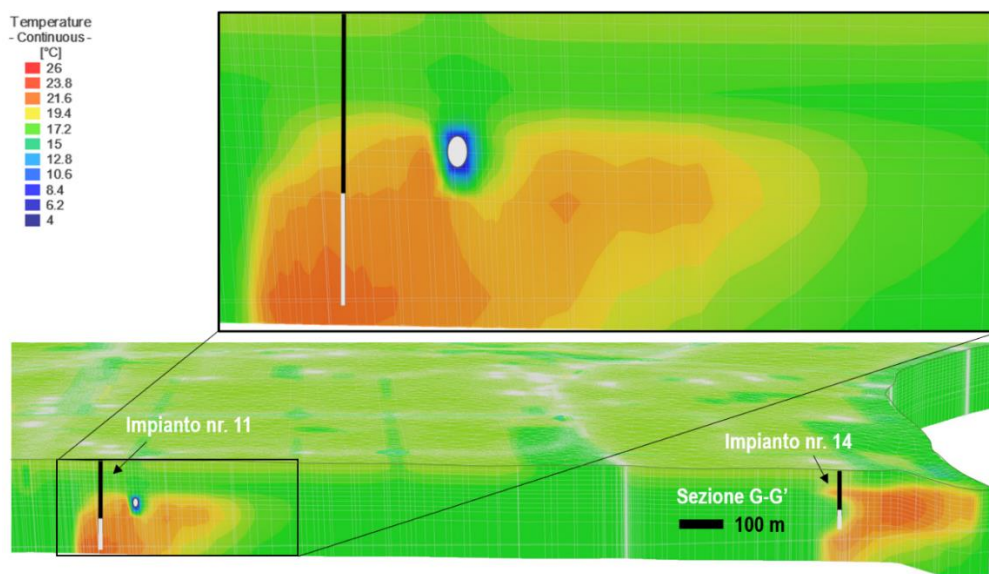


Figura 36. Sezione G-G': mappa delle temperature al termine dell'attivazione nella stagione invernale del quarto anno di simulazione. In figura sono indicati i plumi termici dovuti agli impianti nr. 11 e 14, entrambi del Politecnico di Torino. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5. (Politecnico di Torino, 2023).

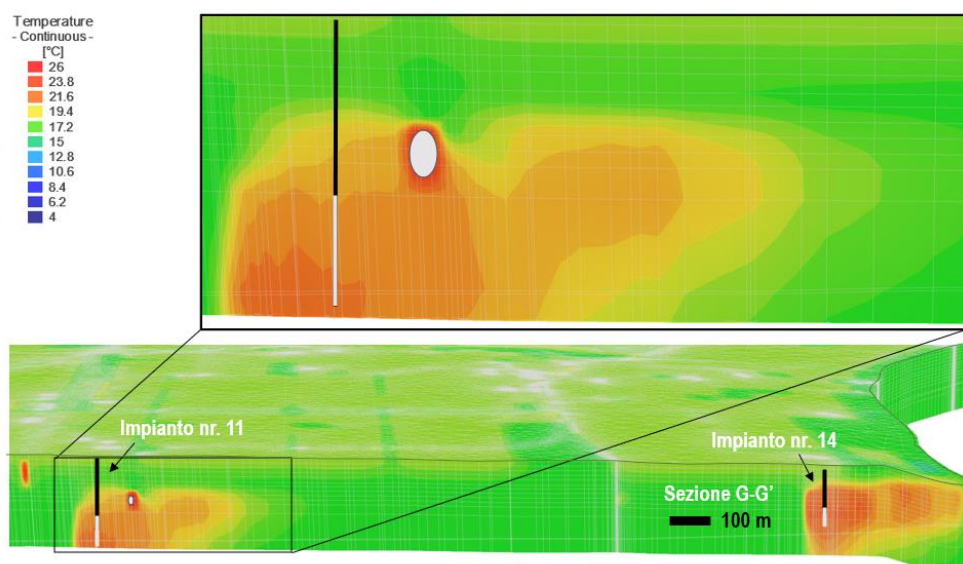



Figura 37. Sezione G-G': mappa delle temperature al termine dell'attivazione nella stagione estiva del quarto anno di simulazione. In figura sono indicati i plumi termici dovuti agli impianti nr. 11 e 14, entrambi del Politecnico di Torino. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5. (Politecnico di Torino, 2023).

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

5.3 Valutazione dell'alterazione termica

Come anticipato nel precedente capitolo le installazioni geotermiche in un contesto geologico quale quello del sottosuolo della città di Torino determinano una zona di disturbo, definita in letteratura come zona di alterazione termica (ZAT). Gli elementi che contribuiscono all'alterazione termica del sottosuolo dell'area urbana oggetto dello studio sono certamente gli impianti geotermici a circuito aperto, gli impianti a circuito chiuso, le strutture interrato (parcheggi, piani interrati, ecc.) e le infrastrutture quali il passante ferroviario e la Linea 1 della metropolitana. L'attivazione termica delle strutture della Linea 2 si aggiunge pertanto ad un ambiente già alterato, in particolare in alcune zone della città. L'impatto termico causato dall'installazione e dall'attivazione di uno o più degli impianti sopracitati, ovvero il suo andamento temporale ed estensione nello spazio, può essere ricostruito ricorrendo a simulazioni numeriche accoppiate termo-idrauliche basate sul metodo degli elementi finiti (Lo Russo et al, 2012; 2014; Barla et al. 2015; Barla et al. 2018), come eseguito nello studio condotto dal Politecnico di Torino e qui richiamato.


Le analisi numeriche condotte hanno consentito di sovrapporre l'effetto dell'attivazione termica della Linea 2 a quelli degli altri elementi presenti nell'area oggetto di studio ai fini dell'individuazione della ZAT.

Per valutare in dettaglio l'influenza derivante dall'attivazione termica delle strutture della metropolitana è necessario considerare che la galleria della metropolitana è ubicata a profondità differenti lungo il tracciato e quindi il suo impatto sulle temperature del terreno circostante è fortemente variabile nello spazio. Per riferimento sono state quindi prese in considerazione due diverse profondità (10 e 25 m da piano campagna), rappresentative rispettivamente per la tratta in Cut&Cover e per la tratta in TBM, dove l'effetto prodotto dalla metropolitana può essere considerato massimo.

Nelle Figure 27 e 29 viene rappresentata l'alterazione termica ad una profondità di 25 m da p.c., ovvero nella porzione di terreno maggiormente influenzata dalla galleria realizzata in TBM.

Per le tratte dove sono presenti i diaframmi (galleria realizzata in C&C) invece l'influenza termica della struttura sul terreno circostante si estende per l'intera profondità del diaframma stesso che risulta tuttavia estremamente variabile lungo la linea (da circa 12 m a oltre 42 m). Per mettere in evidenza l'alterazione termica di tutti i differenti diaframmi è stata scelta come rappresentativa la profondità di 10 m (Figure 26 e 28) che consente al tempo stesso di evidenziare la zona di alterazione termica dei diaframmi poco profondi (12 m) così come di quelli più profondi.

Sfruttando l'interoperabilità tra i due software FEFLOW e QGIS, le mappe raster di alterazione termica rappresentate nelle Figure 26-29 sono state ulteriormente processate ottenendo così una rappresentazione delle zone del terreno caratterizzate da una variazione di temperatura maggiore di 1 °C rispetto alle condizioni del terreno (già disturbate) precedenti l'attivazione della metropolitana. Queste aree possono essere quindi considerate coincidenti con la ZAT. La Figura 38 mostra l'area complessiva di alterazione termica (ZAT) con una linea tratteggiata nera. L'area presenta evidentemente un tracciato parallelo a quello dell'infrastruttura e fortemente influenzato

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

dall'andamento della circolazione idrica sotterranea. A monte idrografico della galleria, l'estensione della zona è sostanzialmente trascurabile e sempre inferiore a 50 m. A valle invece l'estensione è maggiore e raggiunge valori del centinaio di metri, con un valore massimo di 276 m in corrispondenza della curva tra le stazioni Mole-Giardini Reali e Novara. Si ricorda che la fascia dovuta all'attivazione termica della metropolitana in progetto è stata attribuita tenendo in considerazione i risultati più cautelativi tra quelli ottenuti alle due profondità d'interesse (per il tratto in C&C e TBM) e al termine di entrambe le stagioni estiva e invernale. Di conseguenza, essendo questi valori caratteristici delle profondità indagate, a quote differenti la zona di disturbo sarà al più uguale o inferiore.

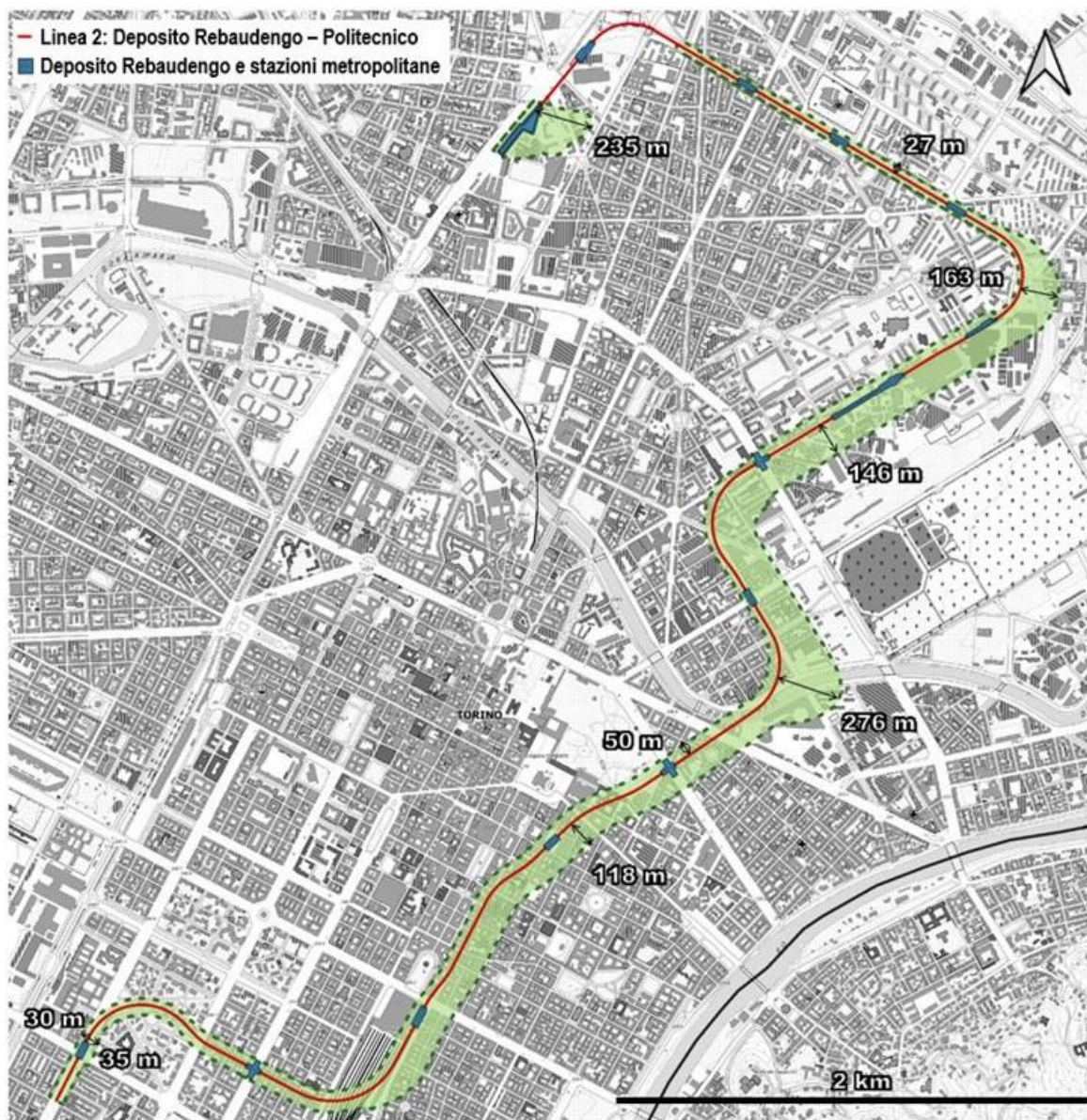




Figura 38. Zona di alterazione termica per la tratta di ML2 considerata nel presente studio. La linea nera tratteggiata delimita il confine entro il quale le variazioni di temperatura superano 1°C. (Politecnico di Torino, 2023).

L'interferenza tra differenti impianti geotermici presenti nel sottosuolo riveste particolare importanza soprattutto nelle aree urbane ove, in spazi limitati, possono essere presenti numerosi impianti per lo sfruttamento geotermico del calore presente ed è già stata oggetto di numerosi studi (Fry, 2009; Lo Russo et al. 2012, 2014; Barla et al., 2018; Baralis, 2020). L'interesse crescente al riguardo, sia da parte degli Enti deputati al controllo delle risorse idriche sotterranee che da parte della comunità scientifica, è giustificato dal fatto che queste anomalie termiche possono comportare un'alterazione del potenziale di scambio termico a cui è associato un

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

peggioramento del rendimento degli impianti geotermici (Epting & Huggenberger, 2013; Herbert et al., 2013; Barla et al. 2018).

La modellazione condotta consente in ultima analisi di individuare una fascia di alterazione della temperatura a seguito dell'attivazione termica della metropolitana. Indicazioni sugli effetti generati da plumi termici di terzi sulla galleria, possono essere in qualche modo desunte dalle zone del modello ove, sin d'ora, è presente una concentrazione di impianti esistenti (ad esempio l'area attorno a piazza Carlo Alberto). Tuttavia al fine di definire in maniera rigorosa tali effetti sarebbe opportuno condurre analisi numeriche specifiche, con le stesse caratteristiche di quella di cui sopra, ma finalizzate a simulare, in maniera parametrica, lo specifico ruolo di sorgenti termiche posizionate a diverse distanze dalla metropolitana e in corrispondenza di diverse aree.


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

6. SINTESI CONCLUSIVA

La presente relazione generale ha descritto in termini generali le attività svolte nell'ambito della progettazione definitiva inerente l'attivazione termica delle strutture della Linea 2 della Metropolitana di Torino nella tratta Politecnico-Rebaudengo. I dettagli del lavoro svolto sono contenuti nelle relazioni tecniche specifiche (Caratterizzazione termo-idraulica dei terreni - documento n° MTL2T1A0DGTRCOMR002, Relazione tecnica e di calcolo - documento n° MTL2T1A0DGTRCOMR003 e Individuazione dei ricettori per lo sfruttamento del calore estratto - documento n° MTL2T1A0DGTRCOMR004) a cui si rimanda per tutti gli approfondimenti specifici.


Di seguito si fornisce una sintesi delle attività svolte nell'ambito della progettazione definitiva che sarà possibile approfondire nei documenti specifici sopra citati:

- Riguardo ai criteri progettuali per l'individuazione delle strutture termicamente attivabili, tutti i tratti di galleria realizzati in TBM e in C&C sono stati interamente ritenuti idonei all'attivazione termica eccettuate le porzioni interferenti con i pozzi di aerazione e con il pozzo di emergenza. Per 12 stazioni su un totale di 13 sono stati ritenuti idonei all'attivazione i diaframmi che presentano assenza di interruzioni nella struttura ed assenza di strutture secondarie in adiacenza che possono comportare schermature totali o parziali nei confronti del terreno circostante.
- Per sfruttare al meglio il calore estratto dal terreno per la tratta di galleria realizzata in TBM si è ritenuto necessario il collegamento in serie di due anelli del rivestimento consecutivi (ogni anello risulta composto da 7 conci oltre al concio chiave) per formare un unico circuito di scambio; per le tratte realizzate in C&C così come per i diaframmi delle stazioni e del deposito-officina Rebaudengo lo schema ottimale per il collegamento in serie dei pannelli è risultato dipendente dalla lunghezza complessiva del tratto attivabile del diaframma medesimo (da singolo a 5 pannelli).
- Specifiche prove di laboratorio (prove di tipo *needle probe*) unitamente a particolari prove in sito (Test di Risposta Termica Distribuita D-TRT) hanno consentito di definire nel dettaglio i parametri termo-idraulici principali dei terreni del sottosuolo di Torino. Sulla base dei risultati ottenuti il sottosuolo della città di Torino per le profondità di interesse è stato schematizzato attraverso 3 differenti unità termo-idrauliche che sono state successivamente utilizzate nella definizione delle sezioni omogenee.
- La distribuzione spaziale della temperatura dell'acqua di falda, ulteriore parametro fondamentale per il calcolo della potenza termica estraibile dal sottosuolo, è stata ricostruita attraverso specifiche misure puntuali (con freatimetro munito di sonda termometrica) e continue (sensori termometrici fissi) effettuate in una serie di piezometri distribuiti lungo l'intero tracciato della tratta Politecnico-Rebaudengo.
- Prendendo in considerazione cinque parametri ovvero la posizione della superficie piezometrica rispetto alla galleria (F), la temperatura dell'acqua di falda (T), la direzione del flusso principale della falda rispetto alla direzione della galleria (DF), il gradiente o cadente piezometrica del flusso della falda (I) e la stratigrafia del terreno attorno alla galleria (Geo) è stato possibile individuare rispettivamente 22 sezioni omogenee per la porzione che sarà realizzata in TBM e 14 sezioni omogenee per la porzione che sarà realizzata in C&C per un totale complessivo di 36 differenti sezioni omogenee. A ciascuna

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX


sezione omogenea è stato infine assegnato un codice univoco che corrisponde ad uno specifico modello numerico FEM-TH.

- I singoli modelli numerici FEM-TH corrispondenti alle sezioni omogenee individuate lungo le gallerie di linea (TBM e C&C) sono stati realizzati con il codice di calcolo agli elementi finiti FEFLOW (Diersch, 2008). Per le stazioni è stato assunto un approccio che considerasse, quando possibile, le analogie fra le stazioni e determinati modelli "tipologici" al fine di ridurre il numero di analisi numeriche da condurre. Anche per queste è stato utilizzato il medesimo codice numerico adottato per le gallerie di linea. I modelli numerici realizzati hanno permesso di considerare il flusso di falda e di integrare le componenti advettive e idro-dispersive del trasporto di calore sia all'interno di mezzo saturo, sia di mezzo insaturo o parzialmente saturo. Ogni modello ha quindi permesso di calcolare la differenza di temperatura a 30 giorni tra ingresso e uscita del circuito di scambio termico. Le differenze di temperatura a 30 giorni rappresentano la condizione più conservativa per il calcolo della potenza estraibile tramite il rivestimento della galleria o dai diaframmi delle stazioni.
- Da ciascuna differenza di temperatura tra ingresso e uscita dal circuito di scambio termico nel caso estivo e nel caso invernale è stato possibile ottenere la potenza termica per metro lineare estraibile dal terreno e da questa la potenza termica complessiva per ogni tratta di determinata lunghezza. Per le stazioni è stata considerata la potenza termica complessiva derivante dall'attivazione dei diaframmi selezionati secondo i criteri precedentemente descritti. L'analisi dei risultati ha mostrato una potenza termica specifica lievemente inferiore in inverno rispetto all'estate per la maggior parte delle tratte della ML2 in virtù di una minore differenza in questa stagione tra la temperatura naturale del suolo, la temperatura all'interno della galleria (dedotta dai risultati dell'analisi termica svolta in condizioni di esercizio ordinario della linea 2 di Torino in condizioni di punta e di morbida) e le temperature del circuito di scambio. Le porzioni di tracciato che sono risultate nel complesso essere le più produttive sono due tratte rispettivamente comprese tra le stazioni di Porta Nuova e Carlo Alberto e tra la stazione di Verona ed il pozzo PNO e la tratta in C&C compresa tra il pozzo PNO e la stazione Cimarosa-Tabacchi.
- Complessivamente sono stati individuati un totale di 59 differenti impianti, a loro volta suddivisi tra 14 impianti derivanti dall'attivazione termica dei conci prefabbricati per la porzione di galleria scavata con TBM, 20 impianti derivanti dall'attivazione termica dei diaframmi per la porzione di galleria scavata con metodo C&C e 25 impianti relativi all'attivazione delle stazioni. I 34 impianti presenti lungo le gallerie di linea, sia in TBM che in C&C afferiscono alle 12 stazioni di collegamento impianti oltre al Deposito-officina Rebaudengo che costituisce di per sé un impianto singolare.
- Confrontando infine i dati di potenza termica disponibile agli impianti afferenti a ciascuna stazione di collegamento con i dati di fabbisogno delle strutture a servizio della ML2 (coincidenti in questo caso con le stazioni di linea e con il deposito-officina Rebaudengo) è stato possibile verificare la copertura delle esigenze energetiche della maggior parte delle stazioni di linea e la contemporanea presenza di notevoli surplus termici che possono essere quindi destinati ad altri ricettori esterni.
- I risultati in termini di potenze termiche totali estraibili hanno mostrato valori per la maggior parte delle stazioni di collegamento impianti maggiori rispetto alle previsioni del PFTE sia per l'estate che per l'inverno. L'attivazione termica delle strutture delle stazioni,

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX


precedentemente non considerata, gioca un ruolo importante in questo senso. I risultati aggiornati del PD si ritengono inoltre maggiormente affidabili rispetto alle precedenti progettuali in quanto risultano basati su una più approfondita caratterizzazione termoidraulica dei terreni, una più realistica analisi termica delle condizioni di esercizio ordinario della linea 2 nonché una serie di scelte progettuali volte a massimizzare lo scambio termico e a facilitare il più possibile le operazioni di realizzazione degli impianti.

- Tramite un modello numerico FEM-TH tridimensionale implementato dal Politecnico di Torino è stato possibile ricostruire con buona affidabilità la zona di alterazione termica (ZAT) dovuta all'attivazione termica dell'intero tracciato della metropolitana, delle stazioni di linea e del Deposito-officina Rebaudengo. A questo proposito si ricorda che l'attivazione termica delle strutture della ML2 non comporta il prelievo e/o l'immissione in falda di acque ed è quindi assimilabile ad un circuito geotermico a circuito chiuso. A monte idrografico della galleria, l'estensione della ZAT è sostanzialmente trascurabile e sempre inferiore a 50 m mentre a valle del tracciato l'estensione è maggiore e raggiunge valori del centinaio di metri, con un valore massimo di 276 m in corrispondenza della curva tra le stazioni Mole-Giardini Reali e Novara. Questi valori rappresentano i risultati più cautelativi tra quelli ottenuti analizzando la ZAT a differenti profondità all'interno del modello numerico tridimensionale.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

7. BIBLIOGRAFIA

- Adam, D., Markiewicz, R., 2009. Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers. *Geotechnique* 59, 229–236. <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.3.229>.
- Amis, T., Robinson, C. A. W., Wong, S., 2010. Integrating Geothermal Loops into the Diaphragm walls of the Knightsbridge Palace Hotel Project, Proc. 11th DFI/EFFC Intl. Conf. on Geotechnical Challenges in Urban Regeneration, Londra, 2010. 10 pp.
- Barla, M., Di Donna, A., 2016a. Editorial Themed issue on energy geostructures. *Environ. Geotech.* 3, 188–189.
- Barla, M., Di Donna, A., 2016b. Conci energetici per il rivestimento delle gallerie. *STRADE & AUTOSTRADE* 5, 2–5.
- Barla, M., Di Donna, A., Perino, A., 2016. Application of energy tunnels to an urban environment. *Geothermics* 61, 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.01.014>.
- Barla, M., Di Donna, A., 2018. Energy tunnels: concept and design aspects. *Undergr. Sp.* <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.03.003>.
- Barla M., A. Di Donna, A. Santi, 2018a. Energy and mechanical aspects on the thermal activation of diaphragm walls for heating and cooling. *Renewable Energy*. doi: 10.1016/j.renene.2018.10.074
- Barla M., Di Donna A., Baralis M., 2018b. City-scale analysis of subsoil thermal conditions due to geothermal exploitation. *Environmental Geotechnics*. <http://dx.doi.org/10.1680/jenge.17.00087>.
- Barla, M., Di Donna, A., Insana, A., 2019. A novel real-scale experimental prototype of energy tunnel. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.* 87, 1–14.
- Bottino, G., & Civita, M. 1986. Engineering geological features and mapping of subsurface in the metropolitan area of Turin, North Italy. In *International association of engineering geology. International congress. 5* (pp. 1741-1753). Brandl, H., 2006. Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Geotechnique* 56, 81energy <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.2.81>.
- Di Donna A., F. Cecinato, F. Loveridge, M. Barla, 2016. Energy performance of diaphragm walls used as heat exchangers, Proc. Inst. Civ. Eng. - *Geotech. Eng.* 1–14. doi:10.1680/jgeen.
- Di Donna, A., Barla, M., 2016. The role of ground conditions and properties on the efficiency of energy tunnels. *Environ. Geotech.* 3.
- Insana, A., Barla, M. 2020. Experimental and numerical investigations on the energy performance of a thermo-active tunnel. *Renewable Energy*, 152, 781-792.
- Laloui, L., Di Donna, A., 2013. Energy Geostructures: Innovation in Underground Engineering, *Energy Geostructures: Innovation in Underground Engineering*, <https://doi.org/10.1002/9781118761809>.
- Politecnico di Torino, 2023. Studio numerico dell'influenza dell'attivazione termica della galleria della metropolitana nel sottosuolo attraversato. Rapporto N.: 2203ML2_RL02.0, 56 pp.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo
Geotermia – Relazione generale	MTL2T1A0DGTRCOMR001-0-1.DOCX

Soga, K., Rui, Y., 2016. Energy geostructures, in: Rees, S.J. (Ed.), *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*. Woodhead 482 Publishing, pp. 185–221. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100311-4.00007-8>