

# Soluzioni geotermiche innovative per l'energia sostenibile

Francesco Cecinato

Università degli Studi di Milano  
Dip. di Scienze della Terra «A. Desio»





Cosa significa  
«Geotermia»?

Immagini da google

TRECCANI

geotermia s. f. [der. di geotermico]. – **Parte della geofisica che si occupa delle questioni inerenti alla temperatura dell'interno della Terra.**

OXFORD LANGUAGES

geotermia

/ge-o-ter-mi-a/

*sostantivo femminile*

La scienza che studia le sorgenti di calore terrestre e il loro sfruttamento come fonti di energia.

HOEPLI

geotermia

[ge-o-ter-mi-a]

*s.f.* (pl. -mie)

*GEOL* Misurazione del calore terrestre e studio delle possibilità del suo sfruttamento come fonte di energia termica

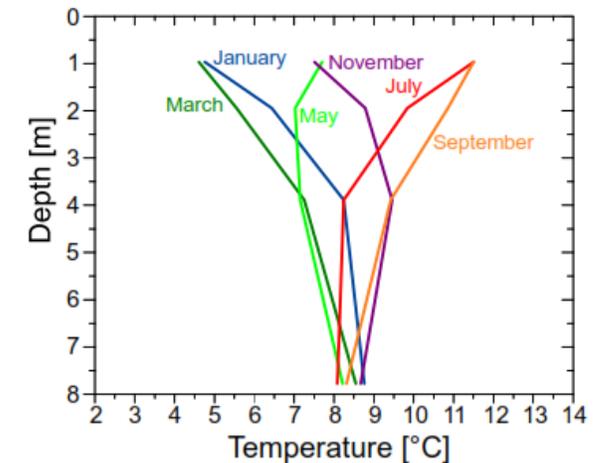
# Cosa significa «Geotermia»?

---

Definizioni dai dizionari

# Storia della geotermia (superficiale)

- Le variazioni termiche sulla superficie si attenuano sotto terra
  - Animali (e uomini, dalla preistoria) hanno sempre sfruttato questa proprietà
- Al di sotto di 10-15m di profondità, T è costante tutto l'anno



# Storia della geotermia (profonda)

- Scavando sempre più in basso, T aumenta secondo un «gradiente geotermico» (in media  $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ )
  - Fenomeni geotermici profondi sfruttati sin dall'antichità
  - Maggior consapevolezza del gradiente geotermico grazie ai minatori, nel medioevo



[historiemedievali.blogspot.com](http://historiemedievali.blogspot.com)



Terme romane a Bath (Wikipedia)

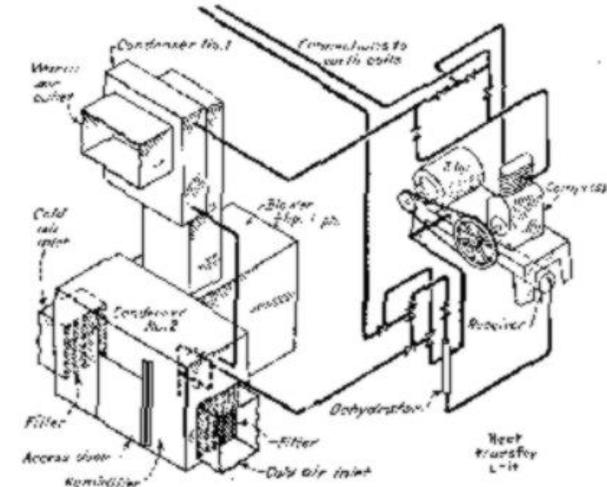
# Storia della geotermia (profonda)

- Il primo esperimento di geotermia profonda fu realizzato a Larderello nel 1904 dal principe P. Ginori Conti
  - Motore alternativo collegato a una dinamo, per produrre energia elettrica

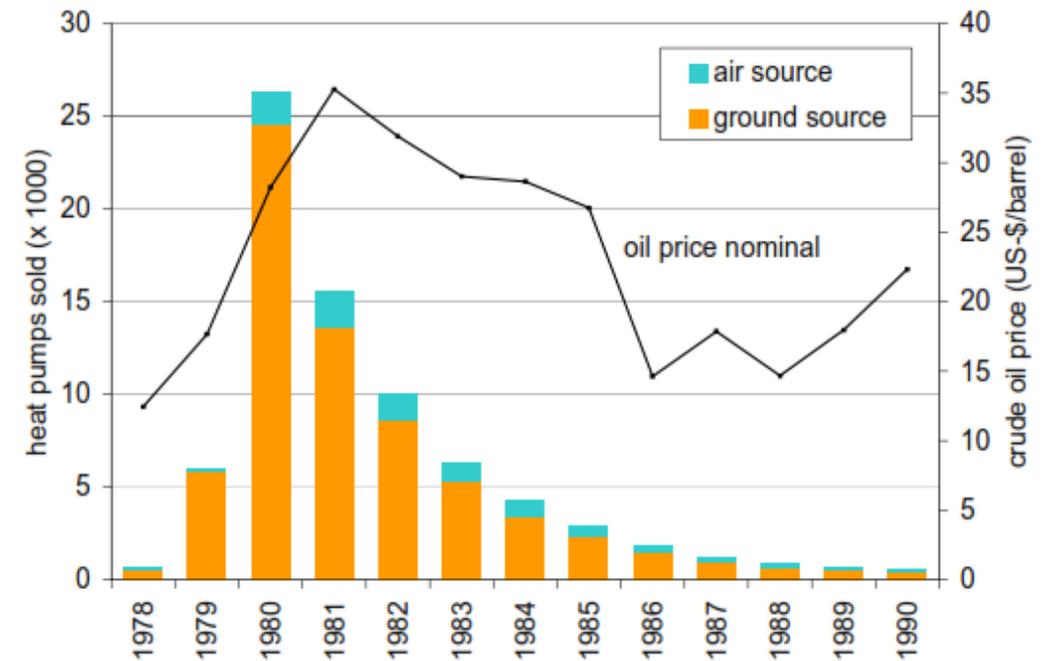


# Storia della geotermia (superficiale)

- Il primo «vero» impianto geotermico superficiale fu installato negli USA nel 1945, con tubi orizzontali nel terreno e pompa di calore a espansione diretta
- Lo sviluppo prese poi piede dopo la crisi petrolifera del 1973
  - Risultò più facile rimpiazzare il petrolio nel riscaldamento domestico che nei trasporti...



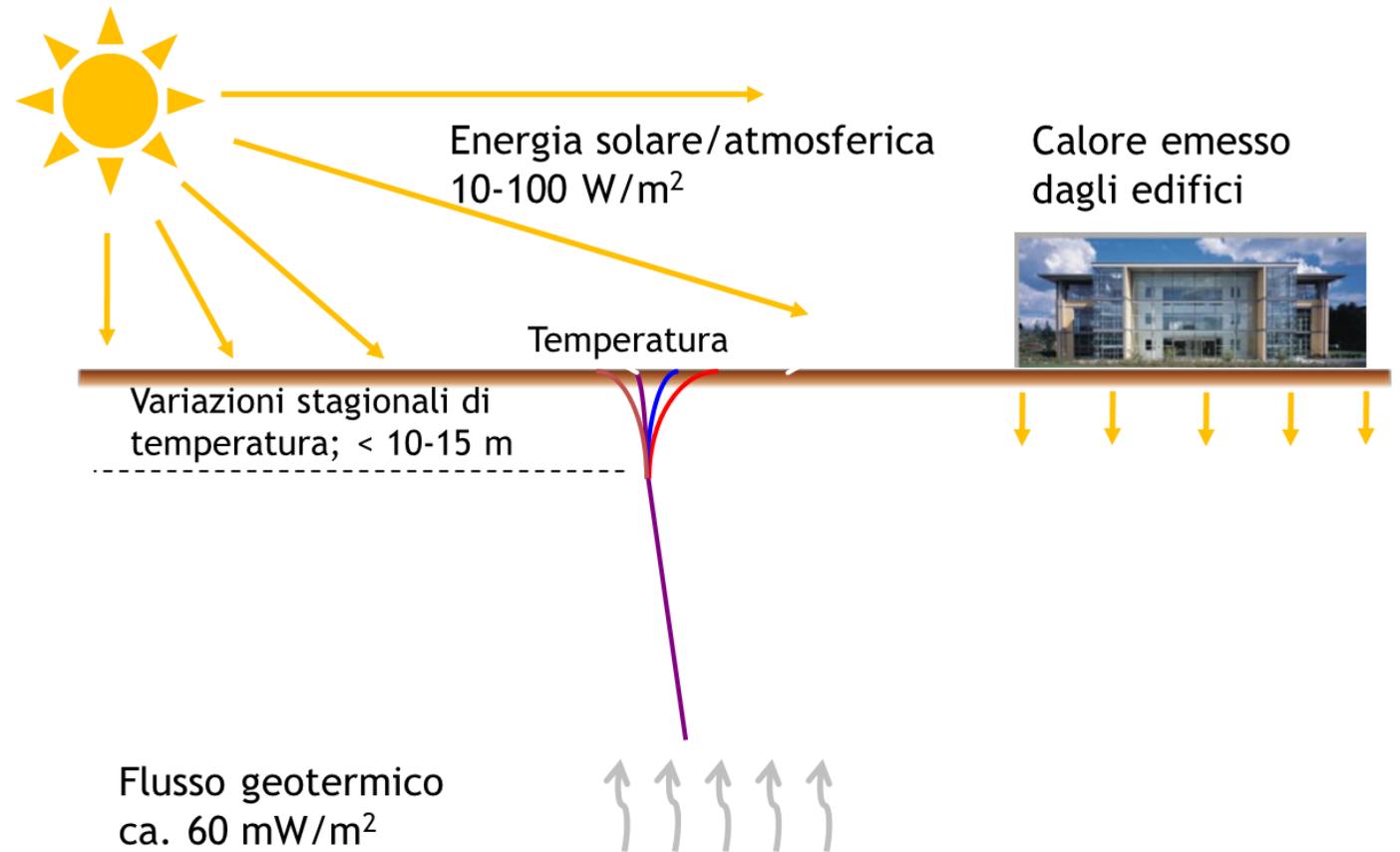
Prima “pompa di calore” geotermica installata a Indianapolis (1945)



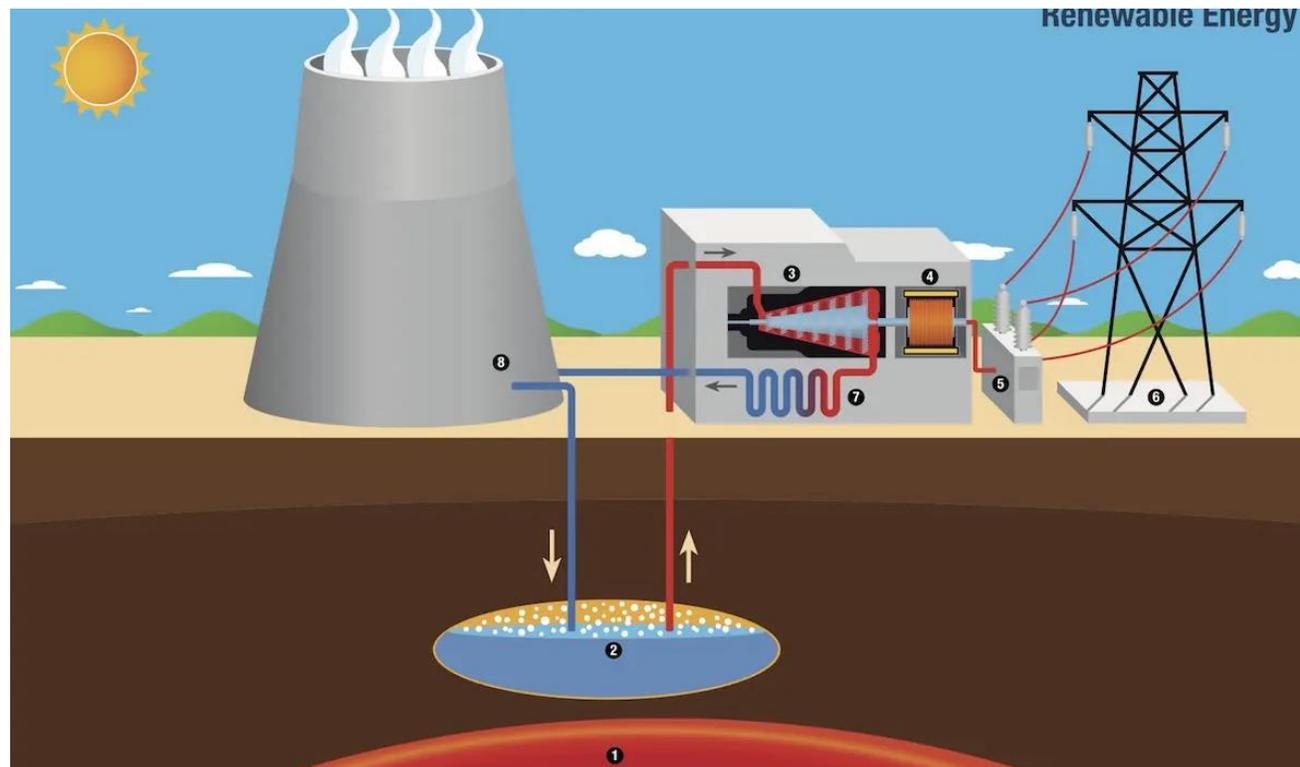
# Distinzione tra geotermia superficiale e profonda

**Geotermia superficiale** - rif. a energia di origine solare nella parte superficiale (o.d.g. centinaia di metri) della crosta

**Geotermia profonda** - rif. a energia di origine profonda (mantello, o.d.g. chilometri); impatto minimo in superficie



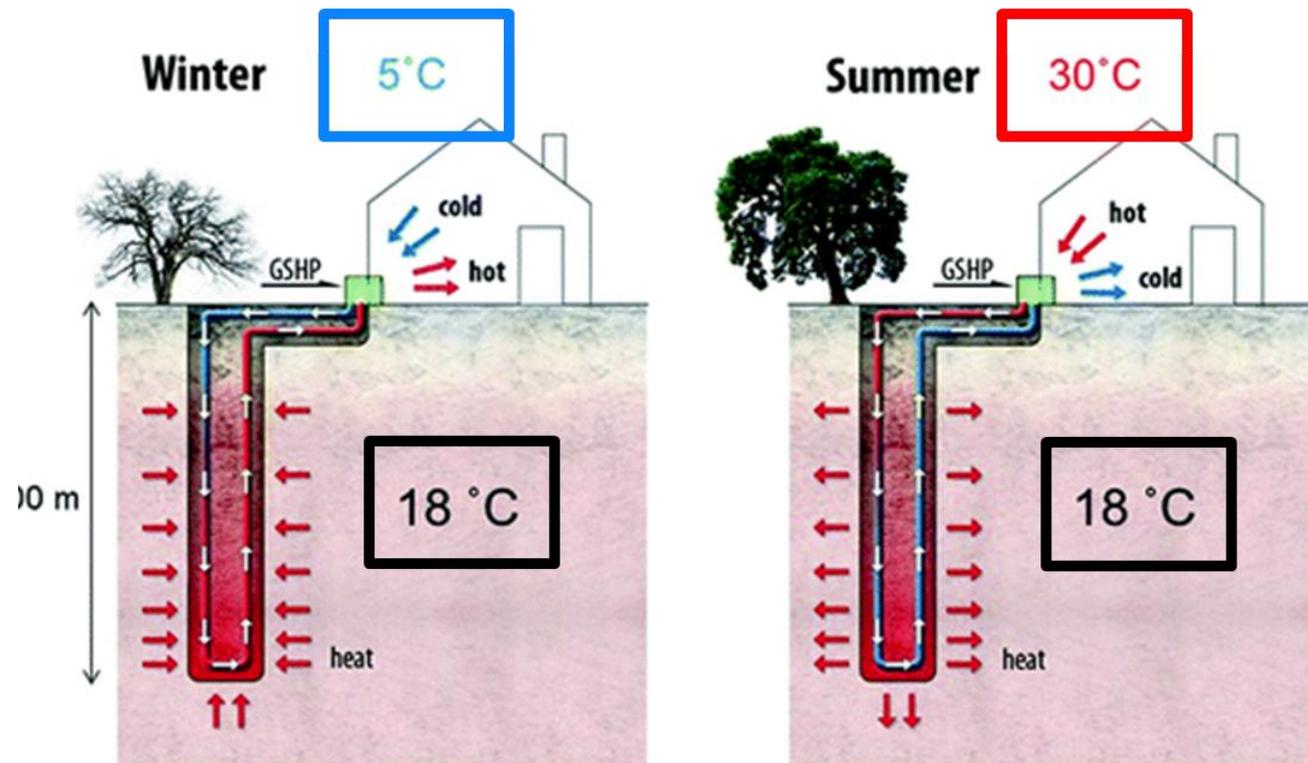
# Come funziona un impianto geotermico «profondo»?



Ingredienti:

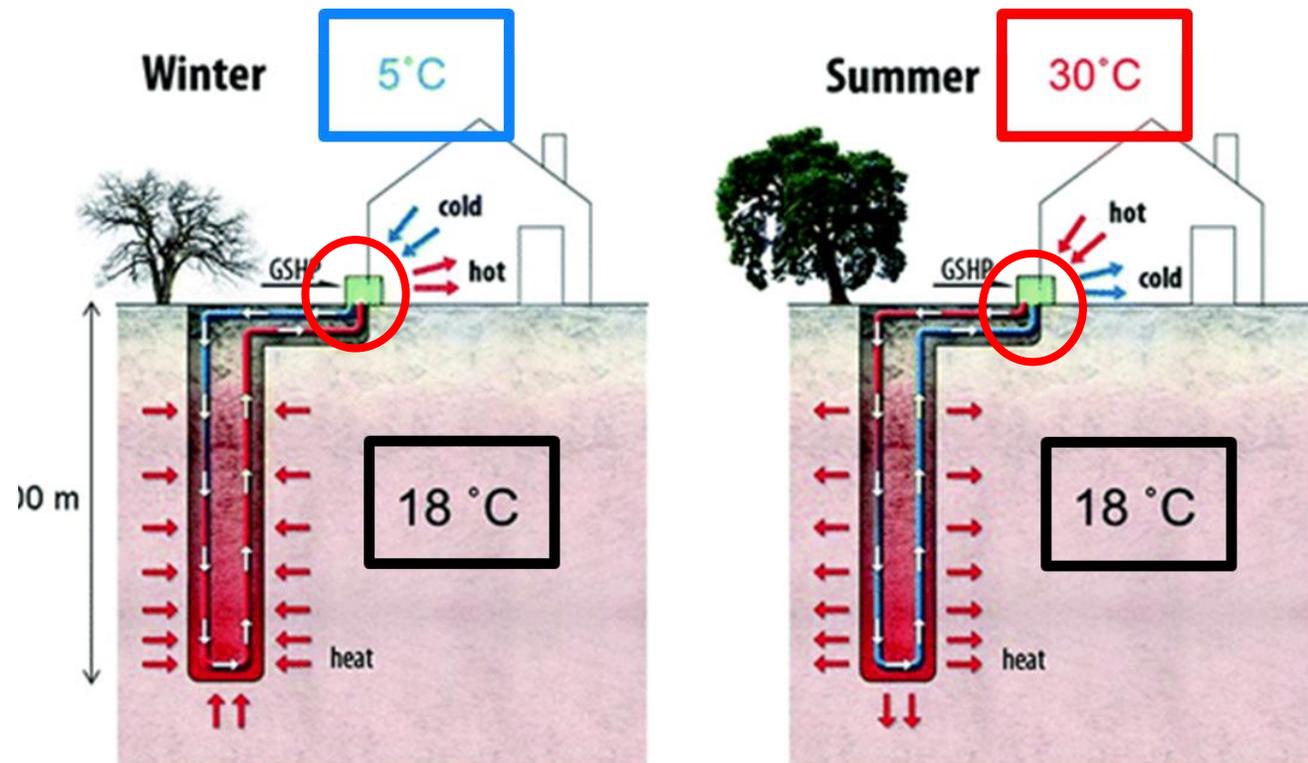
- Un giacimento geotermico
- Pozzi di estrazione/iniezione di acqua/vapore molto profondi (qualche km)
- Centrale elettrica

# Come funziona un impianto geotermico «superficiale»?



- T del terreno
  - $< T$  dell'aria in estate
  - $> T$  dell'aria in inverno
- Ingredienti
  - Terreno
  - Un foro poco profondo
  - Acqua (fluido termovettore)

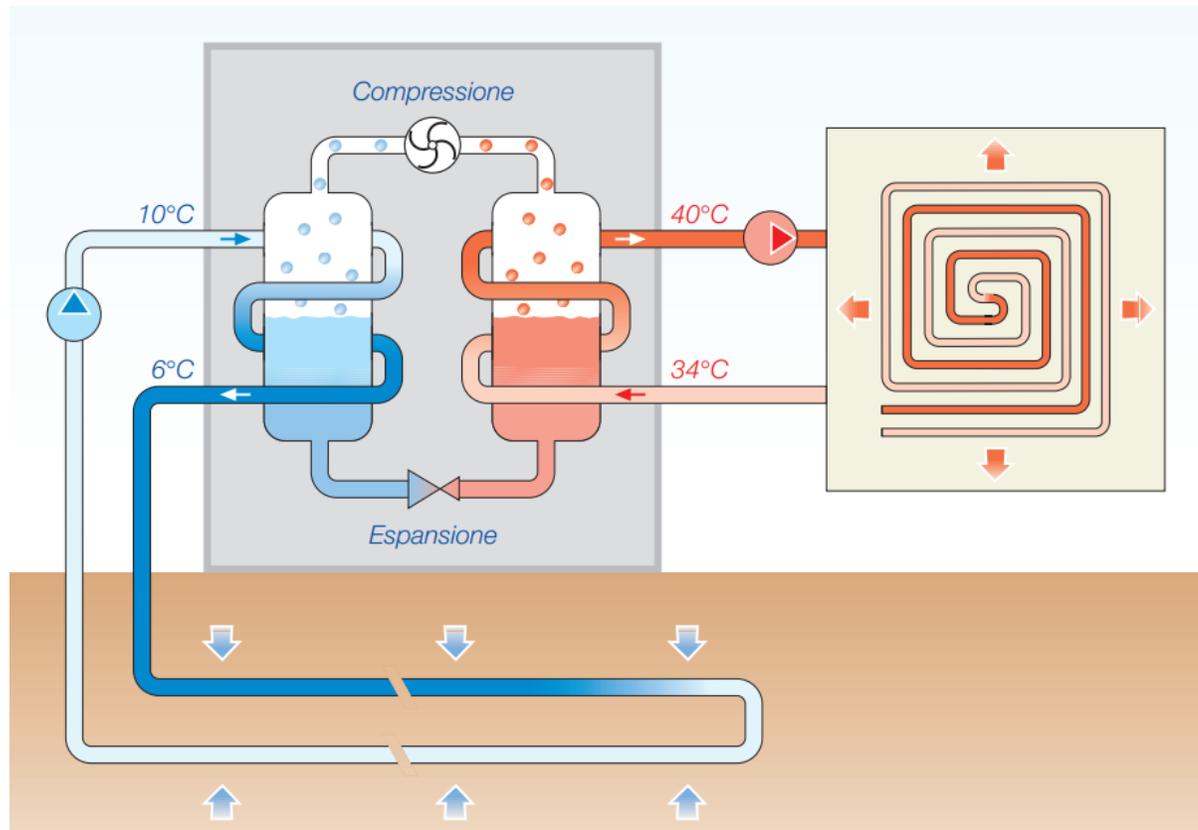
# Come funziona un impianto geotermico «superficiale»?



- T del terreno
  - $< T$  dell'aria in estate
  - $> T$  dell'aria in inverno
- Ingredienti
  - Terreno
  - Un foro poco profondo
  - Acqua (fluido termovettore)
  - **Una pompa di calore**

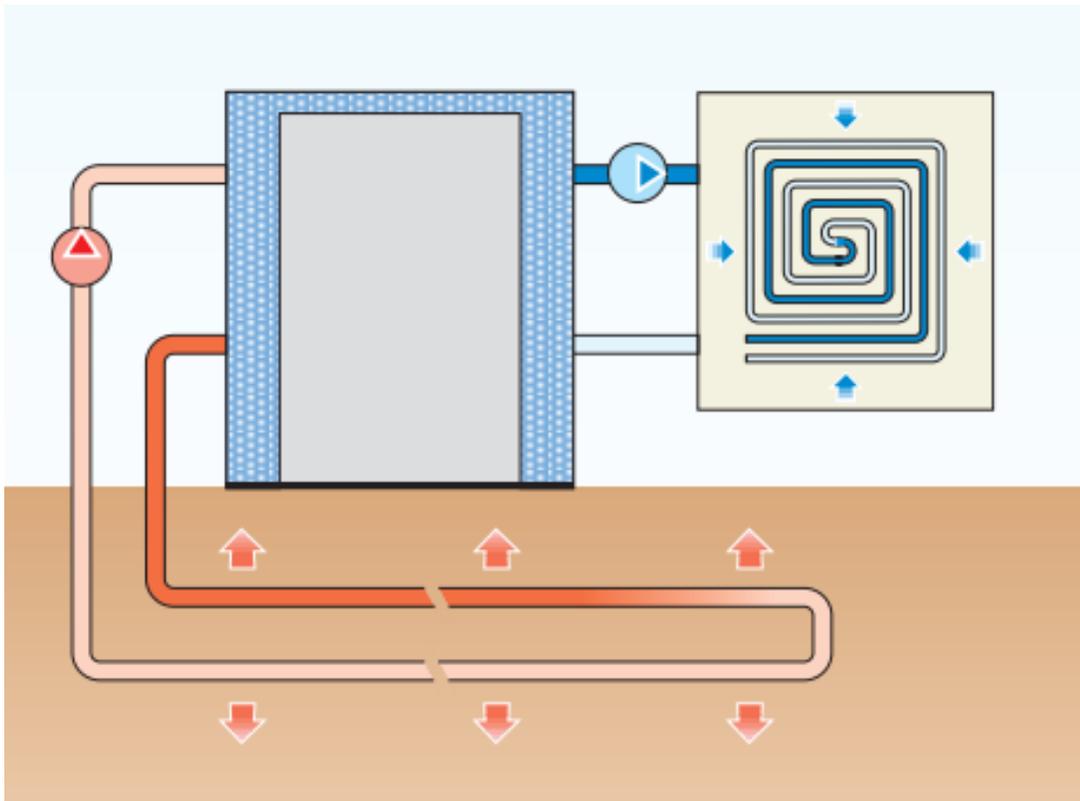
Cos'è una «pompa di calore»?

- Aumenta  $\Delta T$
- Input elettricità



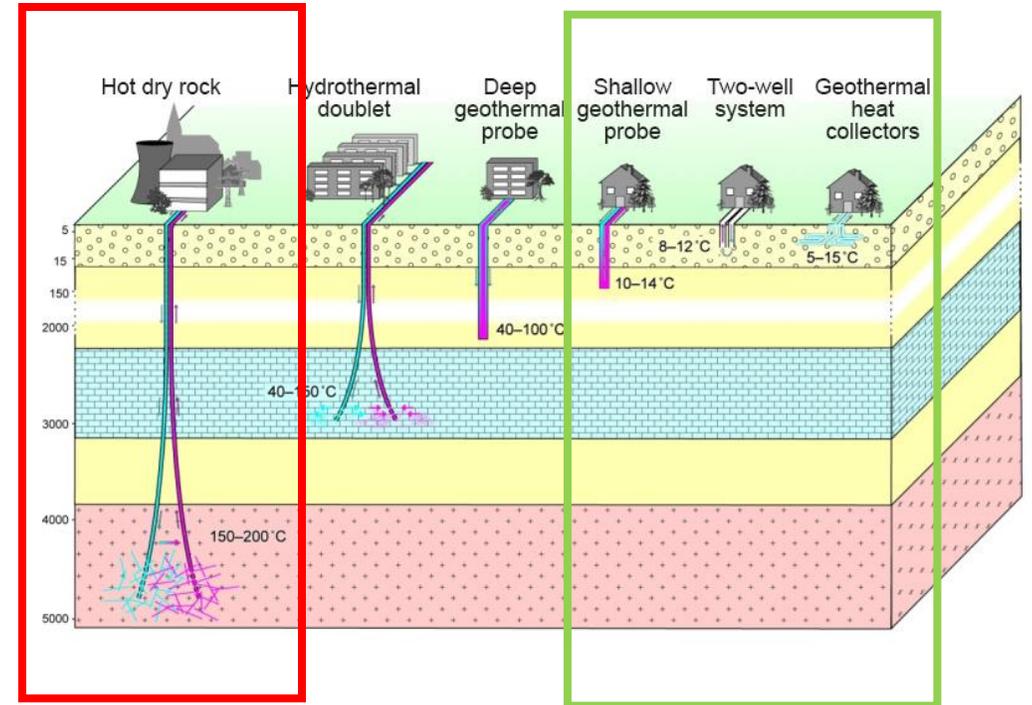
Cos'è una «pompa di calore»?

- Aumenta  $\Delta T$
- Input elettricità



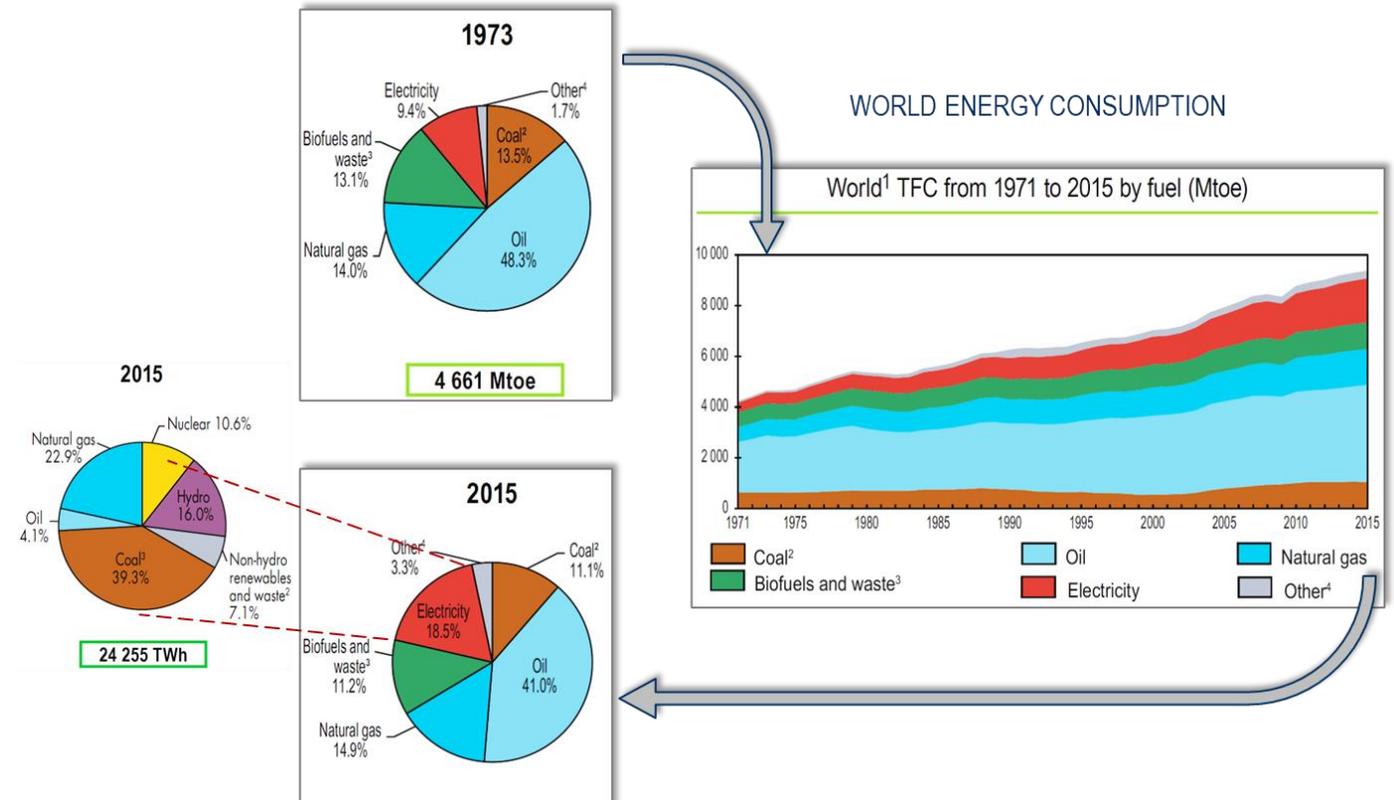
# Geotermia **profonda** VS superficiale

- **Produzione energia elettrica** VS  
Riscaldamento/raffrescamento edifici
- **Costi elevatissimi (centinaia di M€)** VS  
Costi bassi (10-20 k€)
- **Possibile solo in certe zone** VS  
Possibile ovunque
- **Elevato impatto ambientale (sismicità indotta, inquinamento falde, ecc.)** VS  
Bassissimo impatto ambientale



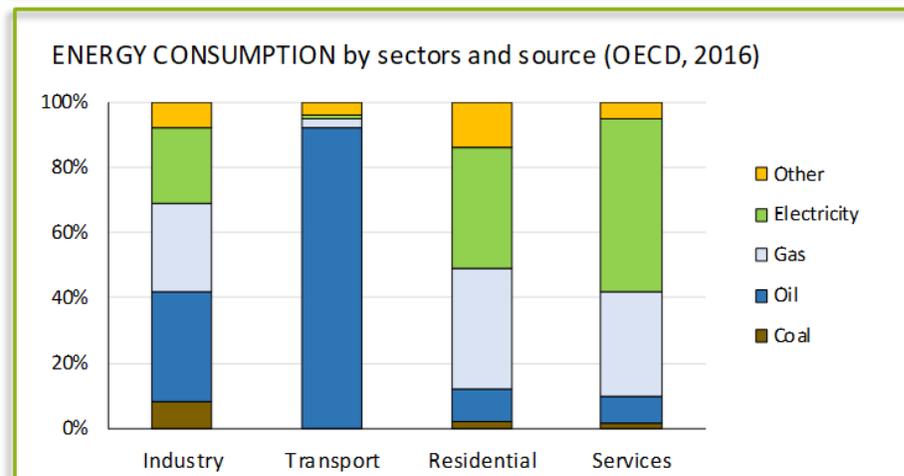
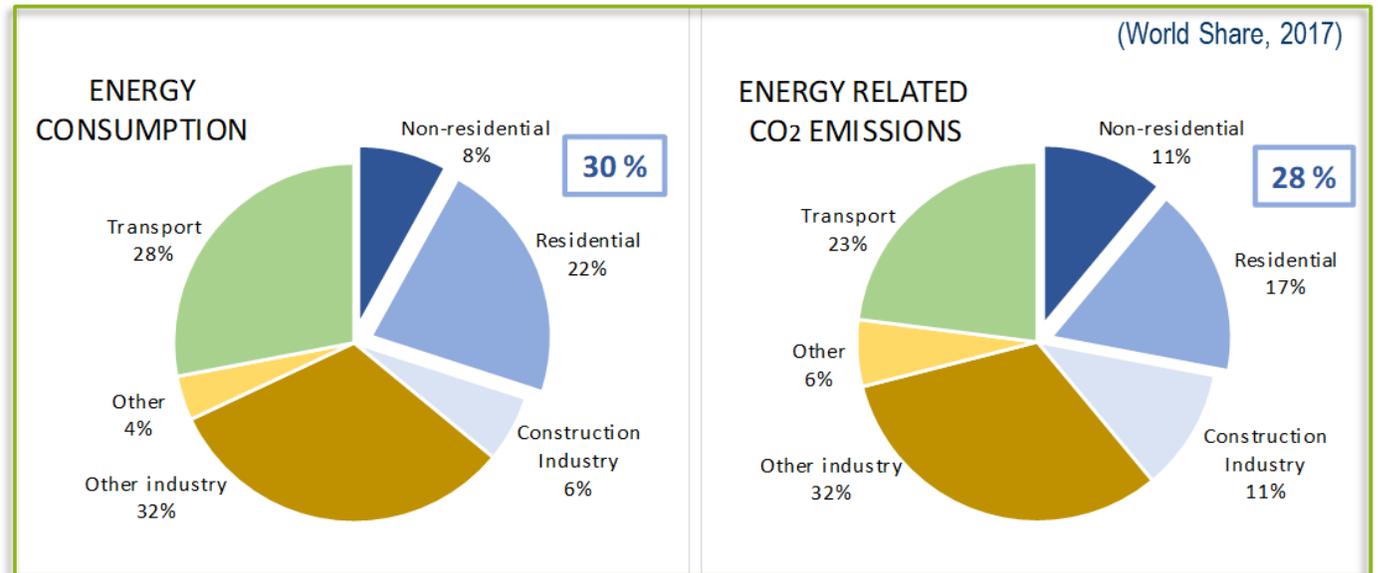
# Energia e sostenibilità: consumo energetico mondiale

- Il consumo di energia è raddoppiato in 40 anni
- Nel 2015 I combustibili fossili coprivano l'80% del totale



# Energia e sostenibilità: edifici civili

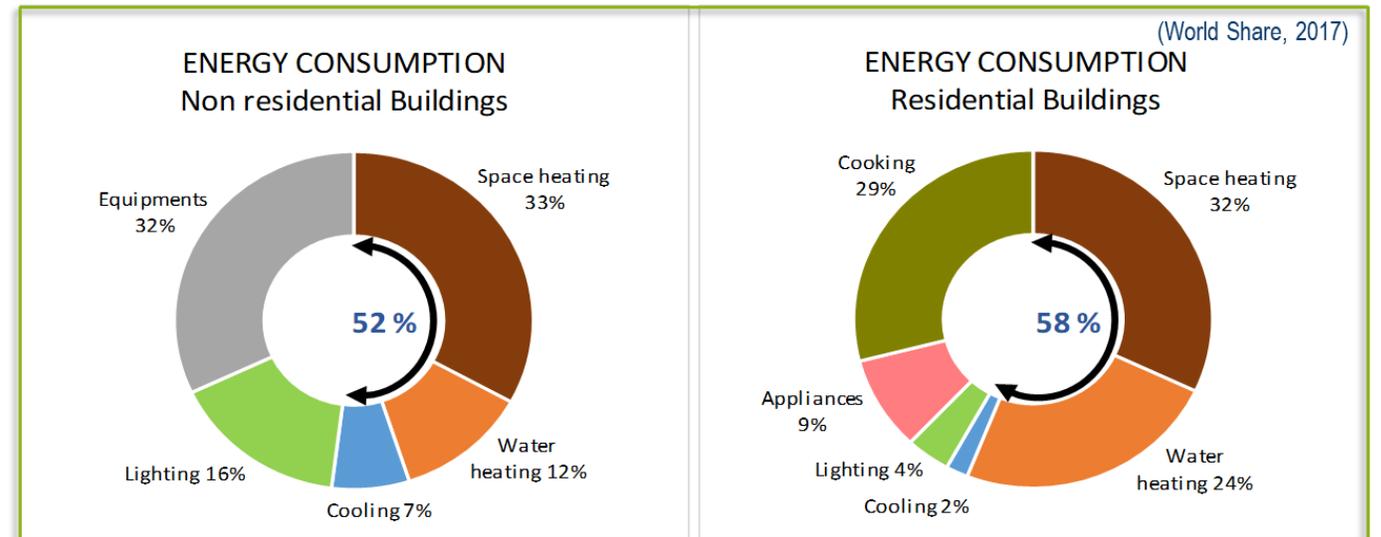
- Il 30% del consumo complessivo e delle emissioni di CO2 è dovuto agli edifici (residenziali e non)
- Una grossa porzione di tale consumo proviene da fonti fossili



# Energia e sostenibilità: climatizzazione edifici

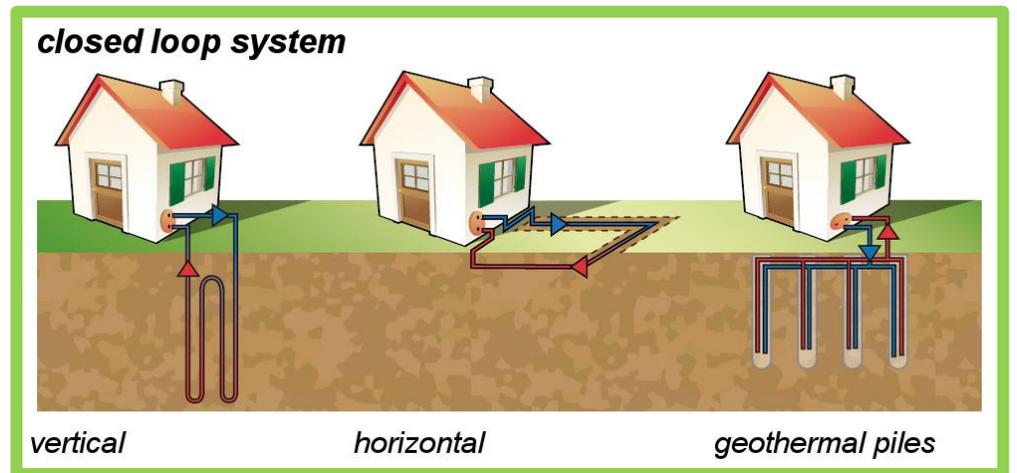
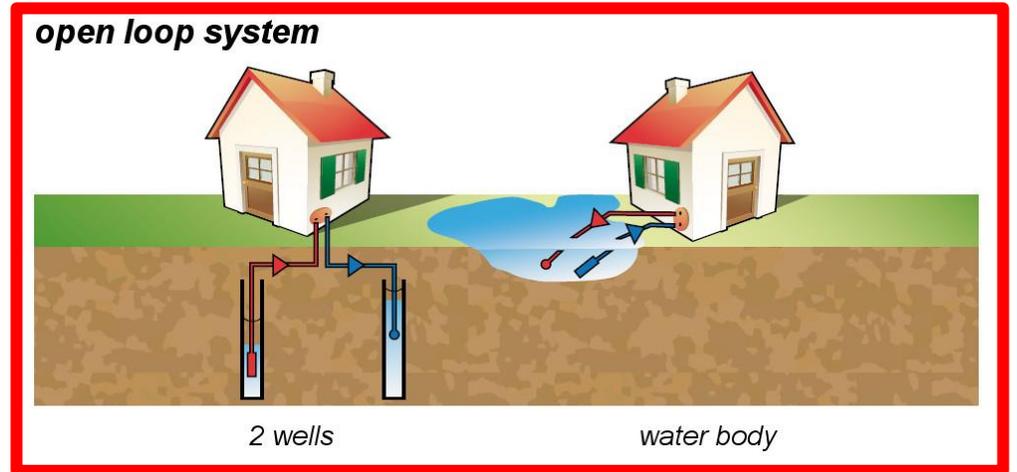
- Il 50-60% del consumo degli edifici è per climatizzazione e acqua calda sanitaria
- Direttive UE:
  - Aumento fonti rinnovabili
  - Riduzione emissioni gas serra
  - Misure a lungo termine

-> Il settore della climatizzazione di edifici ha un ruolo chiave per la transizione energetica, ora e nel prossimo futuro



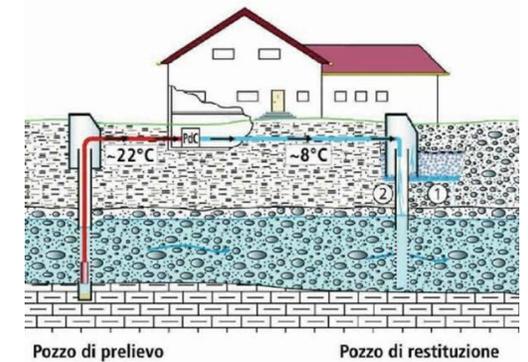
# Geotermia superficiale a circuito aperto VS chiuso

- Uso di pompa di calore
- Estrazione di acqua tramite pozzi (uso diretto per lo scambio di calore) VS Sistema di tubi «ad U» sepolti nel sottosuolo
- Installabili solo in presenza di acquiferi adeguati VS Installabili ovunque



# Sistemi geotermici superficiali tradizionali

- A circuito aperto
  - Primo impiego 1950, Svizzera
- A circuito chiuso
  - Primo impiego 1945, USA
    - A sviluppo orizzontale
    - A sviluppo verticale
- Molto diffusi in alcuni paesi
  - Svezia: 350mila installati, 96% dei nuovi impianti
  - Turchia: 70% dei nuovi impianti
  - Italia: solo 30mila installati



OK, ma...dove sta l'innovazione?



# Le “geostrutture energetiche”

## 1. Geostruttura



Civiltoday.com



nscme.com

## 2. Tubi ad U (+pompa di calore)



Laloui & Rotta Loria (2020)

## Geostruttura energetica



Carotenuto et al. 2017

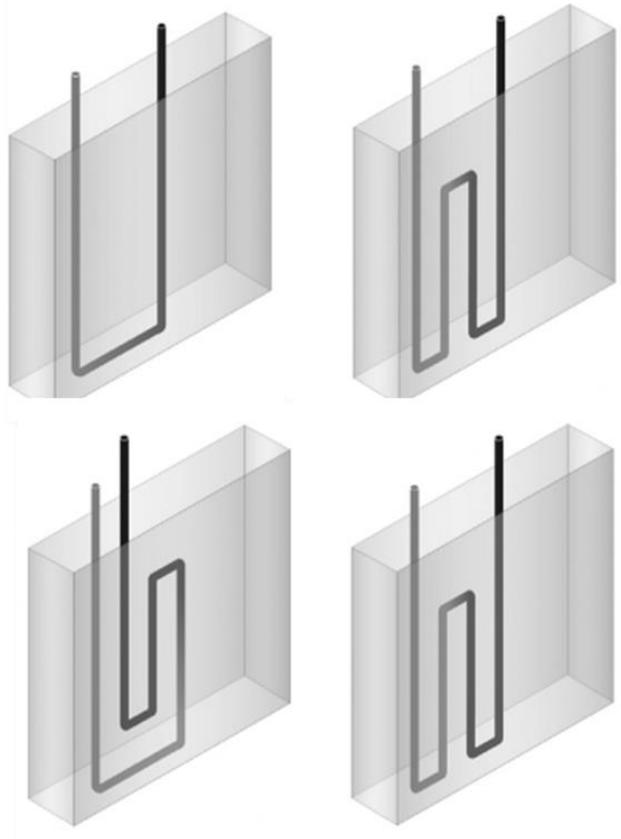


Sterpi et al. (2014)

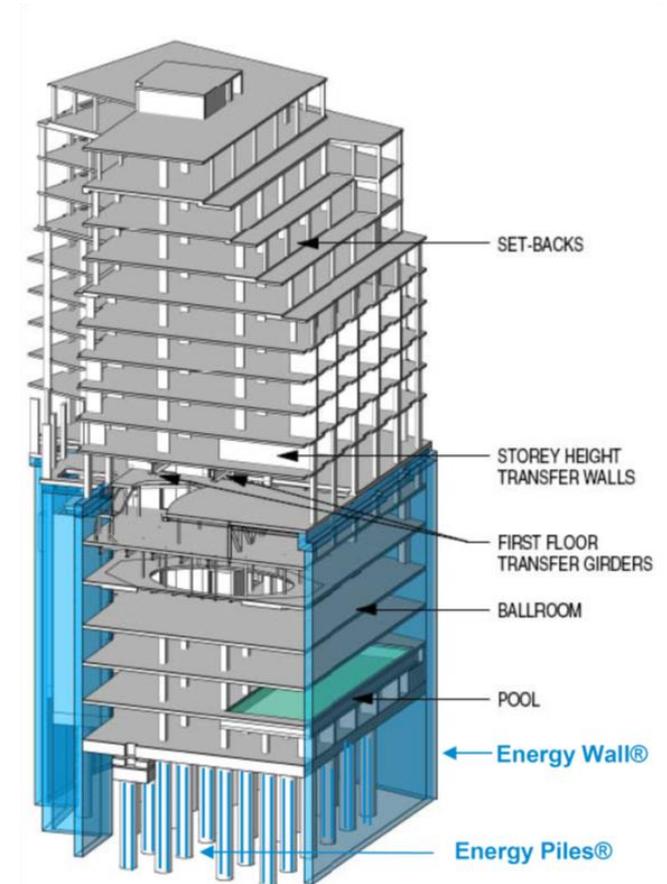
# Pali energetici



# Opere di sostegno energetiche

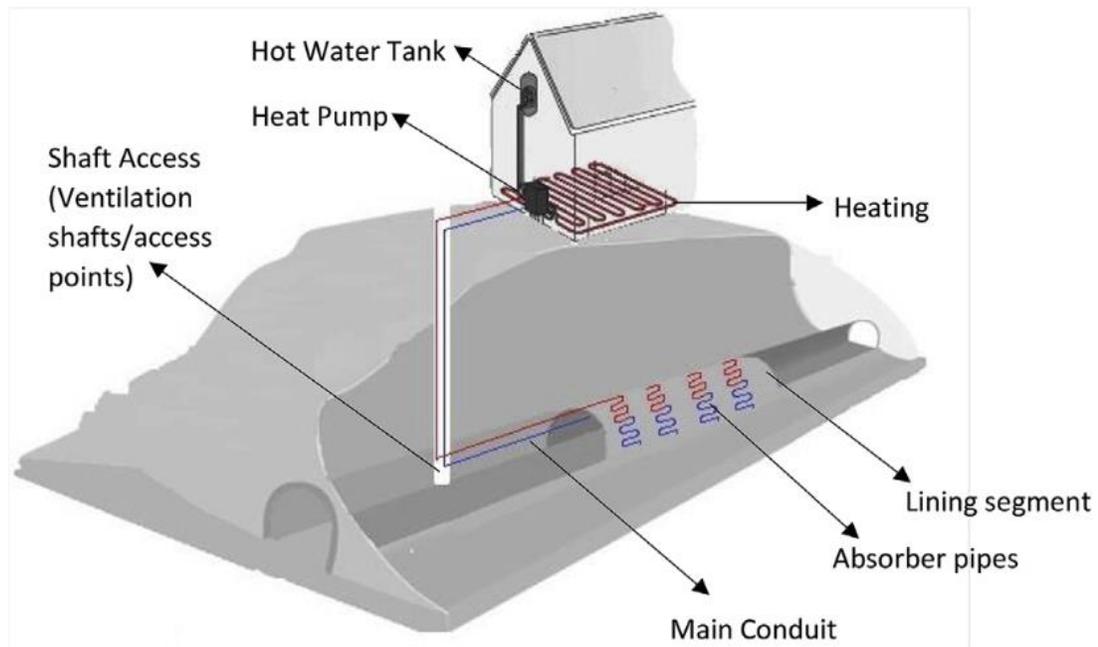


*Sterpi et al. (2014, 2018)*

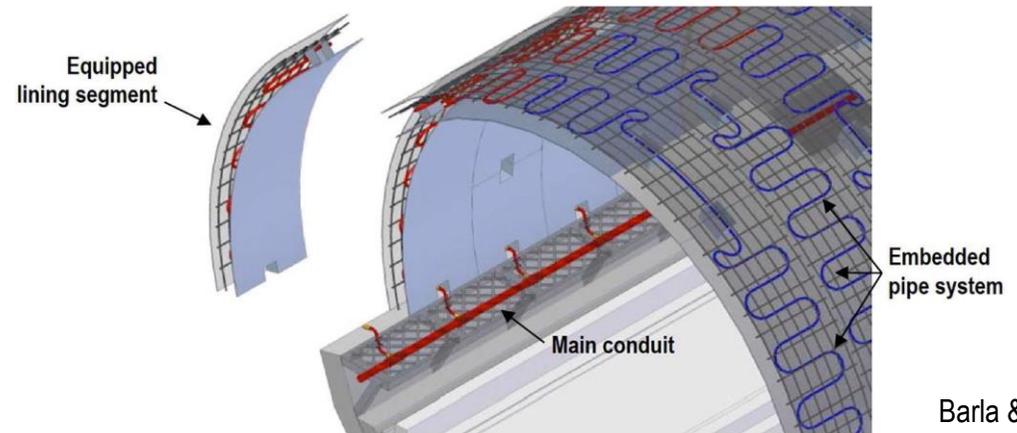


*Geothermal Int. Ltd/Cementation Skanska*

# Gallerie energetiche



Ogunleye et al. 2020



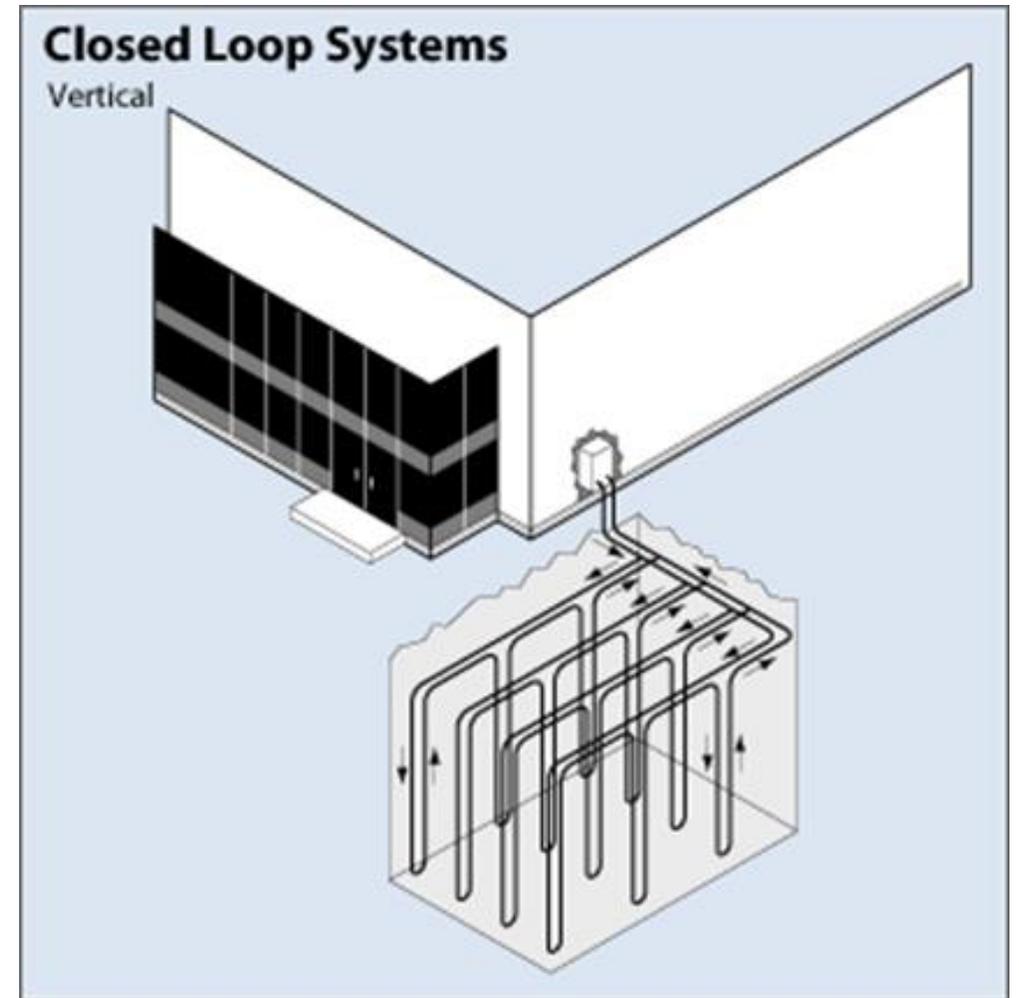
Barla & Di Donna (2018)



Laloui & Rotta Loria (2020)

# VANTAGGI DEI SISTEMI GEOTERMICI tradizionali

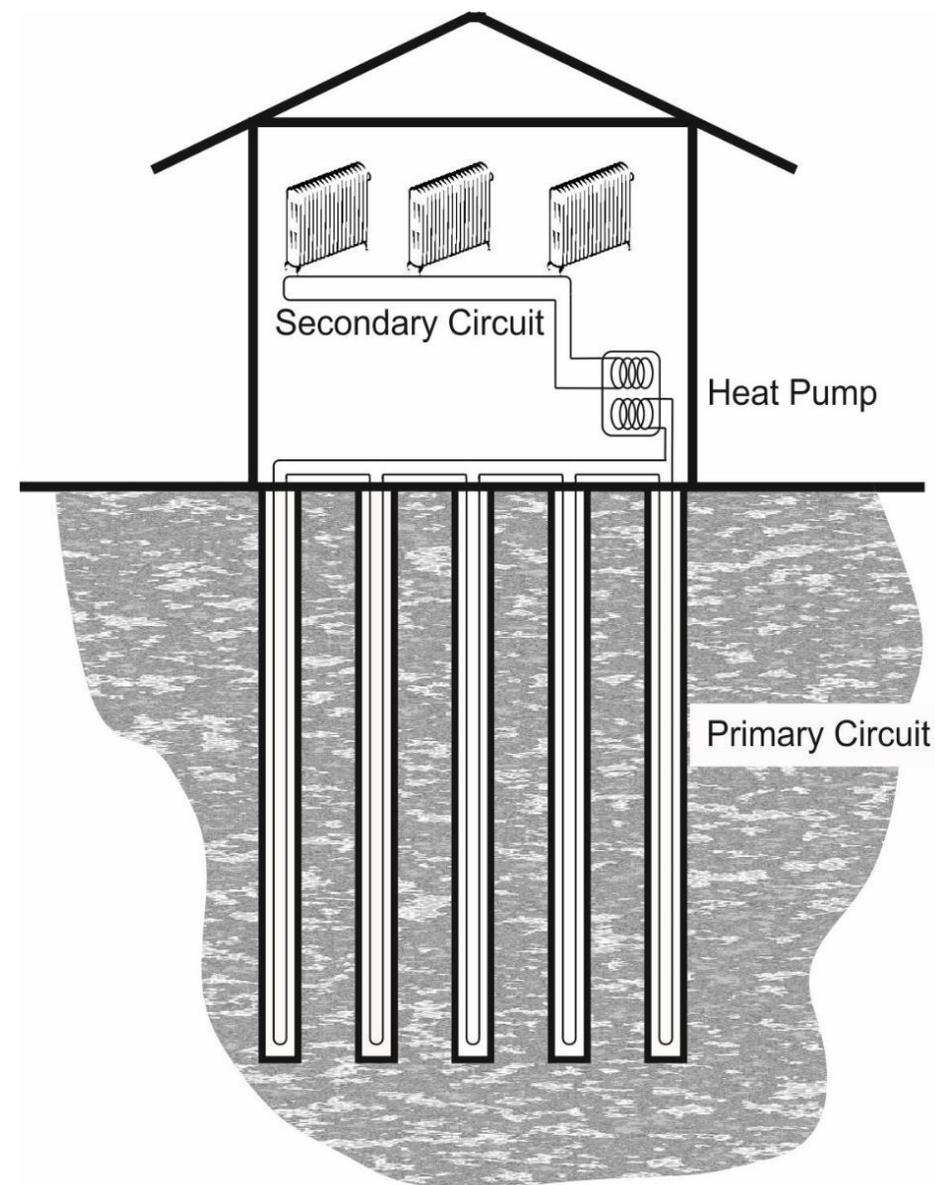
- Bassi costi d'esercizio
  - possibilità di incentivi
- Spazi occupati ridotti
- Manutenzione limitata
- Basso consumo energetico
- Emissioni di CO2 ridotte
- **Ma: maggiori costi iniziali rispetto ad altri tipi di impianti**
  - Costi elevati di installazione
  - Periodi di ammortamento lunghi



[californiageo.org](http://californiageo.org)

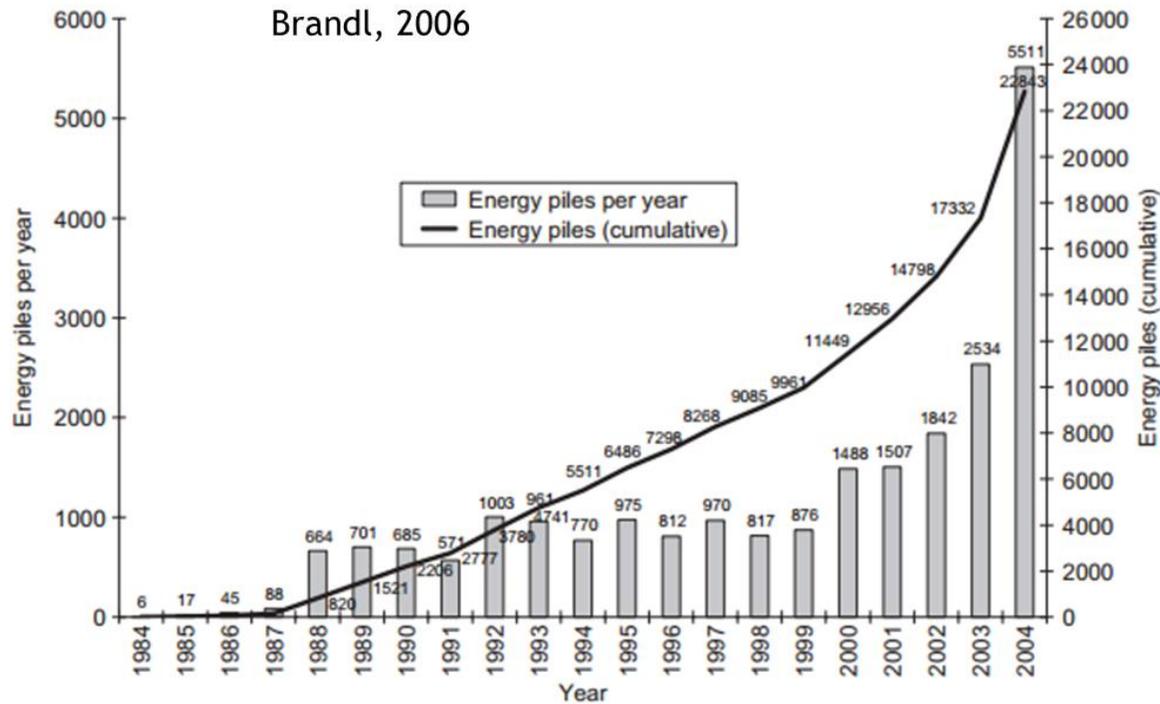
# VANTAGGI DEI SISTEMI GEOTERMICI **innovativi**

- Bassi costi d'esercizio
  - possibilità di incentivi
- Spazi occupati ridotti
- Manutenzione limitata
- Basso consumo energetico
- Emissioni di CO2 ridotte
- Ma: ~~maggiori costi iniziali rispetto ad altri tipi di impianti~~
  - Periodi di ammortamento lunghi
  - Costi elevati di installazione
  - **> RISPARMIO (economico e di spazio) installando gli scambiatori all'interno di strutture di fondazione**
  - **> Maggiori dimensioni -> Maggiore capacità termica attesa**

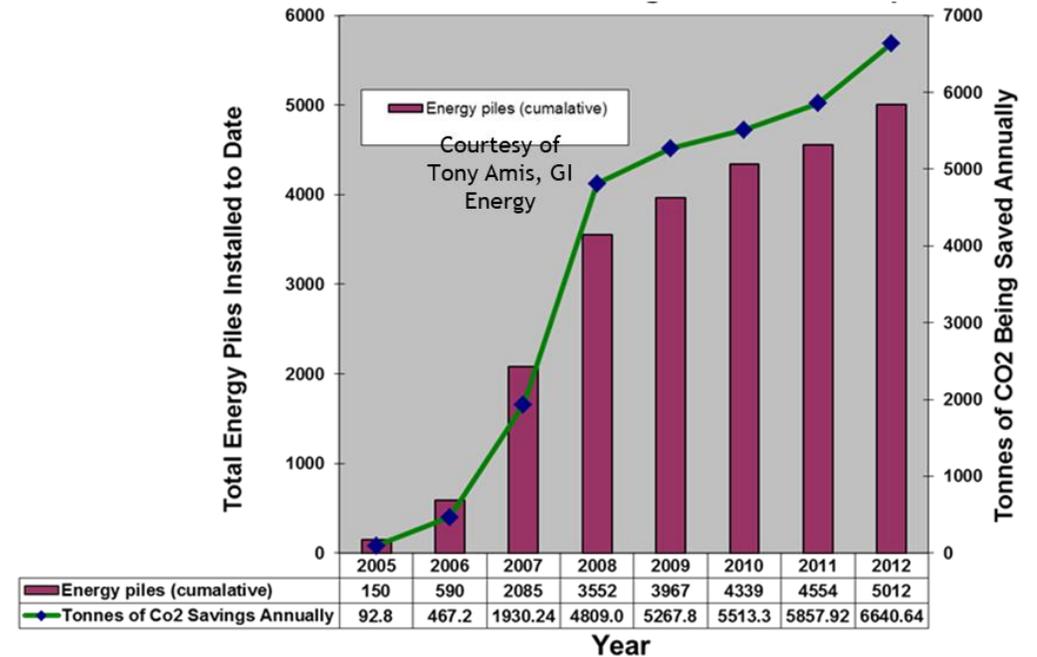


# Prime installazioni di pali energetici

In Austria, dal 1984



In UK, dal 2005

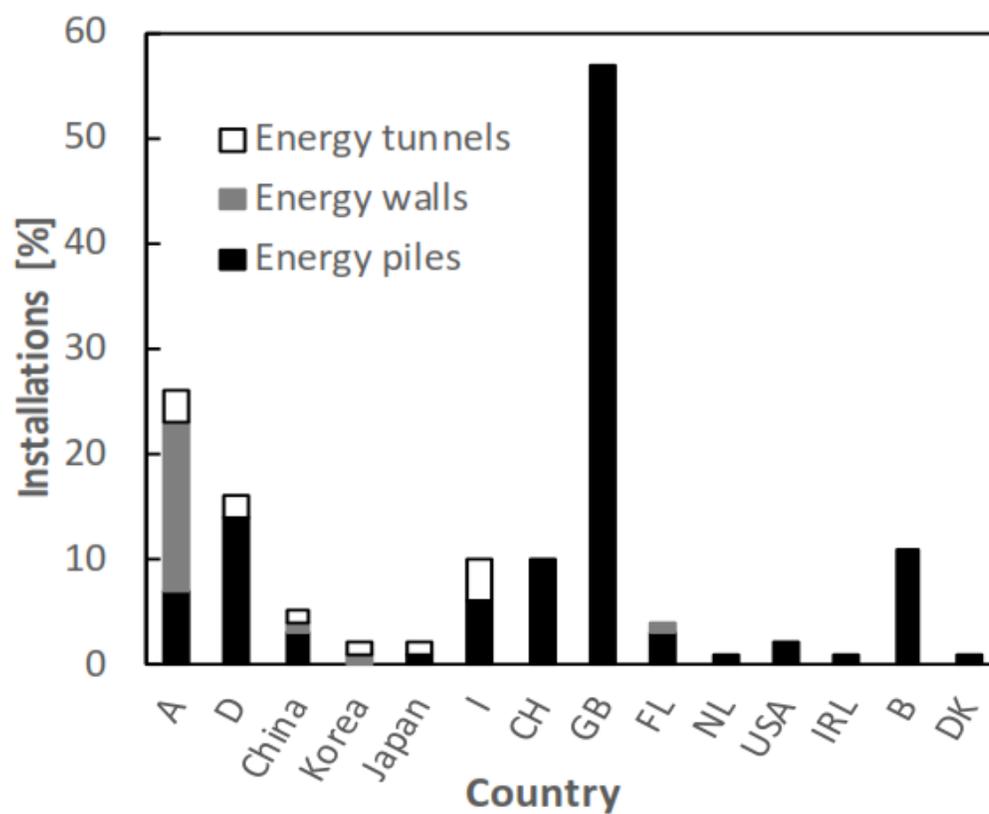
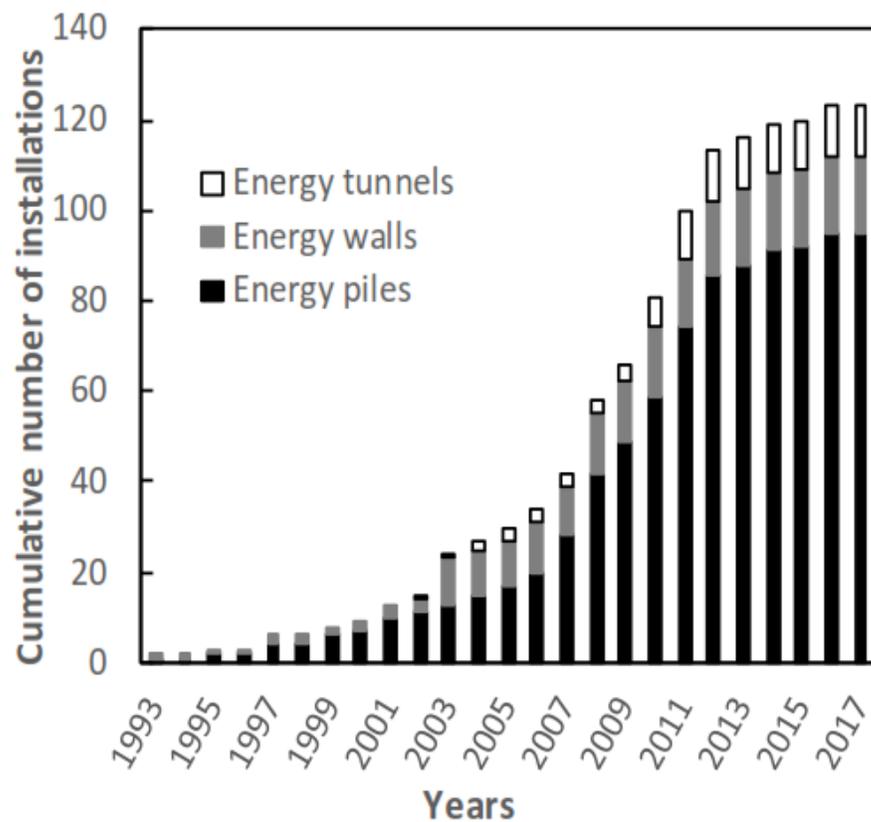


# Installazioni/ricerca in Italia

- Installazioni di pali energetici
  - ≈1000 pali? (mancano dati ufficiali)
- Ricerca su pali energetici
  - Cecinato, F., & Loveridge, F. A. (2015). Influences on the thermal efficiency of energy piles. *Energy*
  - Salciarini, D., Ronchi, F., Cattoni, E., & Tamagnini, C. (2015). Thermomechanical effects induced by energy piles operation in a small piled raft. *International Journal of Geomechanics*
  - Loveridge, F. A., & Cecinato, F. (2016). Thermal performance of thermoactive continuous flight auger piles. *Environmental Geotechnics*
  - Ronchi, F., Salciarini, D., Cavalagli, N., & Tamagnini, C. (2018). Thermal response prediction of a prototype Energy Micro-Pile. *Geomechanics for Energy and the Environment*
  - Adinolfi, M., Maiorano, R. M. S., Mauro, A., Massarotti, N., & Aversa, S. (2018). On the influence of thermal cycles on the yearly performance of an energy pile. *Geomechanics for Energy and the Environment*
  - Cecinato, F., & Salciarini, D. (2021). Energy performance assessment of thermo-active micro-piles via numerical modeling and statistical analysis. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 100268.



# Installazioni/ricerca nel mondo

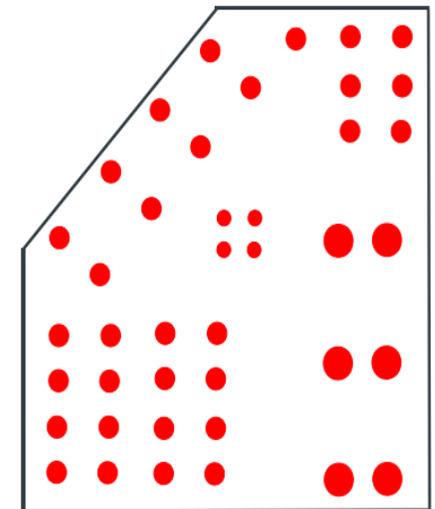
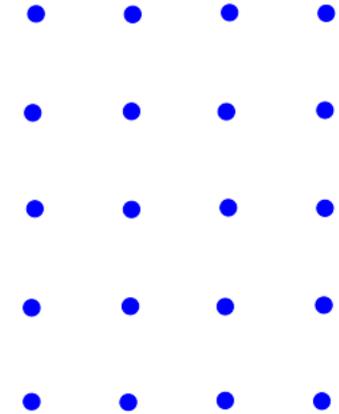
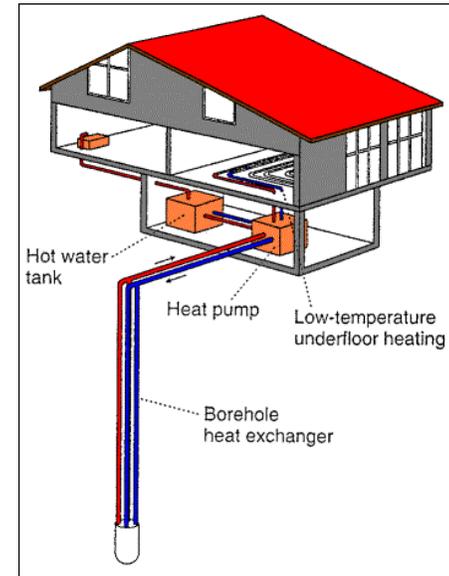


*Di Donna, Barla & Amis (2017)*

# Perchè studiare le geostrutture energetiche?

**Progettazione "termica": verificare la capacità di scambiare il calore necessario al fabbisogno dell'edificio**

- Sonde geotermiche tradizionali:
  - Srtette (diam. 10 cm) e lunghe (L=200 m)
  - Esistono soluzioni semplificate (hp. sorgente lineare e infinita)
- Pali energetici:
  - Geometria e layout vincolati da progetto strutturale
  - Larghi (diam. 1m) e corti (L=20 m)
  - Importanza del regime transitorio
  - Le soluzioni semplificate sono inadeguate



# Perchè studiare le geostrutture energetiche?

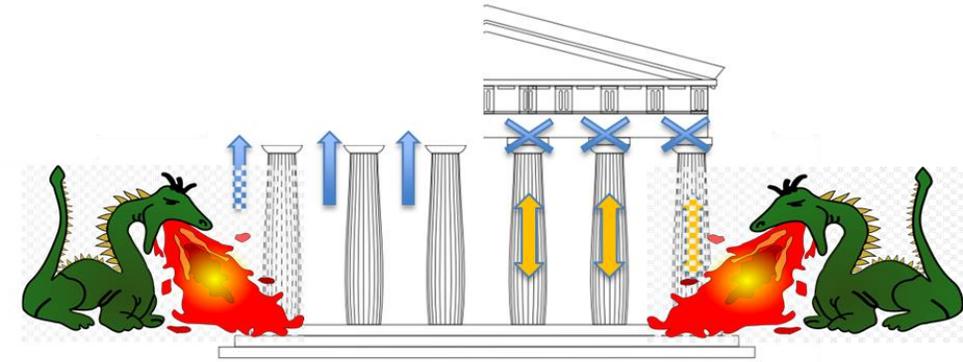
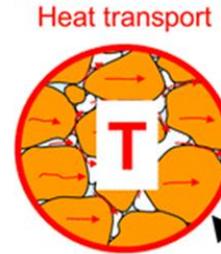
Progettazione  
“strutturale/geotecnica”:

verificare

1) la sicurezza e 2) la funzionalità  
del complesso struttura/terreno

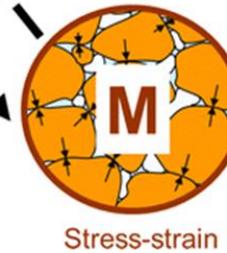
- Effetti termo-meccanici

Variazioni di  
temperatura

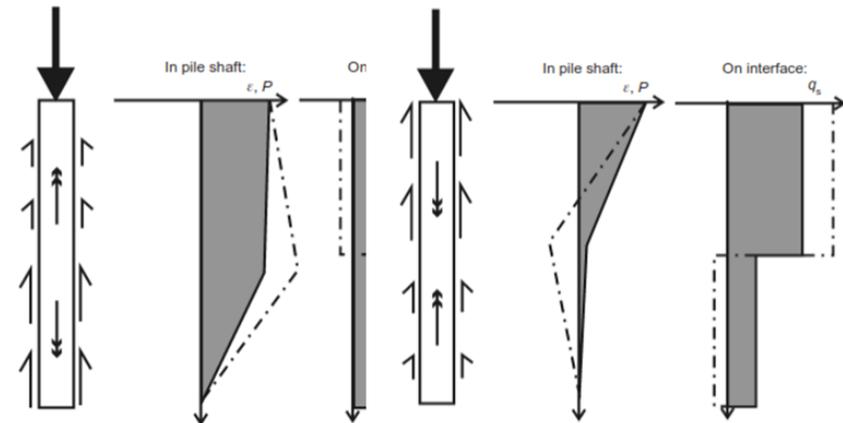


Thermal  
conductivity

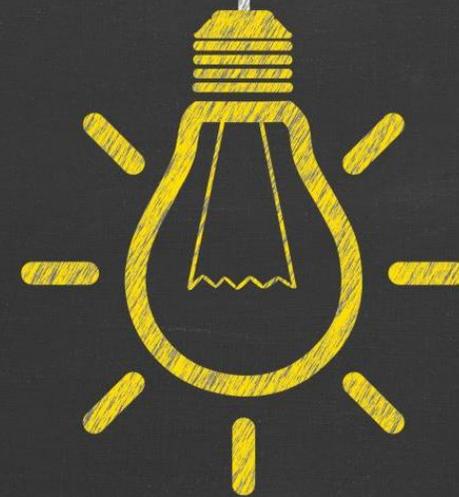
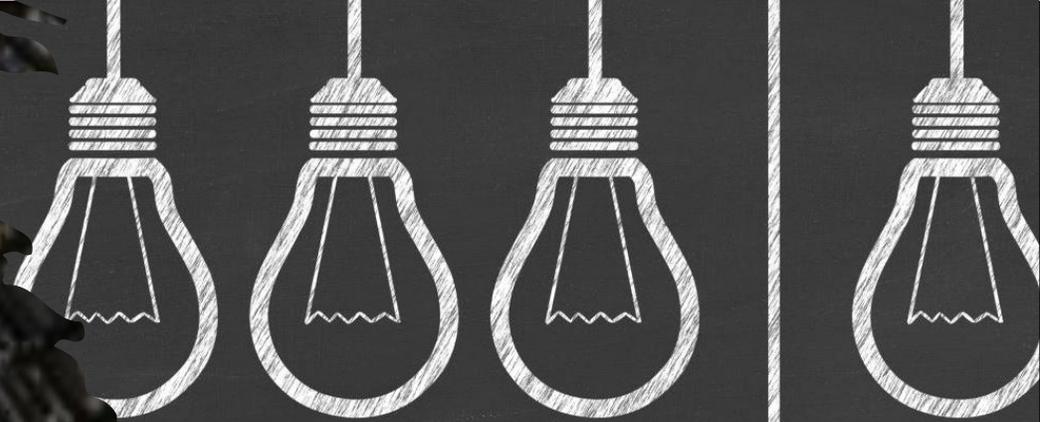
Thermal strains



Variazioni di sforzo  
e/o deformazione

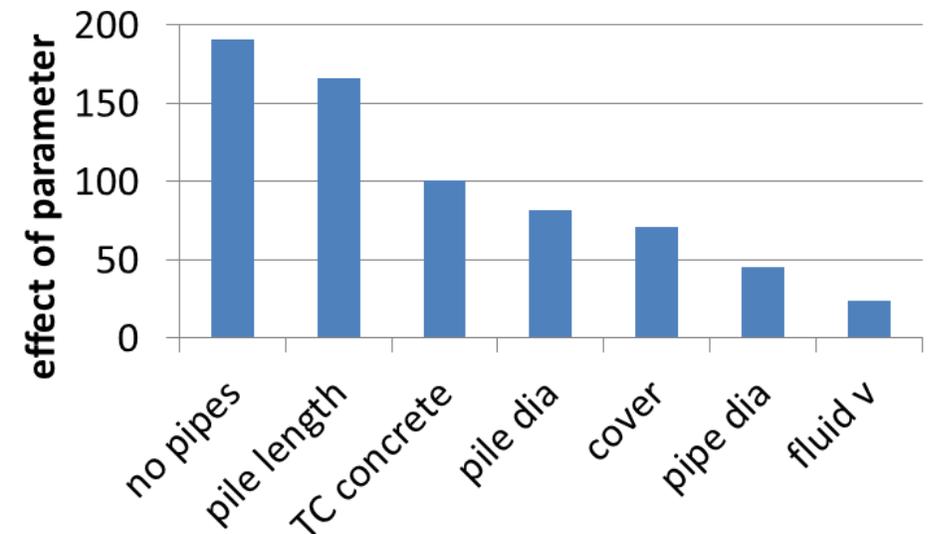
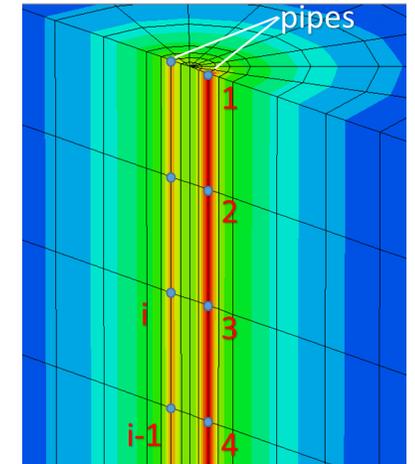


Recenti temi di  
ricerca applicata



# Efficienza termica di pali energetici «trivellati»

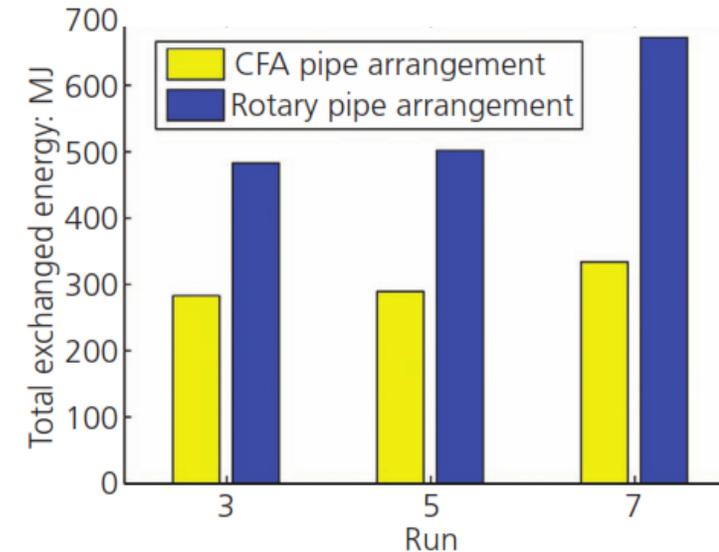
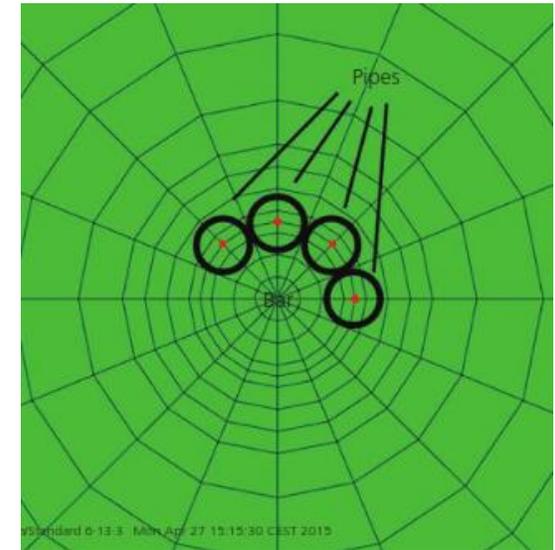
- Classifica dei parametri che massimizzano l'efficienza
  1. Numero dei tubi: da massimizzare, compatibilmente con (a) il diametro del palo e (b) le possibili interazioni (aumento  $E$  con  $n$  tubi non lineare)
  2. Lunghezza palo: non modificabile in base a progetto termico
  3. Conducibilità calcestruzzo: modificabile in qualche caso (additivi o scelta aggr.)



(Cecinato et al. 2015)

# Confronto con pali «ad elica»

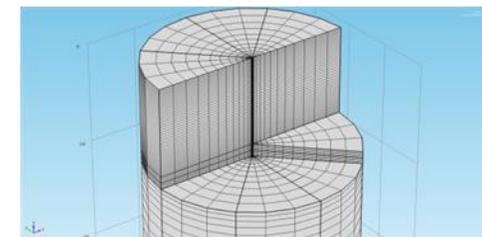
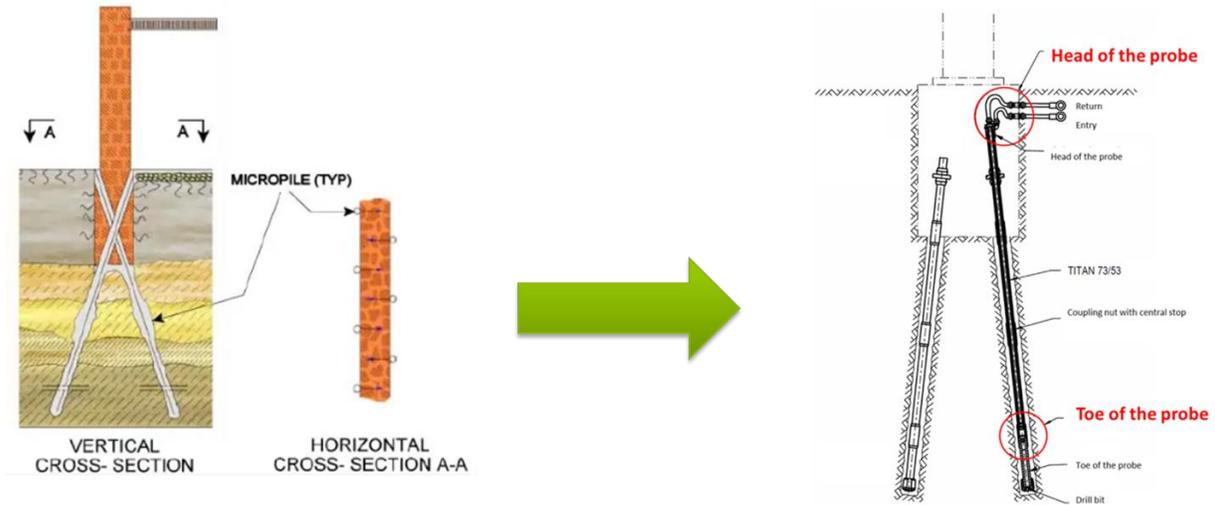
- Palo ad elica continua meno efficiente, a parità di n. di tubi e di altre condizioni
- Numero dei tubi: da massimizzare, compatibilmente con (a) il diametro del palo e (b) le possibili interazioni (aumento E con n. tubi non lineare)
- La disposizione asimmetrica dei tubi peggiora l'efficienza energetica -> consigliabile uso di distanziatori
- La presenza della barra centrale non influenza le prestazioni termiche



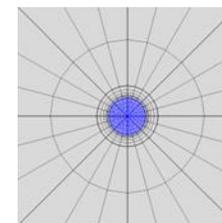
(Loveridge & Cecinato 2016)

# Confronto con «micropali»

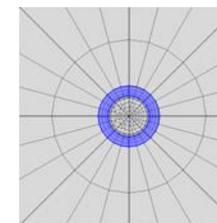
- Valutazione dei fattori più importanti per le prestazioni energetiche
  - Lunghezza palo
  - Conducibilità calcestruzzo
  - Diametro tubi scambiatori
- La progettazione termica dei MPE non deve basarsi sugli stessi criteri usati per i pali energetici a diametro standard



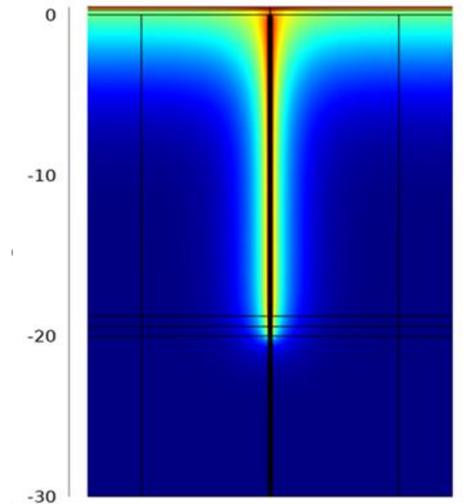
3D view



Internal concrete ring



External concrete ring



T contours for run 3 after 180 days' heat injection

(Cecinato & Salciarini 2021)

# Efficienza termica di diaframmi energetici

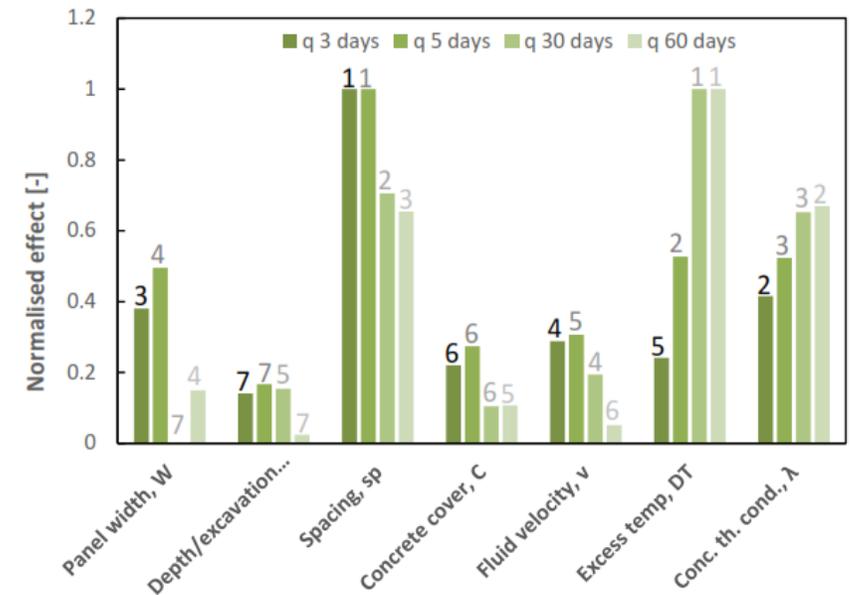
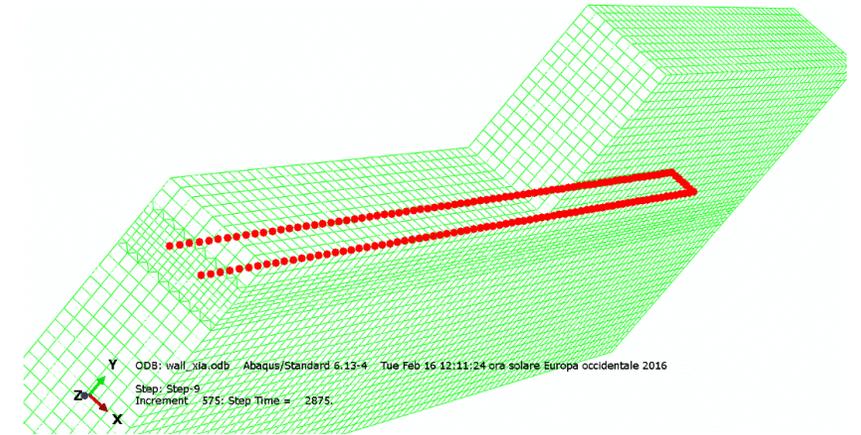
- Classifica dei parametri che massimizzano l'efficienza

1) Breve termine: spaziatura dei tubi s  
-> massimizzare il n. di tubi

1) Lungo termine: differenza  $DT=T_{air}-T_{soil}$   
-> scavi "caldi" come tunnel di metro sono adatti per estrazione di calore, non per iniezione

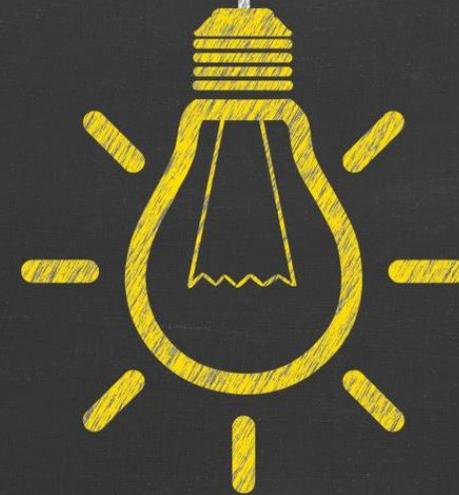
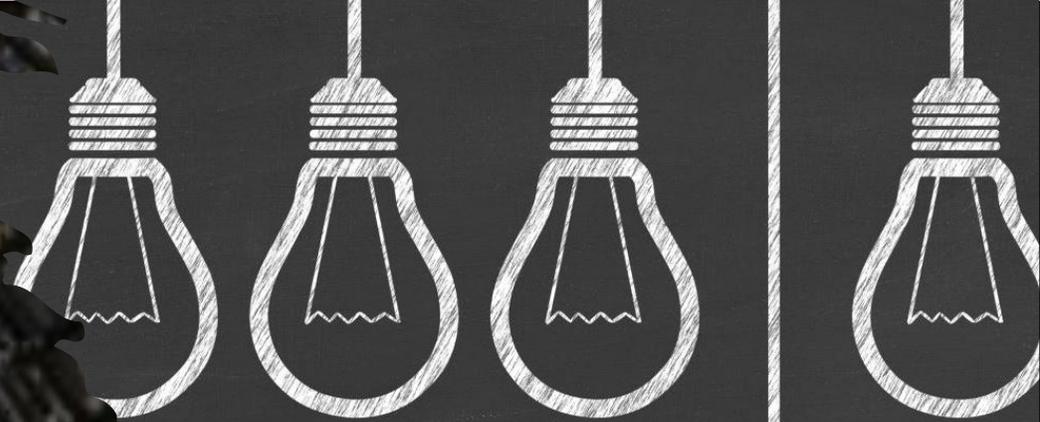
-> miglior rendimento equipaggiando con tubi entrambe le pareti

2) Conducibilità del calcestruzzo



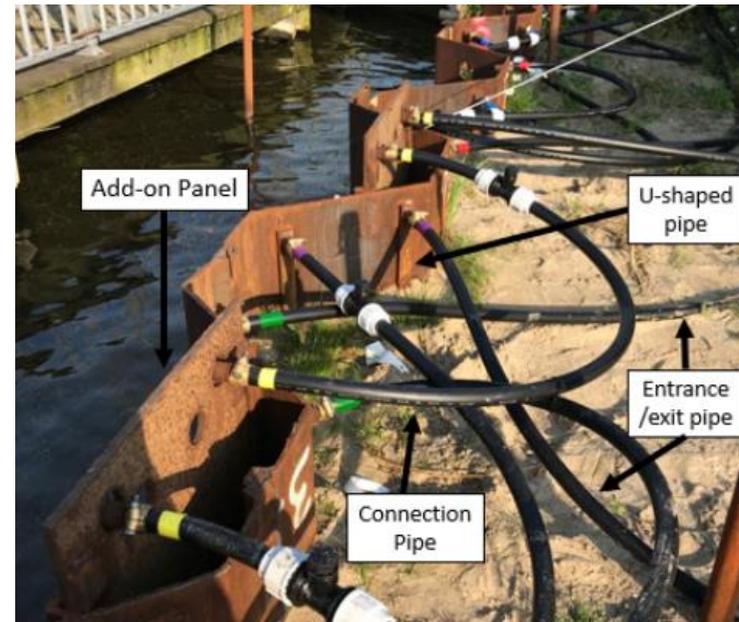
(Di Donna et al. 2016)

Sfide di ricerca/lavori  
in corso



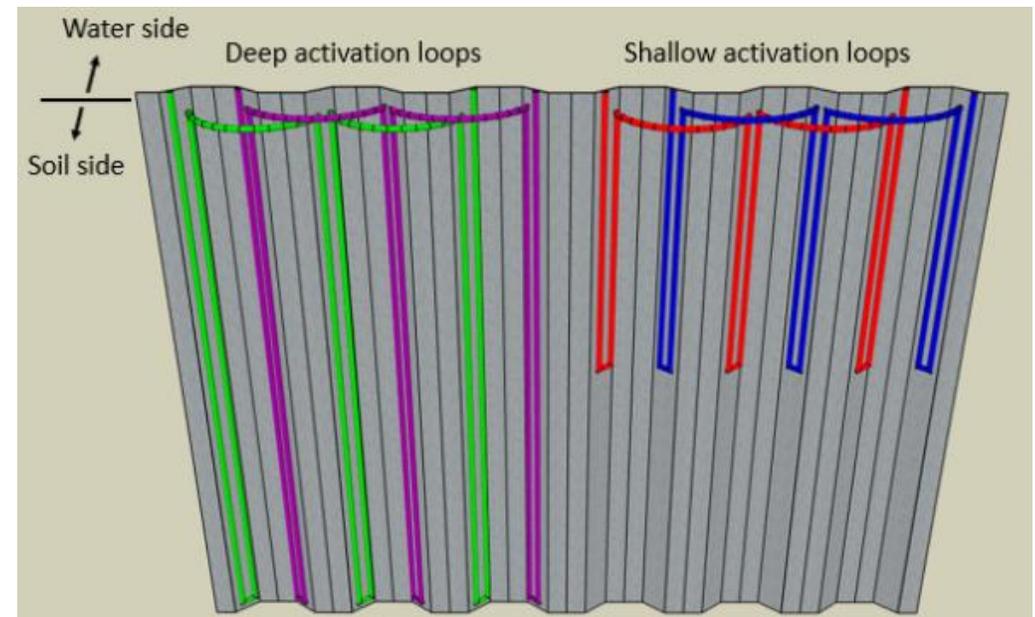
# Palancole energetiche

- Analisi sperimentale e numerica per indagare
  - Ruolo dell'acqua nelle prestazioni energetiche
  - Sollecitazioni termo-meccaniche indotte nella struttura
  - Possibile utilizzo per stoccaggio di calore
  - Ottimizzazione energetica



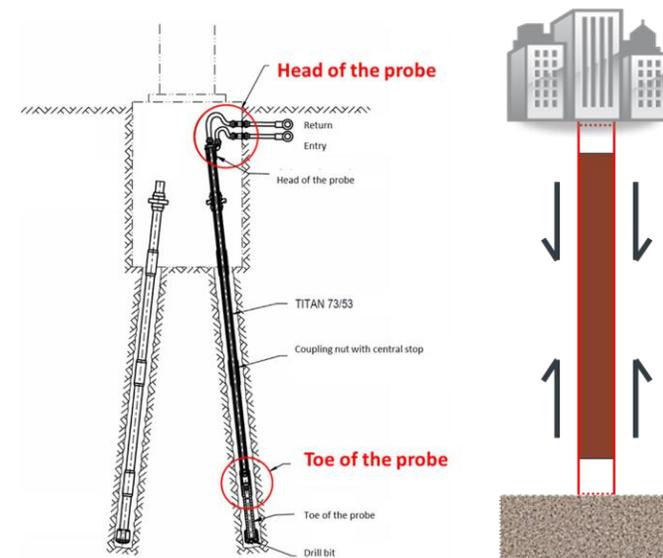
UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI MILANO

CRUX 



# Micropali energetici

- Analisi sperimentale e numerica per indagare
  - Ottimizzazione energetica
  - Sollecitazioni termo-meccaniche indotte nella struttura
  - Effetti di gruppo
  - Possibile utilizzo per stoccaggio di calore
  - Sviluppo soluzioni progettuali semplificate

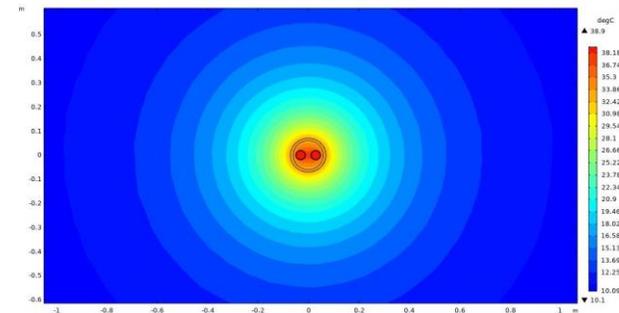
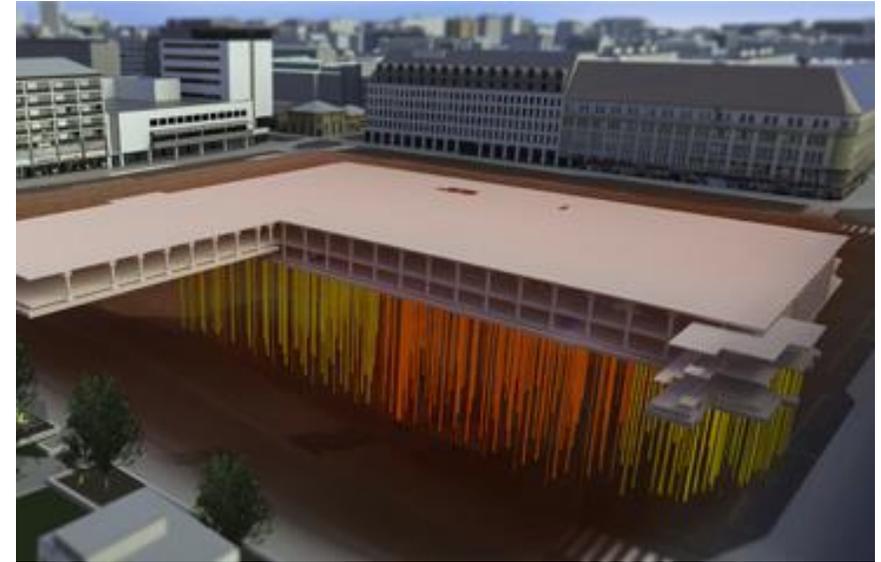


UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI MILANO

**GEOSEC**  
GROUND ENGINEERING

# Stoccaggio di calore

- Integrazione tra pannelli solari e stoccaggio geotermico tramite micropali
- Analisi numerica per indagare
  - Ottimizzazione energetica
  - Effetti di gruppo
  - Effetti termo-idro-meccanici di rilievo date le elevate DT



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI MILANO



  
**TURKU AMK**  
TURKU UNIVERSITY OF  
APPLIED SCIENCES



Grazie per l'attenzione

