Energia geotermica

Energia geotermica

ingegneria senza frontiere

La risorsa geotermica

- Modello concettuale di un serbatoio geotermico
- Aspetti tecnologici

Classificazione degli impianti

- Impianti a espansione diretta
- Impianti a flash e doppio flash
- Impianti a ciclo binario (ORC)

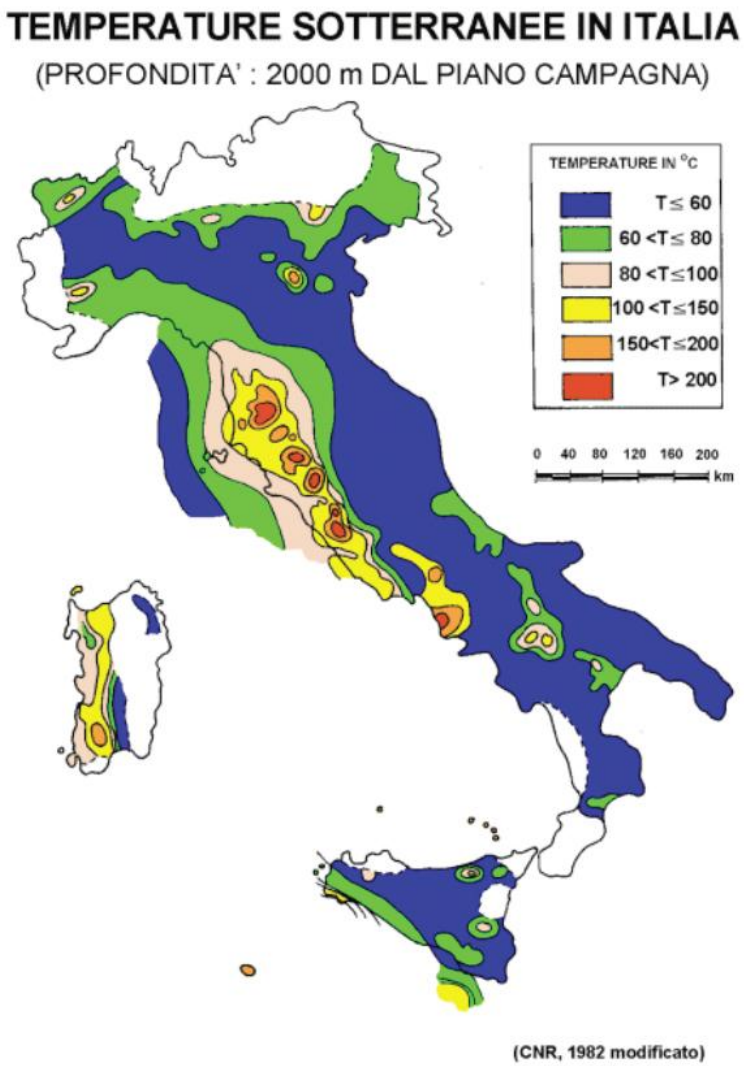
Usi diretti della geotermia

- Usi diretti del calore geotermico

Impianti a pompa di calore geotermica

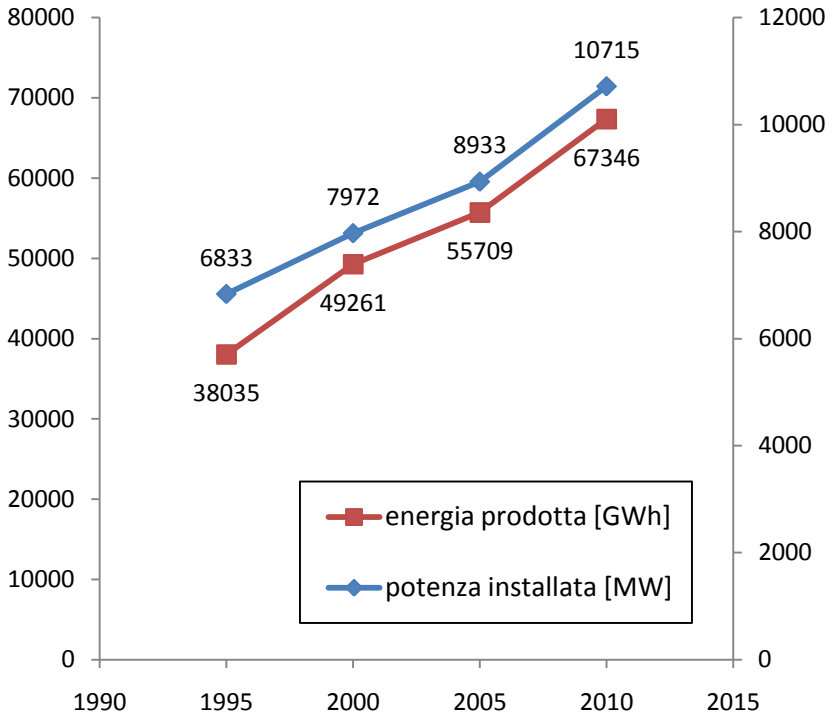
- Tipologie di geoscambiatori

Energia geotermica



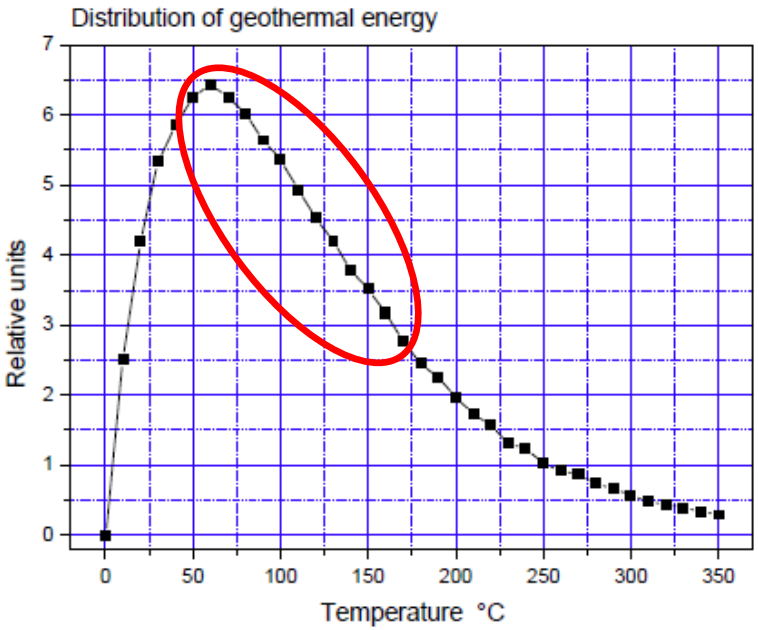
- Più di **100 anni** di attività geotermica
- **700–800 MW** potenza installata (su una richiesta massima storica nel 2007 di 56,8 GW)
- **5500 GWh** di energia prodotti ogni anno (su circa 350000 GWh di fabbisogno nazionale)

Energia geotermica



da R. Bertani, "Geothermal Power Generation in the World 2005–2010 Update Report"

- Produzione e potenza installata "marginale" rispetto alle altre rinnovabili
  - ✓ Circa 10000 MW installati nel mondo (solo in Germania più di 24000 MW di eolico)



Stefansson V., "World geothermal assessment", Proceedings World Geothermal Congress 2005

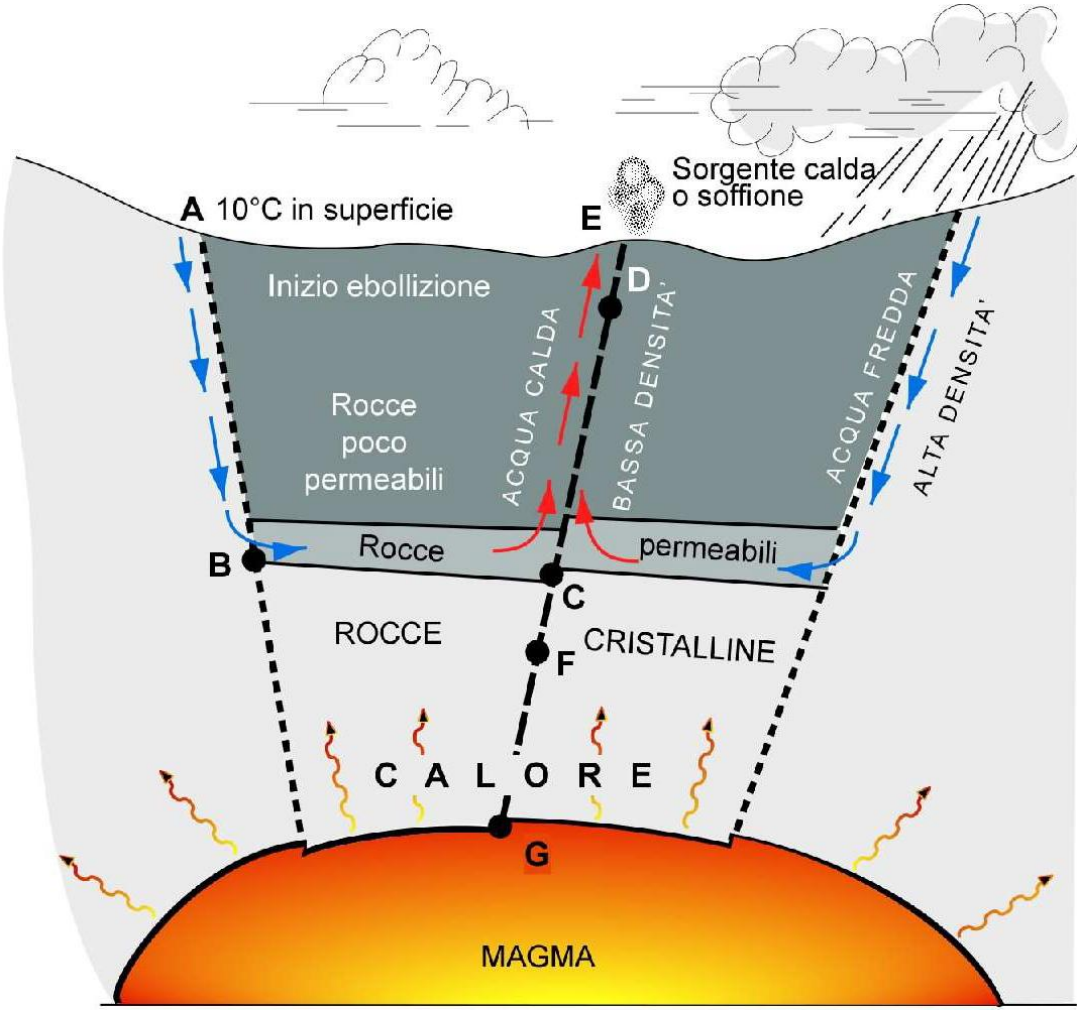
Impianti in grado di **operare per tempi molto lunghi** rispetto alle altre fonti rinnovabili

Energia geotermica

Serbatoio geotermico: modello concettuale

Perché possa avvenire lo sfruttamento dell'energia geotermica devono sussistere alcune condizioni elementari:

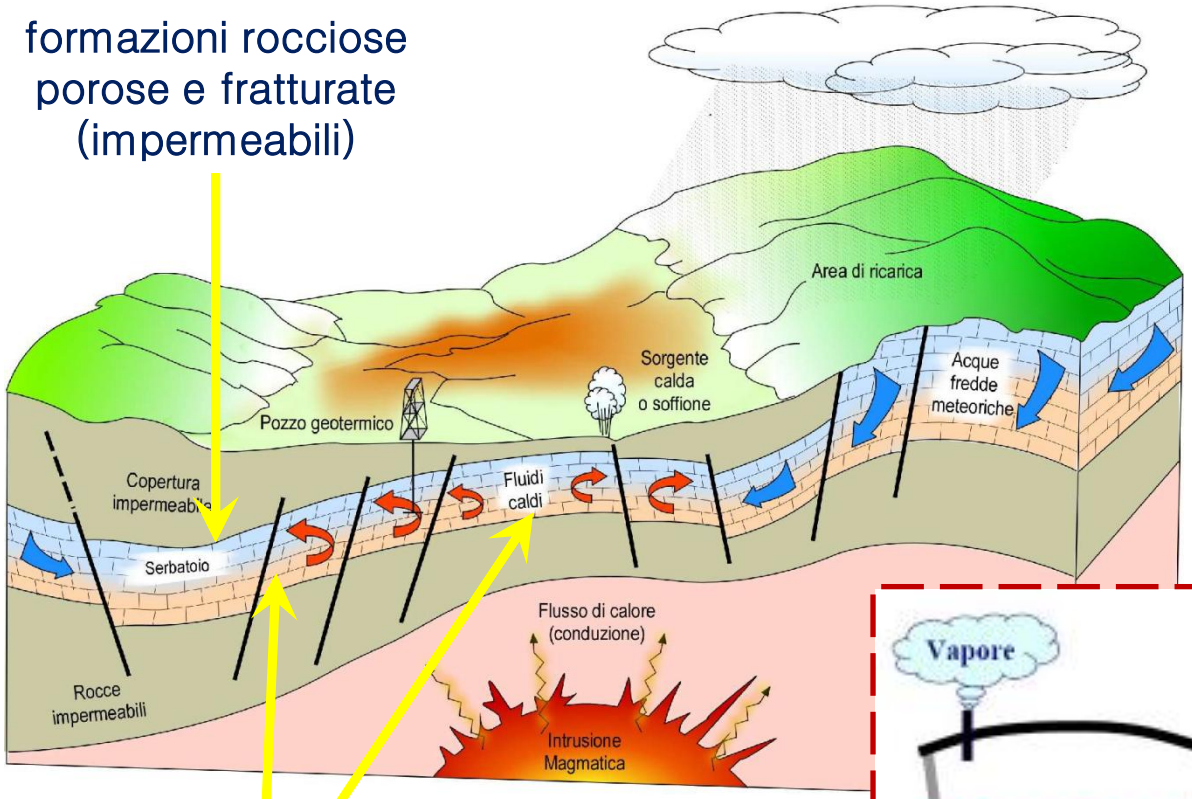
- intrusione magmatica (corpo caldo in profondità)
- presenza di rocce permeabili (serbatoio)
- circolazione di fluido (affinché il calore delle rocce possa essere prelevato e sfruttato sulla superficie)



Energia geotermica

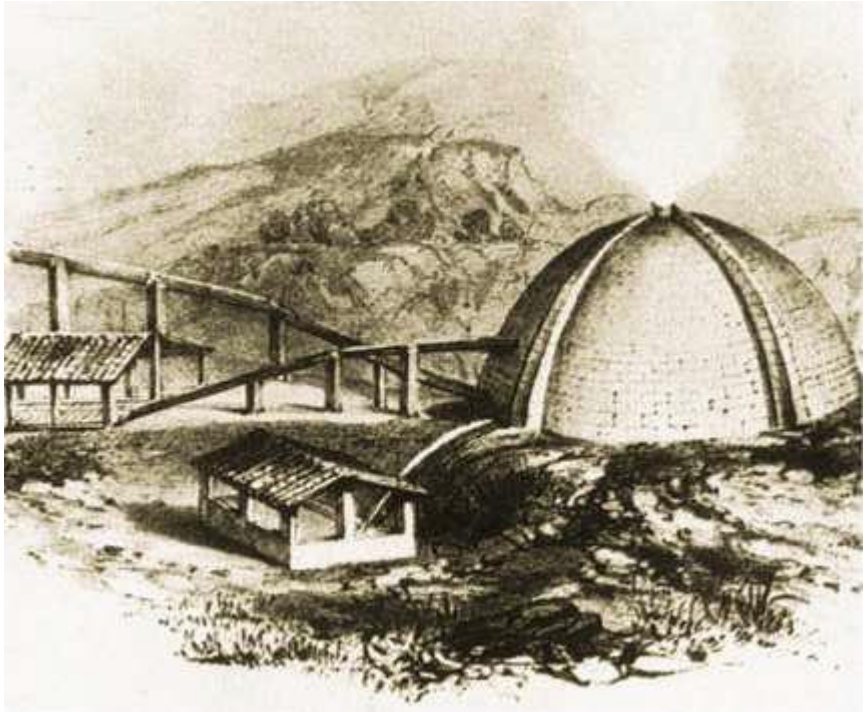
Serbatoio geotermico: modello concettuale

formazioni rocciose porose e fratturate (impermeabili)



formazione di celle di convezione

Energia geotermica



"Lagone coperto" a Larderello, all'interno di queste strutture in mattoni erano raccolte e fatte evaporare le acque boriche.

Larderello 1904. La prima macchina (un motore alternativo accoppiato ad una dinamo), che ha prodotto elettricità sfruttando il vapore geotermico.
Nella foto, il Principe Piero Ginori Conti

Classificazione dei serbatoi geotermici in base al contenuto energetico

(bassa – media – alta entalpia)

Table 1
Classification of geothermal resources by temperature (Dickson and Fanelli, 1990)

	Source[a]			
	(a)	(b)	(c)	(d)
Low enthalpy	< 90°C	< 125°C	< 100°C	< 150°C
Intermediate	90–150	125–225	100–200	–
High enthalpy	> 150	> 225	> 200	> 150

[a] Source: (a) Muffler and Cataldi, 1978; (b) Hochstein, 1990; (c) Benderitter and Cormy, 1990; (d) Haenel et al., 1988.

Energia geotermica

Classificazione dei serbatoi geotermici in base al fluido estratto

Campi a vapore

- Solo 6 nel mondo: Italia (Larderello), USA (Geysers, CA), Islanda, Indonesia, Nuova Zelanda
- Sistema di condensazione a liquido
- Impatti ambientali elevati (CO_2, H_2S, inquinamento termico)

Liquido a T > 160 °C

- Flash : Sistema di condensazione a liquido
- Possibilità di combinazione flash – binario

Liquido 100 °C < T < 160 °C

- Impianti a ciclo binario (ORC)
- 100% rigenerazione dei pozzi
- Possibilità di utilizzazione condensatori ad aria (torri evaporative a secco)
- Ridotte emissioni inquinanti
- Elevati costi di istallazione

Campi a vapore dominante
– Vapore 90% – 98%
– Gas 2 % – 10%

Campi ad acqua dominante
– Fase liquida 20% – 100% del totale estratto

Energia geotermica – Impianti

Impianti a espansione diretta

- Espansione diretta del vapore estratto a pressione atmosferica o inferiore
- Impiantistica tradizionale degli impianti a vapore (taglie impiantistiche standard 10–20–40–60 MW)

Impianti con separazione del vapore

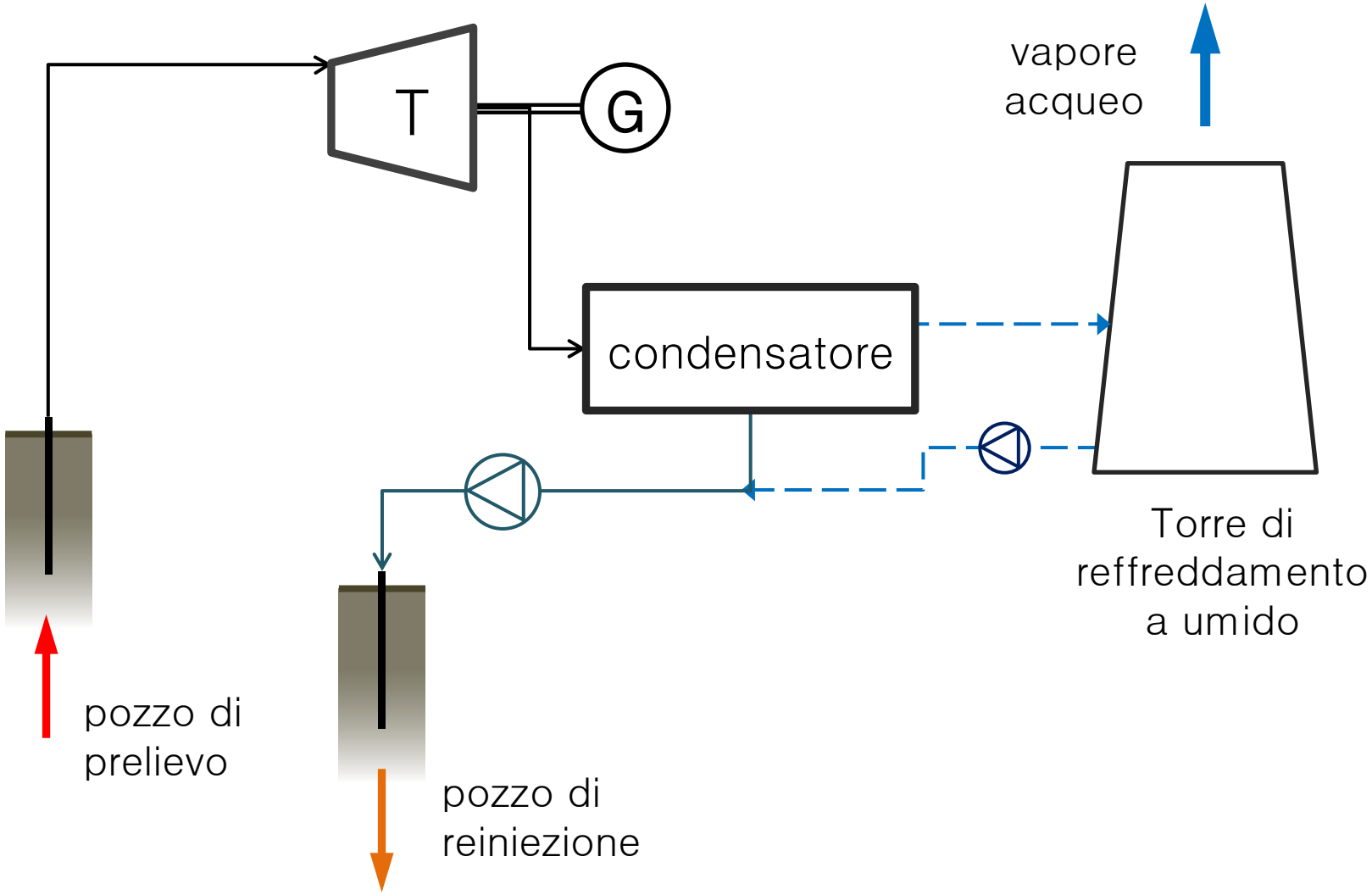
- Impianti a **singolo flash**
- Impianti a **doppio flash**
- Impianti a ciclo combinato (flash + binario)

Impianti a ciclo binario

- Fluido geotermico completamente reiniettato
- Emissioni nulle di sostanze nell'ambiente
- Problema del raffreddamento a secco e consumo degli ausiliari

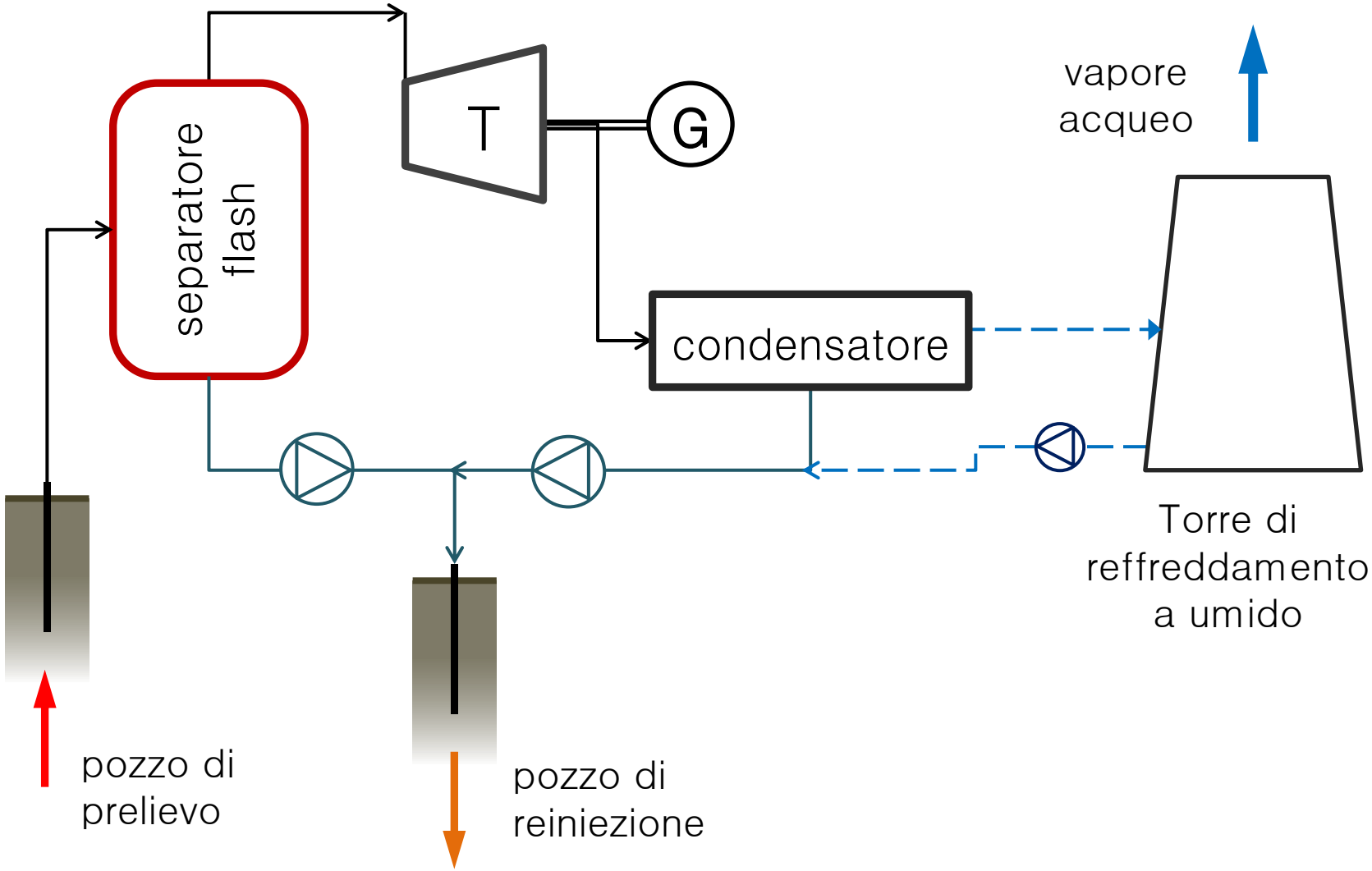
Energia geotermica – Impianti

Impianti a espansione diretta



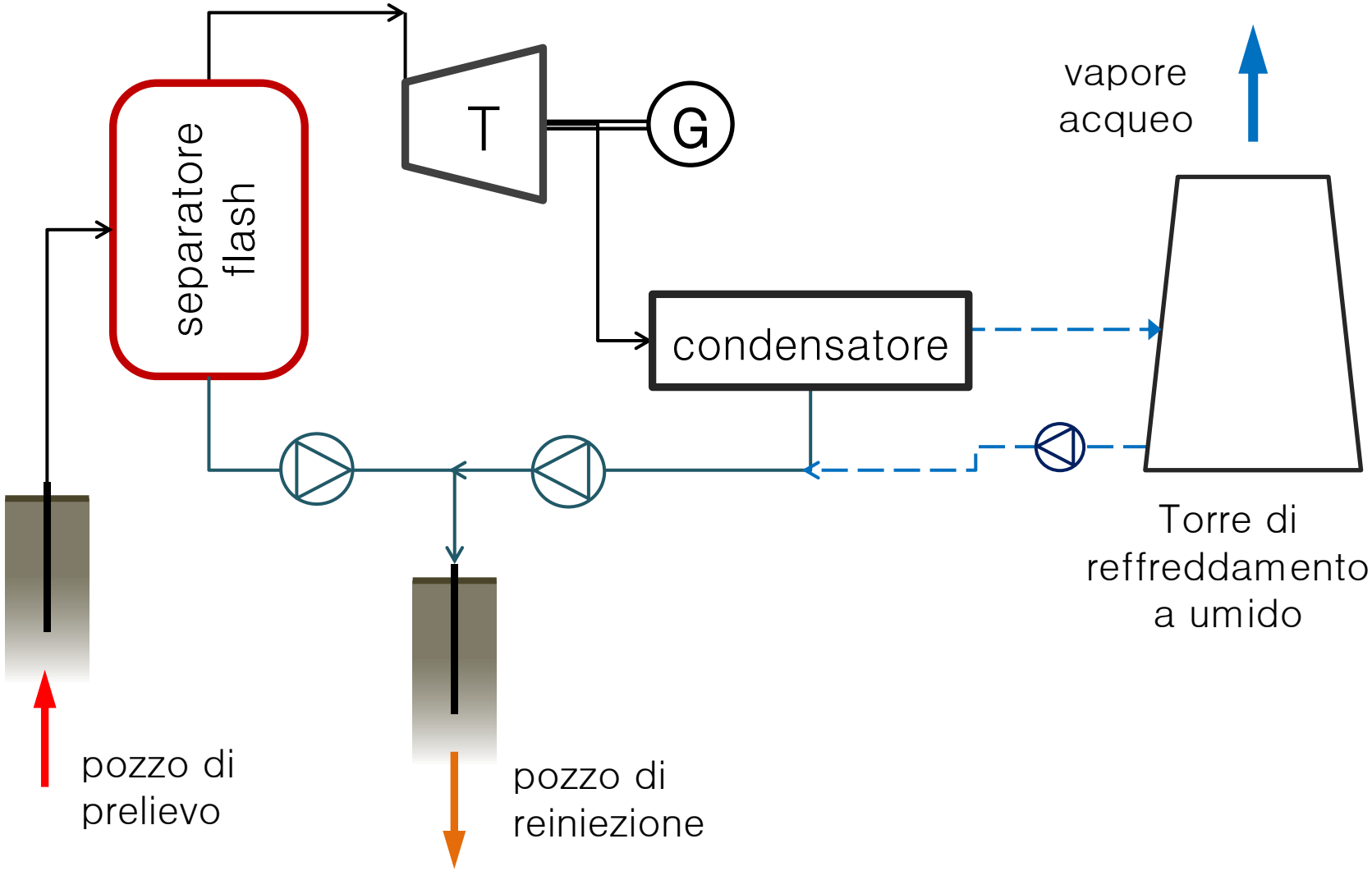
Energia geotermica – Impianti

Impianti a separazione del vapore (flash singolo)



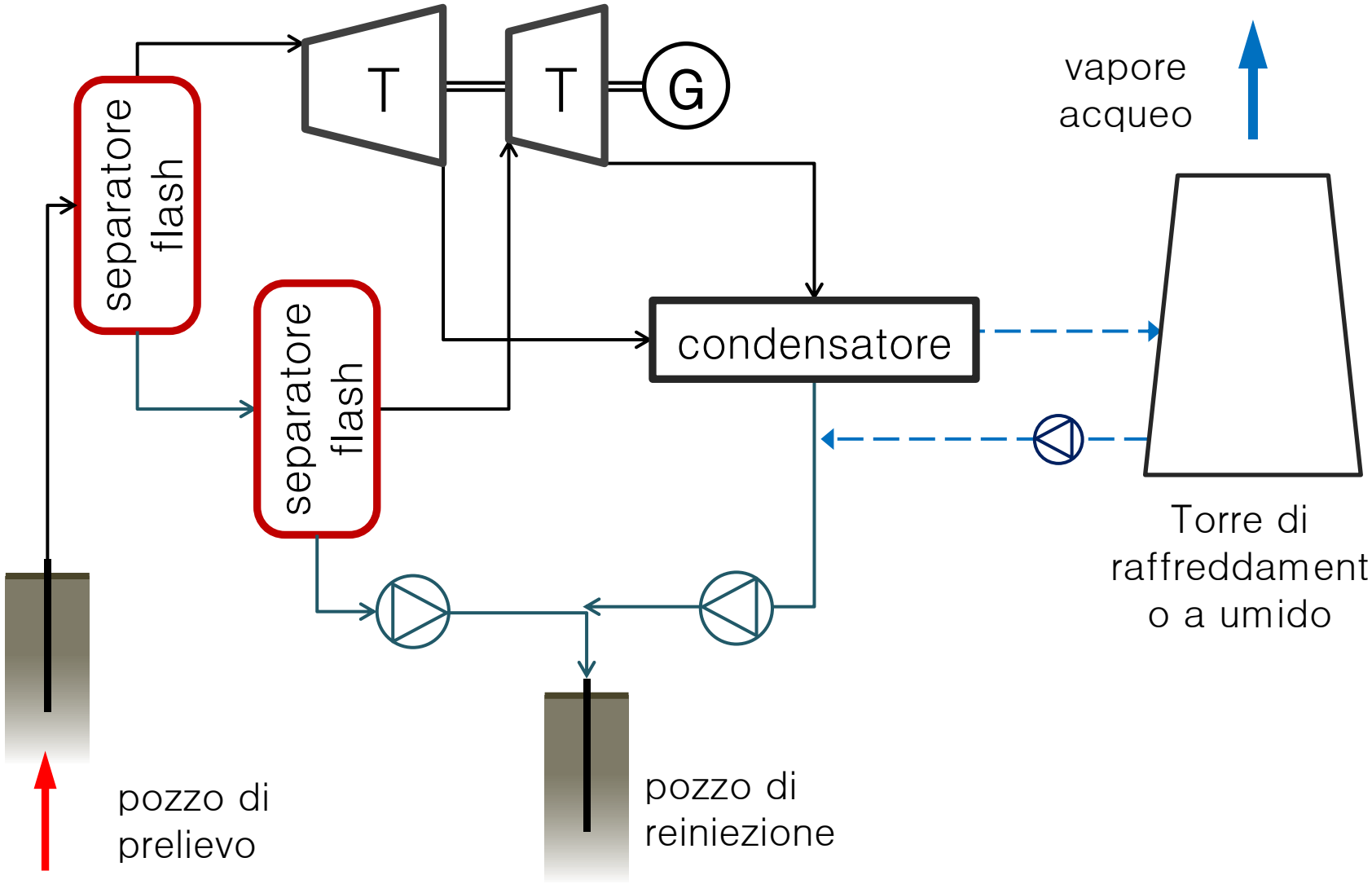
Energia geotermica – Impianti

Impianti a separazione del vapore (flash singolo)



Energia geotermica – Impianti

Impianti a separazione del vapore (flash doppio)



Energia geotermica – Impianti

Impianto di perforazione e uscita controllata di vapore da un pozzo geotermico produttivo (Larderello)

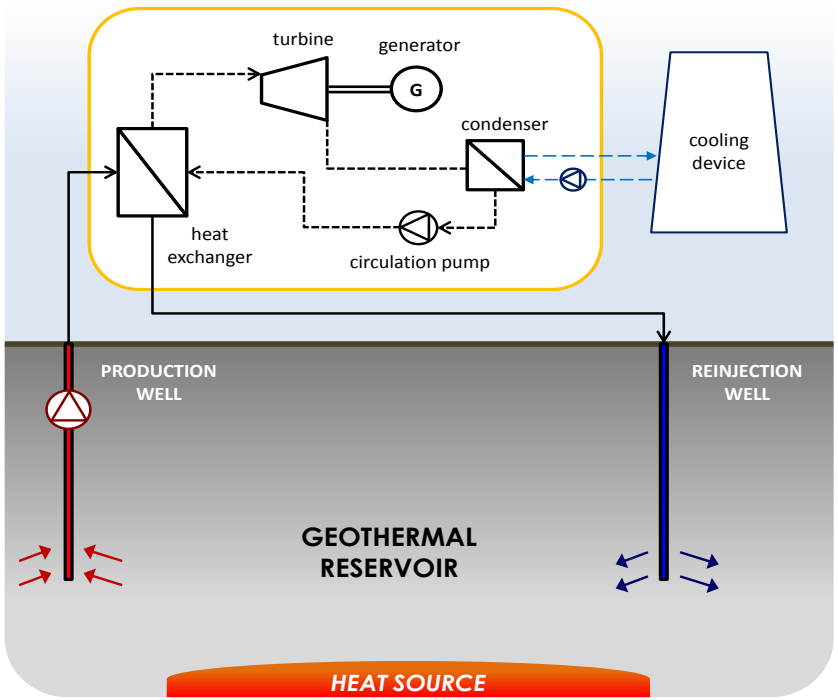
Centrale geotermoelettrica "Valle Secolo" (Larderello)

Pozzo di vapore e vapordotto (Larderello)

Energia geotermica – Impianti ORC

- Possibilità di **sistemi modulari** (prospettiva di standardizzazione e maggiore diffusione)
- Costruttori: ORMAT, Turboden, UTC, Mafi Trench, Cryostar
- Possibilità di utilizzo in **impianti geotermici a ciclo combinato**
- ORC – Tecnologia utilizzata per cicli "bottoming" per recupero di calore e cascami termici (anche da altre fonti rinnovabili, es.: biomasse)
- Soluzioni per il raffreddamento: a secco o con torri a umido

Energia geotermica – Impianti ORC



Efficiency values of geothermal binary power plants		
First Law efficiency	η_I	5 – 10 %
Second Law efficiency	η_{II}	20 – 45 %
Specific brine consumption	β	20 – 200 (kg/MJ)
Power consumption by auxiliary systems		**(% of gross power)**
Circulation pumps		2 – 10 %
Cooling tower fans		10 – 40 %

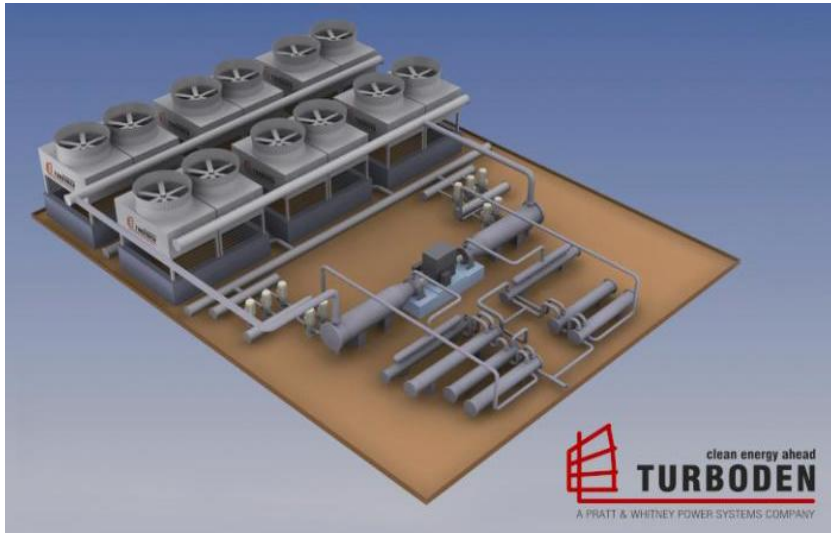
- Organic Rankine Cycles

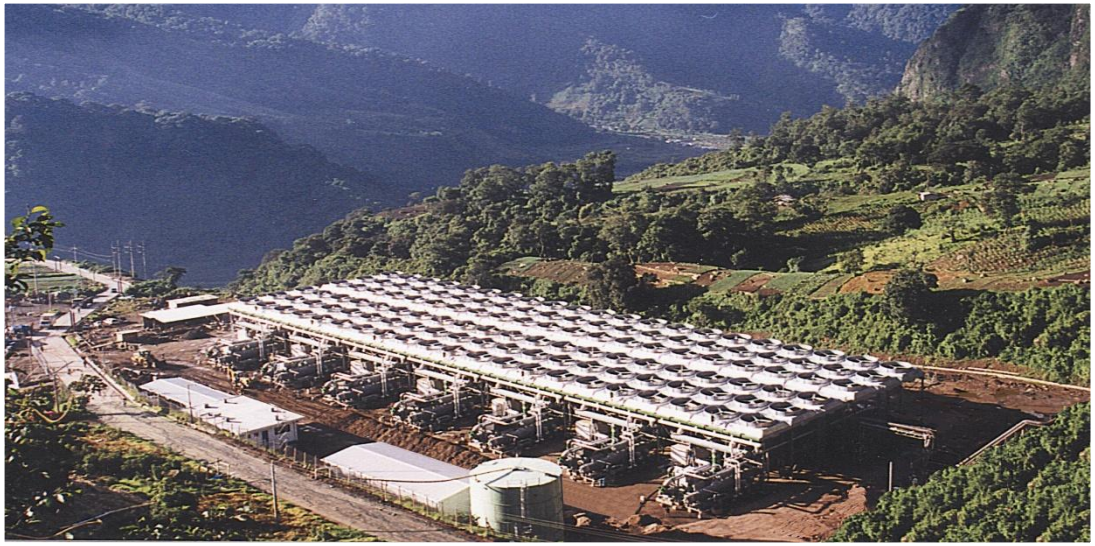
$$\eta_I = \frac{W_{net}}{\dot{m}_{geo}\,(h_{in} - h_{rej})} \qquad \beta = \frac{\dot{m}_{geo}}{W_{net}}$$

$$\eta_{II} = \frac{W_{net}}{\dot{m}_{geo}\,[(h_{in} - h_0) - T_0(s_{in} - s_0)]_{geo}}$$

- Regenerative Rankine Cycle
  - Reduction of the cooling device
  - Small size plants
  - For "dry expansion" working fluids

Energia geotermica – Impianti ORC





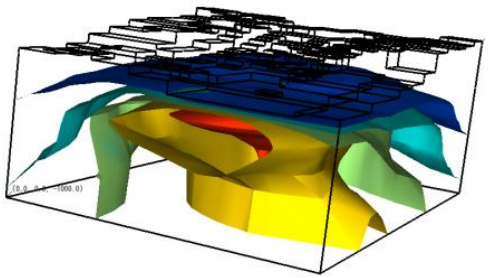
Energia geotermica – La risorsa

Remarks on reservoir simulation

- Equations of conservation of mass, momentum, energy, concentration (pollutant)
- Porous and fractured media flow (Darcy's Law) → Permeability, Hydraulic conductivity

$$\vec{K} = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{pmatrix}$$

- Average properties assignment (hypothesis)
- Materials characterization
- Fractures and faults (porous coherent media and fractured media)
- **Boundary conditions: flow and thermal (wells, assigned T, heat flux, natural recharge, groundwater flow, hydraulic head, natural manifestations)**
- **Initial conditions (gradients)**
- **Mesh** distribution and refinement
- Numerical methods
- Flow of **information** and iterative process → Integrated interdisciplinary approach



Energia geotermica – La risorsa

Limitazioni e criticità dei modelli numerici

- ❑ **Results strongly depends on the reliability and accuracy of the data**
- ❑ **Numerically stable models can be physically not consistent**

✓ "Trash in – trash out" principle

✓ Can the problem be simplified in a proper way to be solved according to calculus or numerical analysis without using dedicated softwares ?
(e.g. reference configurations, "lumped parameters" models)

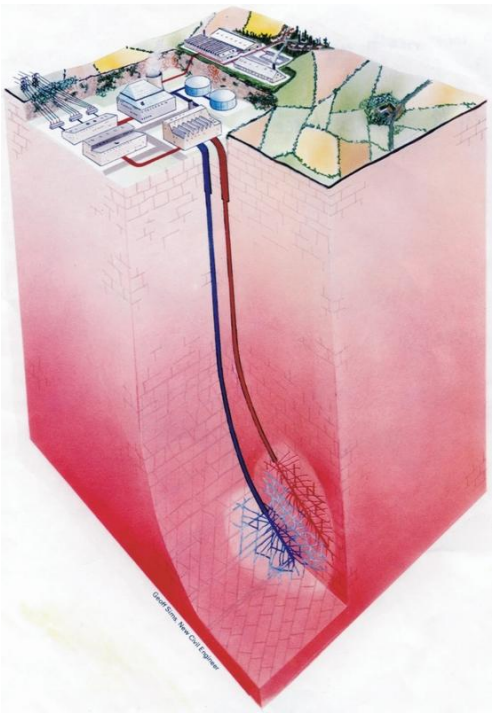
✓ Are we "asking too much" or "asking too bad information" to the numerical models ?
Are the models "too much" or "too less powerful" ?

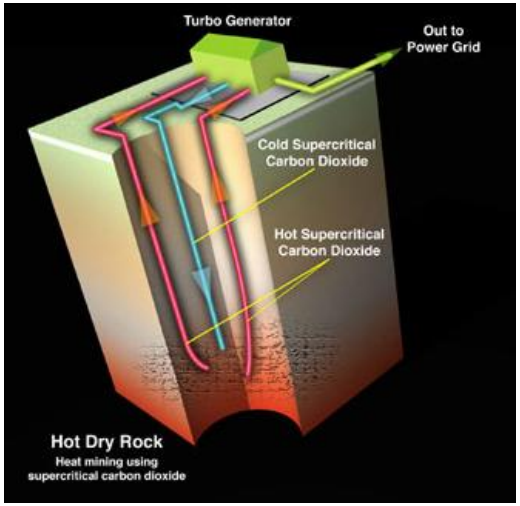
Typical problems:

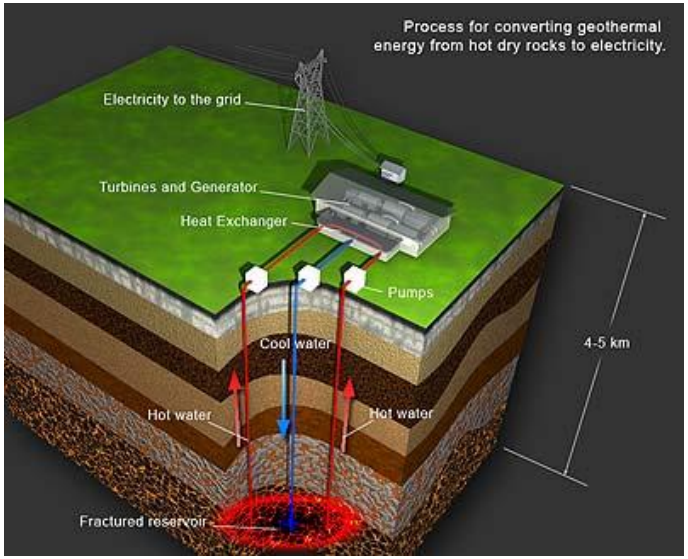
- Oversizing of the plant, wrong reinjection strategy, scaling, corrosion
- Interference effects, bad HP performance, wrong circulation model

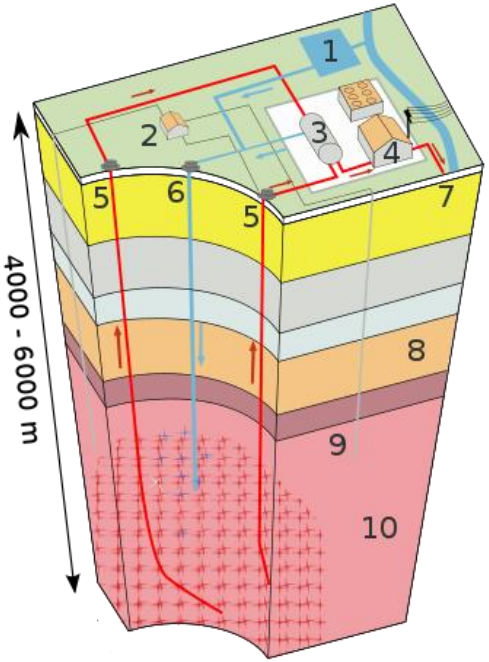
Energia geotermica – HDR e EGS

Hot Dry Rocks e sistemi Enhanced Geothermal Systems





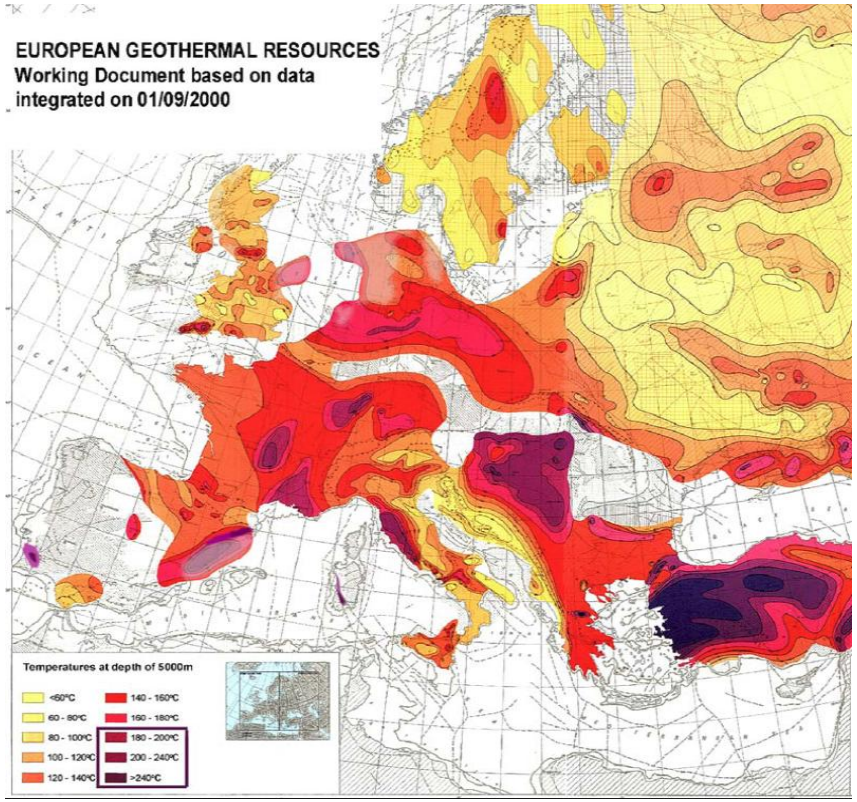




Energia geotermica – HDR e EGS

Hot Dry Rocks e sistemi Enhanced Geothermal Systems

Sperimentazione in Europa – Il più importante progetto R&D di sistema EGS europeo si trova in Francia, a Soultz–sous–Fôret. Recentemente è stato connesso alla rete elettrica un impianto dimostrativo da 1,5 MW. Sperimentazioni in corso sui sistemi a "tripletto" (2 pozzi produttori e 1 reiniettore)



Si stimano 125000 km^2 di superficie (Europa occidentale) con T > 200 °C a circa 5000 m di profondità (fonte: Geothermie Soultz)

Energia geotermica

Caratteristiche chimiche del vapore geotermico

Pressione:	5–10 bar
Temperatura:	150–250 °C
Percentuale di incondensabili:	5 % in volume
Portata:	100–250 t/h

SPECIE INCONDENSABILE		VOLUME (%)
CO_2	Anidride carbonica	80-95
H_2	Idrogeno	2-5
CH_4	Metano	4-8
N_2	Azoto	1 -3
H_2S	Acido solfidrico	1-2

Altri componenti: O_2, Hg, HCl, HF, As, NH_3, H_3BO_3

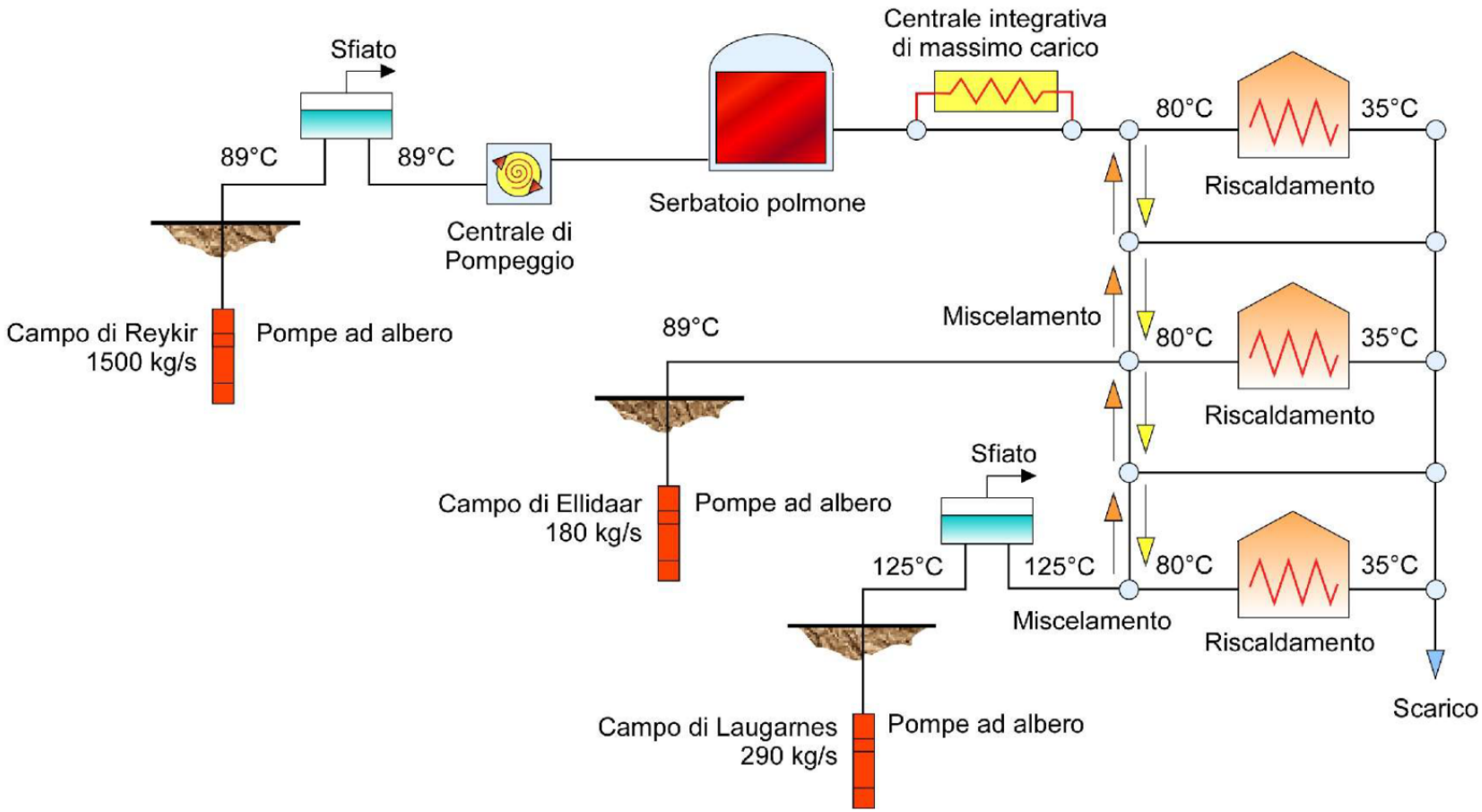
Energia geotermica

- Impatto visivo
- Inquinamento acustico
- Fenomeni di subsidenza } Reiniezione
- Inquinamento atmosferico
  - Acido solfidrico (H_2S) ← soglia olfattiva molto bassa (cattivo odore): 0,7 $\mu g/m^3$
  - Mercurio (Hg)
  - Arsenico (As)

  } Sistemi di abbattimento

Energia geotermica – Usi diretti

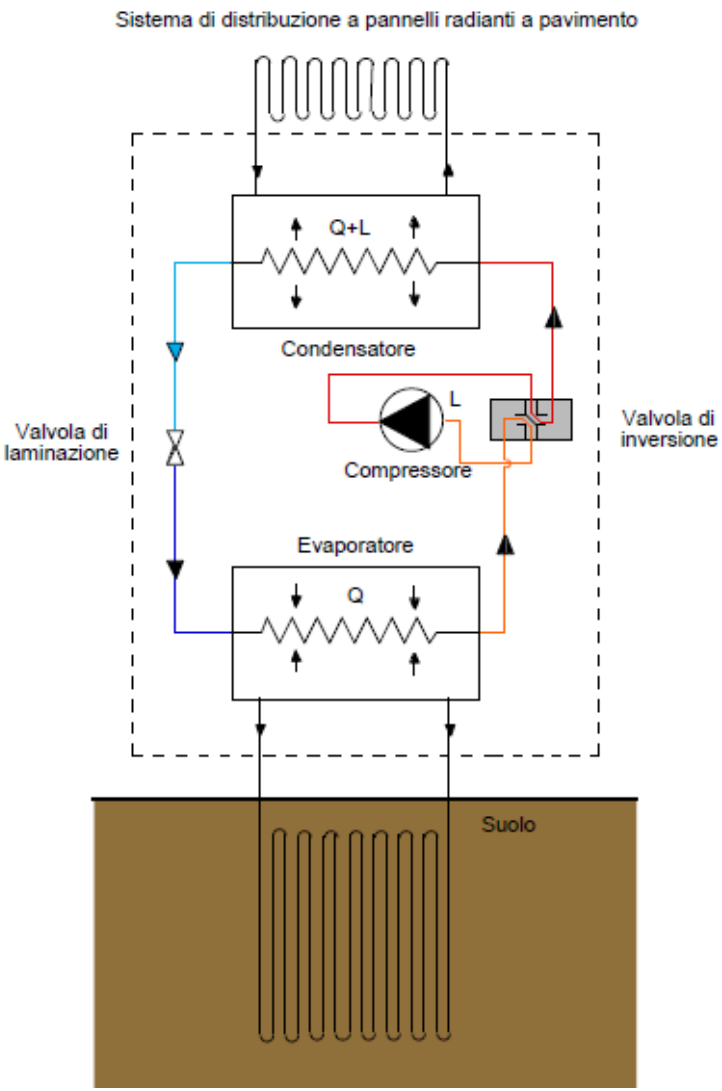
Teleriscaldamento



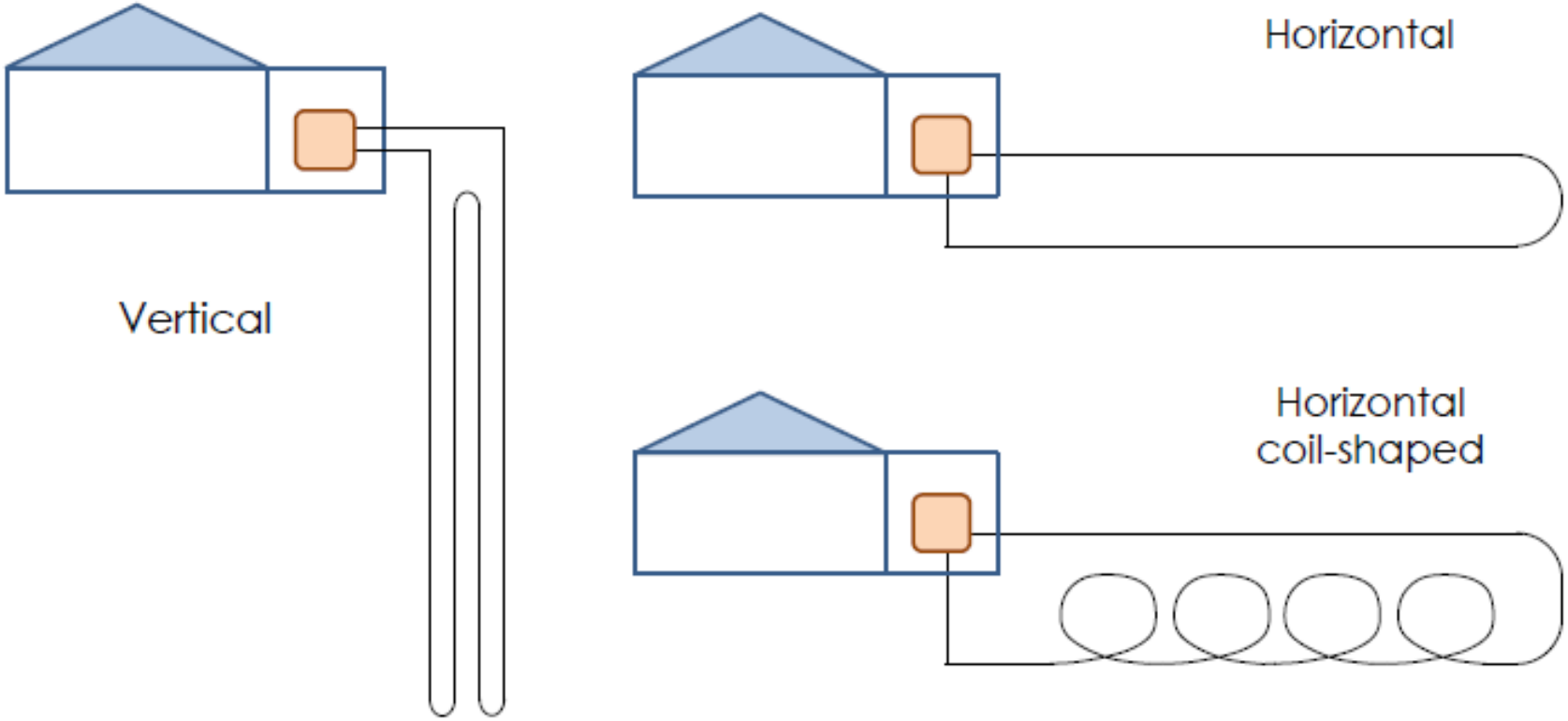
Schema semplificato del sistema di riscaldamento geotermico di un complesso di edifici a Reykjavik, Islanda (da Gudmundsson, 1988).

Energia geotermica - PdC

Pompe di calore geotermiche



Energia geotermica - PdC



(a) Vertical GHE

(b) Horizontal and coil-shaped GHE

Energia geotermica – PdC (Sonde)

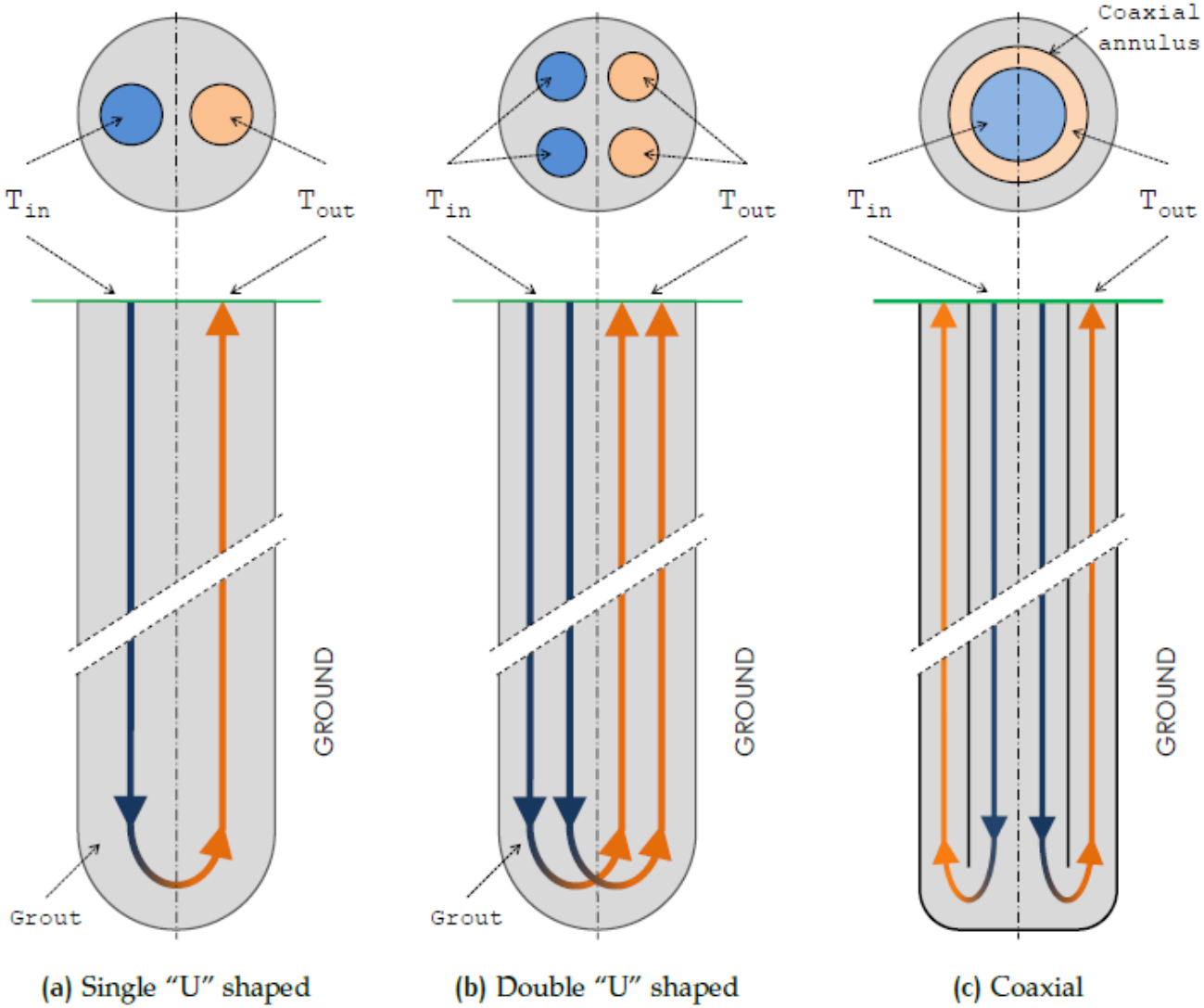


Figure 25.: Common GHE (Ground Heat Exchanger) shapes and fluid circulation layout.

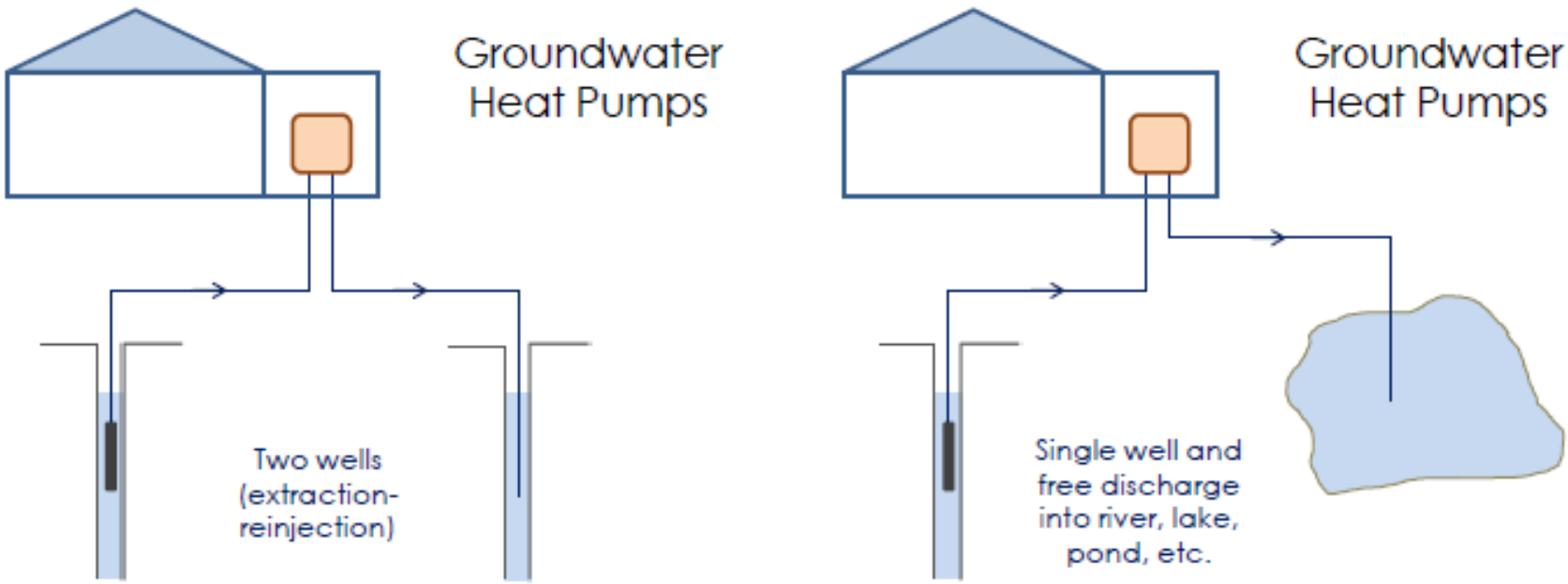
Energia geotermica – PdC (Sonde)

Energia geotermica – PdC (Sonde)

Energia geotermica – PdC (Sonde)

Pali di fondazione per lo scambio termico

Energia geotermica – PdC (Open loop)



(a) GHP system with fluid extraction

(b) GWHP system, with fluid discharge into a surface water body

Figure 26.: Layouts and different configurations of GWHP systems with fluid extraction.