



○ Mappatura degli aspetti ambientali della geotermia profonda

Daniele Fiaschi, Giampaolo Manfreda

Università degli Studi di Firenze

Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIEF)

**GEOENVI: Tackling the environmental concerns
for deploying geothermal energy in Europe**

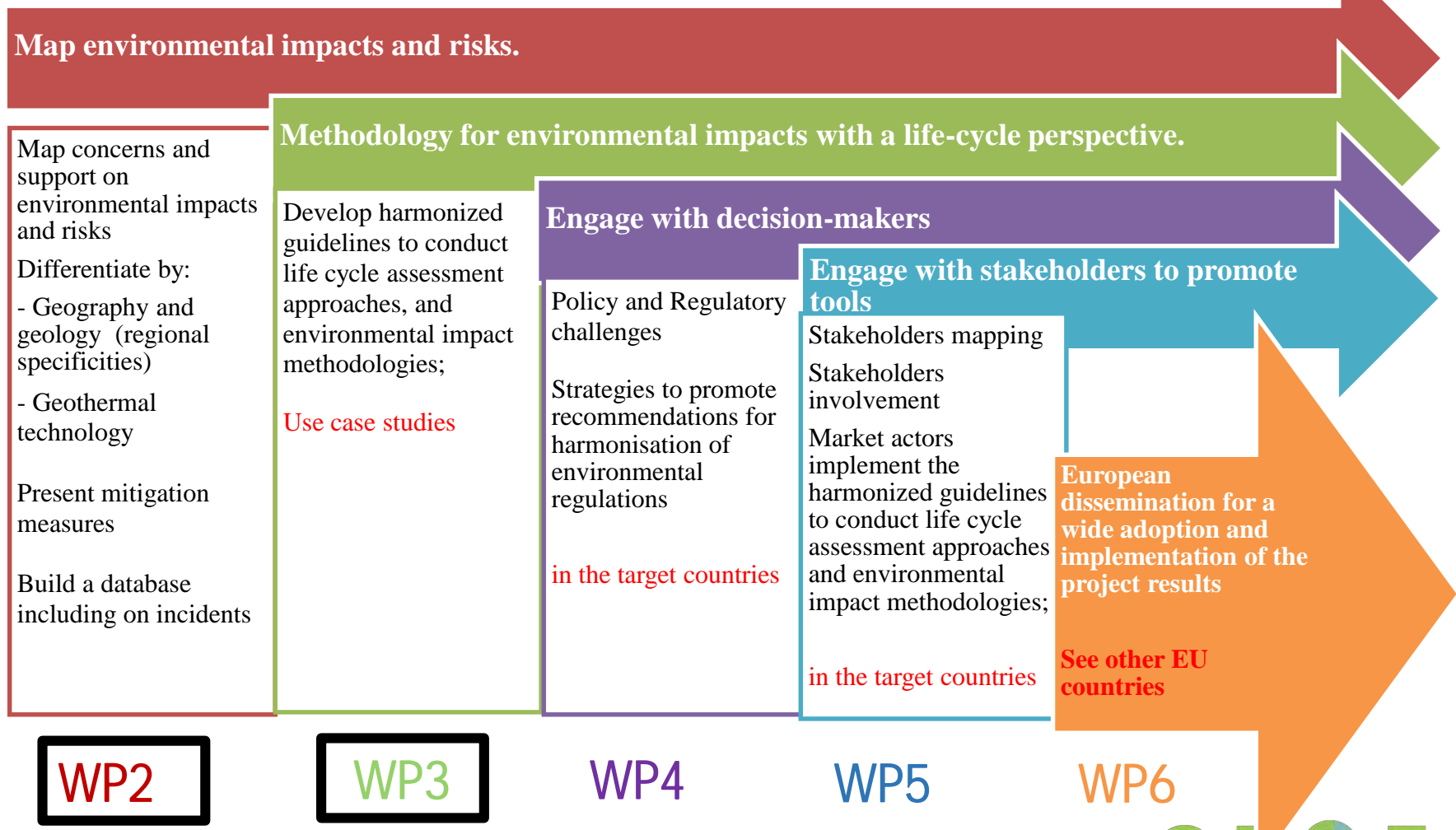
Roma, 17 Aprile 2019



Contenuti

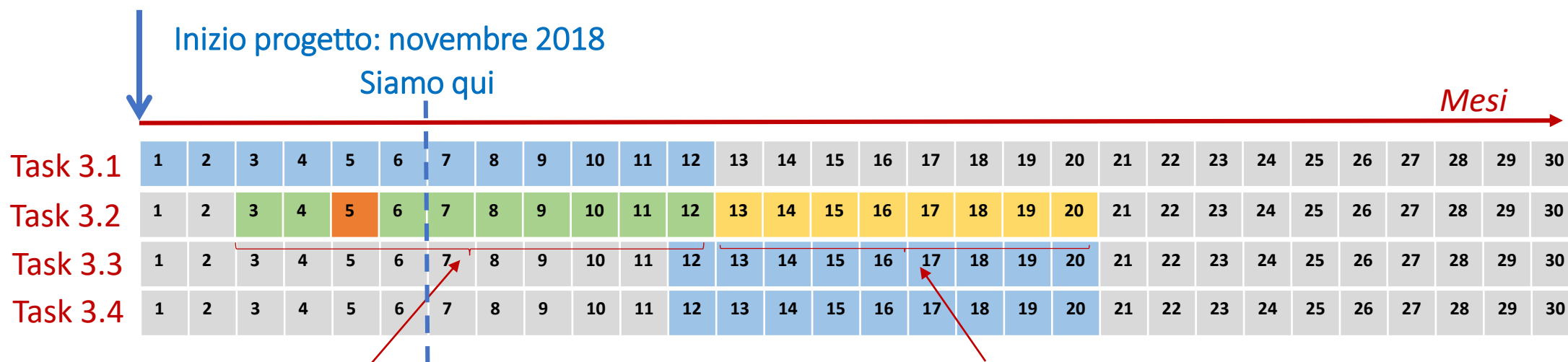
1. Progetto **GEOENVI (WP2)**: Mappatura degli **impatti** e dei **rischi ambientali**
2. Impianti geotermici orientati alla produzione di elettricità e calore: l'indice **PES** (Risparmio Energia Primaria) per la **scalatura dell'impatto energetico e ambientale**
3. **Fattori primari** (misurabili) di interazione tra **geotermia ed ambiente** (ex. **H₂S**, **Hg**, **CO₂**, **uso del suolo**) e loro contributo al bilancio nazionale su base PES
4. **Casi studio italiani** in GEOENVI: **Bagnore3** e **Bagnore4** (Amiata), emissioni misurabili di H₂S, Hg, CO₂ ed «**effetto AMIS**»
5. **Impianto pilota a ciclo binario e reiniezione totale**: progetto pilota Castelnuovo (Progetto GECO)
6. La **Legge 313** Regione Toscana

GEOENVI: Tackling the environmental concerns for deploying geothermal energy in Europe



Progetto GEOENVI: tempistiche e obiettivi del Task 3.2

- (a) Elaborazione dell'impatto ambientale e delle linee guida LCA per l'energia geotermica
- (b) Applicazione ai casi studio (CSGI Task leader con il contributo principale di ARMINES per le linee guida LCA)



➤ **Deliverable 3.2: Prima versione delle linee guida armonizzate per la valutazione ambientale degli impianti geotermici sulla base di indicatori di impatto LCA e non LCA**

(ARMINES)

➤ **Deliverable 3.3: Valutazione ambientale in ogni paese, per una selezione di casi di studio GEOENVI secondo le linee guida armonizzate LCA**

(CSGI)

GEOENVI

Un parametro generale per la valutazione dell'effetto utile energetico e la scalatura degli impatti ambientali della geotermia: PES (Primary Energy Saving)

Italia: Impianti geotermici orientati alla produzione di elettricità (GPE): 813 MW_{el} ; 33 MW_{th}
⇒ l'elettricità è l'Unità Funzionale (UF) dominante

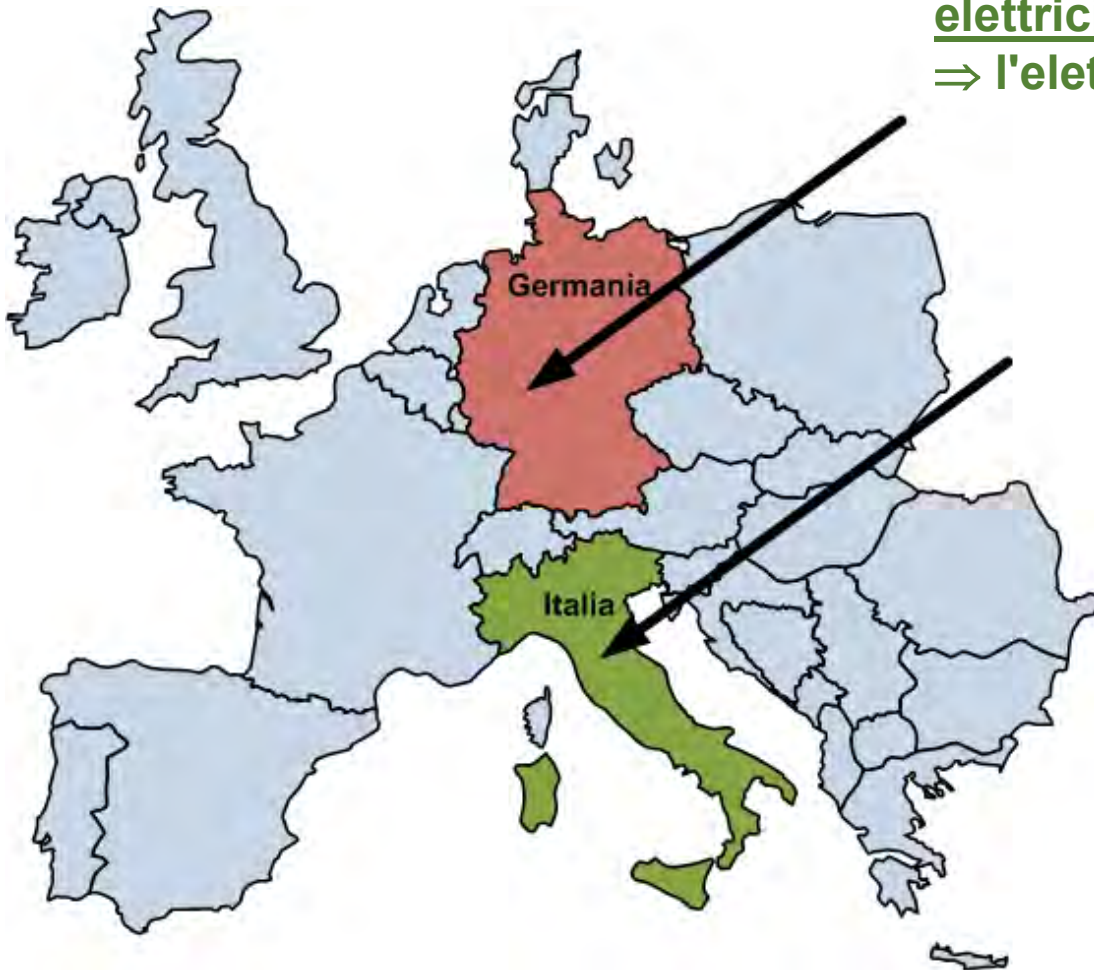
Germania: Impianti geotermici orientati alla produzione di calore (GPH): 6.6 MW_{el} ; 55 MW_{th}
⇒ il calore è l'Unità Funzionale (UF) dominante

? Come armonizzare ?

Primary Energy Savings (PES) come UF Comune

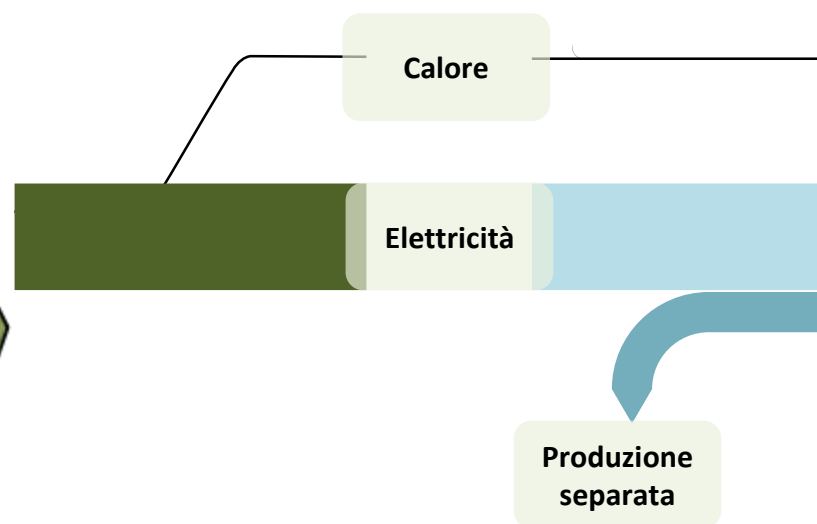
European Directive
for CHP
(2004/08/CE)

$$PES = \left(1 - \frac{1}{\frac{\varepsilon_{el}}{\varepsilon_{Rel}} + \frac{\varepsilon_Q}{\varepsilon_{RQ}}} \right)$$



PES Italia: sistema orientato all'elettricità

- ▶ **2018:** In Italia la produzione complessiva di energia geotermoelettrica è stata di circa **6500 GWh** + **264 GWh** di energia termica.
- ▶ L'energia geotermica in Italia sta sostituendo così $6500/0,525 + 264/0,9 = 12400 + 293 =$ **12693 GWh** = 45700 TJ in termini di **PES**.

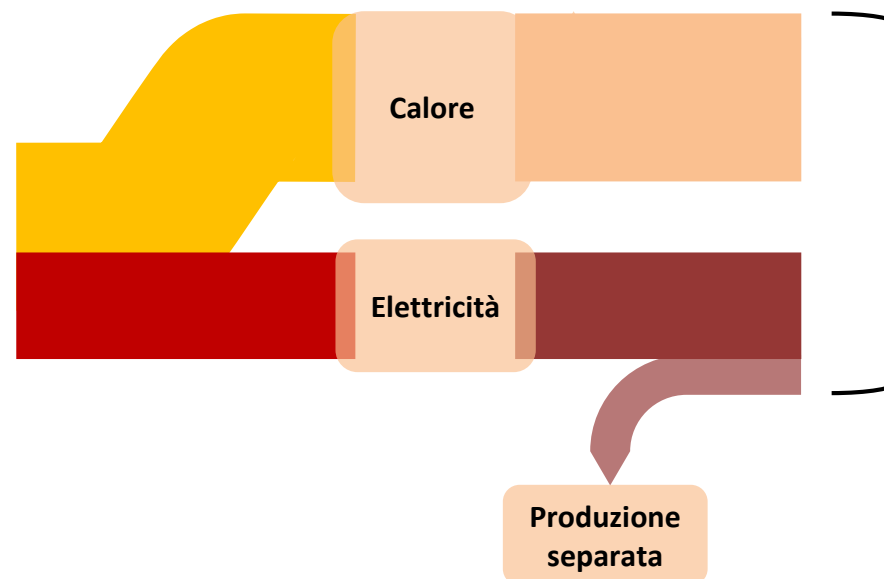


1 kWh di energia elettrica
equivale a 1,95 kWh di PES
(=12693/6500)

*UF adatta per il **confronto**
con altre soluzioni elettriche
o cogenerative nel panorama
energetico nazionale ed
internazionale*

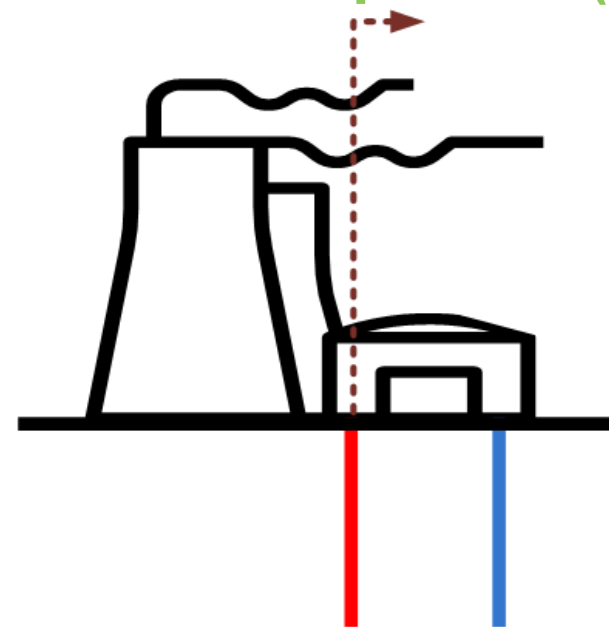
PES Germania: sistema orientato al calore

- ▶ **2018**: In Germania la produzione complessiva di energia geotermoelettrica è stata di circa **50 GWh** + **78,5 GWh** di energia termica
- ▶ L'energia geotermica in Germania ha sostituito quindi $50/0,525 + 78,5/0,9 = 95 + 87 = \mathbf{183\ GWh} = 658\ \text{TJ}$ in termini di PES.



- ❑ 1 kWh di elettricità (UF) dovrebbe essere rivalutato come 3,64 kWh di PES ($=183/50$). Ma l'elettricità è un prodotto di secondo ordine.
- ❑ In alternativa: 1 kWh di calore (UF) dev'essere rivalutato come 2,33 kWh di PES ($=183/78,5$).
- ❑ Applicando l'UF in termini di PES, i sistemi sono sicuramente paragonabili, ma la rivalutazione dovrebbe essere effettuata rispetto al prodotto principale (calore).

Fattori primari (misurabili) di interazione tra geotermia ed ambiente



Emissioni in aria

Dati ARPAT – Monitoraggio aree geotermiche (*medie Larderello-Travale ed Amiata*)

CO₂ ~ 300	kg/MWh
CH₄ ~ 2.4	kg/MWh
H₂S ~ 1	kg/MWh
Hg ~ 0.001	g/MWh
As ~ 0.08	g/MWh
NH₃ ~ 0.7	kg/MWh

Uso del suolo (m²/ MWh)

Flash (inclusi pozzi)	0.17 – (1200 m ² /MW)
Dry steam (inclusi pozzi)	0.11 – (650 – 1200 m ² /MW)
Binari (inclusi pozzi)	0.13 – (400 – 1500 m ² /MW)

Centrale a carbone (incluso estrazione di miniera)	5.7
Centrale idroelettrica (solo serbatoio)	250
Centrale solare PV	7.5
Centrale eolica	7.3

Unit Acronym	kg/MWh	Confidence interval	
		Average	
		Min	Max
Bagnore 3			
Hydrogen sulfide	1.53	9.90 × 10 ⁻⁰¹	2.26
Arsenic	1.20 × 10 ⁻⁰⁶	5.73 × 10 ⁻⁰⁷	2.00 × 10 ⁻⁰⁶
Mercury	1.03 × 10 ⁻⁰⁶	7.81 × 10 ⁻⁰⁸	2.93 × 10 ⁻⁰⁶
Carbon dioxide	3.98 × 10 ⁺⁰²	2.45 × 10 ⁺⁰²	6.56 × 10 ⁺⁰²
Ammonia	1.41 × 10 ⁺⁰¹	4.48	2.89 × 10 ⁺⁰¹
Arsenic compounds	2.66 × 10 ⁻⁰⁵	1.74 × 10 ⁻⁰⁵	4.64 × 10 ⁻⁰⁵
Antimony compounds	1.02 × 10 ⁻⁰⁵	1.10 × 10 ⁻⁰⁸	2.05 × 10 ⁻⁰⁵
Selenium	1.75 × 10 ⁻⁰⁵	4.87 × 10 ⁻⁰⁸	2.98 × 10 ⁻⁰⁵
Mercury compounds	1.62 × 10 ⁻⁰⁴	6.19 × 10 ⁻⁰⁵	2.49 × 10 ⁻⁰⁴
Cadmium	4.35 × 10 ⁻⁰⁸	1.49 × 10 ⁻⁰⁹	1.08 × 10 ⁻⁰⁷
Chromium	2.83 × 10 ⁻⁰⁷	3.65 × 10 ⁻⁰⁸	5.15 × 10 ⁻⁰⁷
Manganese	3.36 × 10 ⁻⁰⁷	1.79 × 10 ⁻⁰⁷	5.15 × 10 ⁻⁰⁷
Nickel	6.88 × 10 ⁻⁰⁷	5.08 × 10 ⁻⁰⁷	1.04 × 10 ⁻⁰⁶
Lead	2.60 × 10 ⁻⁰⁷	5.64 × 10 ⁻⁰⁸	5.15 × 10 ⁻⁰⁷
Copper	3.67 × 10 ⁻⁰⁷	6.67 × 10 ⁻⁰⁸	7.73 × 10 ⁻⁰⁷
Vanadium	1.89 × 10 ⁻⁰⁷	2.08 × 10 ⁻⁰⁸	5.15 × 10 ⁻⁰⁷
Boric acid	8.57 × 10 ⁻⁰³	2.69 × 10 ⁻⁰³	1.49 × 10 ⁻⁰²
Methane	9.81	5.77	1.70 × 10 ⁺⁰¹
Carbon monoxide	3.75 × 10 ⁻⁰²	1.65 × 10 ⁻⁰²	8.25 × 10 ⁻⁰²



Emissioni in aria nella fase operativa

❖ **Amiata**: PRINCIPALE problematica per Inquinamento atmosferico da **gas incondensabili (NCG)**:

❖ Emissioni **locali** (H_2S , NH_3 , Hg, As, B, PM10)

❖ Emissioni **globali** (CO_2 , CH_4)

H_2S → è il **gas più abbondante** rilasciato dagli impianti geotermici dopo la CO_2 . in atmosfera forma un **particolato secondario**, che può essere lavato dalla pioggia o ossidato in SO_2 .

NH_3 → forma **idrossido di ammonio con vapore acqueo** e contribuisce al **particolato secondario** con anidridi. Quando ossidato, contribuisce all'acidificazione del suolo

Hg → in **forma minerale (cinnabar)** o in **piccolissime gocce metalliche**. **Emesso sia nei NCG** che disciolto come **sale** nei **separatori di gocce** delle torri (**drift**). Hg volatile può essere **trasportato nell'atmosfera** e **trasformato in metilmercurio** tossico negli animali (catena alimentare umana)

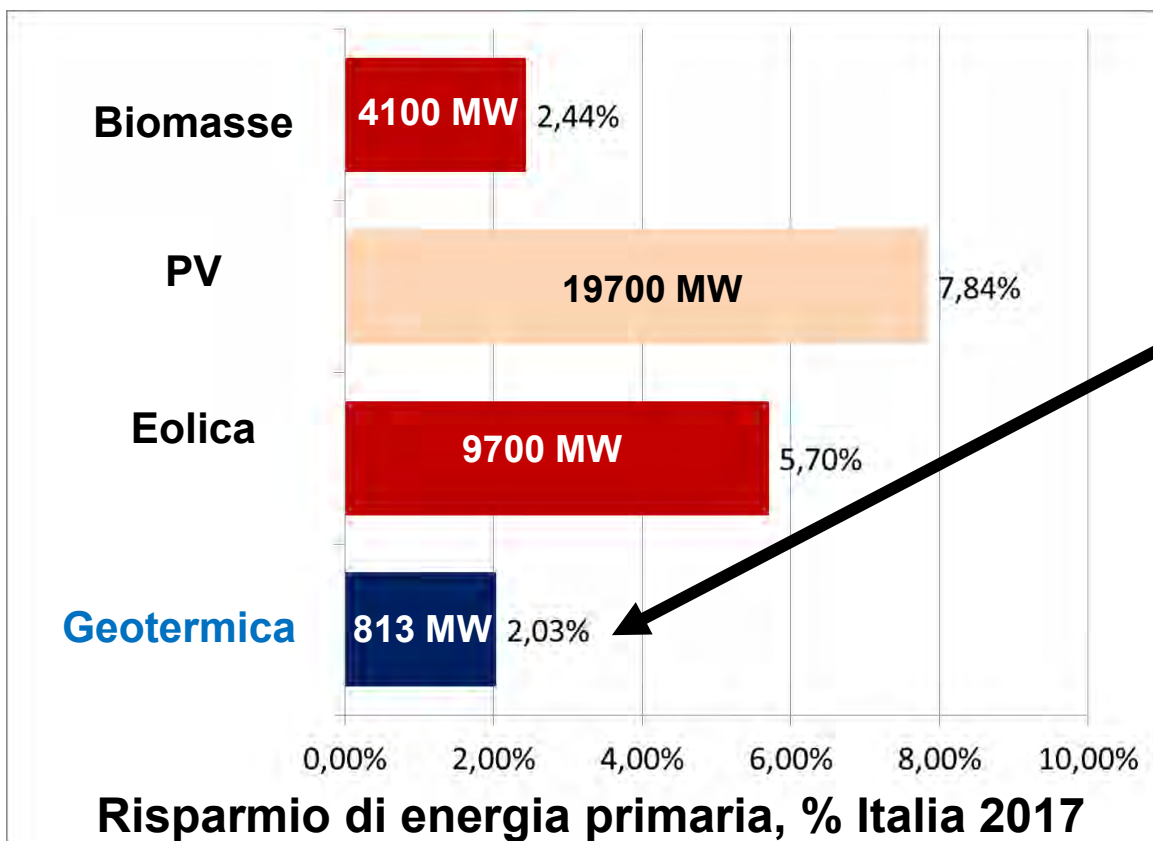
B → si trova in **depositi evaporitici di acqua idrotermale** sotto forma di **sale (borato)**. Il boro è tossico solo se ingerito. L'acido borico (H_3BO_3) è contenuto nel drift emesso dalle torri di raffreddamento.

CO_2 → in **Italia** sono dovuti **all'alta concentrazione di CO_2 nei fluidi geotermici**. Una **parte rilevante di origine naturale** (raggiungerebbero comunque l'atmosfera come emissioni diffuse).

CH_4 → **presente in piccola quantità nei NCG** ed emessa **naturalmente** dal **suolo** nelle aree geotermiche con una **concentrazione da poche ppm a poche unità %**.

Riduzione Emissioni inquinanti grazie all'utilizzo dell'energia GEOTERMICA: esempio di riscaldamento nazionale su base PES

Emissioni totali – principali inquinanti atmosferici da impianti a combustione, SO_x , NMVOC, NO_x , $\text{PM}_{2.5}$, NH_3

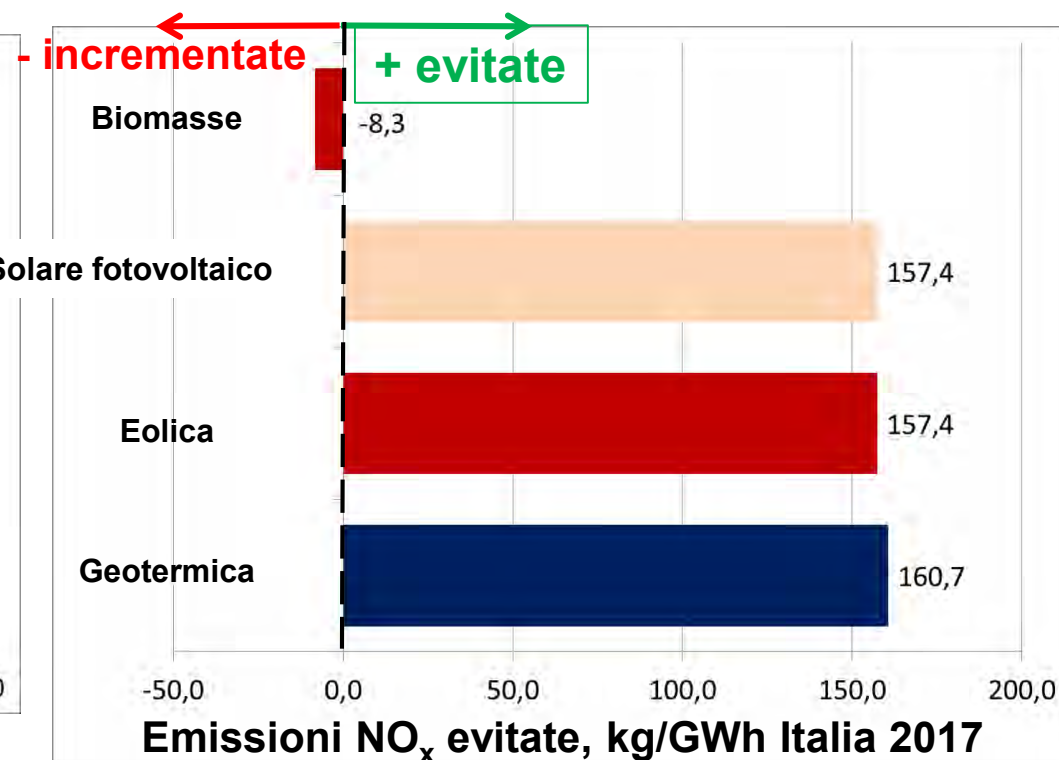
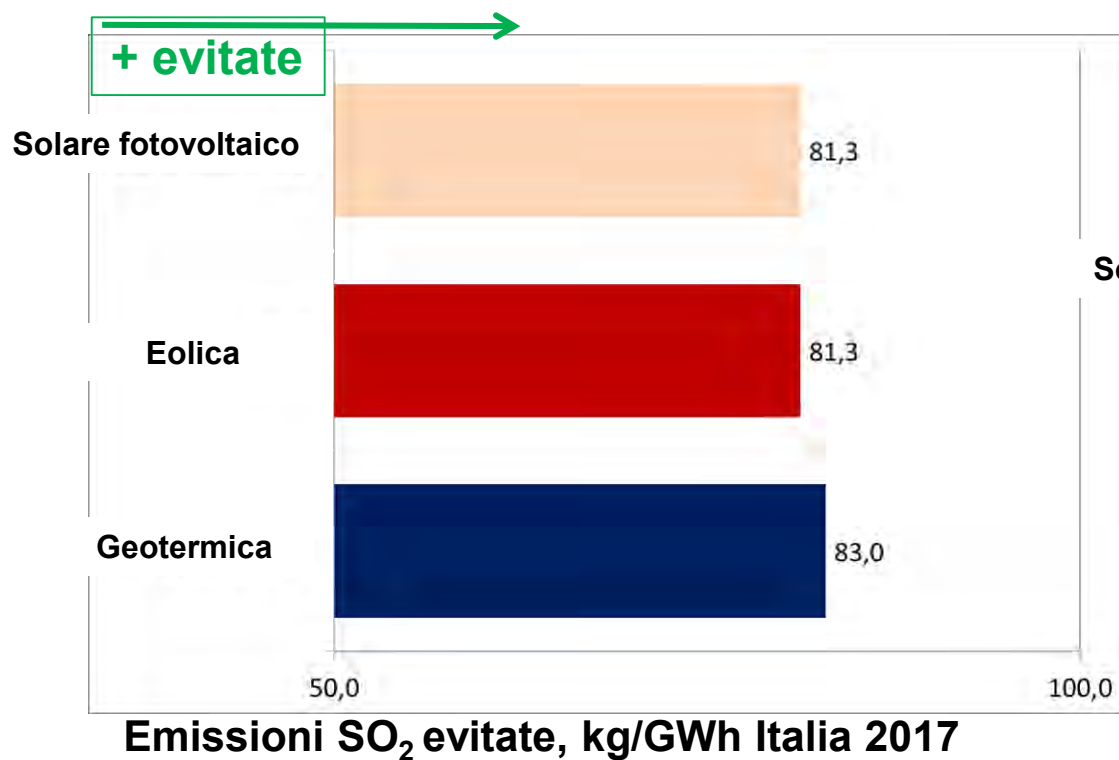


► Su base **PES**, l'energia geotermica in Italia sostituisce **12,7 TWh** (= 2% del consumo totale di energia primaria) proveniente da centrali elettriche, compresa la cogenerazione e le biomasse (energia primaria totale = 365 TWh).

Contribuisce quindi proporzionalmente alla riduzione delle relative emissioni inquinanti

Rapporto ISPRA 2018	Emissioni da uso energia primaria (Elettricità e calore), Italia 2017	
NH_3	kt	0,193
NMVOC	kt	2,199
SO_x (SO_2)	kt	18,986
NO_x (NO_2)	kt	36,770
$\text{PM}_{2.5}$	kt	0,524
CO	kt	17,360

Confronto con altre fonti rinnovabili - emissioni evitate (principali inquinanti)



	NH ₃	NMVOC	PM _{2.5}	CO	H ₂ S	Hg	As
	kg/GWh	kg/GWh	kg/GWh	kg/GWh	kg/GWh	kg/GWh	kg/GWh
Geotermica	-699	9,61	2,29	38,4	-960	2,36	15,2
Eolica	0,824	9,41	2,24	74,314	0,00	2,31	14,9
PV	0,824	9,41	2,24	74,3	0,00	2,31	14,9
Biomasse	-17,9	-72,6	-105	2631	0,00	-0,0002	0,00

Emissioni di CO₂ in GEO Amiata: impatto totale

Applied Geochemistry 24 (2009) 860–875



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Applied Geochemistry

journal homepage: www.elsevier.com/locate/apgeochem



Carbon dioxide degassing and thermal energy release in the Monte Amiata volcanic-geothermal area (Italy)

Francesco Frondini^{a,*}, Stefano Caliro^b, Carlo Cardellini^a, Giovanni Chiodini^b, Nicola Morgantini^c

Le emissioni nell'aria nelle aree geotermiche dipendono dal contenuto del fluido geotermico, ed è legato sia agli impianti geotermici che a manifestazioni naturali.

La CO₂ totale rilasciata dall'area vulcanico-geotermica del Monte Amiata, considera il degassamento da:

- emissioni gassose
- acquiferi vulcanici e carbonato-evaporici
- sistemi geotermici.

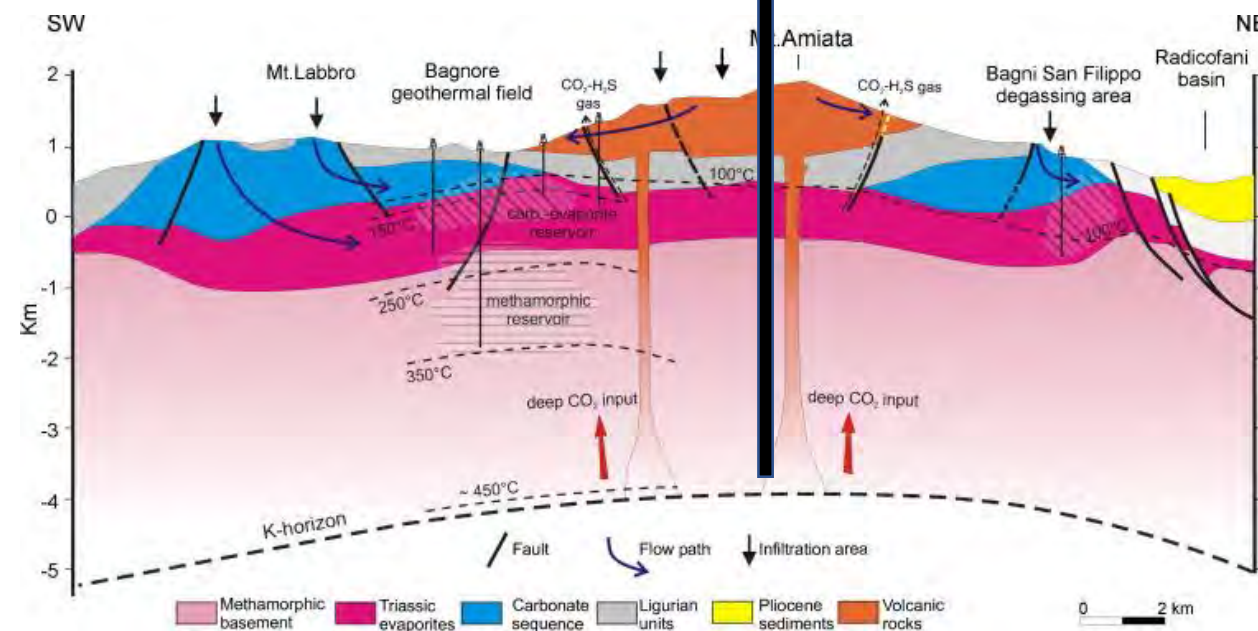
CO₂ totale rilasciata: 347 600 tons/anno



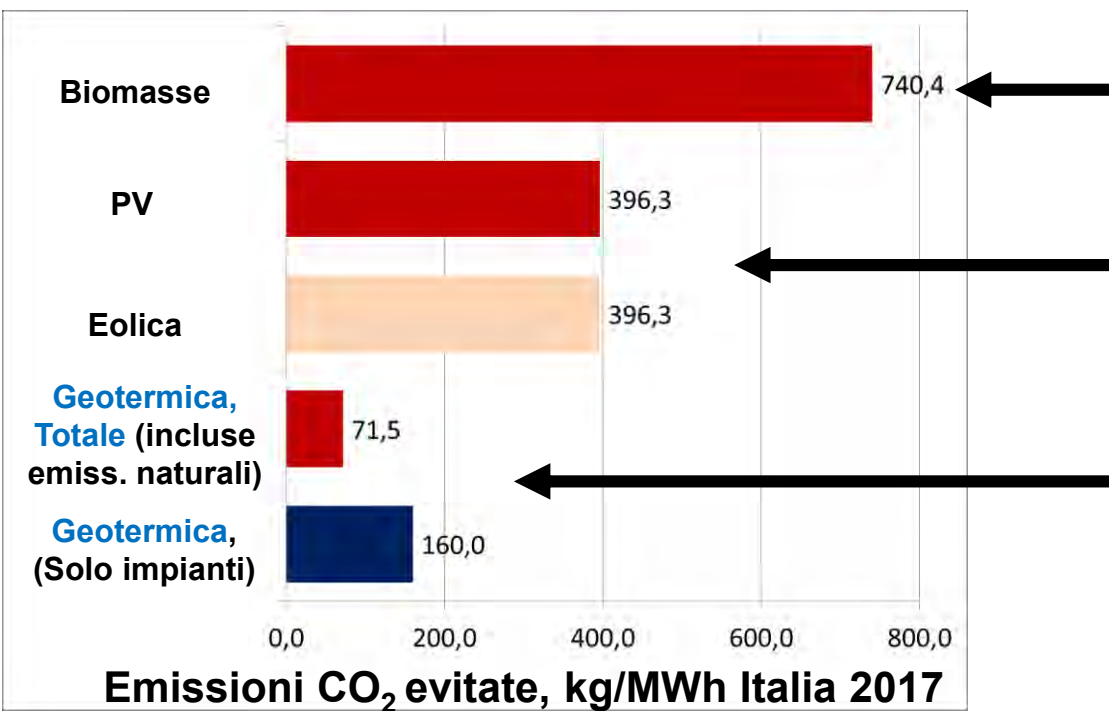
CO₂ naturale: 92 400 tons/anno



CO₂ da pozzi geotermici profondi: 255 200 tons/anno



Riduzione Emissioni inquinanti grazie all'utilizzo dell'energia GEOTERMICA: Esempio riscaldamento emissioni GHG con fattore PES GEO



Ulteriori risparmi derivanti dalla produzione di calore da biomassa rispetto all'eolico e al fotovoltaico, zero emissioni di CO₂

Solo produzione di energia elettrica, zero emissioni di CO₂

Impatto delle emissioni fuggitive di CO₂ - minore effetto evitato

Altri gas serra (CO₂, N₂O, CH₄ etc.)

	CH ₄	N ₂ O
Rinnovabili e biocombustibili	kg evitati/GWh elettrico	kg evitati/GWh electric
<i>Energia geotermica</i>	-2367	5,058
<i>Energia Eolica</i>	22,38	4,955
<i>Solare fotovoltaico</i>	22,38	4,955
<i>Biocombustibili solidi primari</i>	41,79	9,246

Impianti geotermici: casi studio italiani in GEOENVI (Bg3, Bg4, Castelnuovo)

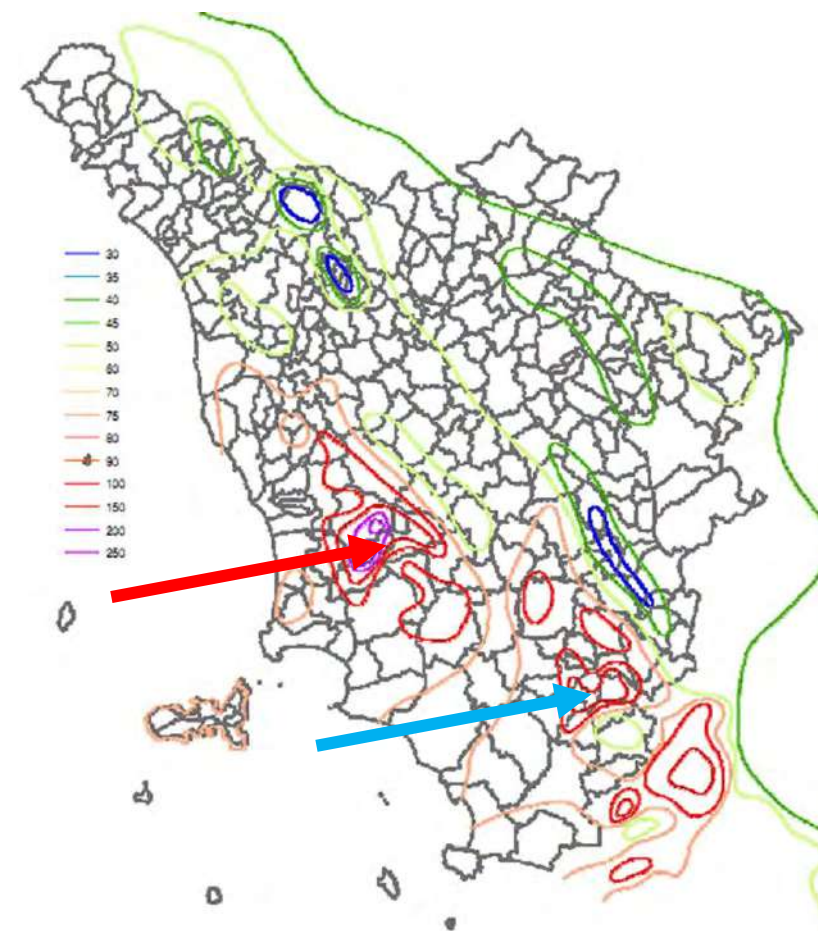
Definizione dei casi studio per l'Italia

❖ Analisi LCA di dettaglio:

- Casi con dati operativi disponibili, impianto flash con **trattamento NCG** e **abbattimento di Hg, H₂S (AMIS) e NH₃ (ENEL GP)** Bagnore 3 e 4
- Progetto pilota **Castelnuovo**, (EU *GECO*) **5MW "closed loop"** per la **produzione combinata di energia elettrica e termica**, progettato per **l'emissione zero di NGC e vapore** in atmosfera, e studio prospettico a **basso impatto ambientale**: Ciclo di alimentazione (bassa incertezza, dati di progetto disponibili), pozzi (in base alle previsioni), composizione del fluido (in base alle previsioni).

❖ Modelli semplificati sviluppati con ARMINES, casi studio, progetti pilota **RETE GEOTERMICA**

- ❖ Casa del Corto, Lucignano, Poggio Montone

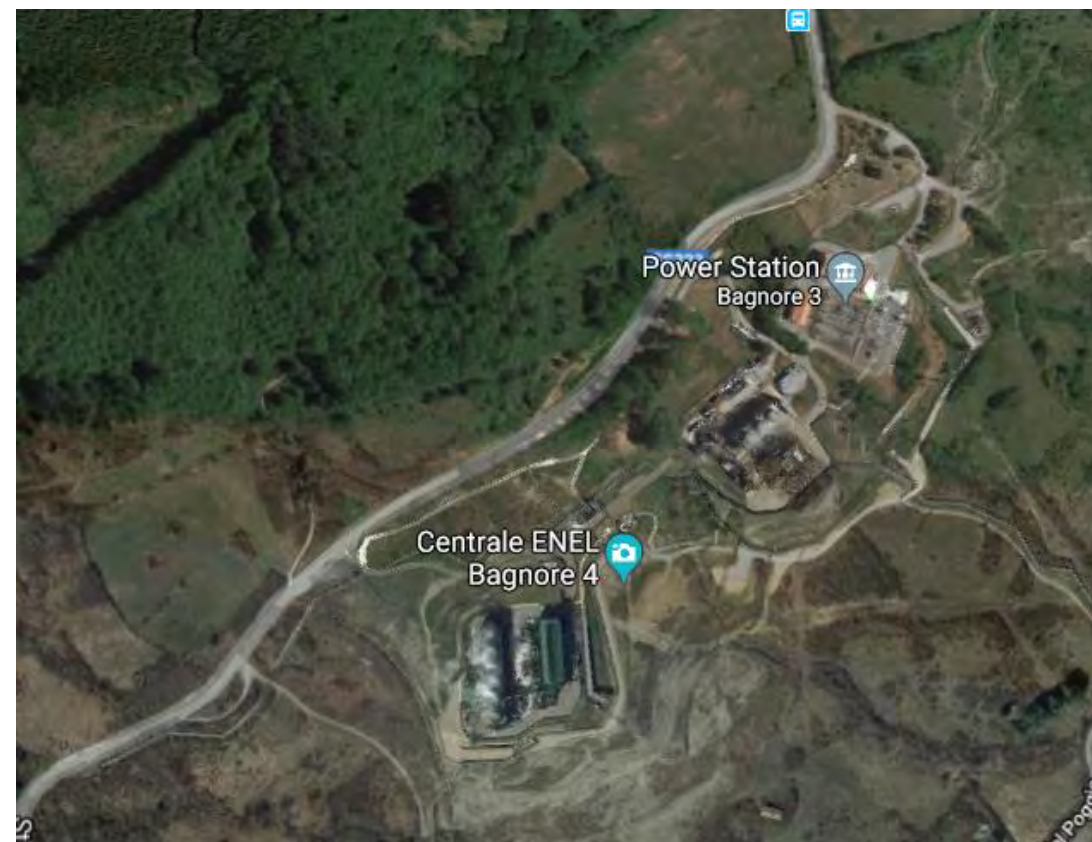


Bagnore 3 e 4, Monte Amiata: impianti geotermici operativi

Il Monte Amiata è un vulcano spento di 1738 m di altezza situato nel sud della Toscana. **La zona è molto ricca di minerali contenenti mercurio**, che era estratto in passato. **Il gradiente geotermico in questa zona è molto elevato e varia da 100 a 250 °C/km**. Il campo geotermico del Monte Amiata è ad **acqua dominante** ad alta temperatura.

❖ Analisi LCA di dettaglio:

- **Impianto combinato flash e binario (Bagnore 3 e 4)**
- **Produzione di energia elettrica**





Bagnore 3 e 4: dati operativi

<u>Denominazione</u>	Anno di Implementazione	Tipologia d'impianto	Potenza installata, MWel	Produzione elettrica annua, MWh (2016)
Bagnore 3	1998	Single flash	20	158.257
Bagnore 3 bottoming ORC	2013	Binario	1	5.419
Bagnore 4	2014	Single flash	2 x 20	167.813/169.169

<u>Composizione del Geofluido</u>		
Acqua/vapore	87-97 %	
NCG	6-12 %	
	CO ₂	87-97%
	H ₂ S	0.4 – 4.5 %
	altri	...

Problemi di qualità dell'aria - riduzione delle emissioni con impianto AMIS e NH₃

Ci sono 2 flussi emissivi in aria:

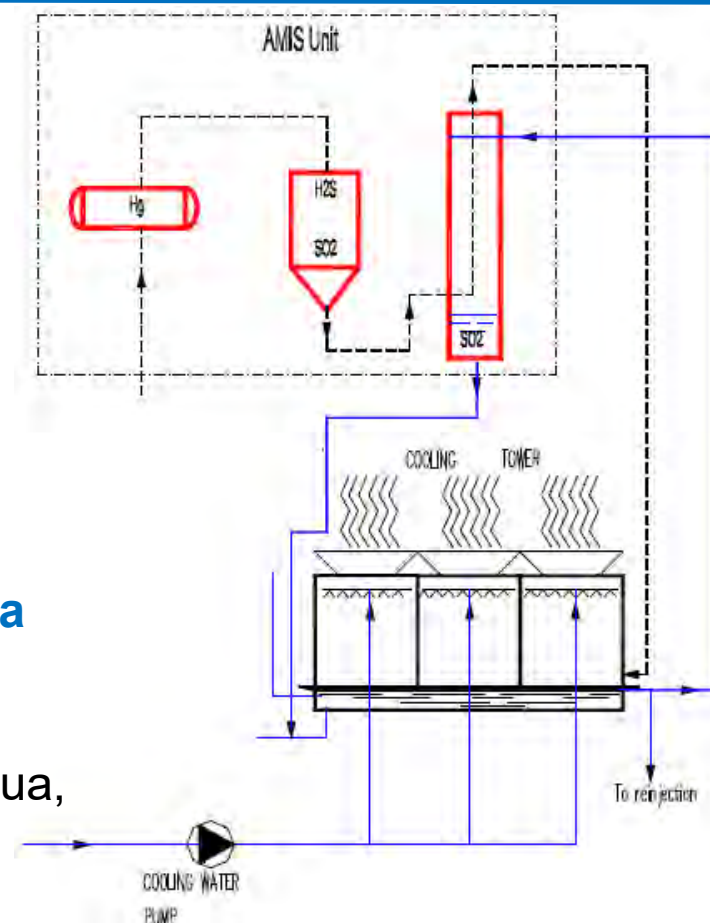
Dopo l'AMIS (emissioni primarie)

La tecnologia **AMIS** consiste in **3 passi** principali:

- i) **Rimozione Hg** - letto assorbente fisso;
- ii) **Rimozione H₂S** mediante ossidazione selettiva -> **H₂S** viene convertito in **SO₂**
- iii) **Riassorbimento dell'SO₂** da parte del geofluido

Unici al mondo che propongono su **larga scala l'abbattimento di H₂S ed Hg** dalla **geotermia** (ex **NO** Islanda, Messico, Nuova Zelanda, Martinica ...)

Torri di raffreddamento (emissione secondaria): **H₂S** e **l'NH₃**, molto solubili in acqua, si trovano **principalmente nella fase acquosa**, e sono **trasportati in atmosfera** attraverso **l'air stripping** e il **drift** (trascinamento gocce) dalle **torri**



Effetto AMIS	H₂S in, kg/h	H₂S out, kg/h	Hg in, g/h	Hg out, g/h	As out, g/h	NH₃ (ingresso collettore pozzi), kg/h	NH₃ (uscita da impianto acidificaz., soluz. Liquida), kg/h
Bagnore 3	141.5	7.03	>10	0.94	1.2	158	38.5
Bagnore 4	138.3/138.6	6.85/6.91	>20	0.98/1.19	1.58/1.75	176.1/185	27.1/24

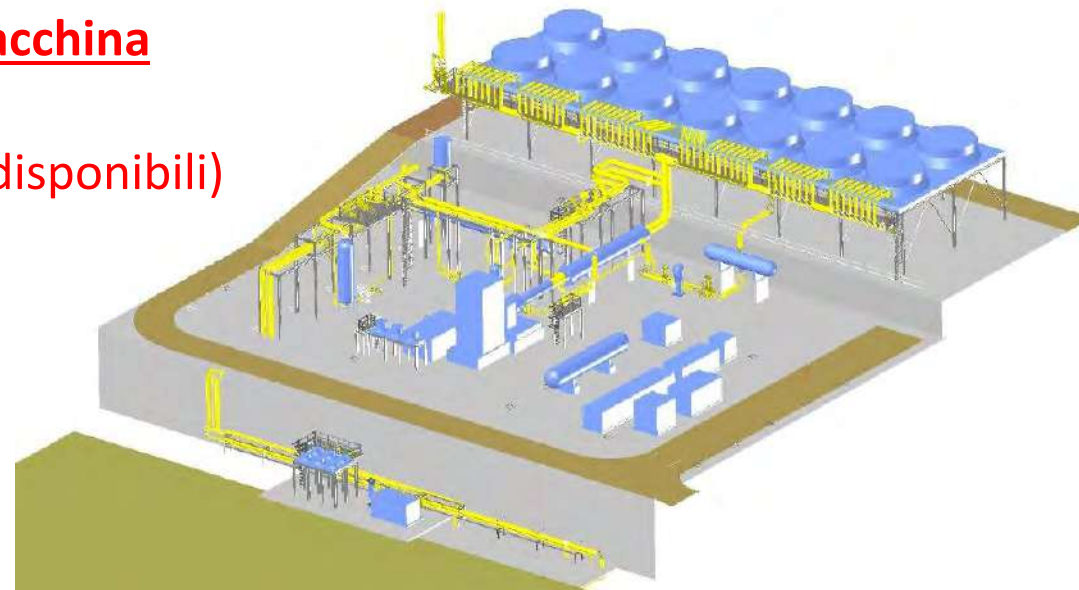
Impianto Pilota di Castelnuovo (progetto GECO)

❖ LCA dettagliata:

- Produzione combinata di elettricità e calore (CHP)
- «emissioni zero» di NCGs e vapore in atmosfera
- Ciclo chiuso binario ORC, fluido geotermico NON in macchina

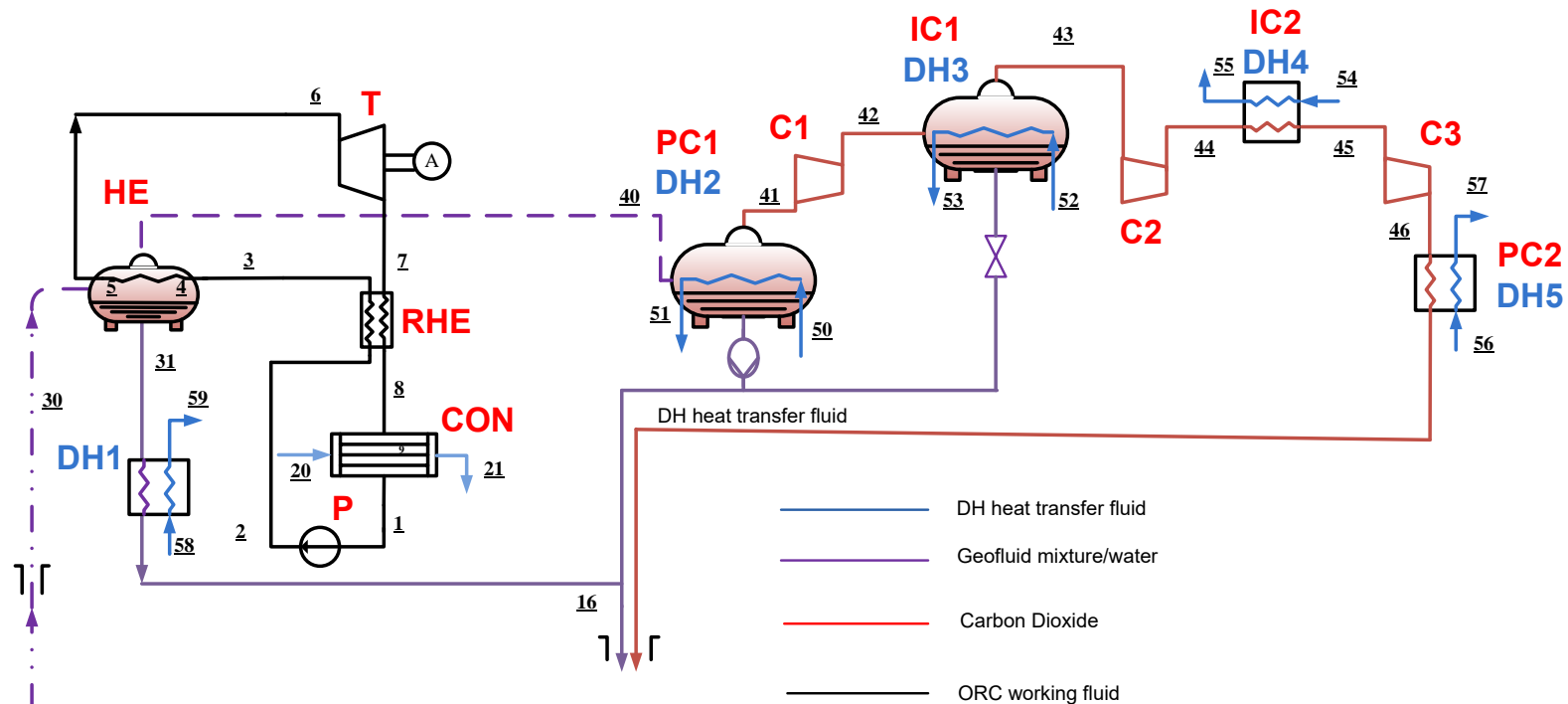
❖ Dati d'ingresso

- Ciclo termodinamico (bassa incertezza, dati di progetto disponibili)
- Pozzi (dati di progetto)
- Composizione del Geofluido (dati di progetto)



Castelnuovo: dati progetto

Temperatura	180	°C
Pressione	10	bar
Portata	18	kg/s
Operatività annuale	92	%
Potenza elettrica lorda	6452	kWe
Pompa dell'ORC	562	kWe
Compressore NCG*	268	kWe
Condensatore	375	kWe
Consumo ausiliari	60	kWe
Perdite di trasformazione	7	kWe
Potenza elettrica netta	5180	kWe



Composizione Geofluido

Acqua (vapore)	92%
NCG	8%
CO ₂	97.5%
H ₂ S	2%
Altri	0.5%

La **Produzione di calore** nell'impianto pilota di **Castelnuovo** può provenire da:

- Raffreddamento delle brine liquide prima della reiniezione (DH1)
- Recupero di calore dal flusso di reiniezione del gas compresso (Precooler, 2 intercoolers, Post-cooler; DH2-5)
- Ogni flusso presenta un diverso costo economico/ambientale, che può essere calcolato con un approccio economico-ambientale ed exergo-economico

Legge 313: Disposizioni

7 ter. nella prospettiva di un sistema di economia circolare, è necessario prevedere che tutti i concessionari delle risorse geotermiche assicurino l'impiego dell'energia termica derivante dall'attività dell'impianto nella misura di almeno il 50 per cento di quella prodotta annualmente, nonché l'utilizzo della CO₂, in una percentuale pari ad almeno il 10 per cento di quella emessa dagli impianti di produzione di energia geotermoelettrica;

Utilizzo calore e recupero CO₂

7 quinquies. al fine di impiegare il calore, nonché di utilizzare la CO₂ prodotta dagli impianti geotermoelettrici, è necessario garantire la possibilità di ammortamento degli eventuali investimenti tenendo conto dell'esiguo termine di durata residua delle concessioni geotermoelettriche esistenti, stabilito ai sensi dell'articolo 16, comma 10 del d.lgs. 22/2010;

Possibili incentivi al recupero calore e CO₂ (sotto forma di ammortamento)

7 septies. è necessario che il bando di gara preveda la possibilità, per il nuovo concessionario, di condurre l'attività di impiego del calore e di sfruttamento della CO₂ derivante dall'impianto geotermico, previo compenso al concessionario uscente commisurato al valore degli impianti a tal fine realizzati ed esistenti, secondo le modalità indicate dall'articolo 9, comma 2 del d.lgs. 22/2010;

Valorizzata la Continuità operativa

Legge 313: rilascio autorizzazioni

1. Il rilascio di autorizzazioni per nuove centrali nell'ambito delle concessioni esistenti, o di nuove concessioni per media o alta entalpia è subordinato alla dimostrazione, nell'ambito del progetto presentato ai fini del rilascio dell'autorizzazione:

a) dell'utilizzo delle migliori tecnologie, al fine di limitare le ore di non funzionamento delle centrali geotermoelettriche e dei relativi impianti di abbattimento delle emissioni che generano emissioni di gas inquinanti non controllate, a non più del 2 per cento del totale delle ore di funzionamento annuo;

Mirata a limitare le emissioni

b) della implementazione di un sistema di monitoraggio della qualità dell'aria presso i ricettori sensibili, finalizzato a monitorare l'acido solfidrico in continuo e, con campagne stagionali, il mercurio, l'arsenico, il boro, l'ammoniaca;

Monitoraggio in continuo H₂S

Monitoraggio stagionale Hg, As, B, NH₃

c) di un monitoraggio in continuo, con possibilità di accesso in remoto da parte della Regione, dell'autorità sanitaria locale e dell'Agenzia regionale per la protezione ambientale della Toscana (ARPAT), del funzionamento di tutti gli impianti, con particolare riferimento alle emissioni in atmosfera, al fine di assicurare il rispetto di quanto stabilito alle lettere a) e b);

Accesso remoto ARPAT a Monitoraggio in continuo

Legge 313: rilascio autorizzazioni

b) del corretto inserimento paesaggistico della centrale nel territorio interessato e del recupero del collegamento con gli inserimenti di altre centrali esistenti, se alla stessa collegabili, dando conto degli specifici interventi volti a promuovere l'attuazione degli obiettivi generali relativi alle invariante strutturali del piano di indirizzo territoriale (PIT) avente valenza di piano paesaggistico regionale, attraverso concrete applicazioni progettuali, nonché dei progetti locali volti a dare concreta attuazione agli obiettivi di qualità dei singoli ambiti. Ciò anche attraverso la presentazione, in allegato all'istanza, di una specifica proposta di progetto di paesaggio, avente i contenuti di cui

Integrazione e aspetti paesaggistici (PIT)

Cogenerazione locale

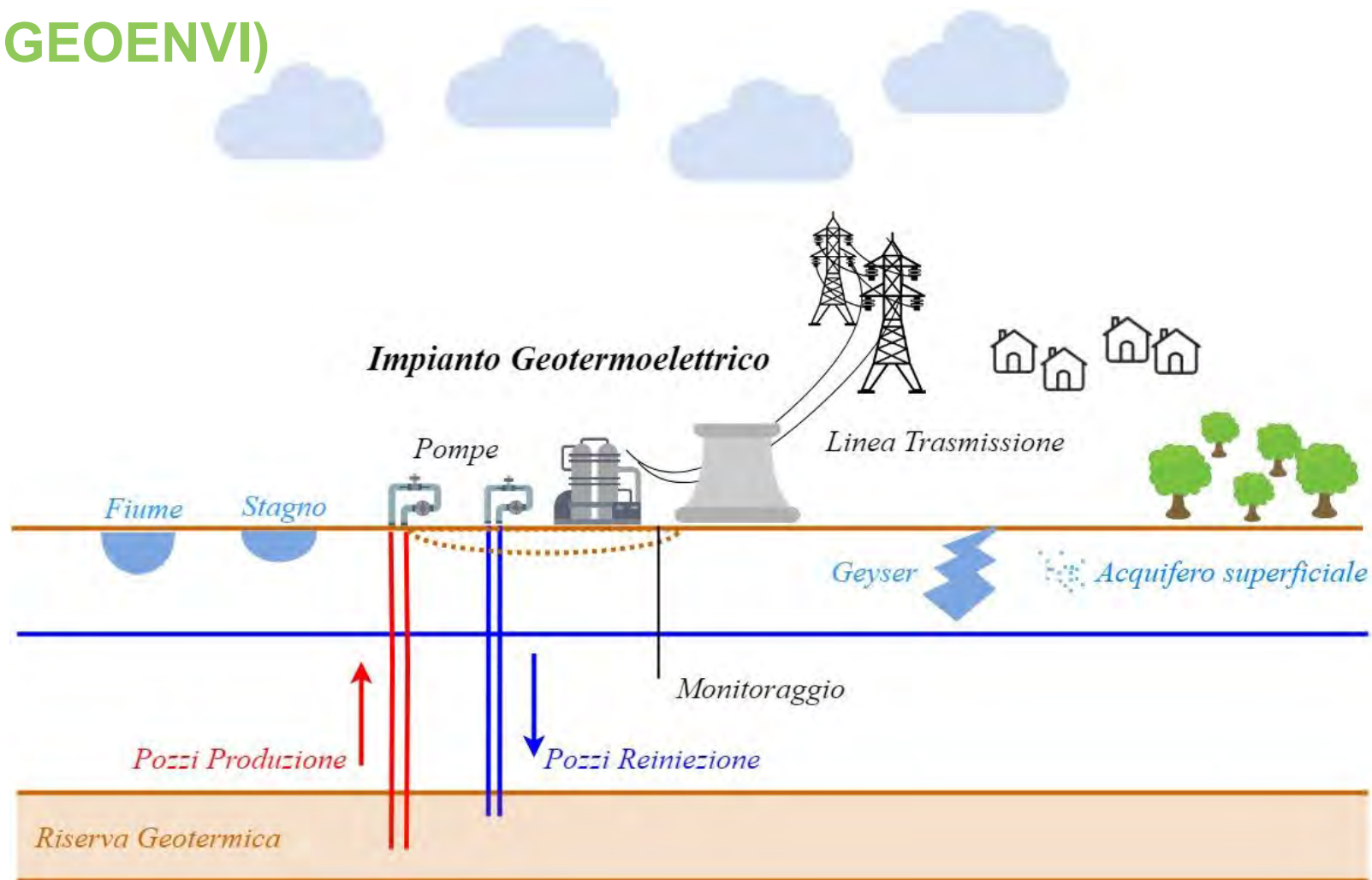
1) la previsione di iniziative volte ad un impiego dell'energia termica a favore del sistema economico locale o di progetti di teleriscaldamento, in una percentuale pari almeno al 50 per cento di quella prodotta annualmente;

Gestione emissioni CO2

2) l'impegno alla utilizzazione, in una percentuale pari ad almeno il 10 per cento dell'anidride carbonica (CO2) emessa dalla centrale, in applicazione dei principi propri dell'economia circolare.

Raccomandazioni (obiettivo GEOENVI)

- Perseguire la strada della **LCA** per la **valutazione** degli aspetti misurabili **dell'impatto ambientale** della geotermia
- **Integrazione dell'analisi exergoambientale** per l'allocazione delle categorie d'impatto ai componenti impiantistici e a situazioni con elettricità e calore
- Introdurre **altri metodi** di valutazione degli effetti ambientali per aspetti **difficilmente misurabili**



Fonte: P. Bayer et al., Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 26, 446-463