

GeoThermExpo 2010 - Ferrara, 22 settembre 2010

Caratterizzazione di risorse geotermiche a moderata temperatura per la progettazione di impianti di potenza

M. Vaccaro, A. Franco, C. Casarosa

Dipartimento di Energetica "L. Poggi" - Università di Pisa

Largo Lucio Lazzarino, 2 – 56126 PISA

email: maurizio.vaccaro@for.unipi.it



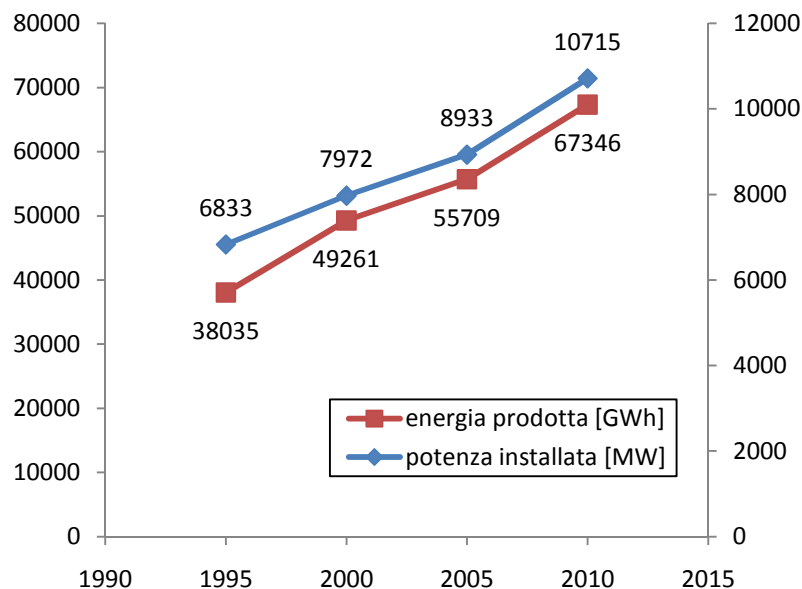
Sommario

- Introduzione
- Caratterizzazione della risorsa geotermica
 - proprietà e parametri termofisici di fluido geotermico e acquifero
 - risorse geotermiche a moderata temperatura (ricadute tecnologiche)
 - osservazioni
- Problematiche tecnologiche
 - scaling e strategie di reiniezione
 - ORC – temperature moderate
- Simulazione numerica e ingegneria di serbatoio
 - Obiettivi: sostenibilità tecnologica ed ambientale del sistema impianto-serbatoio geotermico; corretta strategia di sfruttamento del serbatoio geotermico
 - Limitazioni della modellazione numerica
- Conclusioni

Introduzione

La fattibilità e la sostenibilità tecnologica di un impianto geotermico non possono prescindere da un'accurata fase di indagine concettuale e sperimentale e di simulazione del “comportamento” del serbatoio (in configurazione “imperturbata” e in seguito allo sfruttamento della risorsa).

- Obiettivi fondamentali della simulazione numerica:
 - set di dati fisici e geologici per la **valutazione del potenziale geotermico** e della sostenibilità dello sfruttamento
 - set di parametri termofisici per la **progettazione** ottimizzata dell'impianto di potenza
- Limitazioni: dipende fortemente dall'affidabilità e dall'accuratezza dei dati in ingresso; modelli stabili numericamente possono non essere necessariamente fisicamente consistenti.

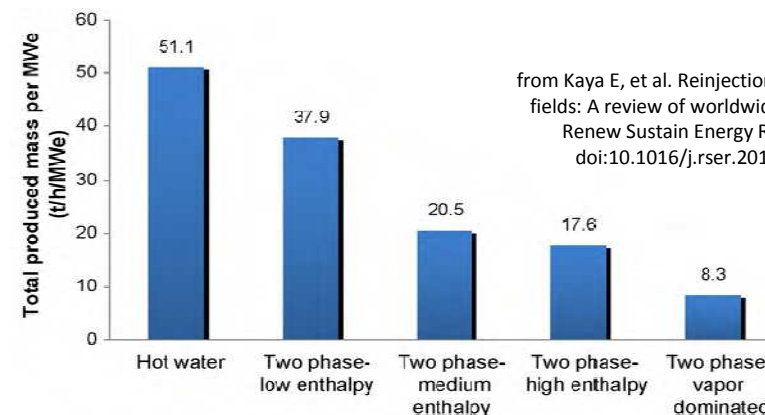


impianti a ciclo binario nel mondo

numero impianti	> 200
potenza installata [MW]	> 1150
energia prodotta [TWh]	> 6

Geotermia in Italia

potenza installata 737 MW
energia prodotta circa 5,3 TWh



from Kaya E, et al. Reinjection in geothermal fields: A review of worldwide experience. *Renew Sustain Energy Rev* (2010), doi:10.1016/j.rser.2010.07.032

Caratterizzazione della risorsa geotermica

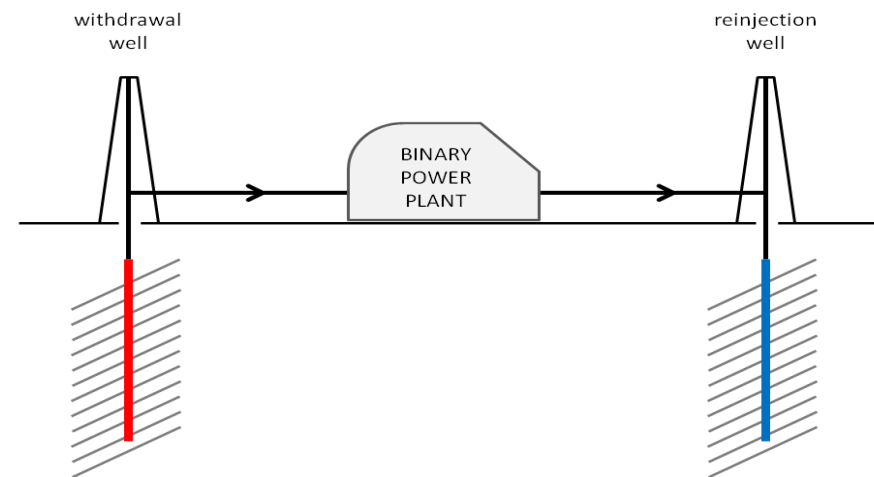
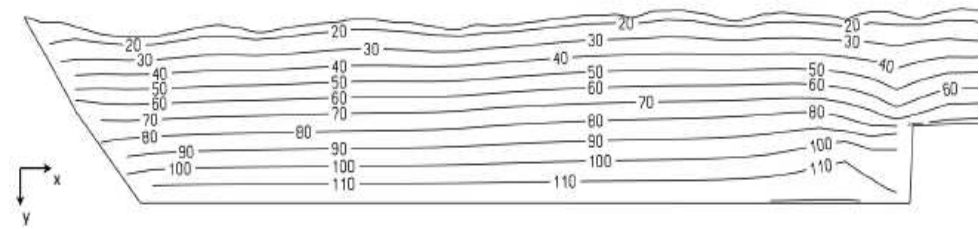
Grandezze da cui dipende una conoscenza globale del sistema
serbatoio – fluido – impianto

Fattori geologici – geofisici

- ✓ distribuzioni spaziali di temperatura, calore specifico, pressione, quota piezometrica di fluido
- ✓ estensione spaziale del campo geotermico, individuazione delle aree di ricarica naturali
- ✓ porosità totale ed effettiva
- ✓ modello di permeabilità e circolazione del fluido
- ✓ fase/i del fluido geotermico e parametri termofisici
- ✓ caratteristiche chimiche del fluido geotermico (salinità, aggressività chimica)

Fattori tecnologici

- ✓ tecnologie di prospezione e individuazione dell'acquifero
- ✓ tecniche di perforazione e di estrazione del fluido
- ✓ tecnologia di conversione energetica utilizzata (fattori di conversione, di utilizzazione)
- ✓ sistemi di trattamento delle acque residue
- ✓ strategia di reiniezione



Valutazione del potenziale geotermico

Stato dell'arte: osservazioni generali

Non esiste una metodologia di valutazione condivisa, assodata ed utilizzata in maniera generale da tutti, esistono però concetti e metodi ritenuti basilari ed affidabili a cui rifarsi. Spesso gli autori si sono occupati di specifiche regioni geografiche di interesse, trascurando l'elaborazione di tecniche d'indagine generali.

È fondamentale non solo stimare la risorsa "di base", ma anche valutare quanto della risorsa può essere estratta e sfruttata secondo favorevoli condizioni economiche.

Requisiti e proprietà principali per la valutazione positiva di una certa risorsa geotermica (per usi elettrici o diretti)

- temperatura ed energia termica del serbatoio sufficienti per garantire elevati rendimenti e una lunga "vita utile" dell'impianto
- disponibilità di siti in cui effettuare la reiniezione in maniera corretta e sostenibile
- evitare fenomeni di corrosione e scaling
- elevata permeabilità della roccia, per garantire una buona produttività dei pozzi
- accessibilità stradale favorevole e vicinanza alla rete di trasmissione elettrica

Principali tecniche d'indagine ordinati per livello crescente di dettaglio e complessità

- Metodi del primo ordine
- Valutazione statistica
- Simulazione numerica

elaborazione di un modello che comprenda

1. Geologia e struttura del serbatoio
2. Geometria dei pozzi e delle fratturazioni
3. Condizioni idrauliche, termiche, meccaniche e chimiche (HTMC)

principali software utilizzati:

- TOUGH2 (<http://esd.lbl.gov/TOUGH2/>) e relative interfacce grafiche commerciali (Petrasim, <http://www.rockware.com/>)
- FEFLOW (<http://www.feflow.info/>)

Caratterizzazione della risorsa geotermica

- **Multidisciplinarietà del problema**

Una corretta e completa interpretazione del “ciclo di vita” e delle caratteristiche del serbatoio geotermico necessita di una fase di **interconnessione** dei diversi settori disciplinari di solito in campo (geologia, geofisica, ingegneria).

Questa interazione è fondamentale per attuare una pratica industriale più attenta all'**ottimizzazione** e alla **sostenibilità** nell'uso della risorsa geotermica.

- **Realizzazione del modello numerico di un serbatoio geotermico**

Strumento importantissimo per chi deve prendere decisioni operative per la produzione di energia da un certo campo geotermico.

Appare evidente che nella realizzazione di questo strumento debbano prendere parte persone esperte in diversi settori: scienze della terra, ingegneria, termodinamica, informatica.

Il modello deve essere sempre preceduto da una corretta interpretazione dell'idrogeologia e della geochimica della zona di interesse.

*Fondamentale è la calibrazione del modello allo **stato "imperturbato"** del sistema roccia-fluido.*

*Successivamente si possono simulare diverse **condizioni di sfruttamento** ed individuare la più corretta **strategia di reiniezione**.*

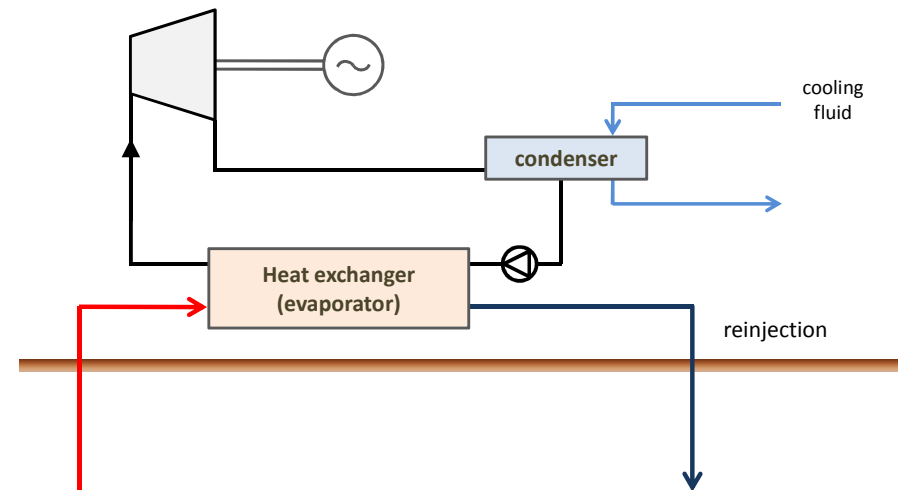
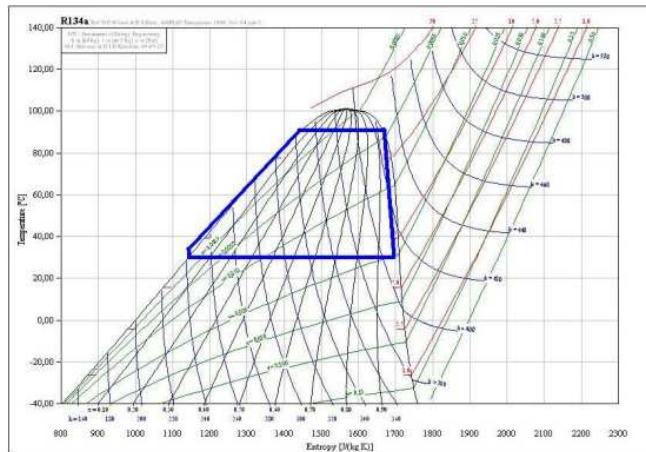
Problematiche tecnologiche: cicli binari – temperature moderate



- **ORC e Kalina** : tecnologie di riferimento per i serbatoi a $T < 150\text{ °C}$
- L'attenzione viene sempre più rivolta a giacimenti a **temperature inferiori**
- Le prestazioni degli impianti ORC sono fortemente condizionate da ΔT e **portata**



- Il ΔT di progetto dello scambiatore è un parametro limitante al diminuire della T di estrazione del fluido
- La **T di reiniezione** è un parametro molto importante; è limitata inferiormente dai fenomeni chimici di **scaling** e **corrosione** nelle parti dell'impianto a contatto col fluido geotermico "raffreddato"



- Una **proposta tecnologica** interessante è la progettazione "**standardizzata**" di impianti ORC, in cui si tenga conto dei problemi citati, e si cerchi di sfruttare le entalpie in gioco in un determinato campo in maniera da realizzare applicazioni "**modulari**" per i potenziali campi geotermici.
- Come per altre fonti energetiche rinnovabili (soprattutto l'eolico), un processo di standardizzazione strettamente collegato alla caratterizzazione caso per caso della risorsa geotermica, potrebbe consentire applicazioni più efficienti e competitive

Effetti negativi di una mancata o non corretta caratterizzazione della risorsa

*Una mancata o errata caratterizzazione della risorsa presente in una certa zona può avere conseguenze molto gravi sulla **produttività** dell'impianto di produzione di energia, sulla **"rinnovabilità"** e sulla sostenibilità della risorsa*

- ❑ Mancato ripristino nel tempo della risorsa in termini di temperatura, pressione e quota
- ❑ Cambiamenti nello stato chimico del fluido (maggiore scaling, corrosione di parti dell'impianto)
- ❑ Intasamento dei pozzi di reiniezione per scaling
- ❑ Strategia di reiniezione errata (eccessivo raffreddamento del serbatoio, perdita di fluido)
- ❑ Effetti negativi sull'ambiente (inquinamento delle acque, delle falde, del suolo; subsidenza)

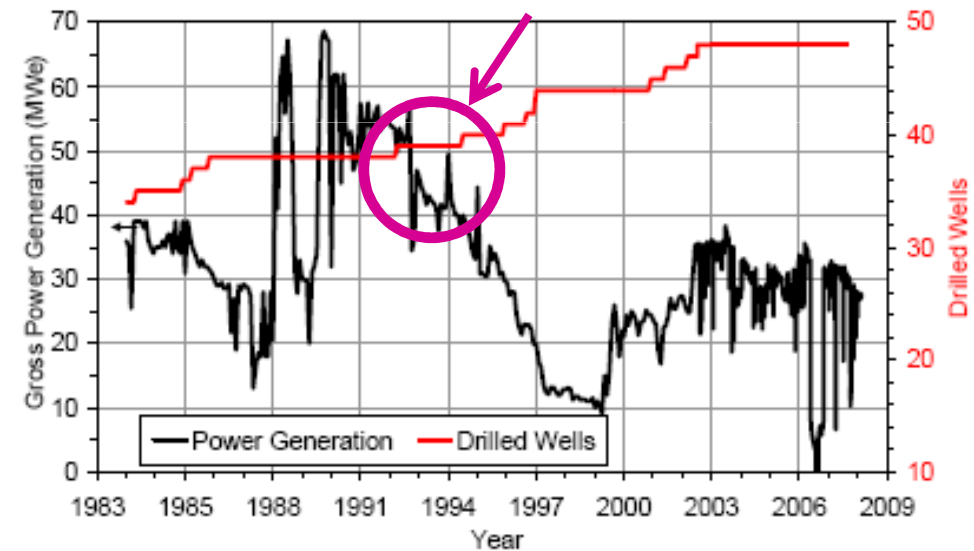
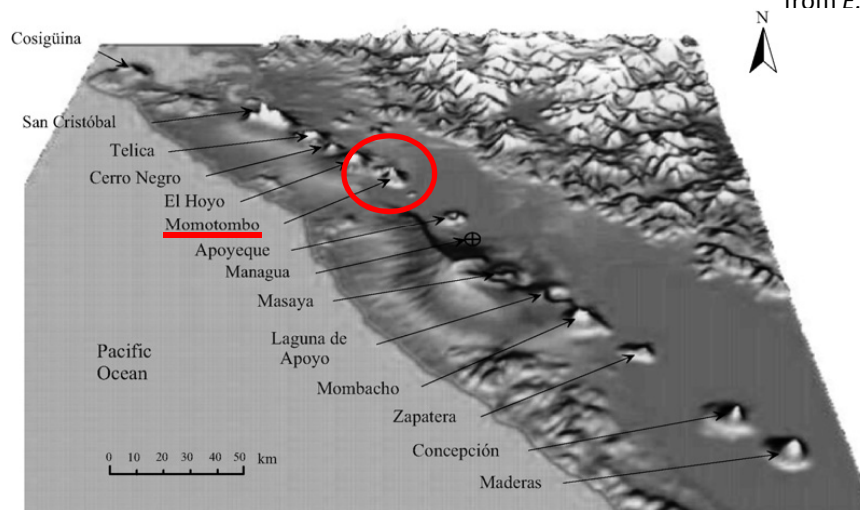
-
- Per comprendere meglio i metodi di caratterizzazione della risorsa è importante studiare le **casistiche** e le **storie di sfruttamento** di alcuni campi geotermici in uso e in osservazione da ormai moltissimo tempo.
 - Si ritiene interessante, a livello di ricerca, **sviluppare e ricreare modelli concettuali e numerici a partire dai dati storici di diversi campi** noti e studiati nel mondo.
 - Le tecniche di simulazione e l'ingegneria di serbatoio sono in una fase di notevole e continuo miglioramento, l'obiettivo è quindi quello di **non ripetere gli alcuni errori di previsione e caratterizzazione compiuti negli anni e documentati dai dati storici disponibili.**

Osservazioni - Effetti negativi di una mancata o non corretta caratterizzazione della risorsa

Importanza dell'analisi e dello studio delle "storie" di sfruttamento di diversi campi geotermici mondiali, delle tecniche di simulazione numerica adottate e delle strategie di produzione e reiniezione

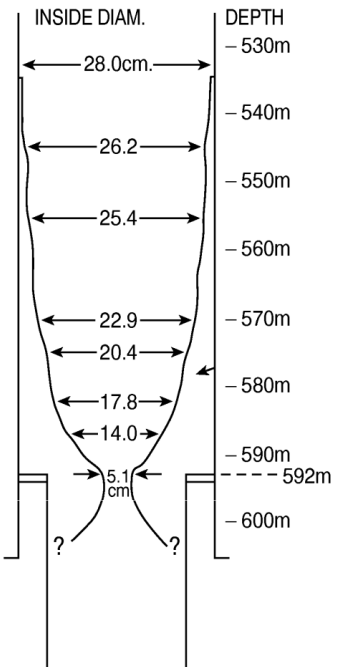
Momotombo reservoir (Nicaragua)

from E. A. Porras, G. Bjornsson, "The Momotombo Reservoir Performance upon 27 years of exploitation"

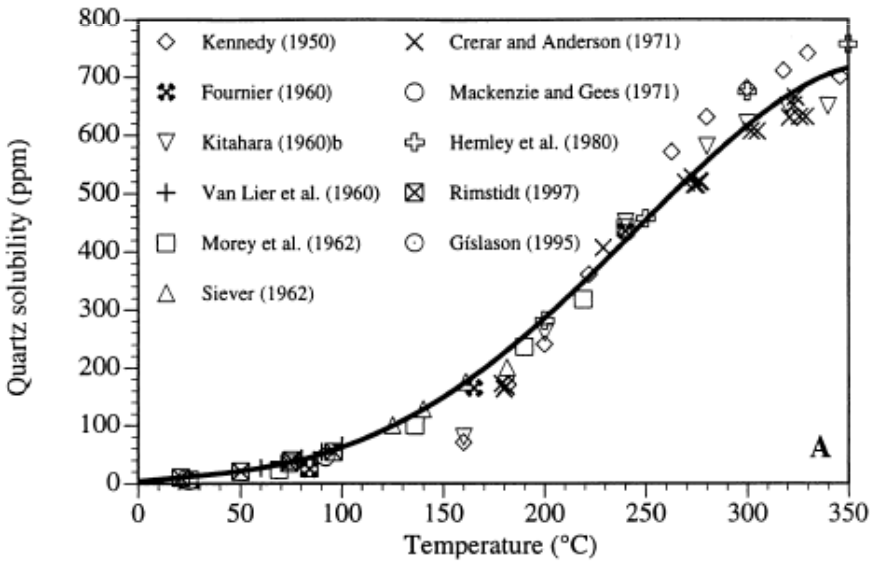
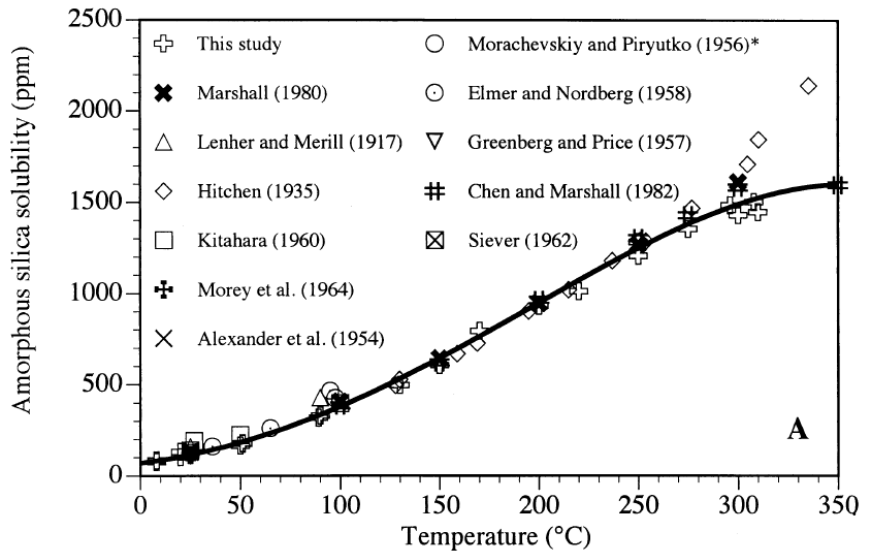


- prima unità single flash da 35 MW (1983); seconda unità da 35 MW nel 1989;
- calo sostanziale della produzione nel 1991, nel 1999 cala a 9 MW;
- dal 2000 si nota una ripresa dovuta alle operazioni di pulizia di calcite e alla cementazione di un pozzo; nel 2002 viene installata una unità ORC da 7 MW;
- **Situazione attuale:** 30 MW in produzione, 77 MW potenza installata; *mean well output* 0,75 MW/well rispetto a una media mondiale di 1,9 MW/well

Scaling e reiniezione



from "Computer Modeling for Geothermal Systems: Predicting Carbonate and Silica Scale Formation, CO2 Breakout and H2S Exchange", N. Møller, L. P. Greenberg, J. H. Weare



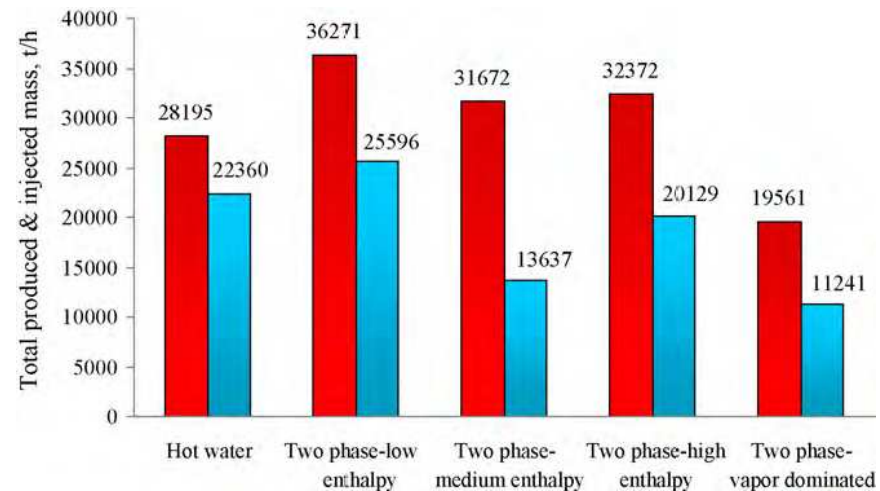
from "Amorphous silica solubility and the thermodynamic properties of H_4SiO_4 in the range of 0° to 350°C at P_{sat} ", I. Gunnarsson and S. Arnorsson

Scaling e reiniezione

- La **strategia di reiniezione** è la più importante questione nel progetto di un sistema geotermico.
- Non esiste una regola generale per il **siting** più corretto dei pozzi di reiniezione all'interno di un serbatoio geotermico. È un processo fortemente dipendente dalla particolare configurazione del sistema considerato.
- La **T di reiniezione** è strettamente collegata al livello di saturazione dei composti che possono precipitare e danneggiare o intasare le parti dell'impianto.
- I fenomeni di scaling e deposizione intervengono anche all'interno dei pozzi stessi (reiniezione), arrivando a volte a "tapparli" (fenomeno che può rivelarsi, nei casi peggiori, irreversibile)



(a) Total mass reinjection (t/h), more than 92000 t/h



(b) total mass production (red) and reinjection (blue), (t/h) for each type of geothermal system

Scaling e reiniezione – ricadute tecnologiche sulla risorsa geotermica a moderata temperatura

Temperatura di reiniezione



Parametro critico per la progettazione dell'impianto di produzione di energia. Una caratterizzazione non corretta della risorsa porterebbe a efficienze troppo basse e portate eccessive negli scambiatori

Limitata inferiormente dai limiti imposti dalla composizione chimica del fluido. Un eccessivo raffreddamento del geofluido porterebbe a livelli non accettabili di scaling e fenomeni corrosivi

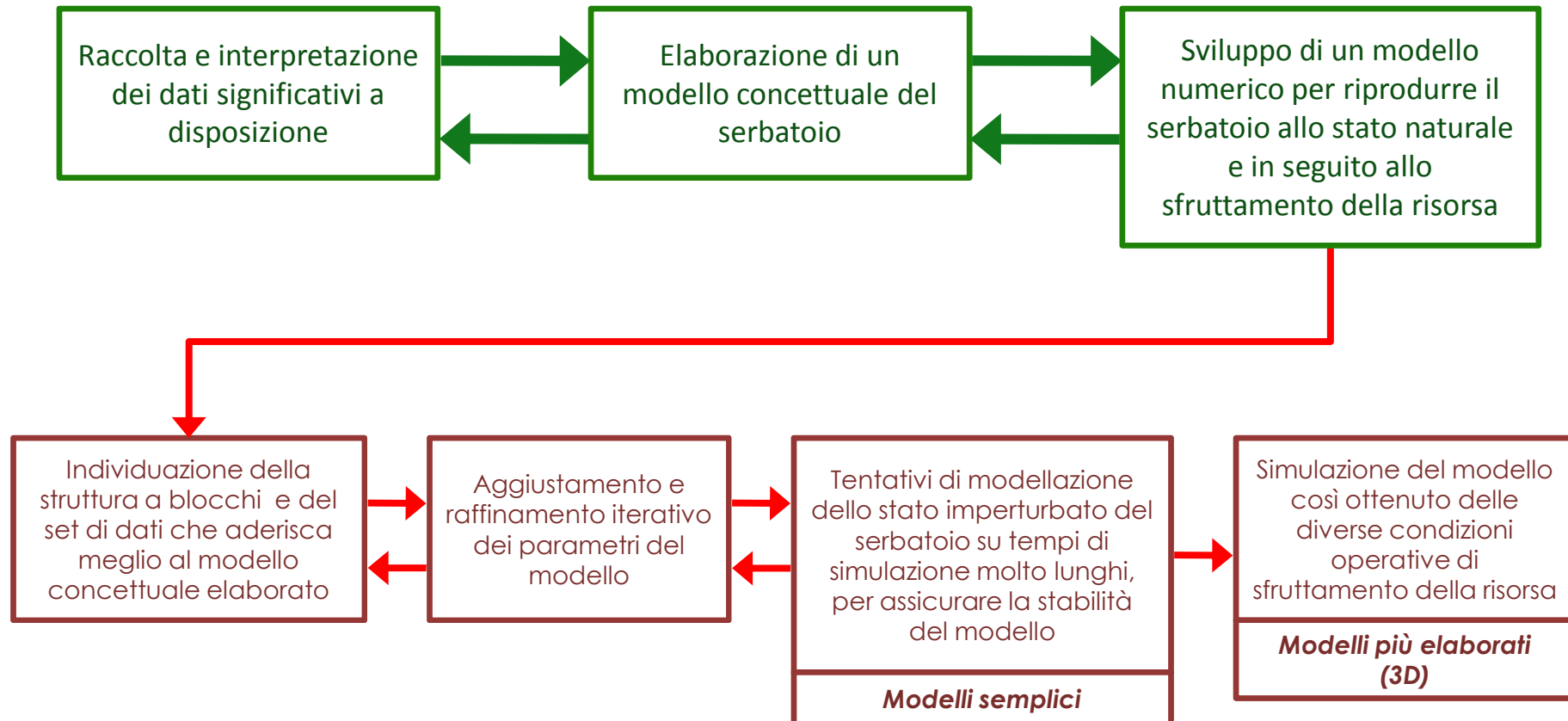
I **campi a medio-bassa temperatura** sono oggi di enorme interesse tecnologico, proprio perché si prestano all'installazione dei cicli binari.

I campi a medio-bassa temperatura **sono maggiormente diffusi nel mondo** di quelli a vapore o ad acqua dominante ad alta temperatura

Simulazione numerica e ingegneria di serbatoio

Modello concettuale delle procedure generali necessarie per la simulazione al computer di un serbatoio geotermico

(da P. Ungemach e M. Antics, "Insight into modern geothermal reservoir management practice", modificato)



Simulazione numerica e ingegneria di serbatoio

Dal punto di vista ingegneristico i risultati di una simulazione numerica devono contenere le informazioni necessarie alla progettazione e ottimizzazione dell'impianto che si decide di associare ad una certa risorsa.

Risultati fondamentali della simulazione numerica per la progettazione e all'ottimizzazione di un impianto a ciclo binario per risorsa geotermica a medio-bassa temperatura

- **Stabilità nel tempo della temperatura e della pressione del fluido**

distribuzione spaziale di temperatura e pressione nel dominio di calcolo considerato, per lo stato imperturbato del campo e per diverse configurazioni di sfruttamento industriale (es.: numero di pozzi, strategie di reiniezione diverse)

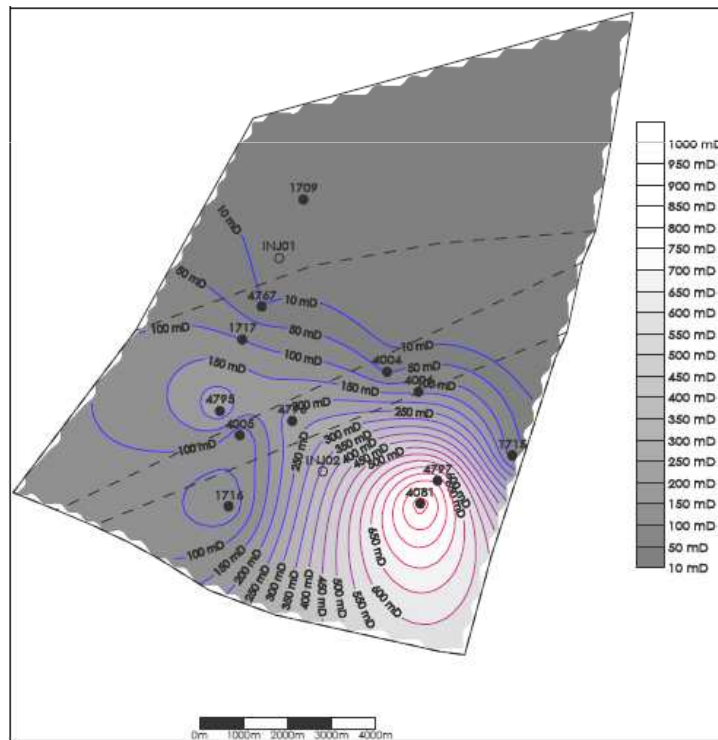
- **Comprensione dei fenomeni di scaling e corrosione in relazione ai dati disponibili sul chimismo del fluido geotermico**

la T minima di reiniezione, può essere stabilita anche attraverso modelli che accoppino alle equazioni di trasporto di massa e calore anche le equazioni di equilibrio chimico dei composti più critici.

È FONDAMENTALE CHE DAI RISULTATI DELLA MODELLAZIONE NUMERICA SI ESTRAGGANO DATI EFFETTIVAMENTE UTILI ALLA PROGETTAZIONE DELL'IMPIANTO DI POTENZA, GIACCHÉ APPARE EVIDENTE CHE ALCUNI RISULTATI DI UNA SIMULAZIONE POTREBBERO NON ESSERE DIRETTAMENTE UTILI AL PROGETTISTA. È MOLTO IMPORTANTE CHE CI SIA STRETTA INTERAZIONE TRA CHI ELABORA IL MODELLO E CHI PROGETTA LA STRUTTURA DI UTILIZZAZIONE DELLA RISORSA.

Alcuni limiti della simulazione numerica

- ❑ Deve essere ben chiaro quale sia il tipo di problema per cui si ricorre alla simulazione numerica, e se questa sia lo strumento più adatto, per non incorrere nel rischio di “chiedere troppo” ad uno strumento che potrebbe risultare “troppo” o “troppo poco potente”
- ❑ A parità di configurazione geologica reale i risultati finali della simulazione sono molto differenti se il set di dati di partenza ha una distribuzione più o meno dettagliata nello spazio.



from M. Antics, “Low enthalpy geothermal reservoir simulation”
Oradea (Romania) reservoir model

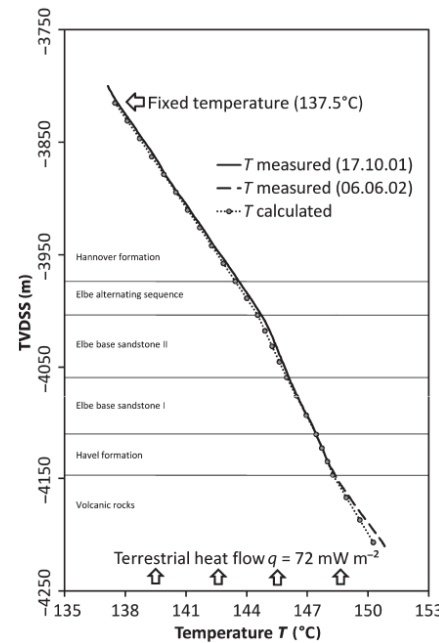
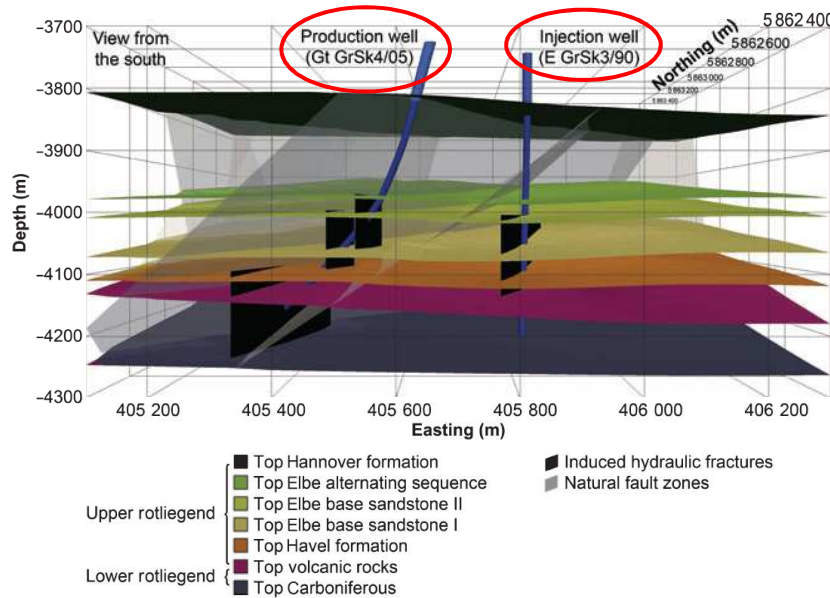
Il dettaglio con cui i dati fisici e idrogeologici di partenza sono distribuiti spazialmente nel modello influisce molto sul risultato. È chiaro che da una distribuzione di permeabilità dettagliata come quella in figura si otterranno risultati ben diversi da quelli che se si fosse assegnato a tutto uno strato del modello una unica permeabilità.

Modelli “a parametri concentrati”: per alcuni campi a medio-bassa temperatura, in strati litologici non eccessivamente spessi, questi modelli possono essere comunque soddisfacenti a dispetto di elaborazioni troppo sofisticate.

Esempi di applicazione della simulazione numerica del serbatoio

Simulazione del doppietto di pozzi geotermici (injection well E GrSk3/90 and production well Gt GrSk4/05) del serbatoio profondo di Groß Schönebeck (north of Berlin, Germany)

(from "3D numerical modeling of hydrothermal processes during the lifetime of a deep geothermal reservoir" - M. G. Blöcher et al.)



OSSERVAZIONI

Software utilizzato: Feflow

Profondità del serbatoio geotermico: 4050 – 4250 m

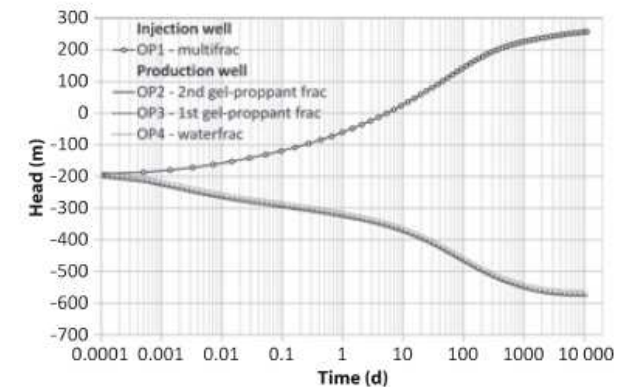
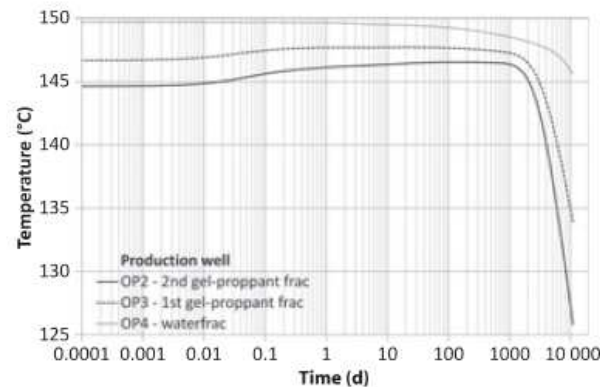
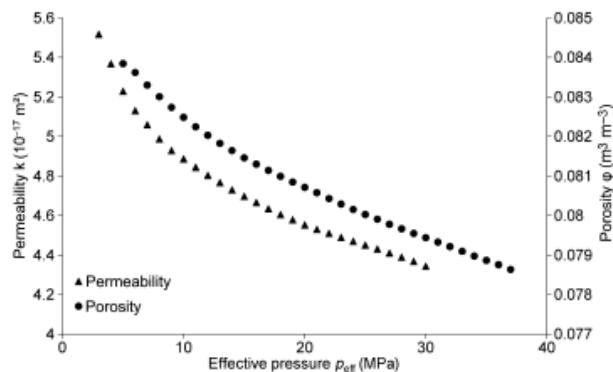
Condizioni che deve soddisfare il doppietto:

1. la pressione nel serbatoio durante la produzione non deve abbassarsi al di sotto di quella iniziale
2. minimizzazione dell'abbassamento della temperatura nel pozzo di produzione

La distanza tra i pozzi è 28 m in superficie ed arriva a circa 500 m nel serbatoio.

Nella simulazione viene prevista una T di produzione di 150 °C e una T di reiniezione di 70 °C.

Nei 30 anni di "vita" simulata del serbatoio la temperatura si abbassa di circa 19 °C.



Conclusioni

- ❑ Le tecniche di **esplorazione geotermica** e i metodi per la valutazione del potenziale geotermico di una certa zona sono di fondamentale importanza anche per le utilizzazioni a moderata temperatura
- ❑ Lo strumento della **simulazione numerica** del serbatoio geotermico consente di fare previsioni sugli esiti di **diverse configurazioni di sfruttamento della risorsa** e di elaborare **opportune strategie di reiniezione** del fluido geotermico
- ❑ Un'attenzione particolare va rivolta alla scelta del metodo di reiniezione che ottimizzi la **sostenibilità della risorsa geotermica** e la **durability delle sue caratteristiche** in funzione dell'utilizzazione energetica finale
- ❑ Lo **scaling** e la **corrosione** sono fenomeni inevitabili (le cui ricadute possono essere, però, controllate) e da cui dipende, generalmente, il limite inferiore delle prestazioni degli impianti di produzione di energia. Va tenuto ben presente che questi fenomeni nel caso di utilizzazioni a medio-bassa temperatura risultano più importanti che in quelle ad alta temperatura o per le utilizzazioni della geotermia "classica"
- ❑ La **progettazione degli impianti a ciclo binario** risente delle limitazioni ambientali e geologiche imposte dalle caratteristiche della risorsa geotermica (ΔT utile, limitazioni sulla portata). Questa "fragilità" progettuale e tecnologica può essere affrontata in seguito a una corretta fase di comprensione e simulazione del serbatoio considerato