

Sismicità in relazione all'attività geotermica

Claudio Chiarabba, INGV

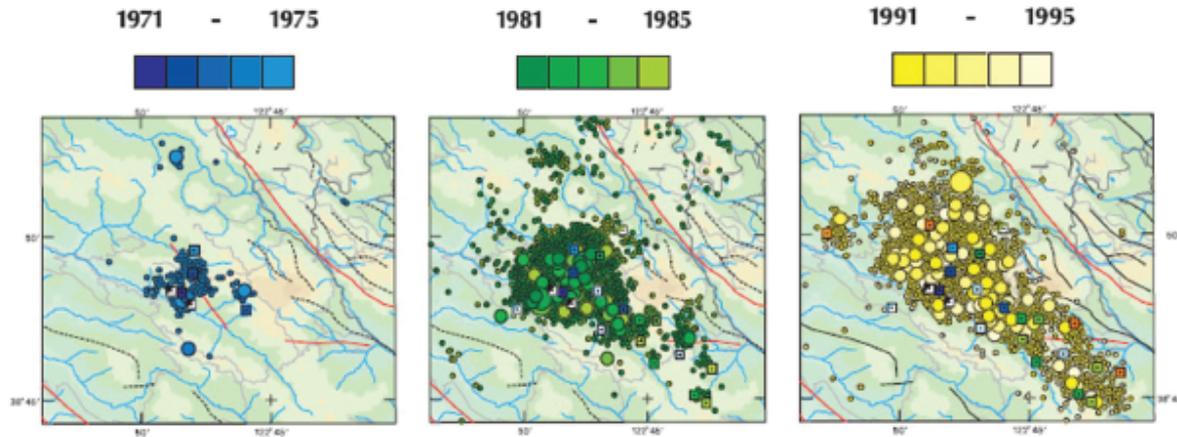
Terremoto è prodotto da variazioni di sforzo all'interno della terra

Naturali=variazioni di sforzo sono prodotte dal carico tettonico

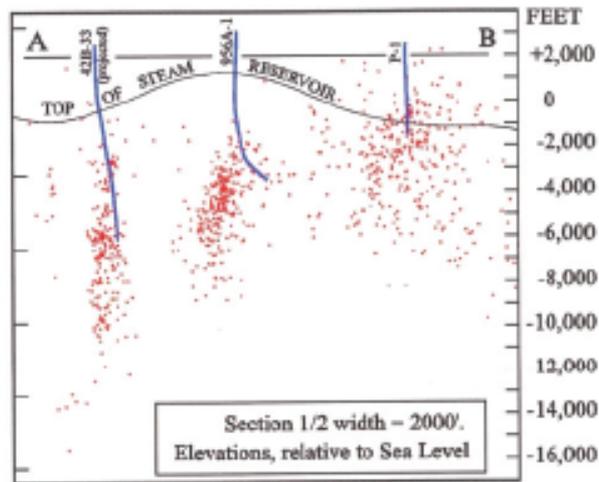
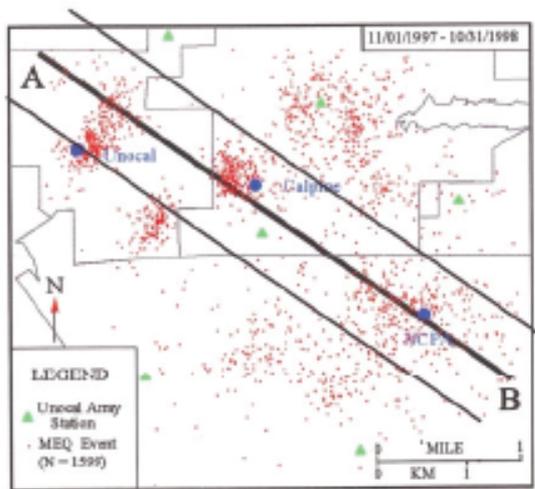
Indotti=variazioni di sforzo indotte da attività umane (es., variazioni di Pressione fluidi)

- Campi a vapore
- Campi a liquido dominante
- EGS (stimolazione di dry rocks)

The Geysers: Campo a vapore

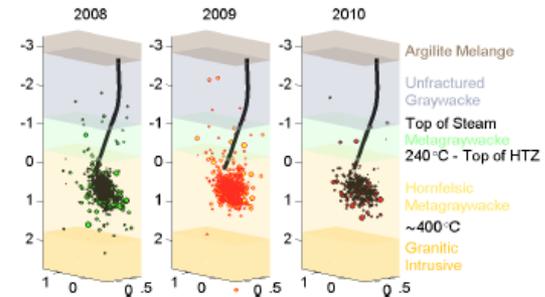
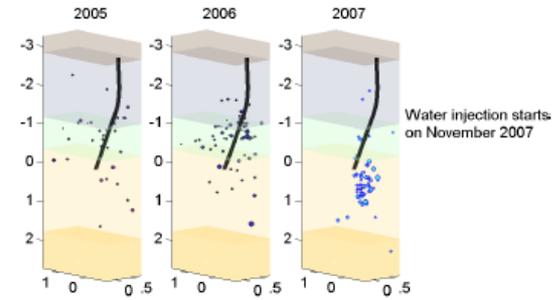
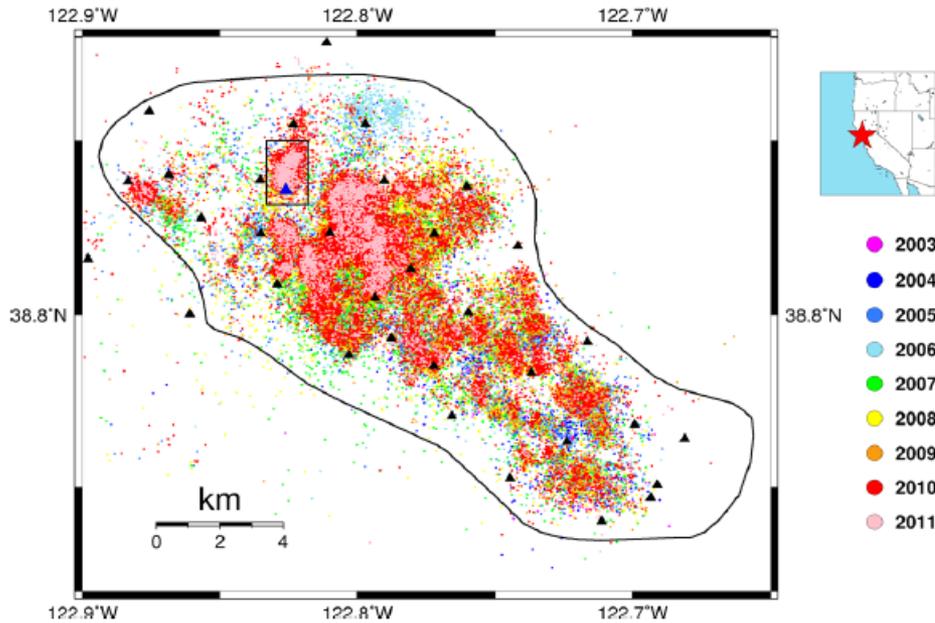


Aumento di sismicità nei decenni



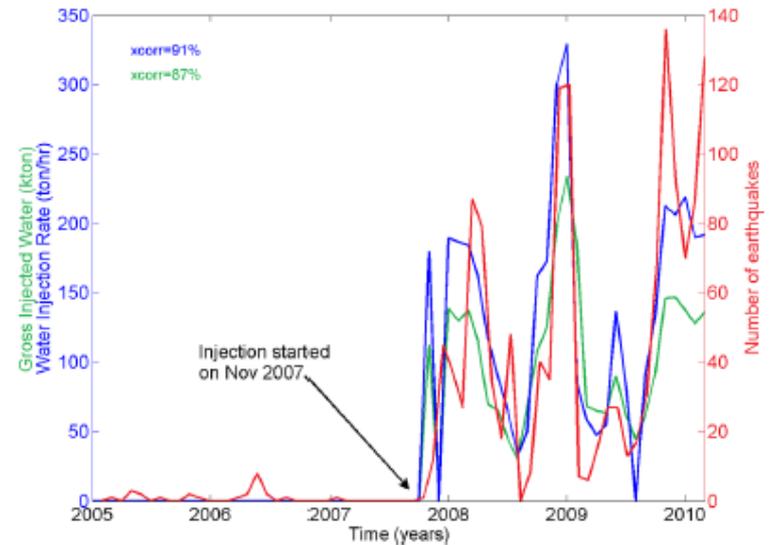
Terremoti nel periodo 1997-1998 e pozzi di re-iniezione fluidi (Beall et al., 1999)

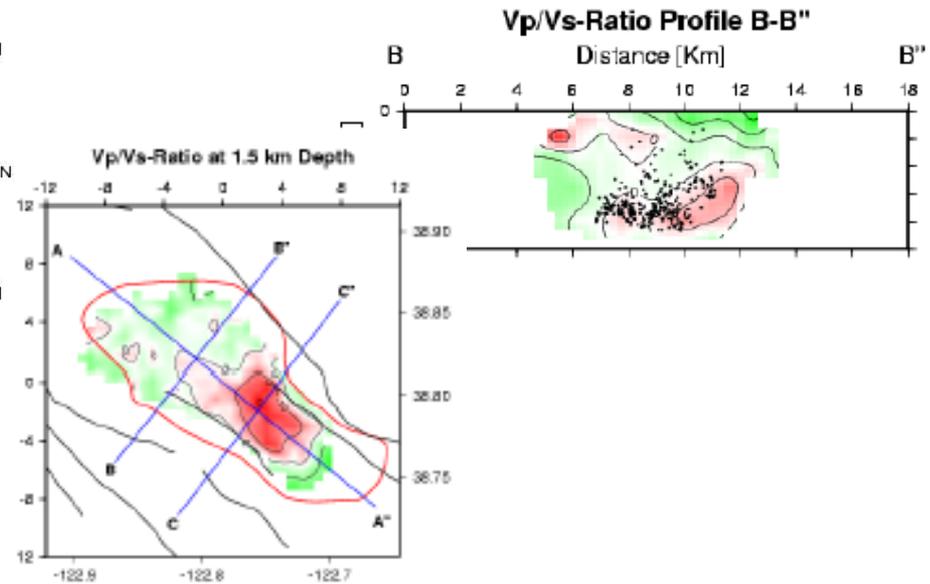
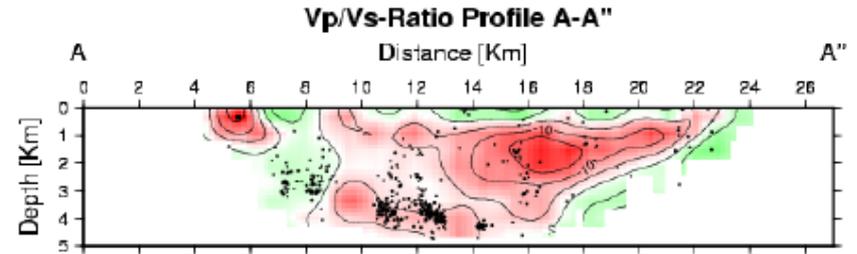
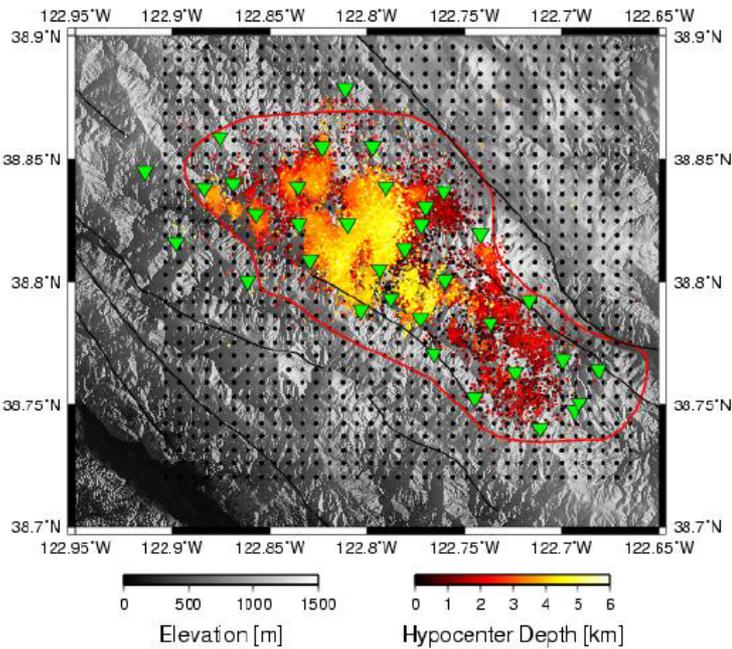
Seismicity at The Geysers



La re-iniezione avviene senza pressione nel pozzo, la grande differenza di temperatura del fluido con il serbatoio comporta un forte raffreddamento e la roccia si contrae, riducendo la pressione di confinamento e favorendo la sismicità.

Thermal contraction





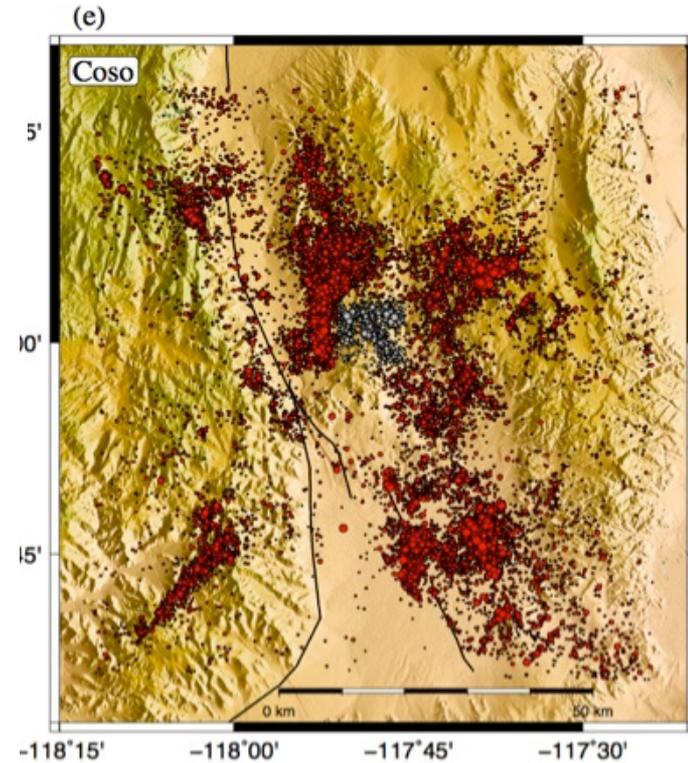
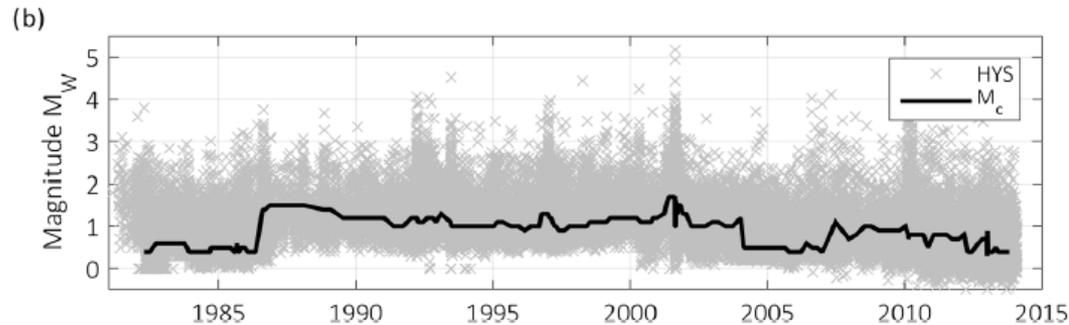
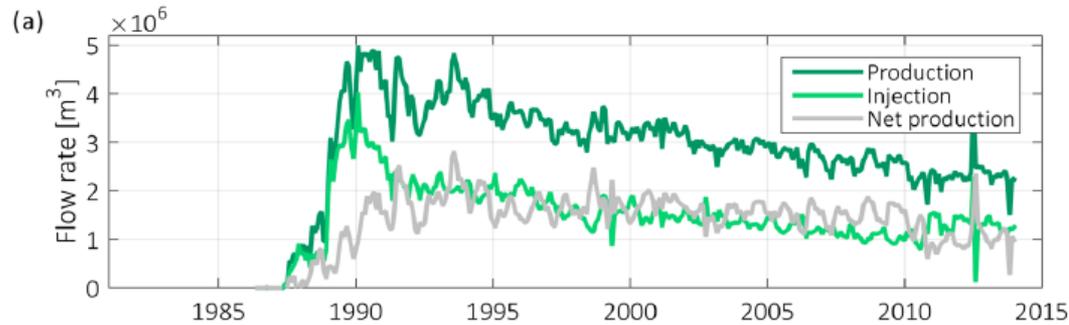
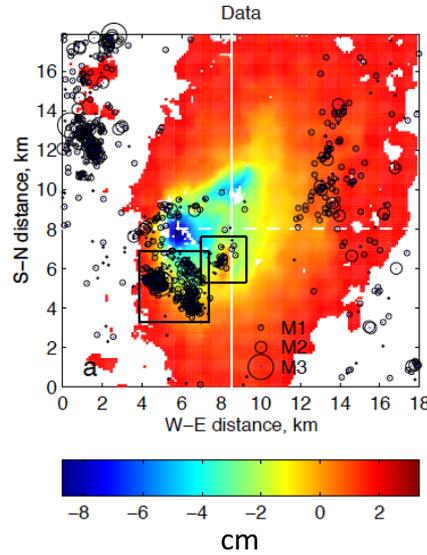
Terremoti avvengono attorno a zone a basso V_p/V_s (rapporto velocità onde P e S) che indica zone calde del campo (vapore)

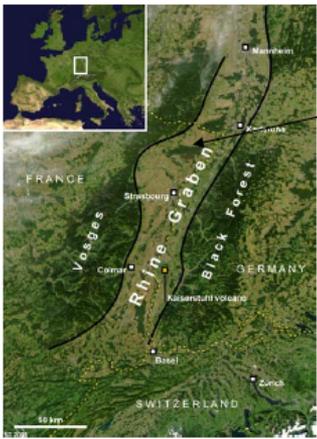
Gritto et al., 2011

The Coso (California)

Liquido dominante

Raffreddamento del serbatoio e contrazione termica hanno portato a microsismicità e subsidenza.

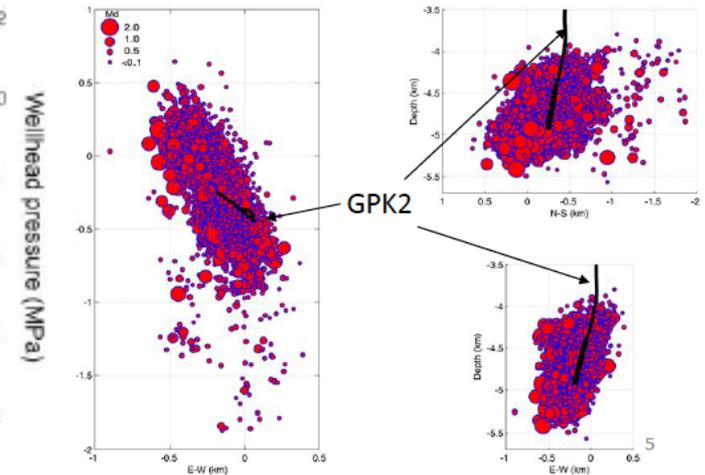
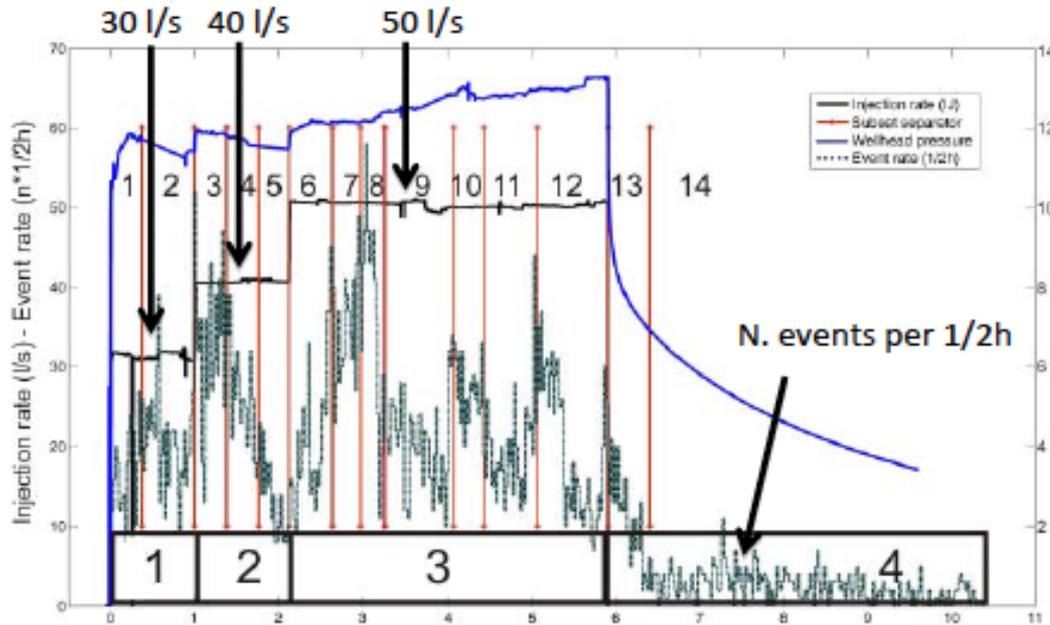
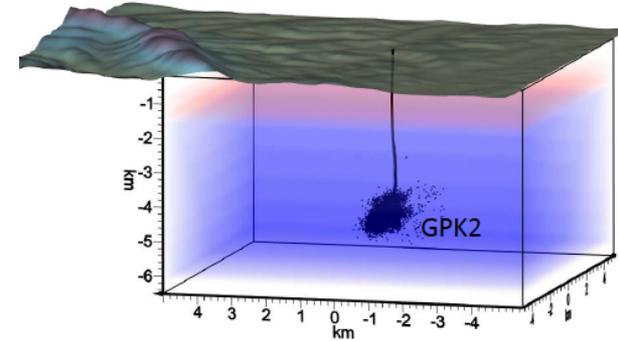




Stimolazione EGS a Soultz-sous-Forets:

Tre pozzi stimolati idraulicamente a 5000 mt.

La stimolazione riattiva un network di fratture con Magnitudo tra -0.3 e 2.5

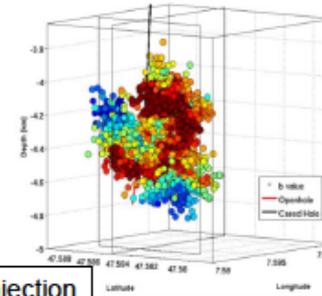
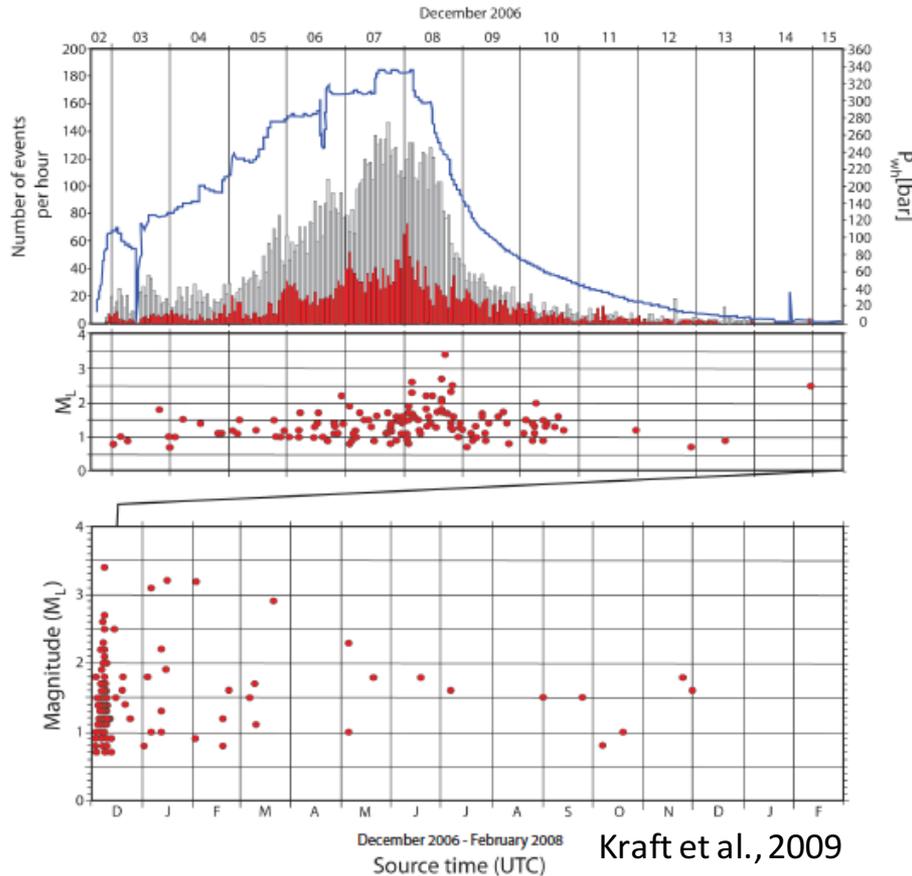


EGS Basilea

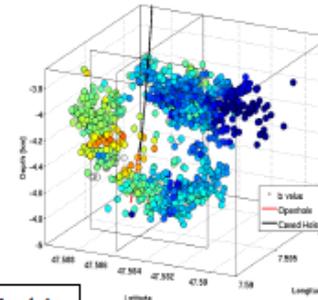


Sciame sismico si attiva durante la stimolazione con Magnitudo max 3.4

Sismicità diminuisce ma continua dopo la fine della stimolazione

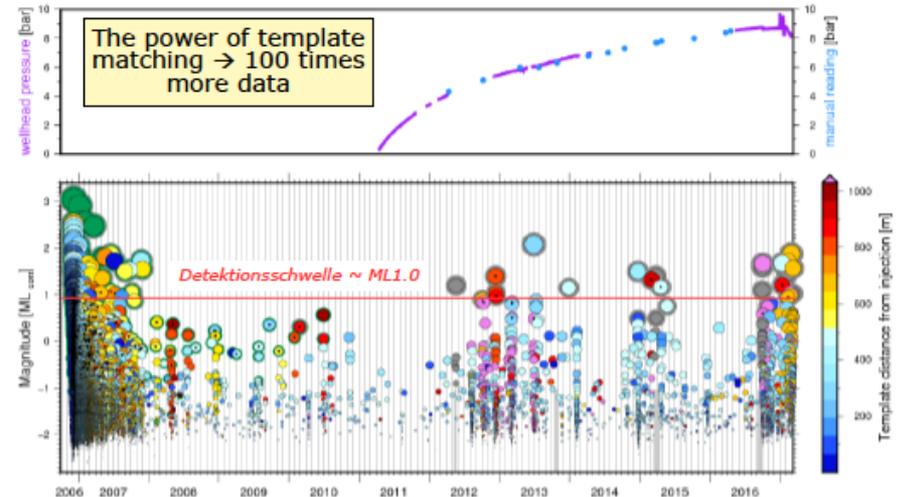


During Injection



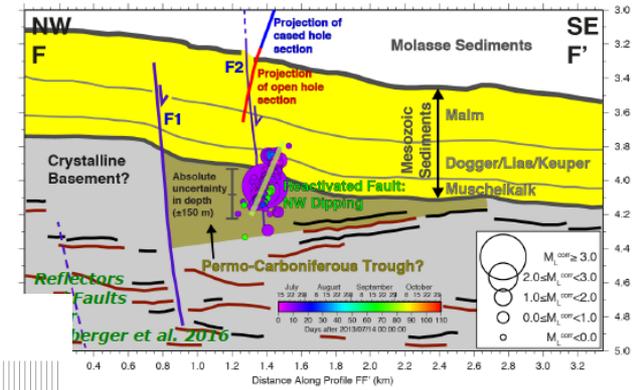
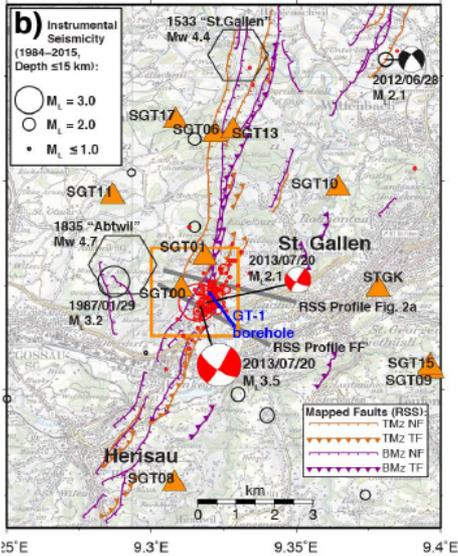
After Shut-in

Bachmann et al., 2012

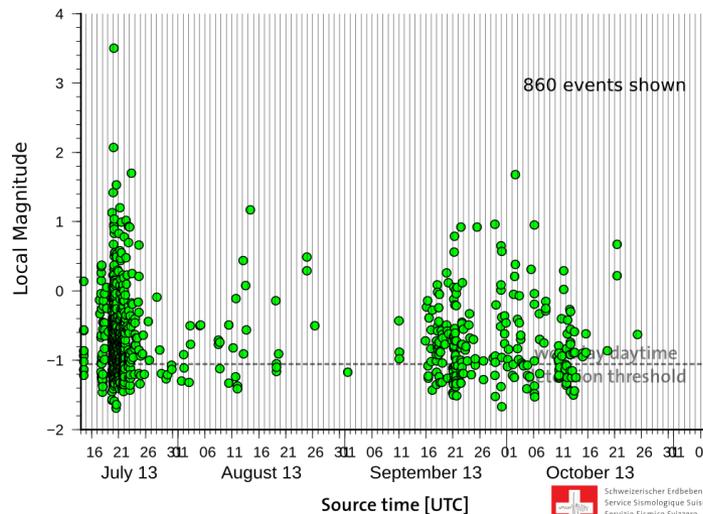
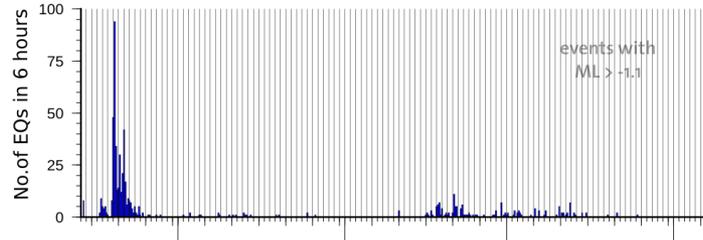


Wiemer, Schatzalp 2015

EGS San Gallo (Svizzera)



St. Gallen induced earthquakes
as of 8. Nov. 2013 17:35 (UTC)



- 2010 – 3D Seismic Campaign (270 km²)
- Citizens of St. Gallen vote on 150 M\$ credit
→ accepted with 82% yes
- 2012 – SED starts seismic monitoring (GeoBest Project)
- 2013 – Mar.: Start of drilling operation
- Jul.: Stimulation of Malm aquifer (4.1 kmTVD)
→ ML3.5 earthquake
- Aug.: City parliament decides to go on.
Population generally supportive.
- Oct.: Production test
→ seismicity turned off (SG = Rangely II)
- Nov.: Well conservation and rig release

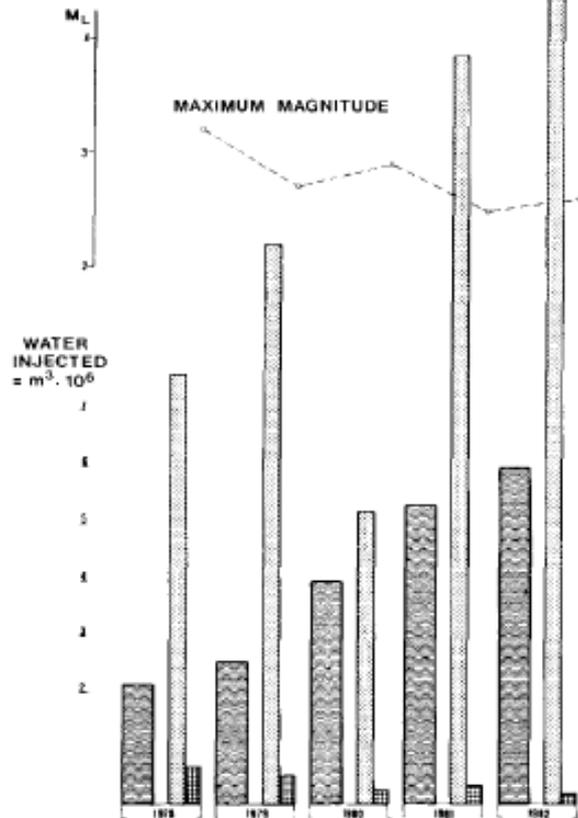
La stimolazione innesca attività sismica su una faglia del basamento, evento massimo di M3.5



Kraft et al. Schatzalp 2015

Correlazione Sismicità Indotta pressione/volume dei fluidi iniettati

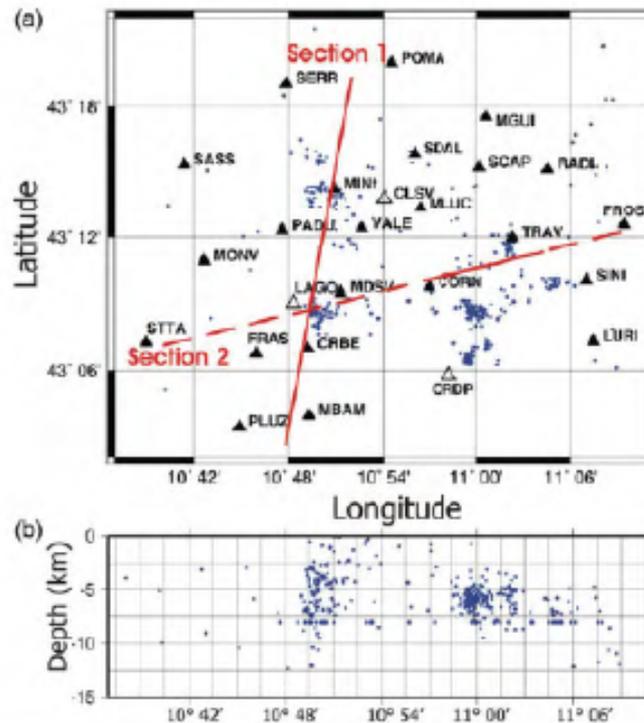
Batini *et al.*, 1985



- Water injected
- Total number of events
- Number of events with M ≥ 2

1978-1982

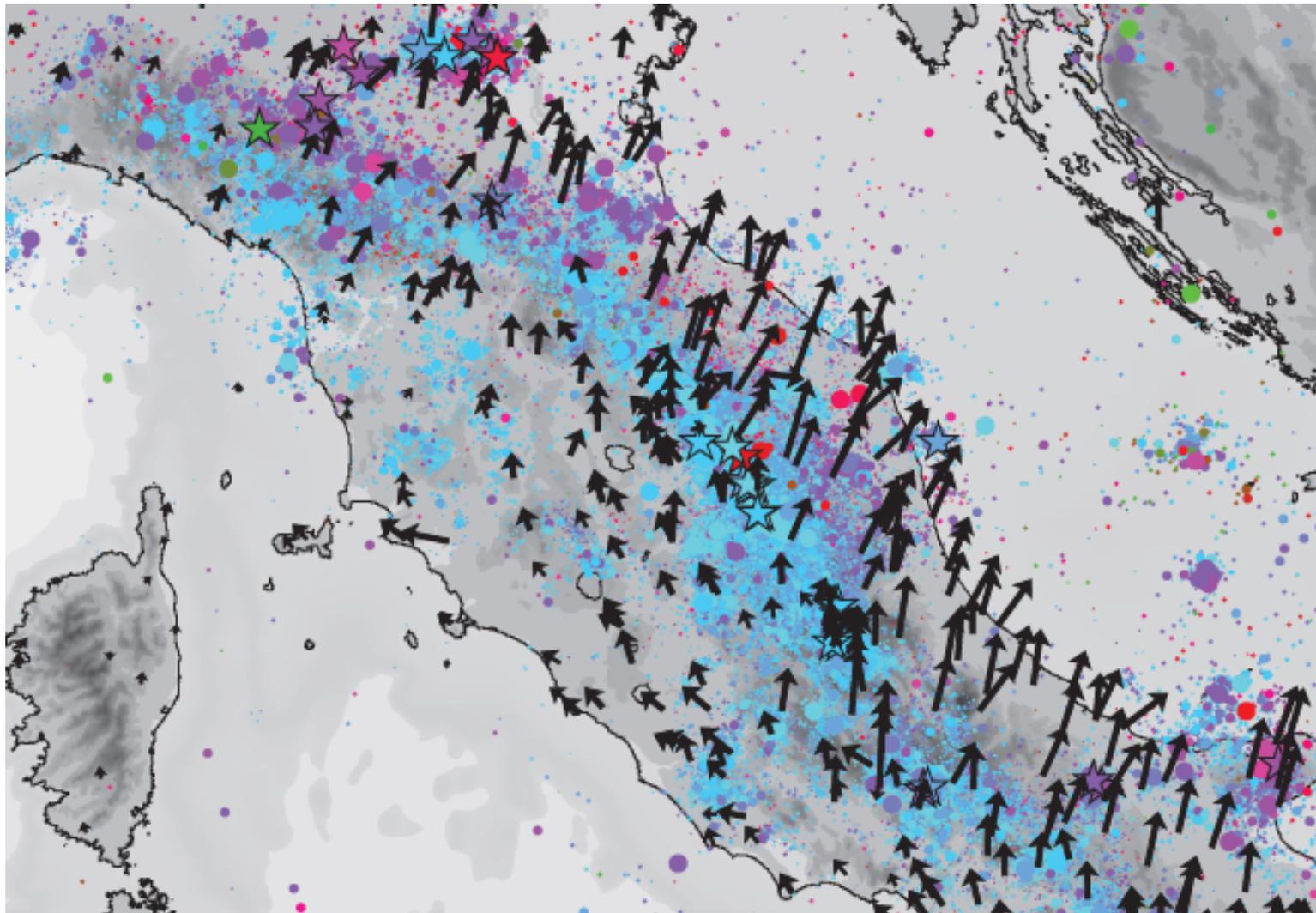
Larderello Rete ENEL 1976-oggi



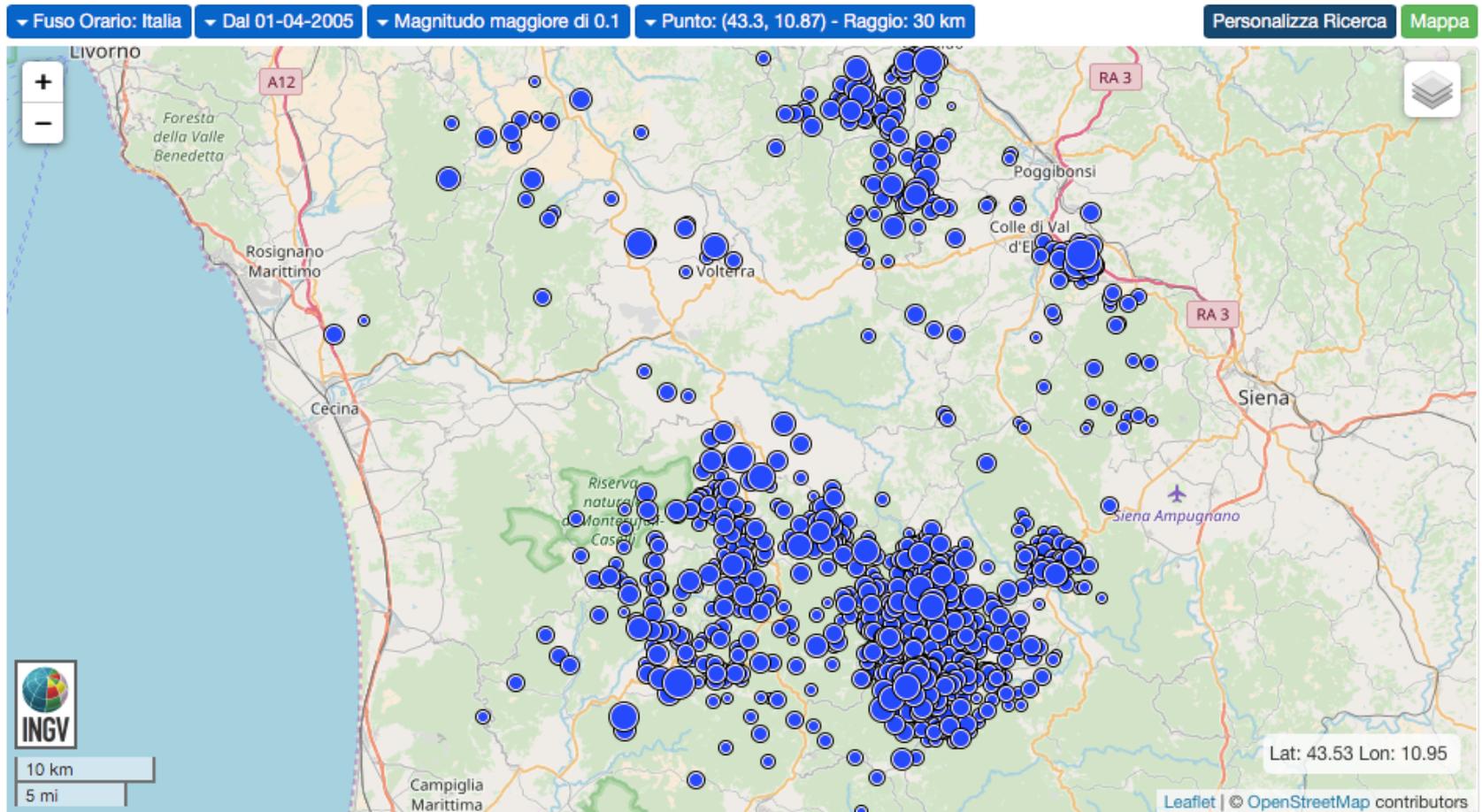
M_L generalmente <2, max 3.3 3.8

Moia, 2013

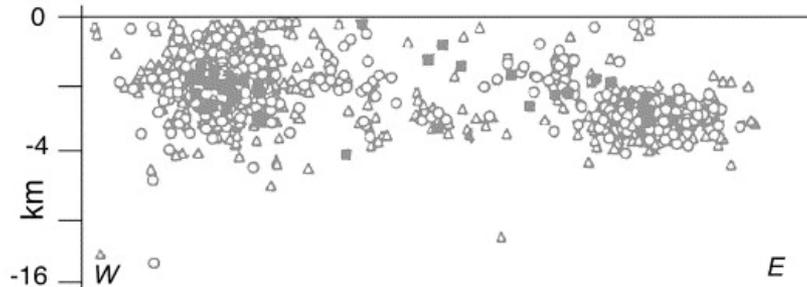
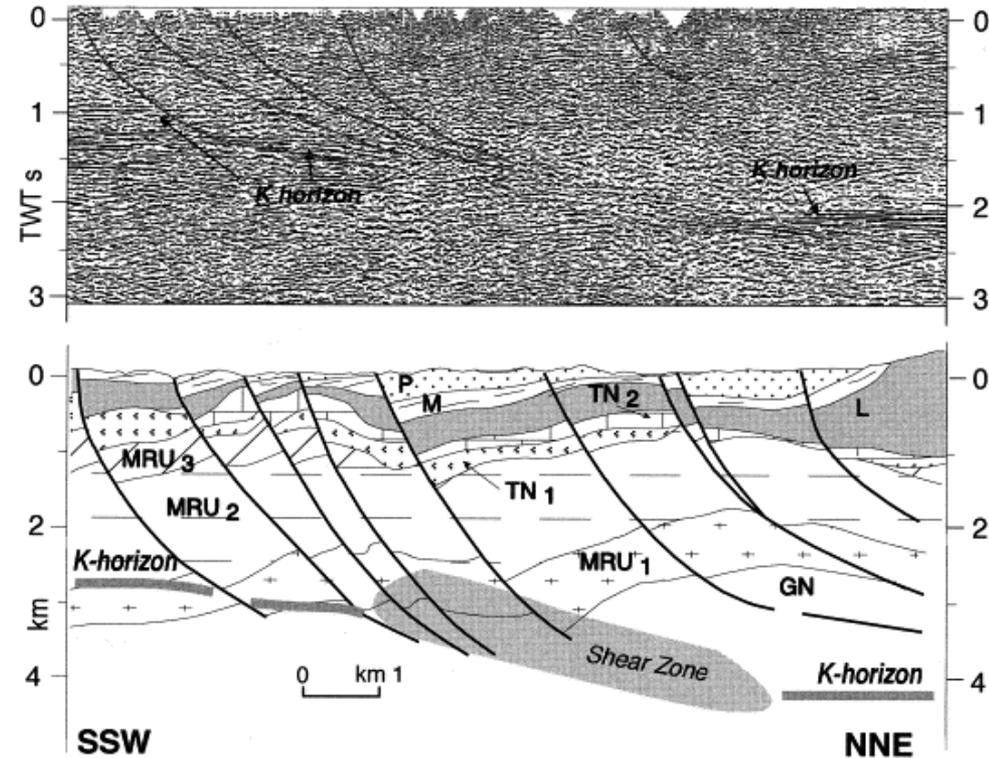
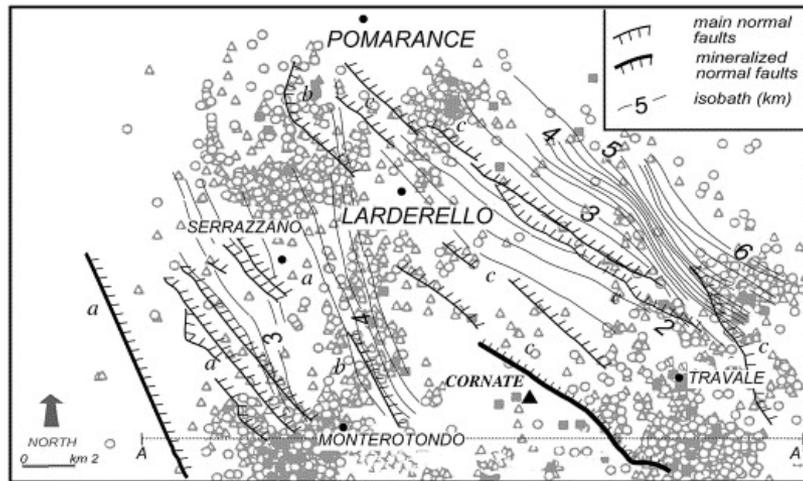
Sismicità strumentale 1980-2018 e velocità GPS



Sismicità area Larderello 2005-oggi Iside INGV



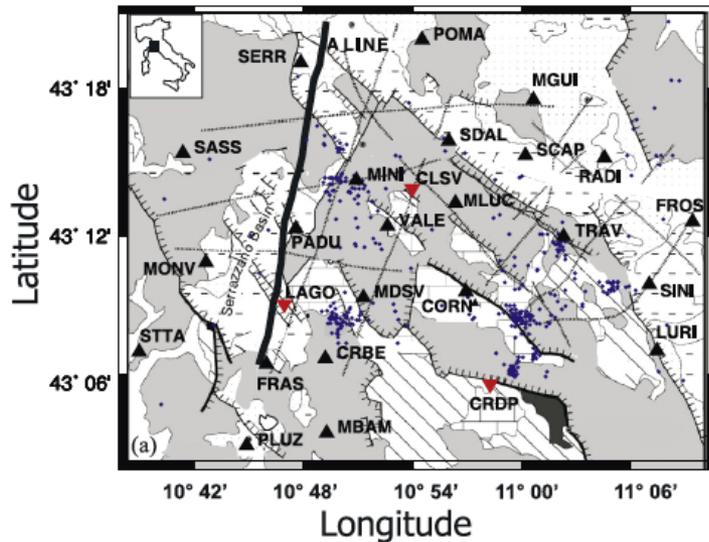
Sismicità Larderello (dati ENEL) e interpretazione tettonica



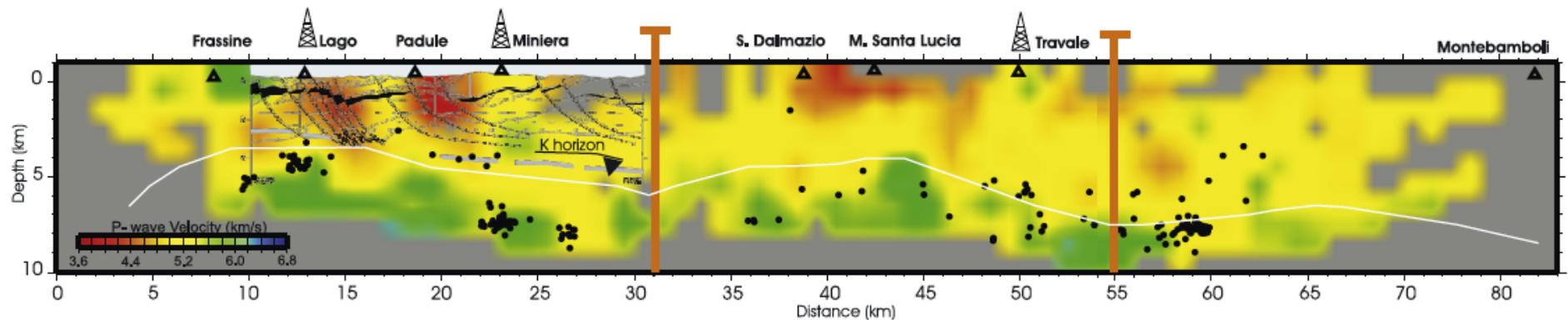
Trasferimento convettivo di calore lungo la shear zone, path preferenziale

Sismicità diffusa non concentrata sulle faglie riconosciute dalla sismica

Sismicità Larderello (dati ENEL, localizzazioni 3D e tomografia Sismica, struttura di velocità nel sottosuolo)



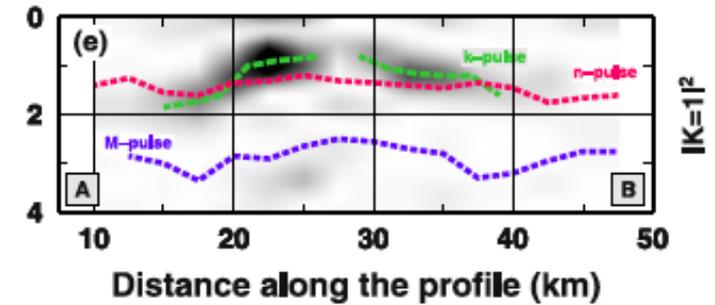
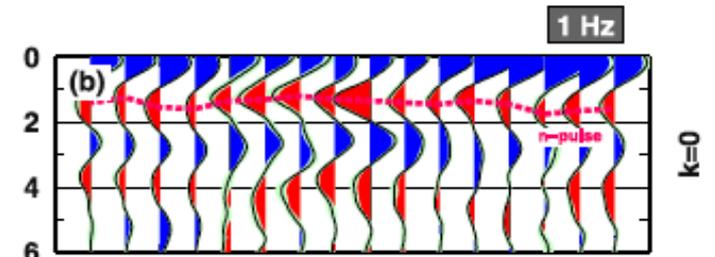
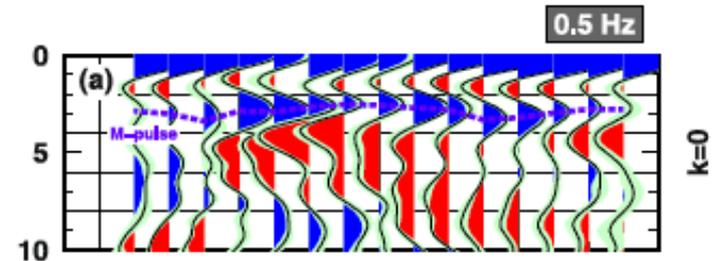
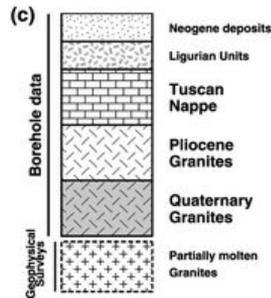
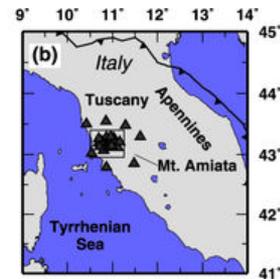
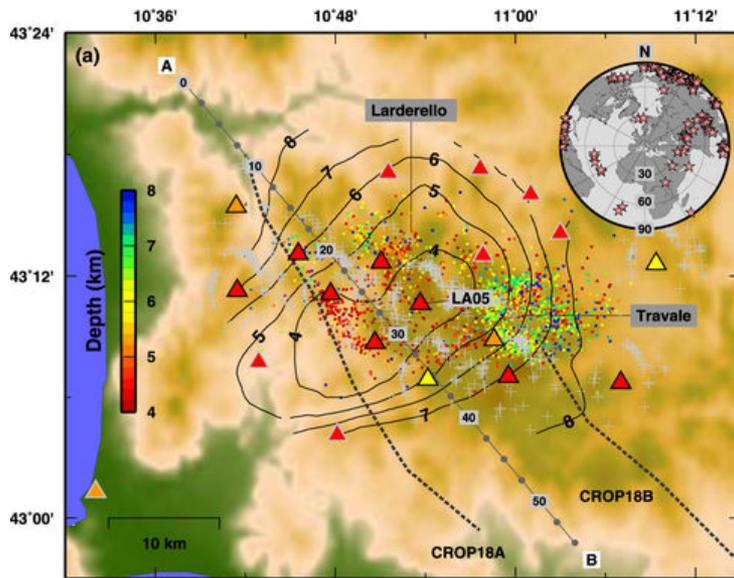
Forma alta V_p e sismicità seguono orizzonte k
Fluttuazione di pressione di fluidi



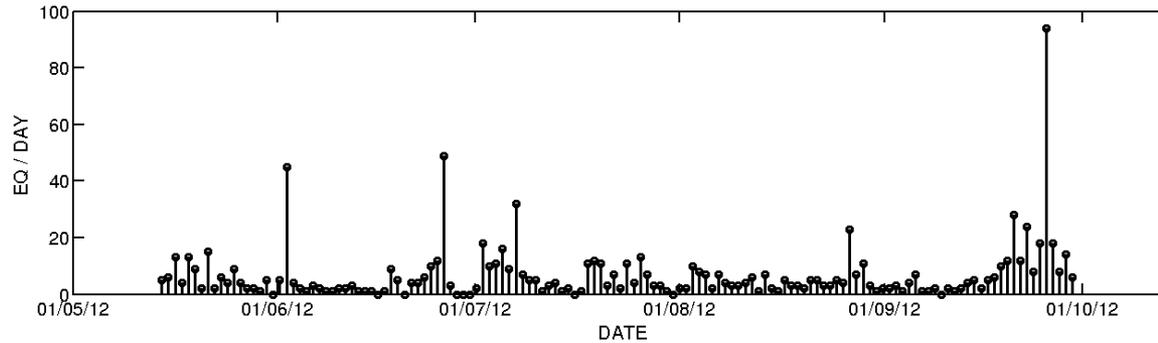
Struttura profonda del campo:

- Profondità Moho (impulsi blu)
- Strato a bassa velocità crostale (impulsi rossi) (zona calda, fusi ?)
- Moho uplift sotto Larderello e anomalia calda del mantello

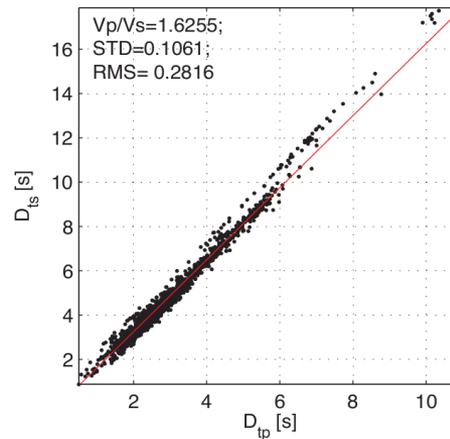
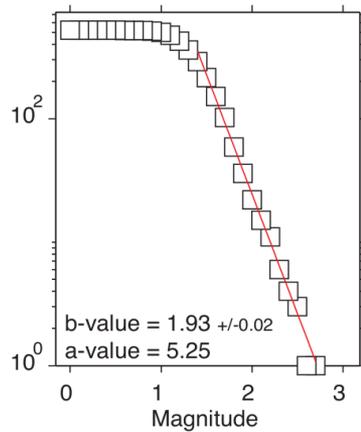
Piana Agostinetti et al. 2017 (esperimento GAPSS)



Catalogo sismico esperimento GAPSS (2012)



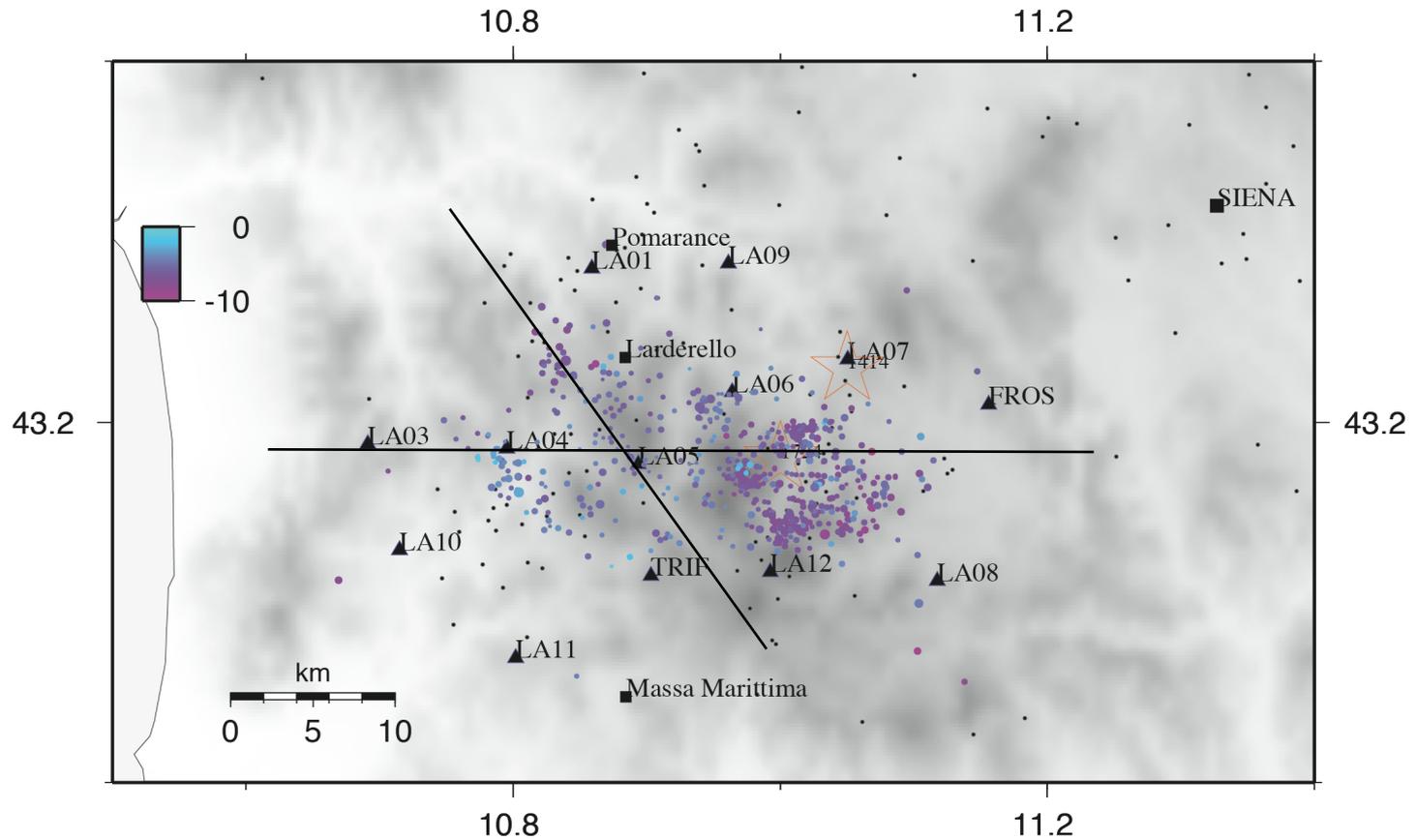
•15 Maggio 2012 – 30 Settembre. 2012: **948** eventi localizzati



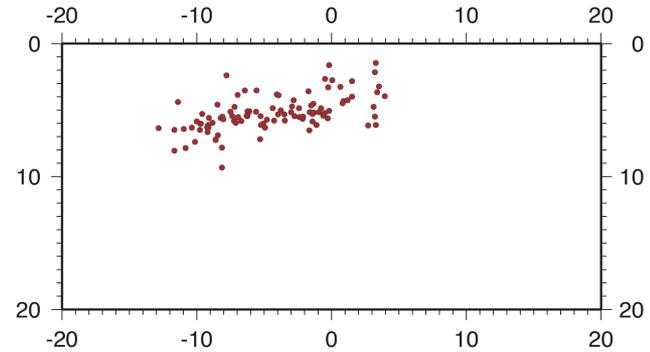
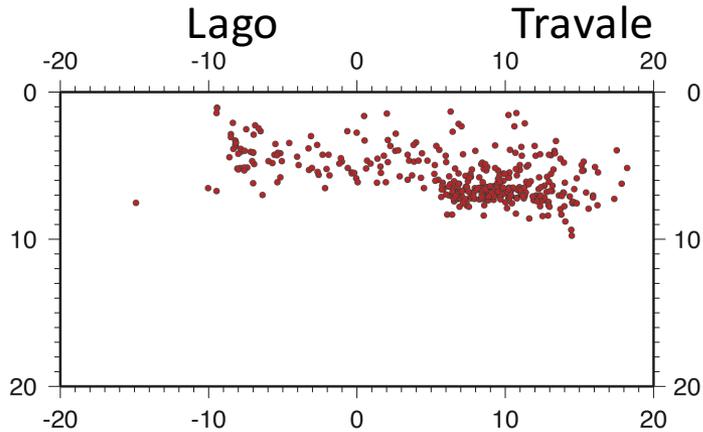
-- Alto b-value (numero maggiore di terremoti piccoli rispetto a quelli grandi)

- Rate sismicità: 5.25 eventi/giorno

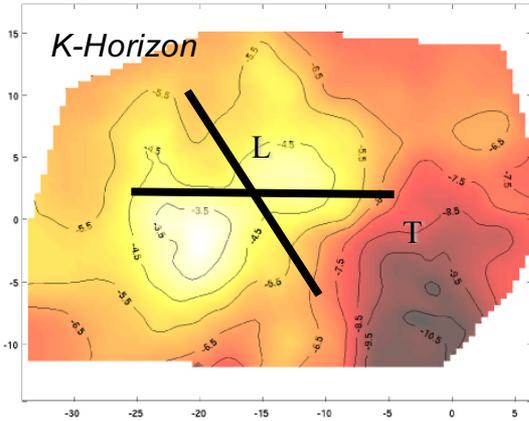
Localizzazioni



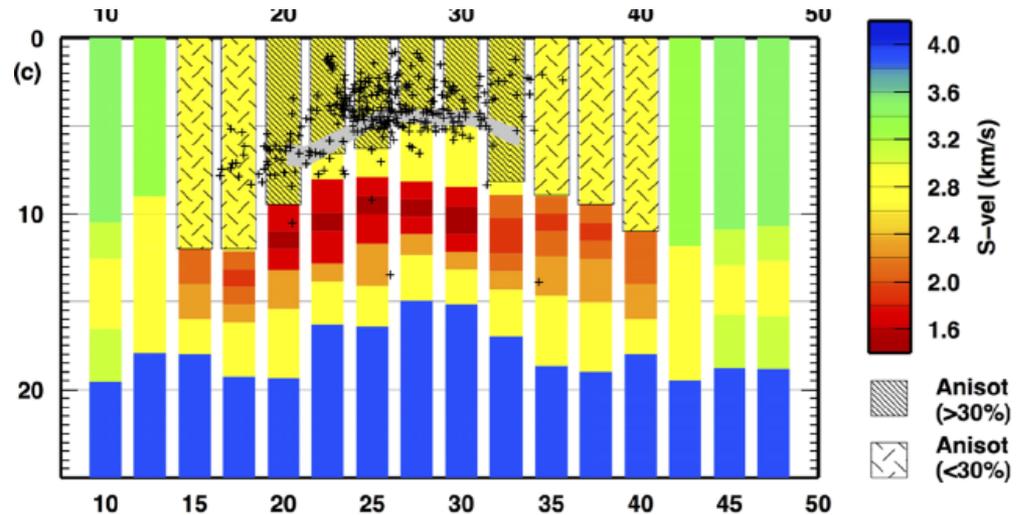
Sezioni trasversali



cut-off sismicità = transizione al comportamento plastico nei graniti



K-Horizon segue isoterma 450° livello fratturato con fluidi supercritici (Batini et al., 1983)



Variazione comportamento anisotropico= fluidi supercritici

Summary:

- Tassi e M_{max} della SI sono legati ai volumi e/o alle pressioni di re-iniezione.
- Differenza di temperatura tra il fluido re-iniettato e il serbatoio caldo porta a contrazione termica e a sismicità (peculiare sistemi a vapore)
- Bilanciare i volumi di fluido prodotti e quelli re-iniettati per mantenere costante la pressione nel serbatoio, prossima a quella iniziale.
- Mantenere basse le pressioni dei fluidi nel sottosuolo. La mancanza di aumento di stress I imita la sismicità indotta.

Importanza sviluppo best practices e monitoraggio proattivo

Importante è la conoscenza delle faglie nel sottosuolo e il loro livello di carico