

# Il monitoraggio dell'estrazione di $CO_2$ in Toscana

## Presente e futuro delle ricerche sulla sismicità indotta in Italia

Thomas Braun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia  
Sezione di Sismologia e Tettonofisica  
Osservatorio di Arezzo

28-Nov-2014 / GNGTS - Bologna



# Indice

- 1 Sismicità antropogenica
  - Definizione tipi di sismicità
  - Approcci di discriminazione
  - Tavolo ISPRA: Possibili eventi di origine antropogenica
- 2 Profondità dell'evento
  - Produzione idrocarburi: Caviaga, 1951
  - Produzione energia geotermica: Amiata, 2000
  - Estrazione  $CH_4$  in area non-tettonica: Rothenburg, 2004
- 3 Produzione  $CO_2$  in Toscana
  - La Valle Altotiberina: tra faglie e fluidi
  - Array/rete sismica di monitoraggio nell'Alta Valtiberina
- 4 Conclusioni
  - Interpretazione
  - Conclusioni
  - Outlook



# Definizione dei tipi di sismicità

## Sismicità:

- **naturale** (*di fondo*): legata a faglie pre-esistenti orientate secondo la sismotettonica dell'area
- **indotta** (*induced*): attività antropiche sono responsabili per la maggior parte delle variazioni di stress e per la genesi di eventi sismici
- **innescata** (*triggered*): attività antropiche sono responsabili di una minima parte delle variazioni di stress associato ai terremoti. Stress tettonico pre-esistente gioca il ruolo principale

(terminologia da McGarr et al., 2002)



# Definizione dei tipi di sismicità

## Sismicità:

- **naturale** (*di fondo*): legata a faglie pre-esistenti orientate secondo la sismotettonica dell'area
- **indotta** (*induced*): attività antropiche sono responsabili per la maggior parte delle variazioni di stress e per la genesi di eventi sismici
- **innescata** (*triggered*): attività antropiche sono responsabili di una minima parte delle variazioni di stress associato ai terremoti.  
Stress tettonico pre-esistente gioca il ruolo principale

(terminologia da McGarr et al., 2002)



# Definizione dei tipi di sismicità

## Sismicità:

- **naturale** (*di fondo*): legata a faglie pre-esistenti orientate secondo la sismotettonica dell'area
- **indotta** (*induced*): attività antropiche sono responsabili per la maggior parte delle variazioni di stress e per la genesi di eventi sismici
- **innescata** (*triggered*): attività antropiche sono responsabili di una minima parte delle variazioni di stress associato ai terremoti. Stress tettonico pre-esistente gioca il ruolo principale

(terminologia da McGarr et al., 2002)



# Approcci di discriminazione

- **fisico-probabilistico**: stima delle variazioni di stress, basato su *Coulomb failure criterion*, modello di sismicità *Rate and State*, e comparazione con la sismicità di fondo o la *Tectonic Stress Rate*.
- **modello statistico di sismicità**: *epidemic-type aftershock sequences* (ETAS), variazioni dei parametri statistici della sismicità (di un catalogo)
- **parametri di sorgente**: (a) profondità dell'evento, (b) meccanismo sorgente: meccanismo focale atipico per la sismotettonica regionale, componenti isotropici/non-DC

(terminologia da Dahm et al., 2012)



# Approcci di discriminazione

- **fisico-probabilistico**: stima delle variazioni di stress, basato su *Coulomb failure criterion*, modello di sismicità *Rate and State*, e comparazione con la sismicità di fondo o la *Tectonic Stress Rate*.
- **modello statistico di sismicità**: *epidemic-type aftershock sequences* (ETAS), variazioni dei parametri statistici della sismicità (di un catalogo)
- **parametri di sorgente**: (a) profondità dell'evento, (b) meccanismo sorgente: meccanismo focale atipico per la sismotettonica regionale, componenti isotropici/non-DC

(terminologia da Dahm et al., 2012)



# Approcci di discriminazione

- **fisico-probabilistico**: stima delle variazioni di stress, basato su *Coulomb failure criterion*, modello di sismicità *Rate and State*, e comparazione con la sismicità di fondo o la *Tectonic Stress Rate*.
- **modello statistico di sismicità**: *epidemic-type aftershock sequences* (ETAS), variazioni dei parametri statistici della sismicità (di un catalogo)
- **parametri di sorgente**: (a) profondità dell'evento, (b) meccanismo sorgente: meccanismo focale atipico per la sismotettonica regionale, componenti isotropici/non-DC

(terminologia da Dahm et al., 2012)





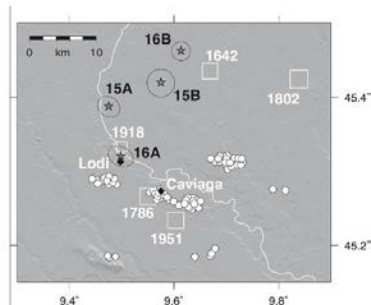
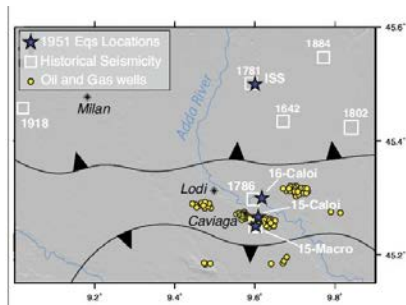
# Tavolo ISPRA: Possibili eventi di origine antropogenica

Rapporto sullo stato delle conoscenze riguardo alle possibili relazioni tra attività antropiche e sismicità indotta/innescata in Italia

Tipologia Attività	Località	Prov.	Documentato <sup>1</sup> - Ipotizzato <sup>2</sup>	Periodo di monitoraggio locale considerato	Mmax (anno)	Imax	Bibliografia	NOTE
								1 Documentato: esistenza di pubblicazione scientifica/approto tecnico che propone una relazione documentata di causalità 2 Ipotizzato: esistenza di pubblicazione scientifica/approto tecnico che ipotizza una correlazione
Bacino Adico	Pieve di Cadore	BL	Documentato	1949-1952	2 (1964)		Calò (1966)	
	Vajont	BL	Documentato	1962-1968	<2 (1963)		Migani (1968); Calò (1971)	
	Ridracoli	FC	Documentato	1981-1989	3		Piccinelli et al. (1995)	
	Passante	CZ	Documentato	1981-1996	2.5		Giuseppetti et al. (1996)	
	Camponosto	AQ	Ipotizzato	n.d.	5.7 (1950)	VIII	Mucciarelli (2013)	
Portofino	FE	Documentato	2005-2012	2.7 (2010)		Valeroso et al. (2009); Stabile et al. (2014)		
Campo genovese	Lanfredello/ Travale	PI	Ipotizzato	1978/1982	3.2 (1978)		Butini et al. (1980a); Butini et al. (1985); Evans et al. (2012)	In questi campi di produzione i dati disponibili mostrano l'occorrenza di eventi indotti di bassa magnitudo correlati ai processi di reiniezione dei fluidi, mentre il livello della sismicità naturale di fondo risulta ancora dibattuta. L'interpretazione degli eventi maggiori, considerati in alcune analisi naturali e in altre indotti/innescati
			Ipotizzato		4.5 (2000)	VI	Mucciarelli et al. (2001)	
	Amiata	GR/SI		1982-1992		3.5 (1983)	Butini et al. (1990); Moia et al. (1993); Evans et al. (2012)	
	Laterra	VT	Documentato	1978-1982	2.9 (1980)		Butini et al. (1980b); Carabelli et al. (1984); Butini et al. (1990); Moia et al. (1993); Evans et al. (2012)	I dati disponibili in concomitanza con specifici esperimenti di iniezione di fluidi documentano chiari esempi di eventi indotti, generalmente organizzati in sequenze di magnitudo da negativa a circa 2, con singoli eventi che raggiungono magnitudo 2.9 a Laterra e 3.0 a Torre Alfinu.
	Torre Alfinu	VT	Documentato	1978-1982	3 (1977)	III/IV	Butini et al. (1980b); Moia et al. (1993); Evans et al. (2012)	
Cesano	RM	Documentato	1978-1982	2 (1978)		Butini et al. (1980b); Evans et al. (2012)		
Etna/Venere/ Micochisti	Caviga	LO	Ipotizzato		5.4 (1951)	VII/VIII	Calò (1956)	
	Cavone	MO	Ipotizzato		5.9 (2012)	VII/VIII	ICHESE (2014)	
	Montemuro	FE	Ipotizzato	2006	1.7		Valeroso et al. (2009)	Valeroso et al. (2009) correlano un sciami di 40 microterremoti ( $M_L < 1.7$ ) avvenuti nel Giugno 2006 con le attività nel pozzo Costa Molina 2, in cui sono re-iniettate acque di strato estratte dai giacimenti della Val d'Agri. Gli eventi sismici, accuratamente registrati da una rete temporanea ad alta densità operativa dal Maggio 2005 al Giugno 2006, sono localizzati entro 1 km di distanza dal pozzo. Studi recenti eseguiti dall'INGV e presentati in convegni nazionali ed internazionali (Valeroso et al., 2013; Chiarabba, 2014) hanno analizzato dati registrati dalla rete sismica nazionale nell'area di Montemuro. Questi studi evidenziano che l'attività microsismica iniziata nel Giugno 2006 è continuata negli anni successivi, correlandosi spazialmente e temporalmente con le attività di re-iniezione nel pozzo Costa Molina 2.
Milena	Rabù/Cave Piedil	UD	Ipotizzato		n.d. (1965)	V	Calò (1970)	



# Produzione idrocarburi: evento @ Caviaga, 1951

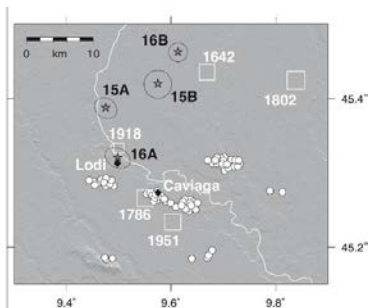
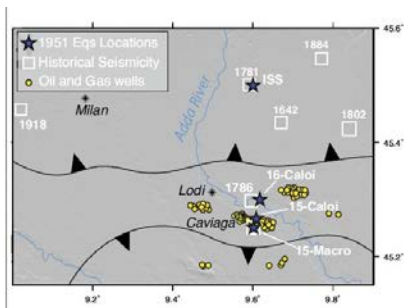


15/05/1951 (M=5.4)  $z > 32$  km; 16/05/1951 (M=4.5)  $z = 13-20$  km

(Caloi, 1956, 1970; Caciagli et al., submitted)



# Produzione idrocarburi: evento @ Caviaga, 1951



15/05/1951 ( $M=5.4$ )  $z>32$  km; 16/05/1951 ( $M=4.5$ )  $z=13-20$  km

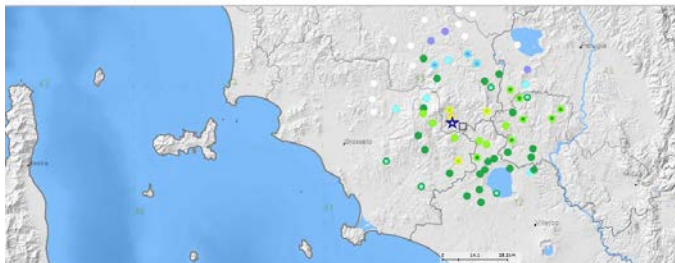
(Caloi, 1956, 1970; Caciagli et al., submitted)

⇒ evento di origine tettonica!



# Campo geotermico: evento @ Monte Amiata, 2000

2000 04 01 18:08:04 MONTE AMIATA										
	Lat	Lon	Prof.	Io	Mw	TMw	Rt	Np	Imax (MCS)	DBMI11
CPTI11	★	42.831	11.691		4.57 ± 0.09	Ine0				
macro-sismico	□	42.815	11.746	5-6	4.54 ± 0.19	Dx	Boll. Macro. ING	66	6	visualizza mdp
strumentale	★	42.831	11.691	3.00	4.57 ± 0.09	MT	Castello et al., 2006			

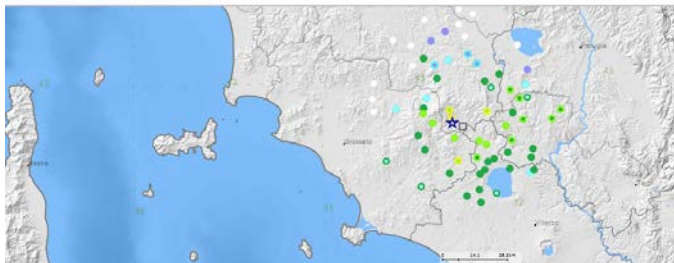


[www.ltpaobserverproject.com/](http://www.ltpaobserverproject.com/), [csi.rm.ingv.it/\[...\]/2000.sum](http://csi.rm.ingv.it/[...]/2000.sum)  
 Mucciarelli et al., 2001 ⇒ **profondità 2 km, ML 3.9**



# Campo geotermico: evento @ Monte Amiata, 2000

2000 04 01 18:08:04 MONTE AMIATA											
	Lat	Lon	Prof.	Io	Mw	Mw	THw	RT	Np	Imax (MCS)	DBM111
CPT111	★	42.831	11.691				4.57 ± 0.09	IneD			
macro-sismico	□	42.815	11.746	5-6	4.54 ± 0.19	Bx		Boll. Macro. ING	66	6	visualizza mdp
strumentale	★	42.831	11.691	3.00	4.57 ± 0.09	NT		Castello et al., 2006			



[www.ltpaobserverproject.com/](http://www.ltpaobserverproject.com/), [csi.rm.ingv.it/\[...\]/2000.sum](http://csi.rm.ingv.it/[...]/2000.sum)

Mucciarelli et al., 2001 ⇒ **profondità 2 km, ML 3.9**

⇒ **origine incerto... e difficile da discriminare... perché la profondità della sismicità naturale è comparabile con il livello di produzione!**



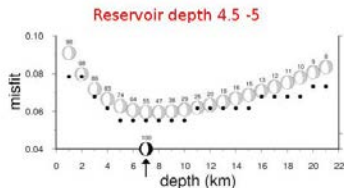
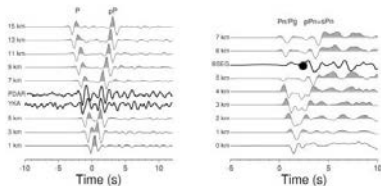
# Area non tettonica: evento @ Rothenburg, 2004

Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 97, No. 3, pp. 691–704, June 2007, doi: 10.1785/0120050149

## The 2004 $M_w$ 4.4 Rothenburg, Northern Germany, Earthquake and Its Possible Relationship with Gas Recovery

by Torsten Dahm, Frank Krüger, Klaus Stammer, Klaus Klinge, Rainer Kind, Kurt Wylegalla, and Jean-Robert Grasso

**Abstract** We study the 20 October 2004  $M_w$  4.4 Rothenburg (Wümme)/Neuen-



Dahm et al., 2007



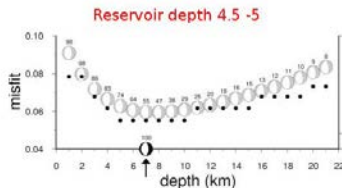
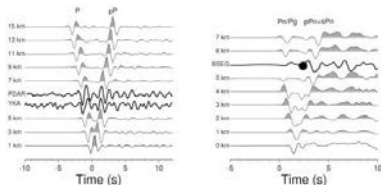
# Area non tettonica: evento @ Rothenburg, 2004

Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 97, No. 3, pp. 691-704, June 2007, doi: 10.1785/0120050149

## The 2004 $M_w$ 4.4 Rothenburg, Northern Germany, Earthquake and Its Possible Relationship with Gas Recovery

by Torsten Dahm, Frank Krüger, Klaus Stammler, Klaus Klinge, Rainer Kind, Kurt Wylegalla, and Jean-Robert Grasso

**Abstract** We study the 20 October 2004  $M_w$  4.4 Rothenburg (Wümme)/Neuen-



Dahm et al., 2007

⇒ origine antropogenica! Livello di estrazione in prossimità dell'ipocentro!

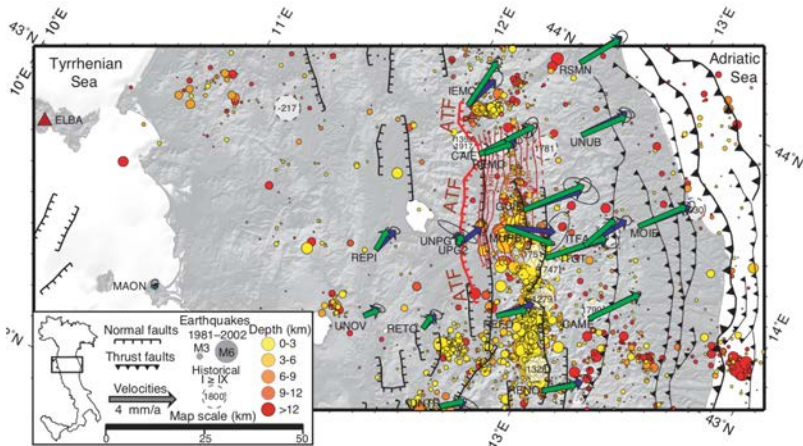


# Meccanismo sorgente: Produzione $CO_2$ @ PSS1





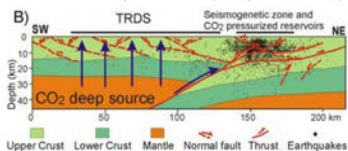
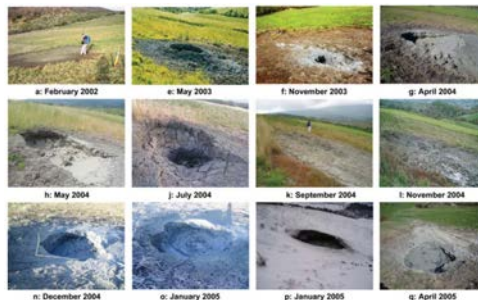
# La faglia altotiberina: regime distensivo



Heinsdottir & Bennett, 2009



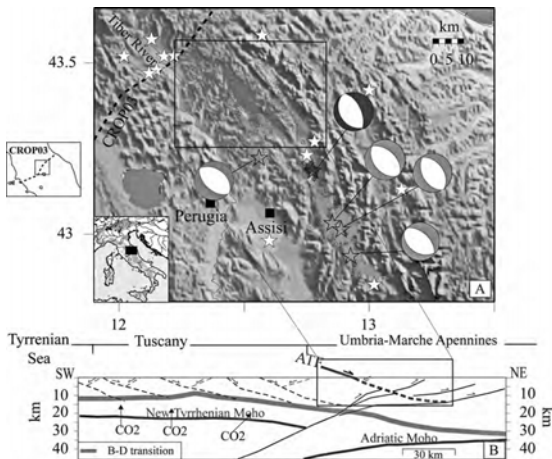
# La Valle Altotiberina: tra faglie e fluidi



Chiodini et al., 2004; Heinicke et al., 2006



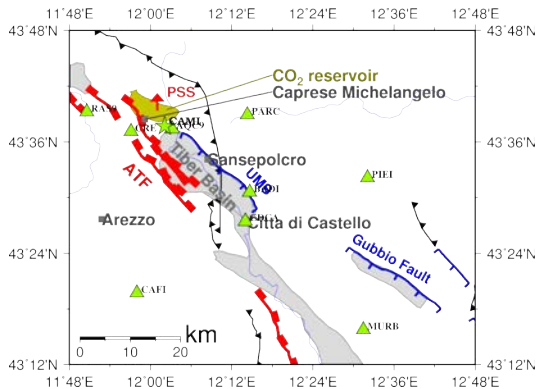
# Meccanismo sorgente: App. Centro-Settentrionale



Chiaraluce et al., 2007



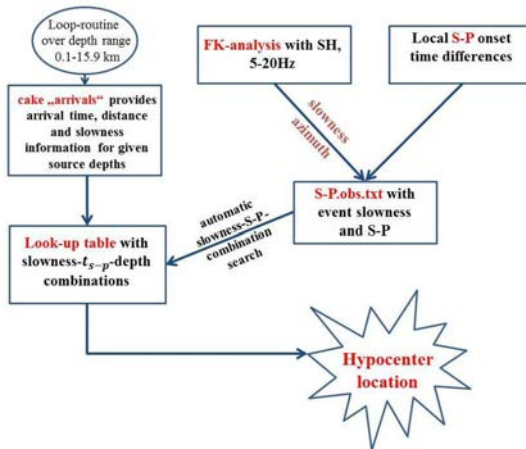
# Array/rete sismica 2010 - 2011



da Martirosian-Janssen, Braun and Dahm, (in prep.)



# Array/rete sismica 2010 - 2011

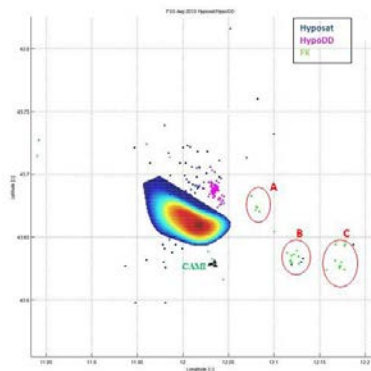


da Martirosian-Janssen, 2011





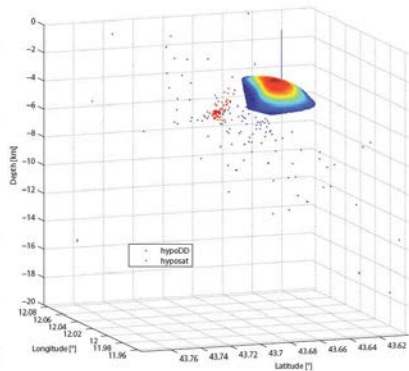
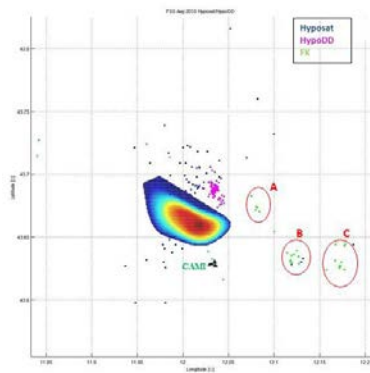
# Ipocentri: Hyposat/HypoDD/FK



da Martirosian-Janssen, Braun and Dahm, (in prep.)



# Ipocentri: Hyposat/HypoDD/FK

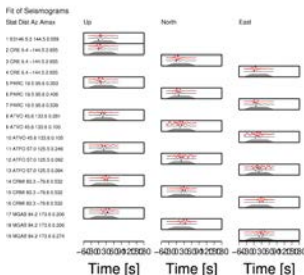
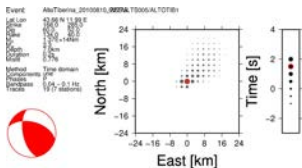


da Martirosian-Janssen, Braun and Dahm, (in prep.)





# Meccanismo sorgente: MT e FOCMEC

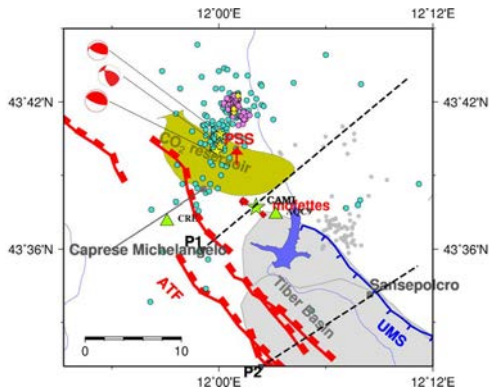
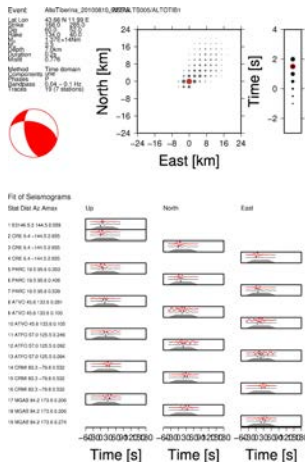


da Martirosian-Janssen, Braun and Dahm, (in prep.)





# Meccanismo sorgente: MT e FOCMEC



da Martirosian-Janssen, Braun and Dahm, (in prep.)

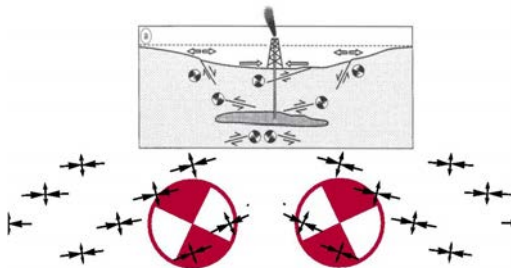
Origine antropogenica? L'evento sismico indotto/innescato?



# Interpretazione

NO!

I terremoti osservati non sono di origine antropogenica!  
Inizio dell'estrazione di  $CO_2$  due mesi dopo lo sciame!



modificato da Seagall, 1989



# Conclusioni

- **Profondità dell'evento** è un criterio valido tranne nei casi in cui l'attività antropica si svolge in prossimità di faglie attive preesistenti.
- **Meccanismo sorgente** non è un criterio discriminante nel caso osservato...  $\Rightarrow$  distribuzione di stress giacimento
- **Momento tensore**: oltre alla determinazione del *Double Couple* il MT consente la determinazione di componenti isotropici e CLVD, comparati con il campo di stress locale possono dare informazioni importanti sull'origine.



# Conclusioni

- **Profondità dell'evento** è un criterio valido tranne nei casi in cui l'attività antropica si svolge in prossimità di faglie attive preesistenti.
- **Meccanismo sorgente** non è un criterio discriminante nel caso osservato...  $\Rightarrow$  distribuzione di stress giacimento
- **Momento tensore**: oltre alla determinazione del *Double Couple* il MT consente la determinazione di componenti isotropici e CLVD, comparati con il campo di stress locale possono dare informazioni importanti sull'origine.



# Conclusioni

- **Profondità dell'evento** è un criterio valido tranne nei casi in cui l'attività antropica si svolge in prossimità di faglie attive preesistenti.
- **Meccanismo sorgente** non è un criterio discriminante nel caso osservato...  $\Rightarrow$  distribuzione di stress giacimento
- **Momento tensore**: oltre alla determinazione del *Double Couple* il MT consente la determinazione di componenti isotropici e CLVD, comparati con il campo di stress locale possono dare informazioni importanti sull'origine.



# Outlook

- La **sorveglianza sismica** con array/reti è uno strumento indispensabile per il monitoraggio della sismicità in aree di produzione industriale.
- Nella compilazione delle liste di eventi sismici di possibile origine antropogenica è necessaria una attenta e accurata **revisione degli eventi sismici precedenti gli anni '80/'90**
- In futuro serve una stretta **collaborazione fra industria, enti di ricerca e le amministrazioni** per lo scambio di dati, informazioni ed esperienze...
- ... e una **maggiore trasparenza** verso la popolazione!
- **Grazie dell'attenzione**





# Outlook

- La **sorveglianza sismica** con array/reti è uno strumento indispensabile per il monitoraggio della sismicità in aree di produzione industriale.
- Nella compilazione delle liste di eventi sismici di possibile origine antropogenica è necessaria una attenta e accurata **revisione degli eventi sismici precedenti gli anni '80/'90**
- In futuro serve una stretta **collaborazione fra industria, enti di ricerca e le amministrazioni** per lo scambio di dati, informazioni ed esperienze...
- ... e una **maggiore trasparenza** verso la popolazione!
- **Grazie dell'attenzione**



# Outlook

- La **sorveglianza sismica** con array/reti è uno strumento indispensabile per il monitoraggio della sismicità in aree di produzione industriale.
- Nella compilazione delle liste di eventi sismici di possibile origine antropogenica è necessaria una attenta e accurata **revisione degli eventi sismici precedenti gli anni '80/'90**
- In futuro serve una stretta **collaborazione fra industria, enti di ricerca e le amministrazioni** per lo scambio di dati, informazioni ed esperienze...
- ... e una **maggiore trasparenza** verso la popolazione!
- **Grazie dell'attenzione**



# Outlook

- La **sorveglianza sismica** con array/reti è uno strumento indispensabile per il monitoraggio della sismicità in aree di produzione industriale.
- Nella compilazione delle liste di eventi sismici di possibile origine antropogenica è necessaria una attenta e accurata **revisione degli eventi sismici precedenti gli anni '80/'90**
- In futuro serve una stretta **collaborazione fra industria, enti di ricerca e le amministrazioni** per lo scambio di dati, informazioni ed esperienze...
- ... e una **maggiore trasparenza** verso la popolazione!
- Grazie dell'attenzione



# Outlook

- La **sorveglianza sismica** con array/reti è uno strumento indispensabile per il monitoraggio della sismicità in aree di produzione industriale.
- Nella compilazione delle liste di eventi sismici di possibile origine antropogenica è necessaria una attenta e accurata **revisione degli eventi sismici precedenti gli anni '80/'90**
- In futuro serve una stretta **collaborazione fra industria, enti di ricerca e le amministrazioni** per lo scambio di dati, informazioni ed esperienze...
- ... e una **maggiore trasparenza** verso la popolazione!
- **Grazie dell'attenzione**



# Acknowledgements

L'esperimento del monitoraggio sismico è stato realizzato nell'ambito di una convenzione con la Consorgas s.r.l. e in stretta collaborazione con A. Martirosian-Janssen, S. Cesca e T. Dahm (Uni Amburgo). Si ringrazia inoltre M. Caciagli, R. Camassi, S. Danesi, S. Pondrelli e S. Salimbeni per le immagini relative al terremoto di Caviaga.

