

Progettazione, sviluppo e implementazione del primo sistema di Early Warning Sismico per reti ferroviarie ad alta velocità in Italia

Aldo Zollo

Dipartimento di Fisica, Università di Napoli Federico II

Andrea Vecchi e Alberto Mauro

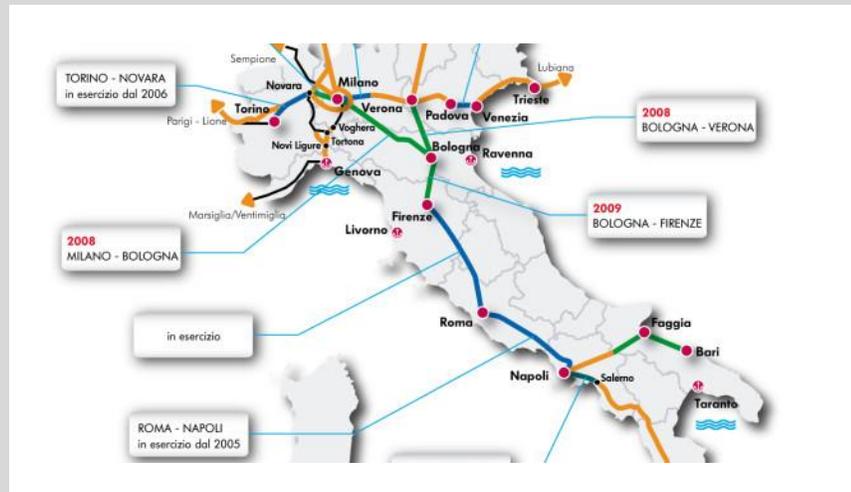
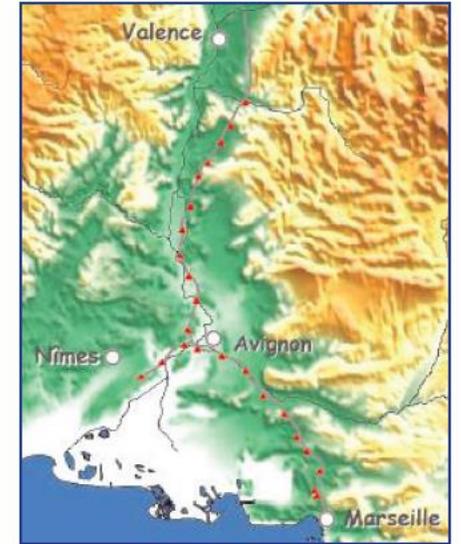
Direzione Tecnica, Rete Ferroviaria Italiana

Research Project Contract funded by RFI –
Rete Ferroviaria Italiana

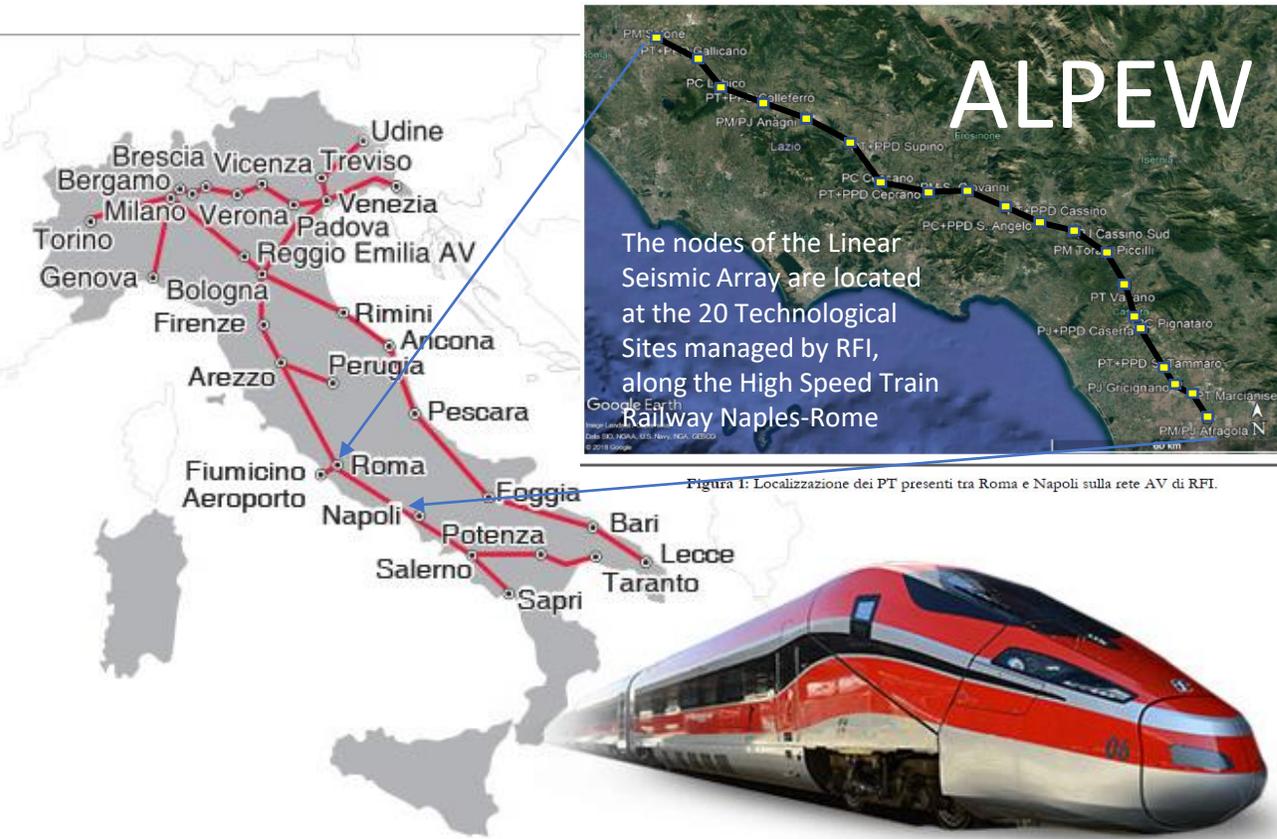


Alcune esperienze nel mondo

- **Giappone (Shinkansen)**
 - Accelerometri lungo la linea ferroviaria e nella regione costiera
 - Eastern Japan Railway company
- **Francia (TGV)**
 - Alta velocità Valence – Marsiglia (250 km)
 - 24 accelerometri lungo la linea
- **Turchia (Marmaray, non è un treno AV)**
 - Accelerometri lungo la linea, collegati al sistema di EW di Istanbul
- **Italia (sviluppo e implementazione di un prototipo su di un tratto della line AV)**
 - Progetto in corso RFI-UNINA Fed II



Obiettivi e Applicazione del Sistema di EW per treni ad alta velocita (EW@TAV)



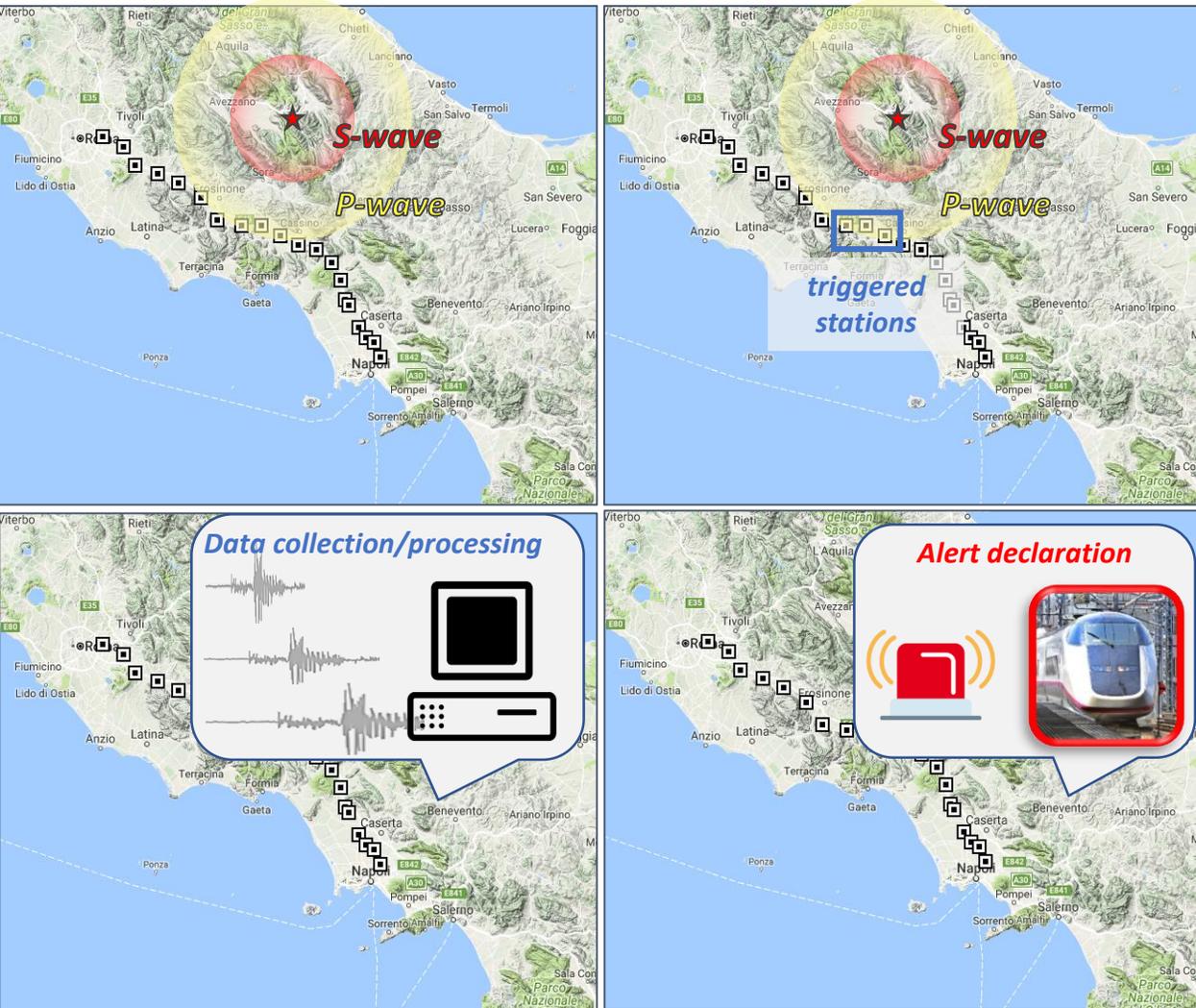
• Azioni (semi)automatiche:

- **dichiara e invia l'allerta** alla sala di controllo RFI
- **attiva i dispositivi** (Automatic Block Signaling) che rallentano o arrestano i treni all'interno di specifici segmenti ferroviari.
- Definisce la «**Fine-Allerta**» per il riavvio del traffico ferroviario (non automatico).

• Valutazione dell'impatto sismico:

- stima dell'impatto atteso sulla linea in termini di valori di picco del movimento del suolo (PGA, PGV) o intensità strumentale.

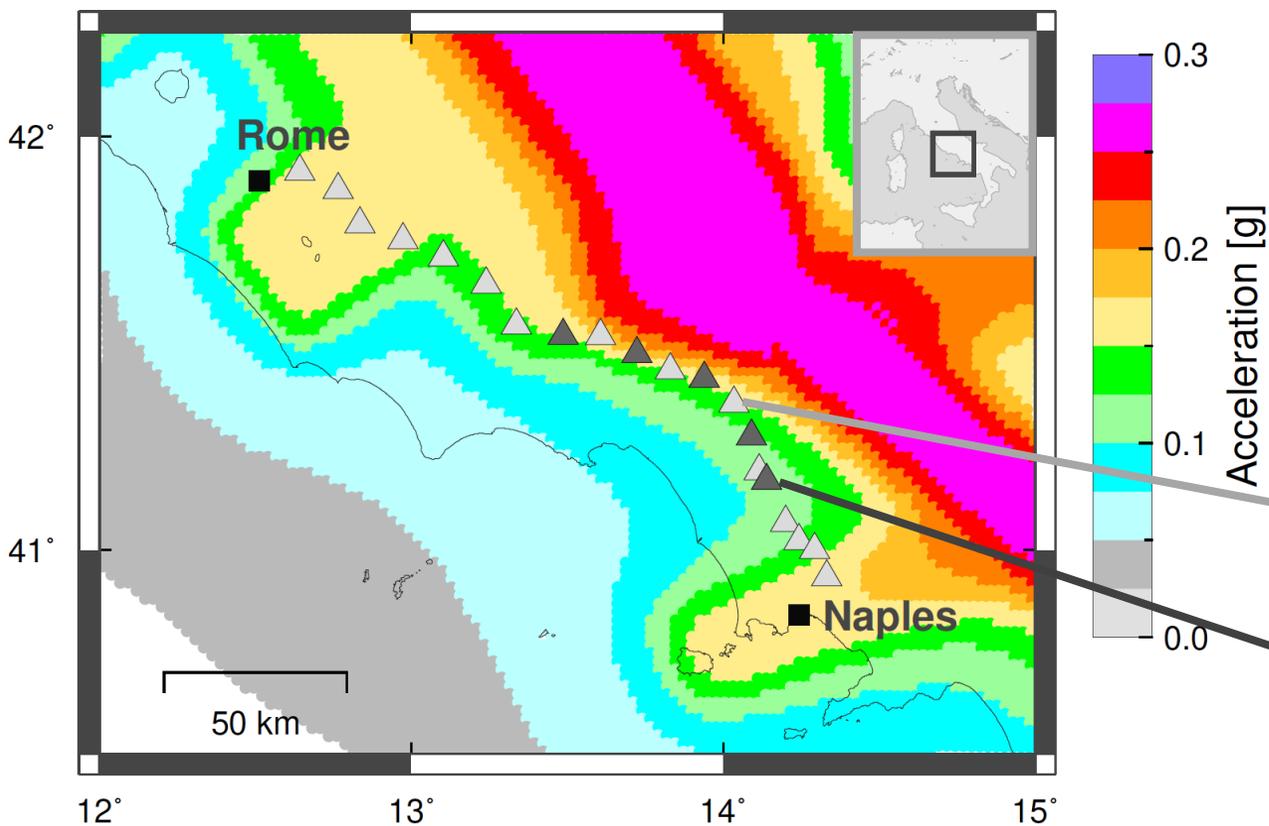
Concetti di base e principali caratteristiche del sistema EW@TVA



- ❖ Il sistema EW@TAV è evolutivo → stime aggiornate dei parametri usando una finestra dell'onda P espansa per tutti i nodi dell'array raggiunti dalle onde P e S
- ❖ Il sistema EW@TAV è probabilistico → i valori di soglia e i livelli di allerta sono impostati in base alla probabilità di superamento di PGA (o PGV)
- ❖ Il sistema EW@TAV usa metodi e algoritmi dedicati per tenere conto della distribuzione lineare delle stazioni

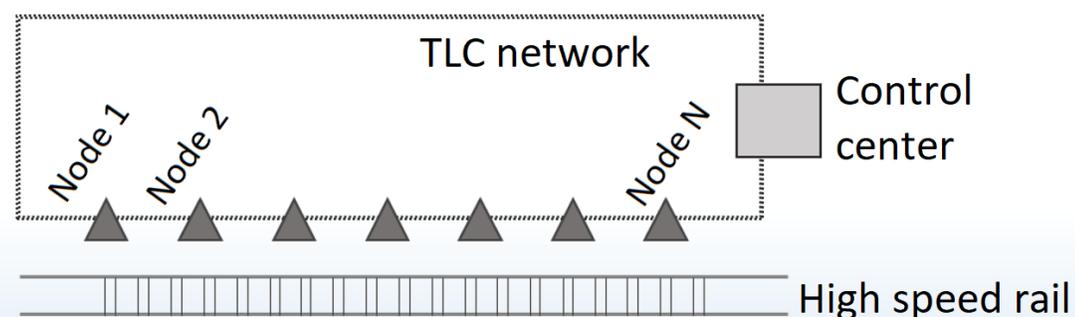
Implementazione & configurazione della rete sismica

Antenna sismica quasi-lineare di 20 nodi, spaziate regolarmente lungo la ferrovia ad alta velocità tra Napoli e Roma (circa 200 km)



Implementazione del sistema EW@TAV:

Array lineare di **stazioni** disposte **parallelamente alla linea AV**

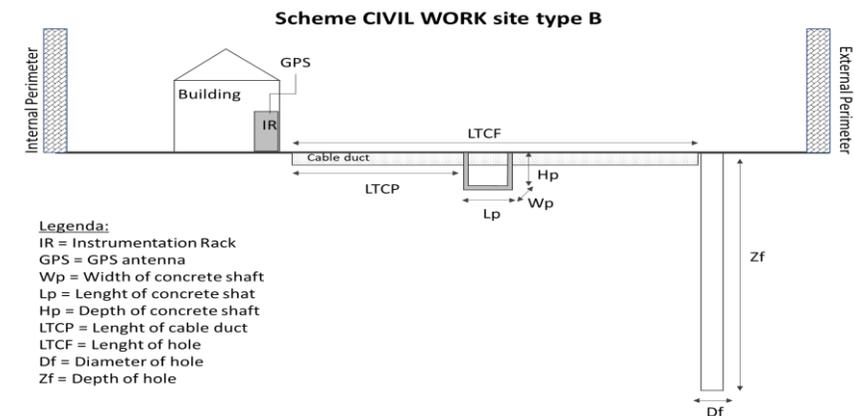
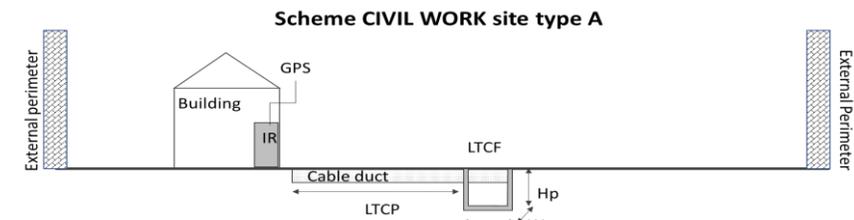
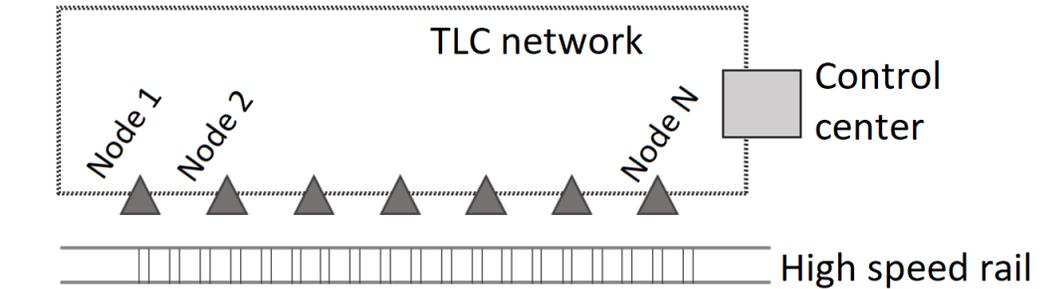


- ❖ **15 Siti Tipo A:** stazioni di superficie (accelerometri 3C)
- ❖ **5 Siti Tipo B:** stazioni di superficie + accelerometri 3C in pozzetti (prof 20m)

EW@TVA : realizzazione dei siti di registrazione

❖ Specifiche tecniche per la fornitura e l'installazione di HW e opere

- Progettazione del sito di registrazione e condizioni ottimali per la misura
- Sistema di comunicazione e trasmissione dati
- Server dedicati per la gestione della rete e della piattaforma software EW@TVA



Legenda:

IR = Instrumentation Rack
GPS = GPS antenna
Wp = Width of concrete shaft
Lp = Length of concrete shaft
Hp = Depth of concrete shaft
LTCP = Length of cable duct
LTCF = Length of hole
Df = Diameter of hole
Zf = Depth of hole

Una piattaforma flessibile, modulare ed adattabile alle esigenze dell'utilizzatore

Il sistema di Early Warning Sismico è basato sulla misura dell'onda-P

Versione 1.0

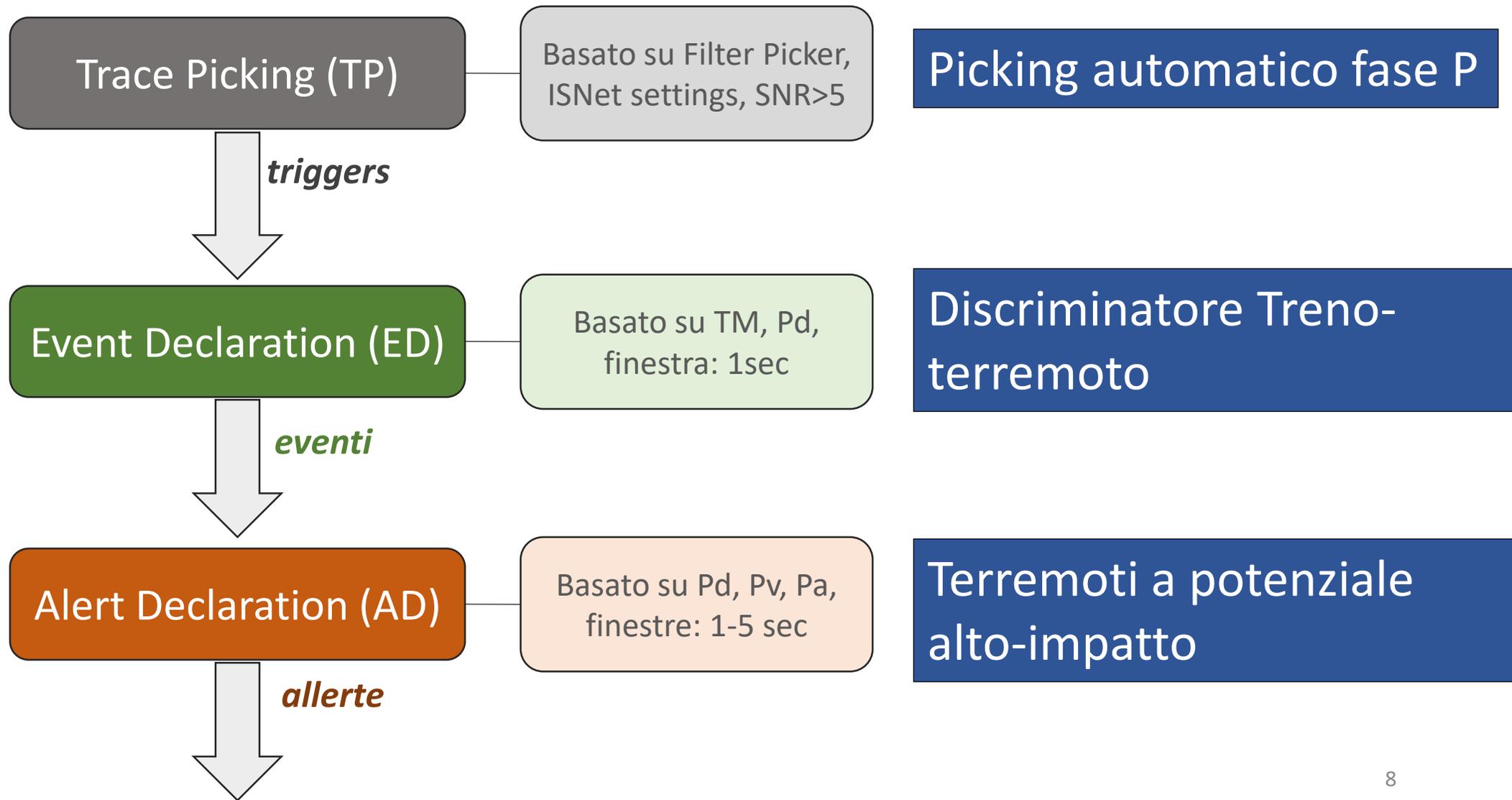
- Allerta basata sulla predizione ai nodi della rete dell'impatto in termini di **PGA (PGV,IMM)**
 - No localizzazione, No magnitudo
- «Shake-Map preliminare» ottenuta **dal segnale P che si è propagato** lungo l'array
- «Shake-Map Finale» ottenuta **dall'onda S** sulla durata dell'intero segnale registrato

Versione 2.0

- Allerta basata sulla predizione ai nodi della rete dell'impatto in termini di **PGA (PGV,IMM)**
 - SI localizzazione, SI magnitudo
- «Shake-Map preliminari» ottenuta **dal segnale P e da Leggi di Attenuazione (GMPEs)**
- «Shake-Map Finale» ottenuta **dall'onda S** sulla durata dell'intero segnale registrato

Modulo Decisionale

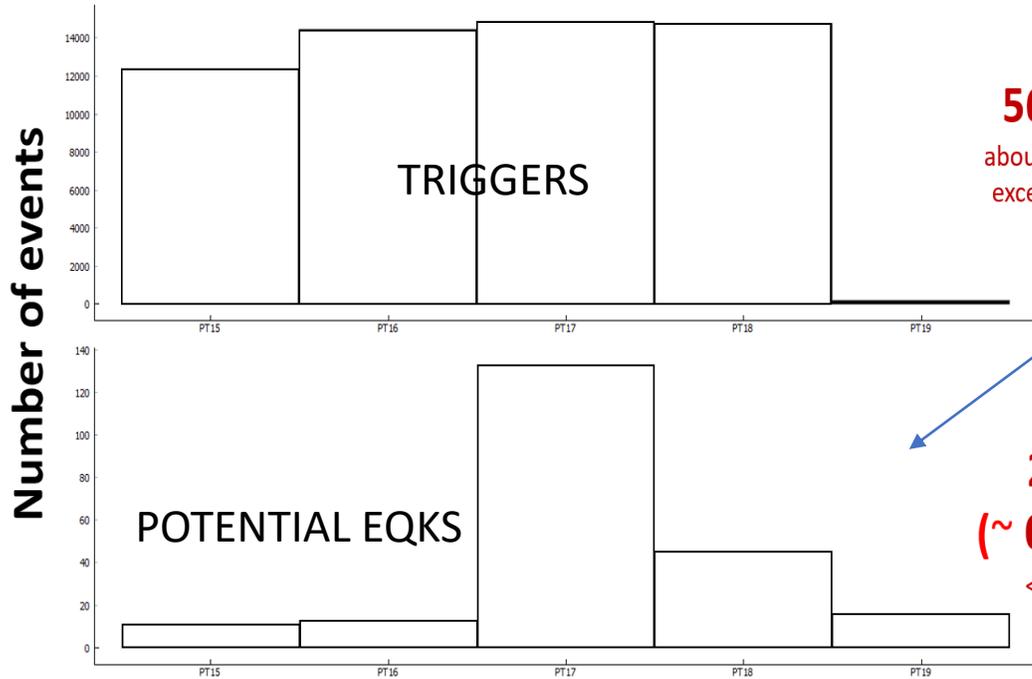
Fasi principali dell'analisi del segnale in tempo-reale



Sperimentazione Temporanea

Cumulative analysis of event declaration at single PTs

Following weeks of real-time testing with ad-hoc TM calibration for each PT

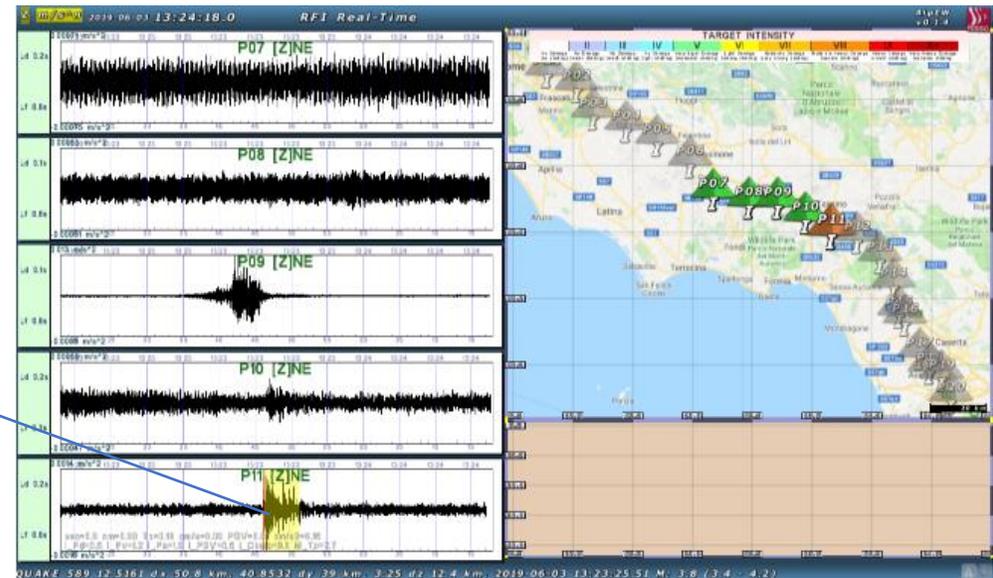
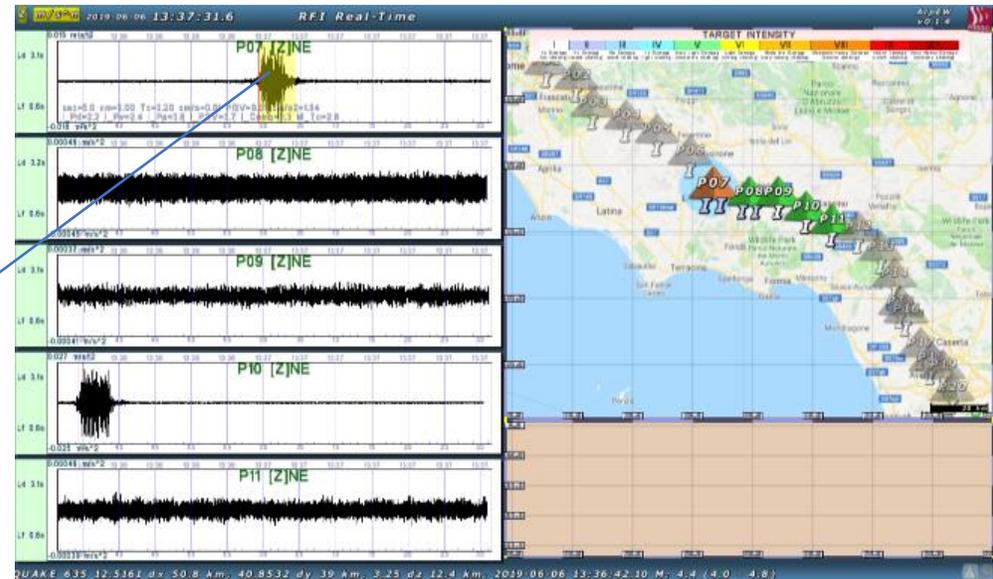


TYPE A0:
56816 total events
about 100 events per day at each PT, except PT19, where the sensor-line distance is largest

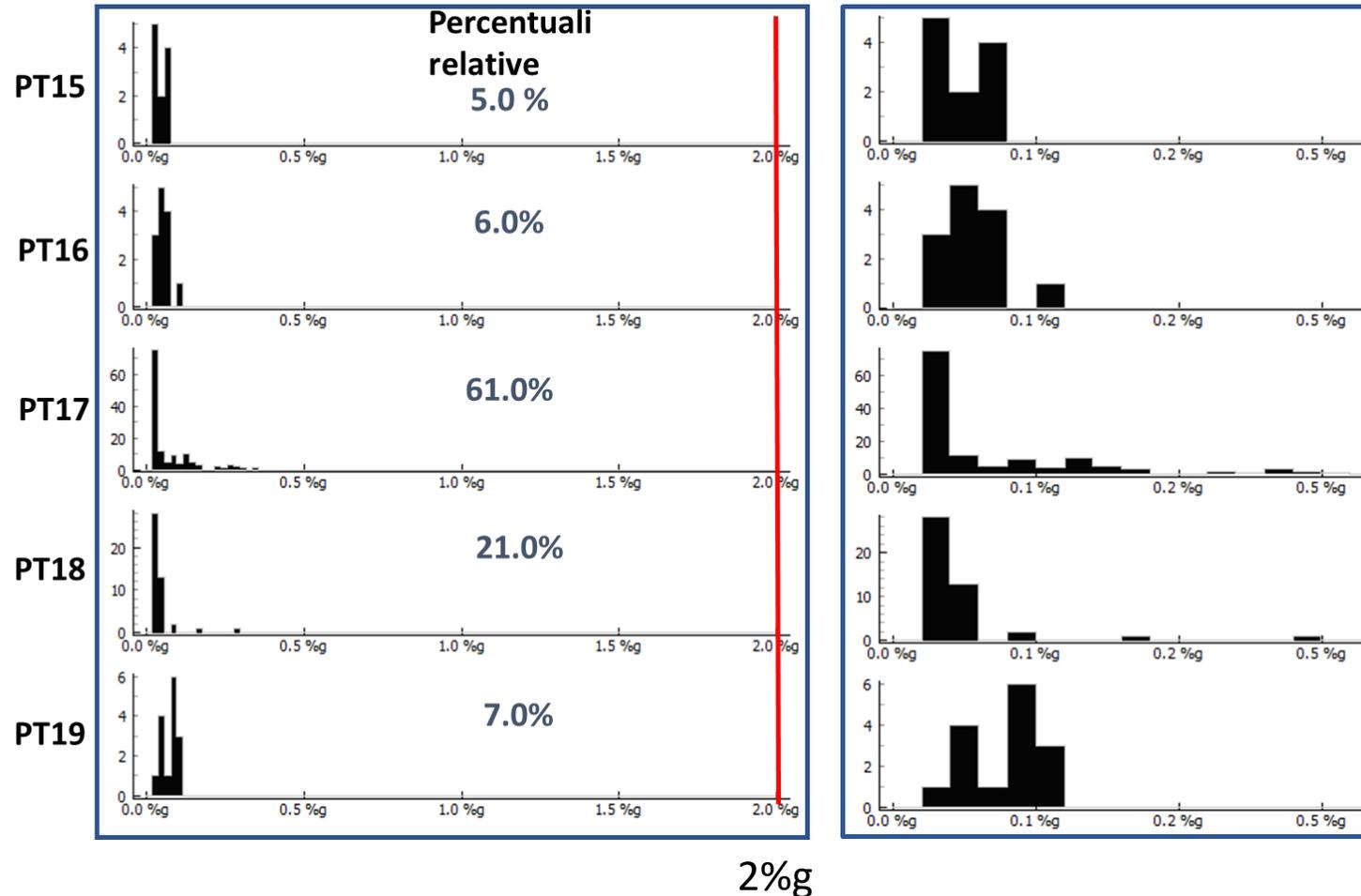
TYPE A1,A2:
217 total events
(~ 0,38% of A0 type)
< 1 events per week at each PT, except PT17 and PT18

For the data acquired during this experiment, TYPE A2 events are the same as type A1

In un periodo di circa 9 mesi di sperimentazione con 5 stazioni: circa 57000 triggers (Tipo A0) e 220 eventi identificati come potenziali eventi sismici.



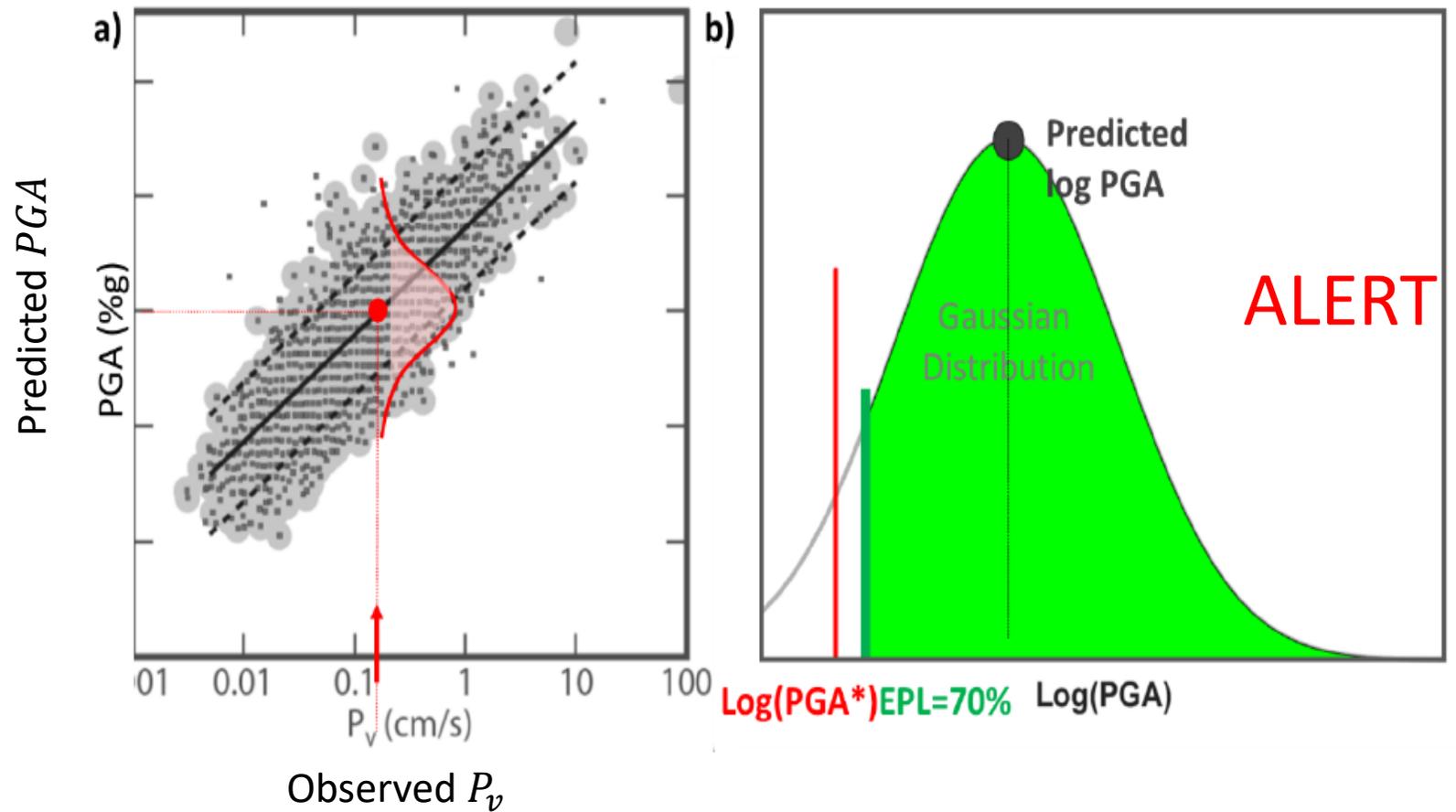
PGA predetti/osservati per eventi di tipo A



Tutti gli eventi di tipo A rilevati durante la sperimentazione sono associati a PGA previsti / osservati di 1 ordine di grandezza inferiori alla soglia minima di esercizio (2% g)

Criterio di allerta al singolo nodo

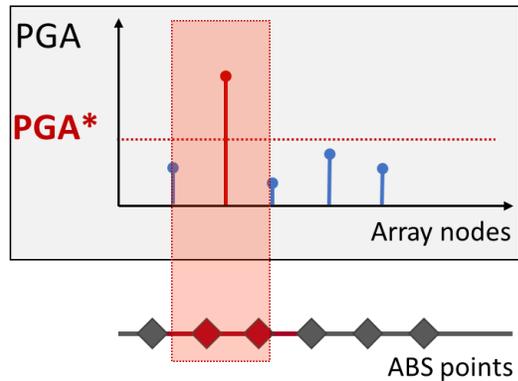
- **Stima di PGA dai valori osservati di P_x** (x=acc,vel,spost)
- **Definire la soglia di PGA** (es. 5%g)
- **Definire la soglia di probabilità di superamento (EPL, Exceeding Probability Level)** (es. 70%)
- **Comparare il PGA(EPL) with PGA di soglia:**
 - Allerta se $\text{PGA}(\text{EPL}) > \text{PGA_Thres}$
 - No Allerta se $\text{PGA}(\text{EPL}) \leq \text{PGA_Thresh}$



Prima allerta: dal «singolo nodo» a «nodi multipli»

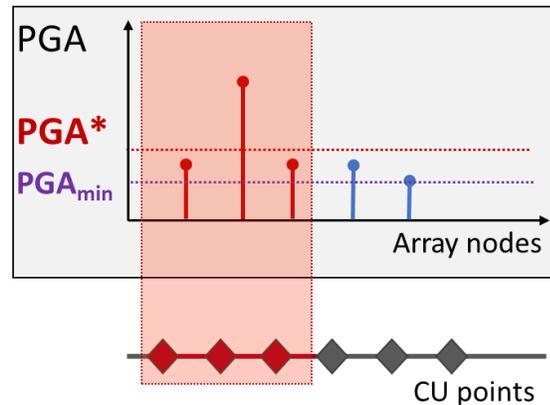
Single Station Basic Alert (SSBA)

Una stazione supera
PGA_soglia (PGA*) e
nessuna informazione
dalle altre stazioni.



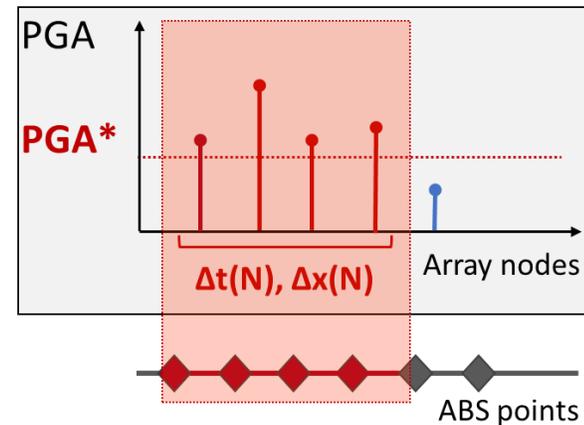
Single Station Refined Alert (SSRA)

Una stazione supera
PGA_soglia (PGA*) e le due
stazioni adiacenti superano
un valore minore di
PGA_soglia



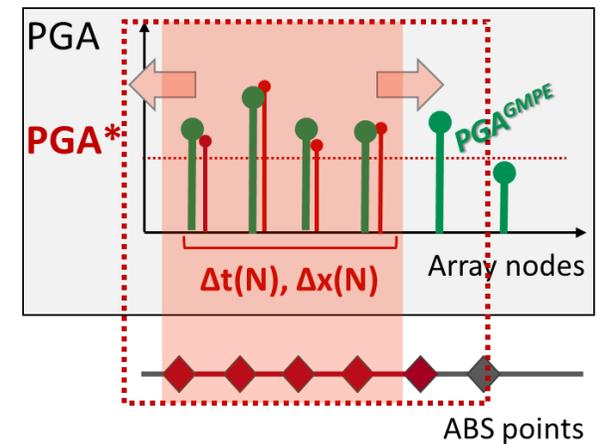
Multi-Station Alert (MSA)

N stazioni superano
PGA_soglia (PGA*) entro
criteri di coincidenza
spazio-tempo



Multi-Station Alert + Location Module (if M and R are accepted)

N stazioni superano
PGA_soglia (PGA*). GMPE è
usata per espandere l'area di
intervento.

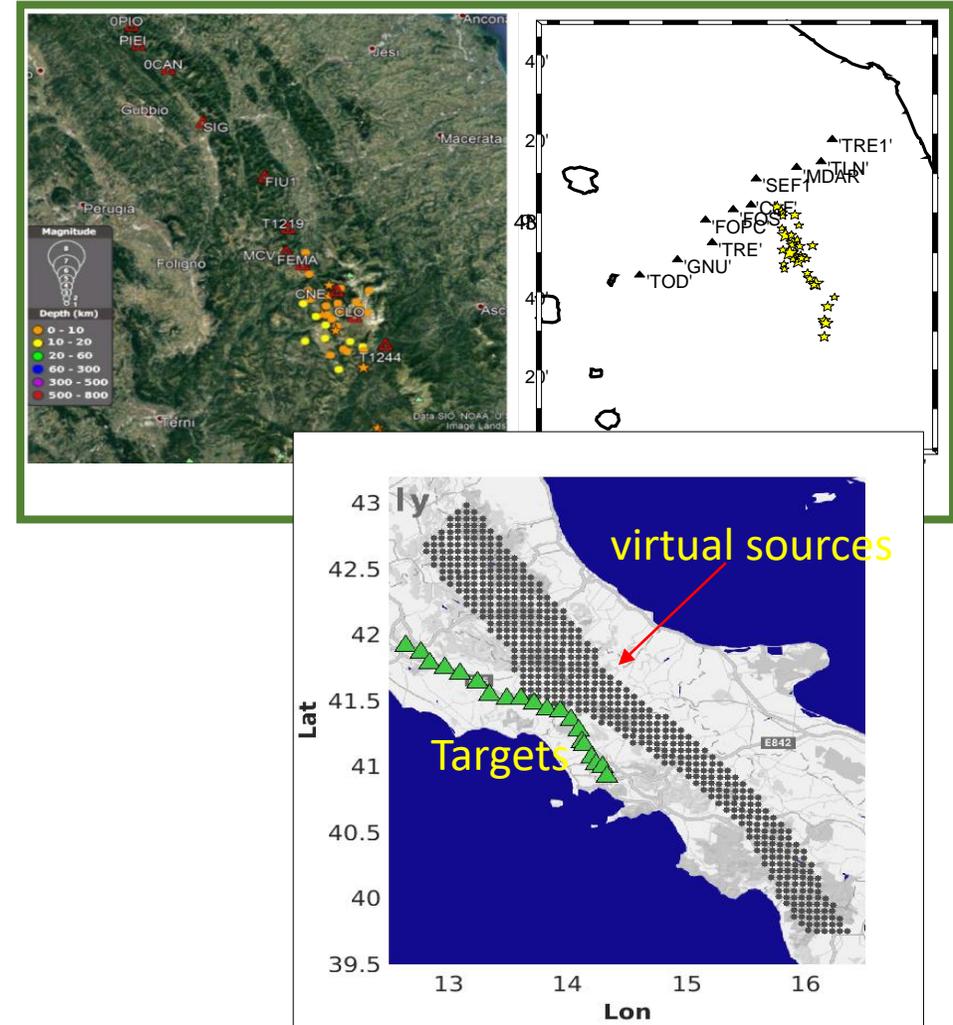


rapido/semplice

robusto/accurato

Tests di valutazione della performance del sistema

- **Esperimenti «onsite»:** modalità tempo-reale,
 - Test end-to-end della catena di acquisizione, e degli algoritmi per la discriminazione dei segnali rispetto al rumore → **6 mesi dopo installazione definitiva**
- **«PlayBack» delle forme d'onda di terremoti reali passati:**
 - Simulare la configurazione di EW@TVA (lunghezza array, spaziatura nodi, ampio range distanza-azimuth-magnitudo per la distribuzione dei terremoti)
 - Sequenza 2017 Italia Centrale, rete DPC-INGV (M 4-6.5)
 - Terremoti Giapponesi M>5 ultimi 10 anni
- **Modelli statistici e scenari di simulazione a scala nazionale**
 - Si considera la rete ferroviaria AV a scala nazionale
 - Si analizzano le potenziali sorgenti sismiche distribuite uniformemente nelle zone sismiche nazionali, la loro occorrenza statistica e distribuzione in magnitudo dalla mappa di pericolosità



Esempio di analisi di performance Metodo «PlayBack»

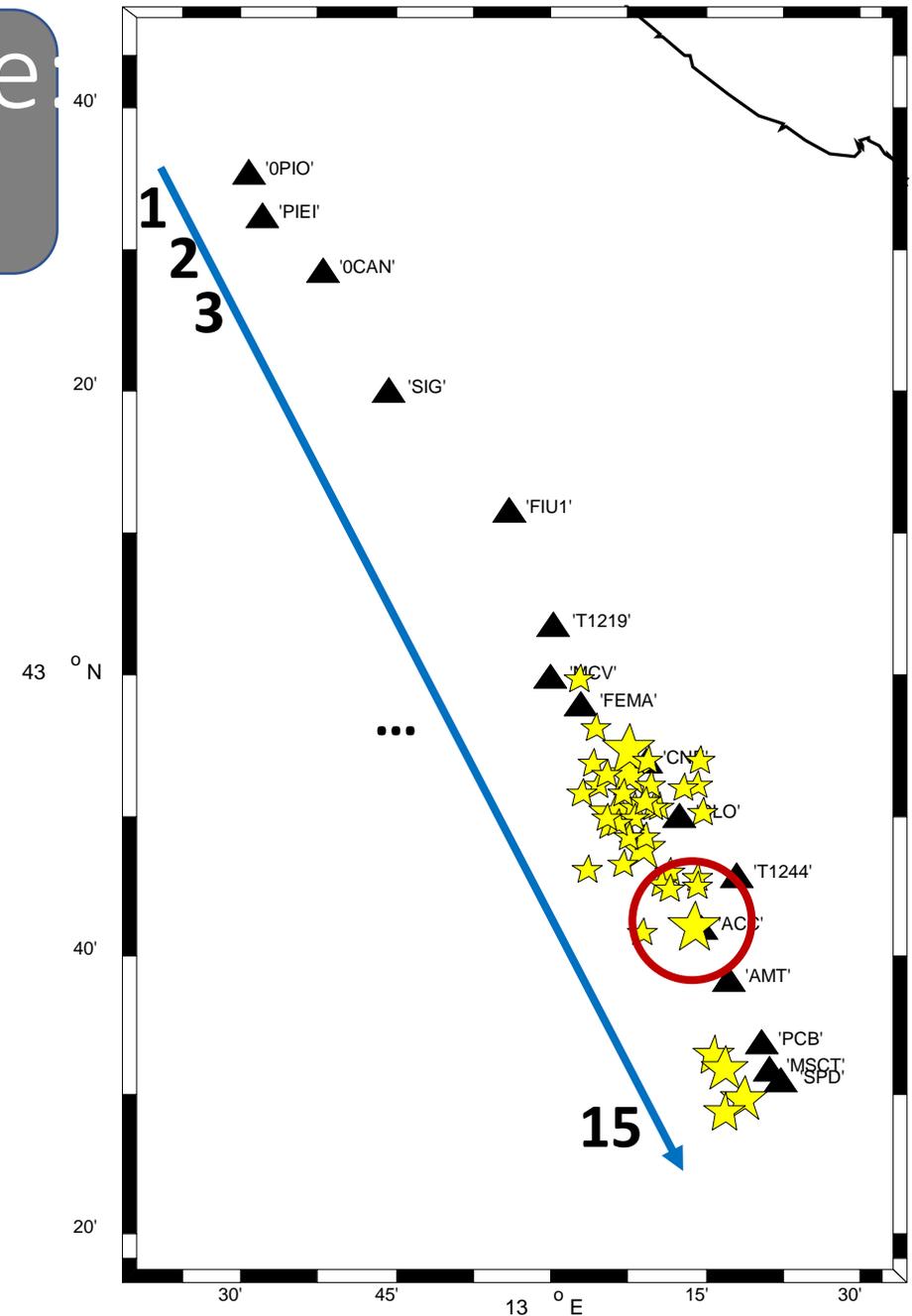
Criterio di allerta: SSBA

PGA soglia: 5%g

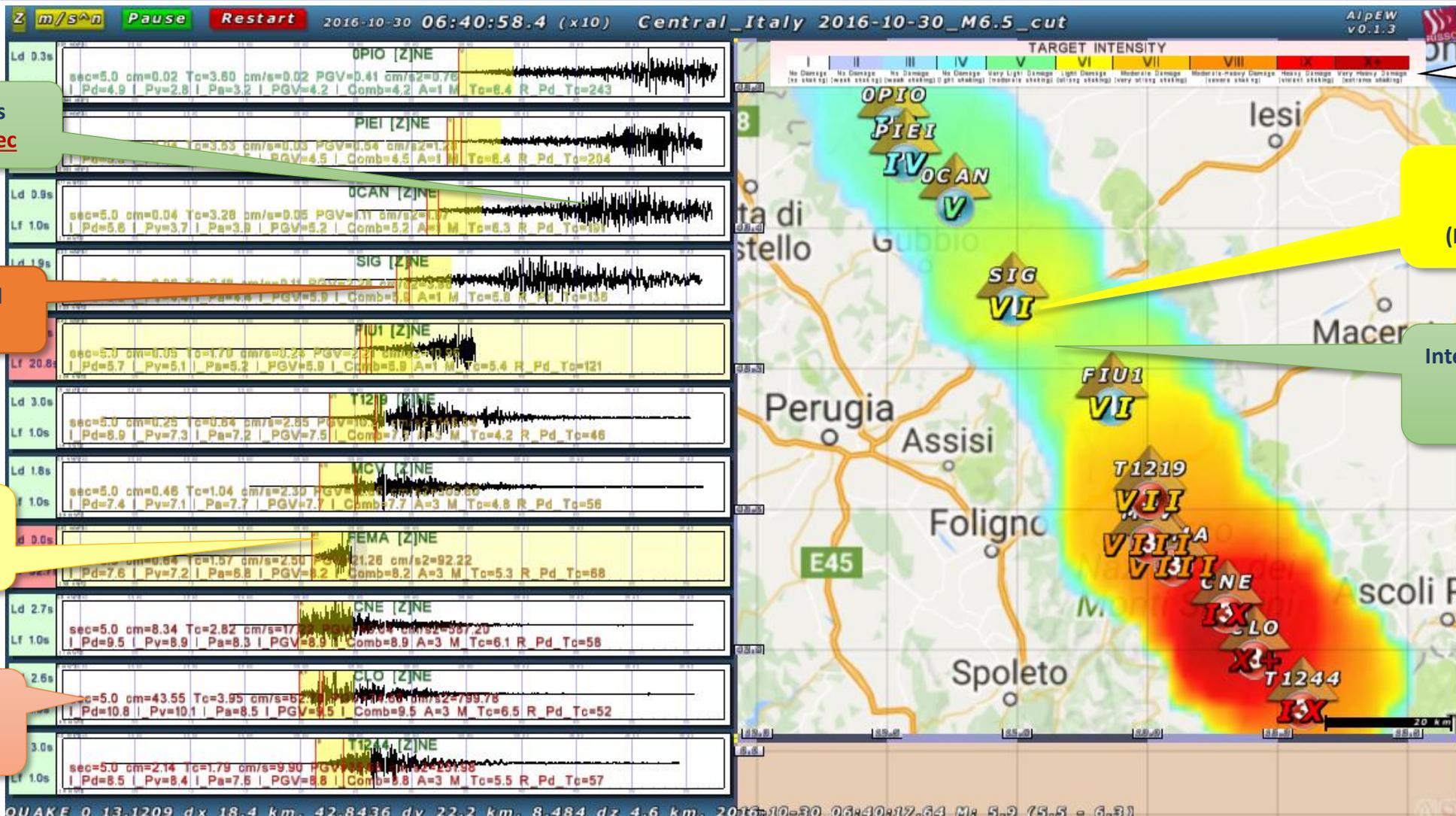
Livello EPL : 50%

**Terremoto: NORCIA [30-10-2016
06:40:17 (UTC)], Mw 6.5**

**Array: Orientazione Appenninica (15
stazioni in totale, spaziatura 15 km)**



Play-Back Forme d'onda Terremoto di Norcia Mw6.5



Seismograms
Latency ≤ 1 sec

P-wave arrival
identification

P-wave signal
(0.5 - 5 s)

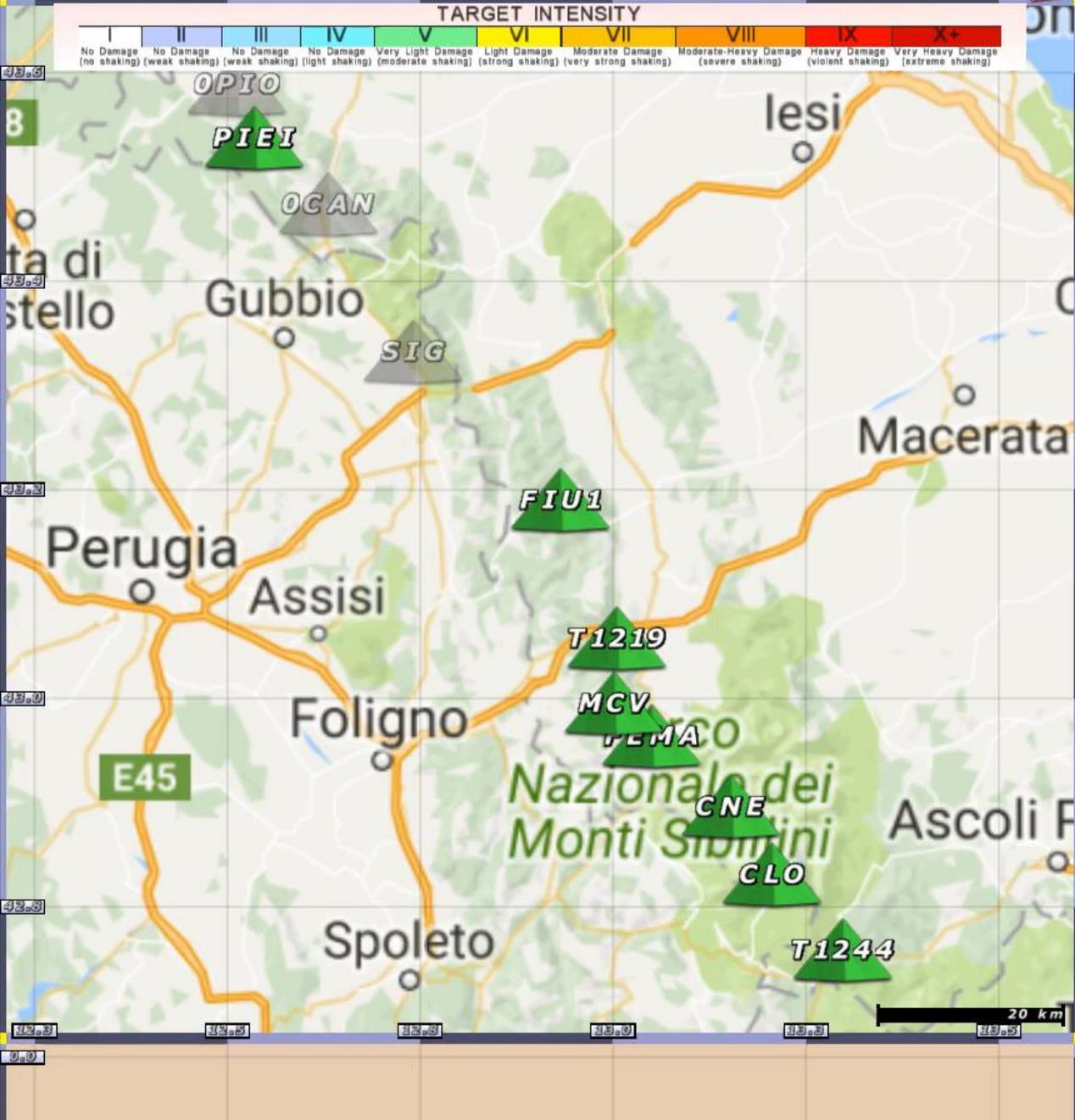
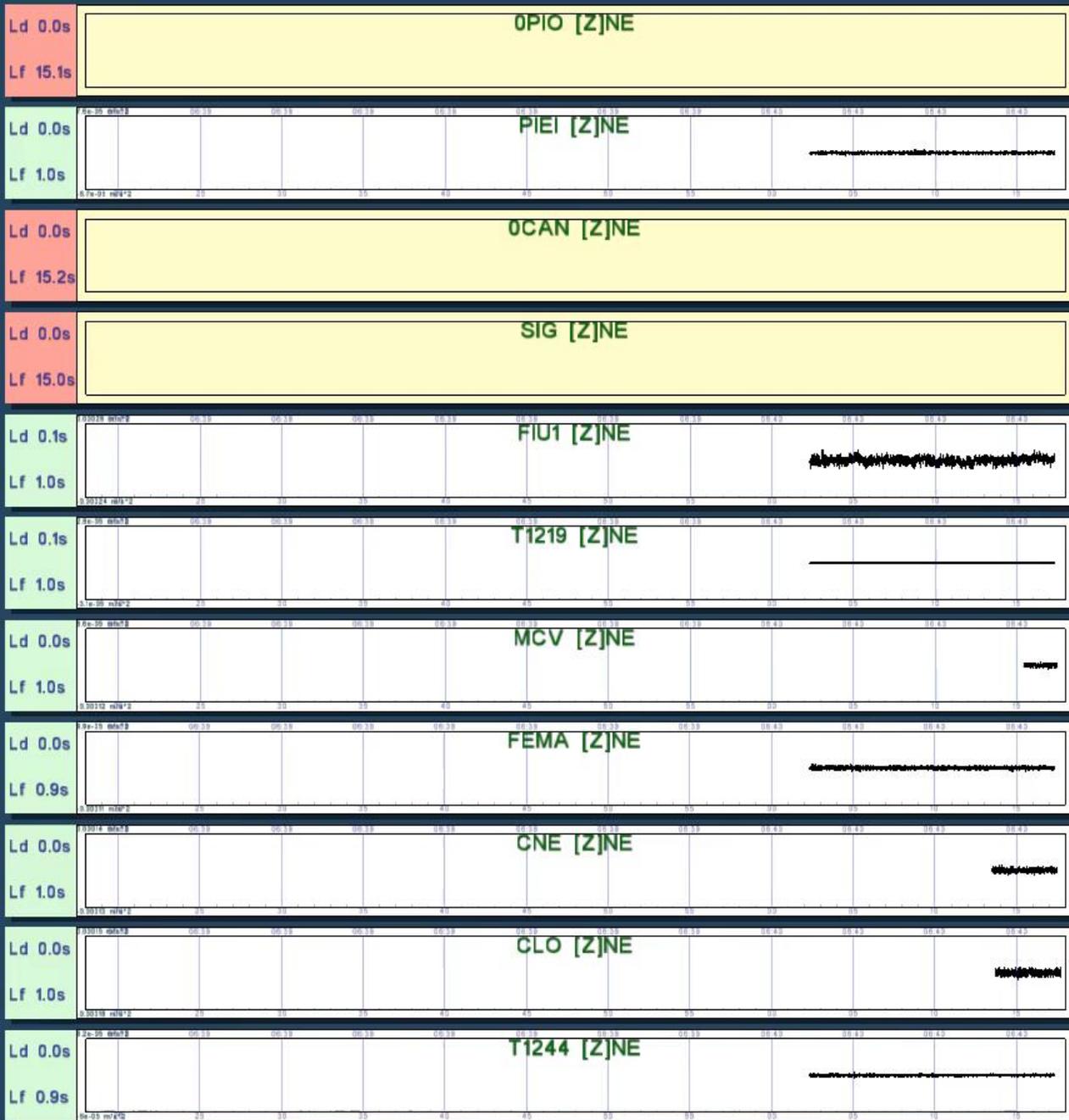
P-wave
measurement
and parameters

Intensity Level
(degree / color)

Seismic Station
Intensity = VI
(Predicted or Measured)

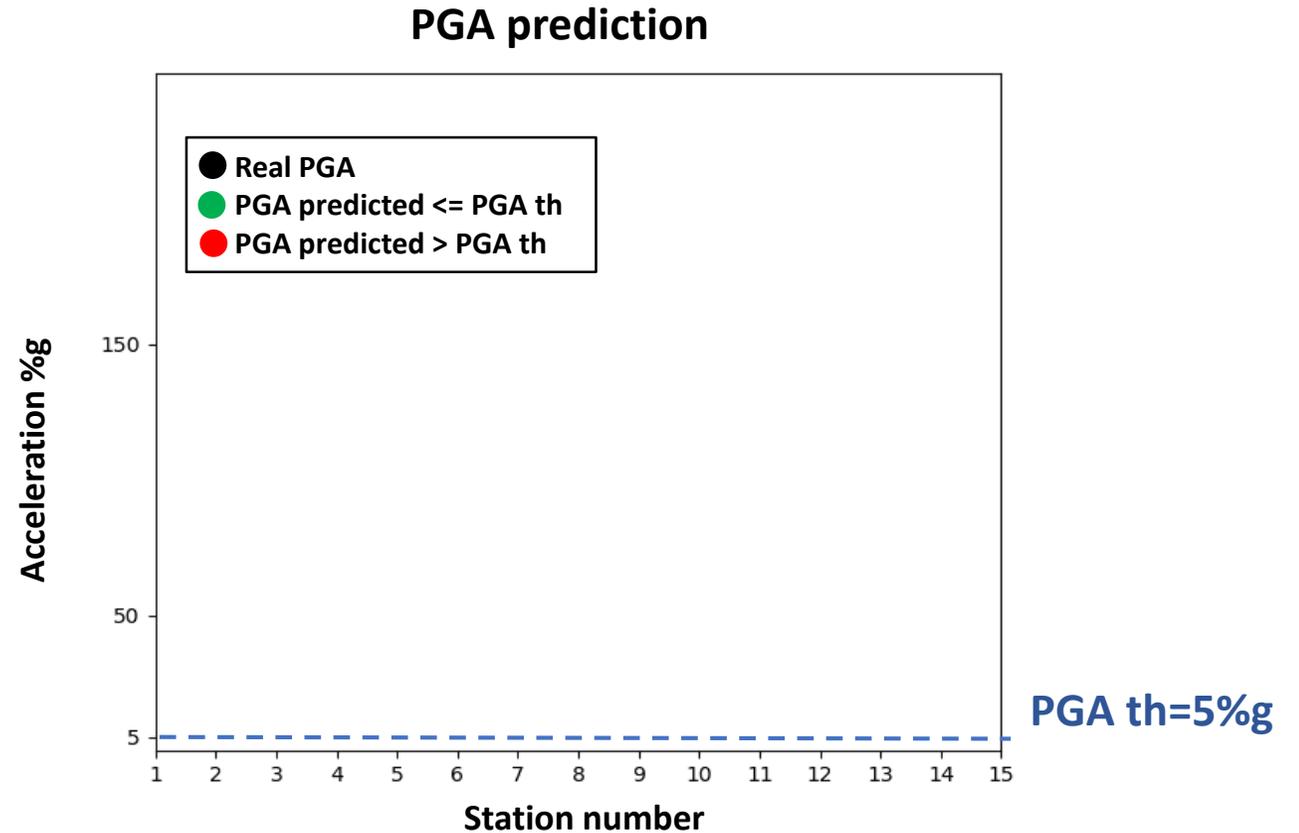
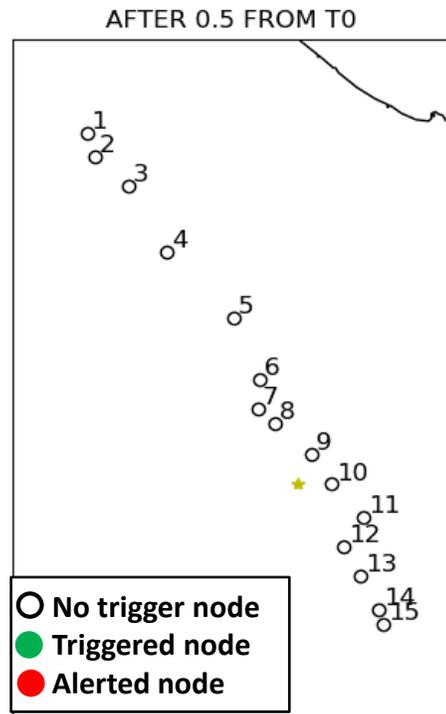
Intensity on the railway line,
predicted through
interpolation

- Playback of real
seismograms
during the M6.5
Norcia earthquake,
using a 100km long
linear array of 10
INGV e RAN (Dept.
Of Civil Protection)
stations.



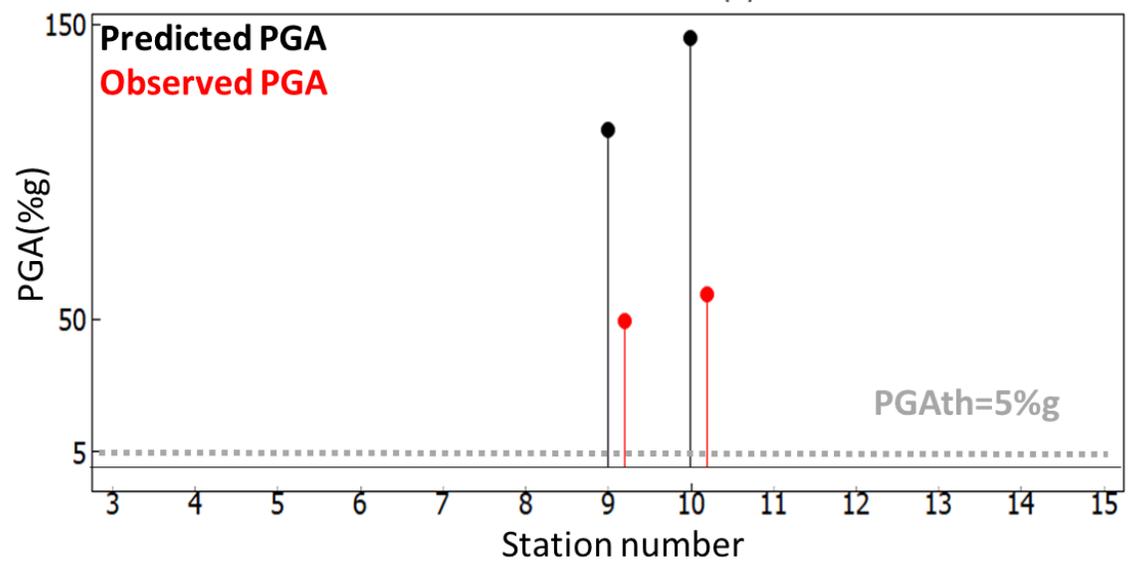
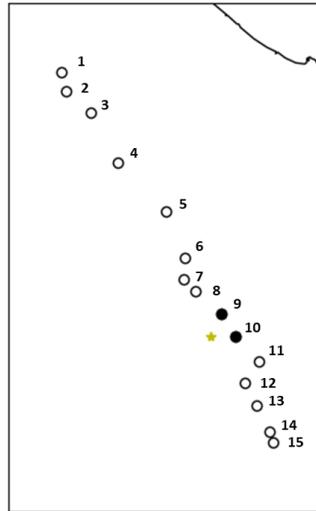
SIMULATION NORCIA EARTHQUAKE Mw 6.5

Config: SSB
PTL=50%



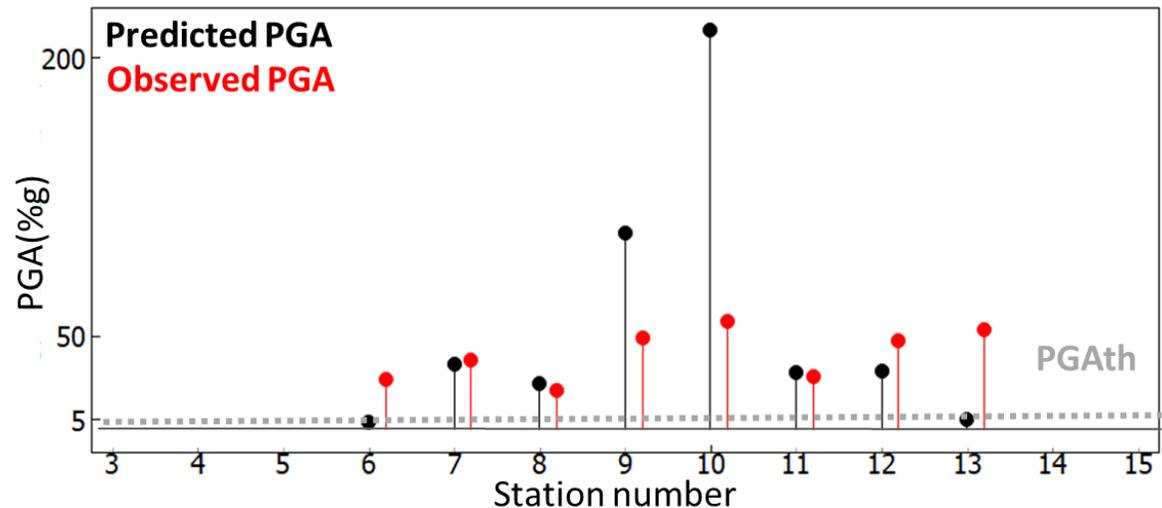
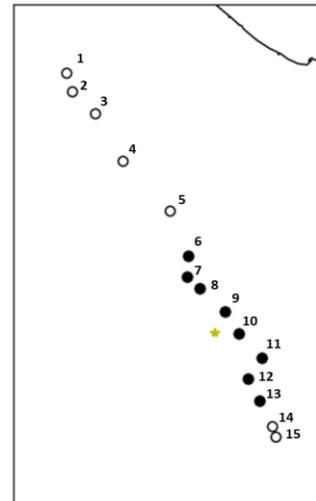
Predicted vs Observed PGA

1st ALERT (TFA) :
2 stations after 2 sec
from first P-arrival



North \longrightarrow South

2nd ALERT (TSA) :
8 stations after 6 sec
from first P-arrival



North \longrightarrow South

Considerazioni finali



- **EW@TAV in Italia è una sfida S&T**, a causa delle distanze epicentrali relativamente brevi, dei tempi utili attesi per azioni di messa in sicurezza e l'alto impatto di potenziali falsi/mancati allarmi
- **EW@TAV: integra i sistemi di «early warning» e «rapid response»** seguendo un approccio evolutivo nel tempo e probabilistico nella decisione
- **I risultati finora raccolti dalla sperimentazione in situ sono promettenti:** il 99,6% dei trigger è stato correttamente identificato come non-terremoto. Il restante 0,4% identificato come potenziale terremoto ha mostrato una PGA stimata inferiore allo 0,1% g. Alla fine, il sistema ha identificato con successo 2 terremoti reali verificatisi durante l'attività di test in situ
- **Testare il sistema e valutarne le prestazioni è un aspetto critico per tutti i sistemi EW operativi o in via di sviluppo.** È in corso uno studio di simulazione che utilizza un'ampia banca dati di terremoti per valutare le prestazioni del sistema in diverse condizioni operative.

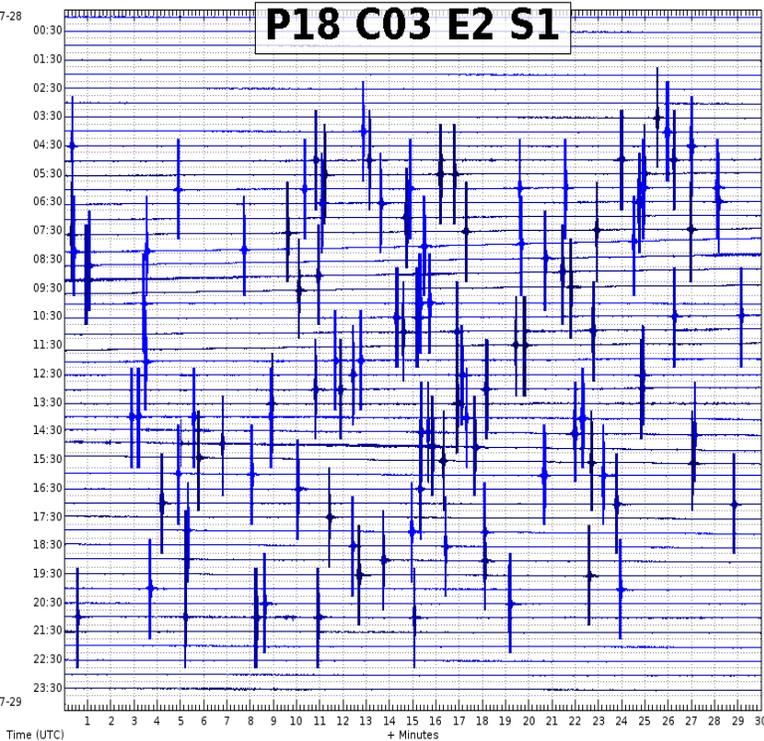
EEWS for High Speed Train (HST) Railways in Italy : Overview and Concept

Research Project Contract funded by RFI –
Rete Ferroviaria Italiana

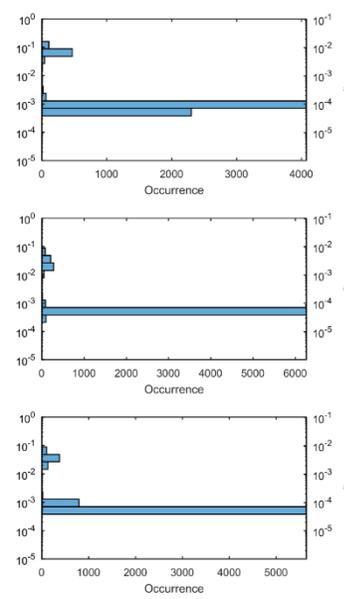
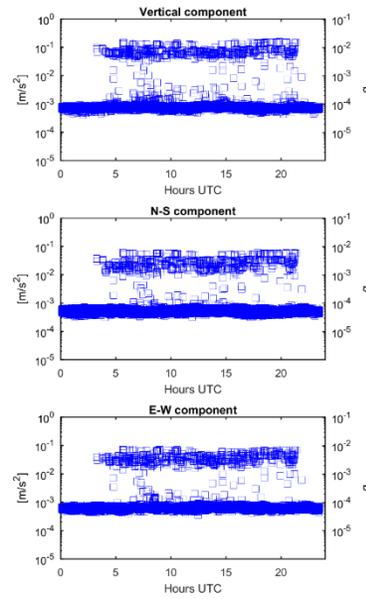


Noise at station sites: background + trains

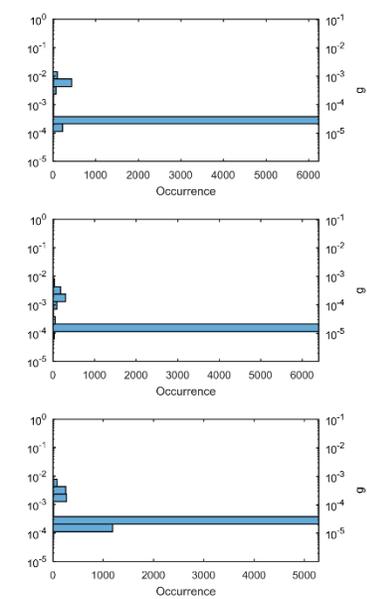
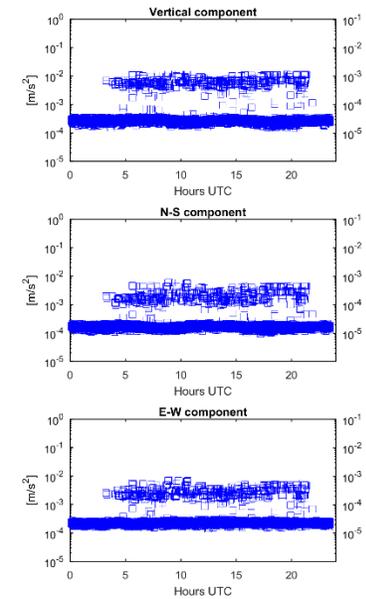
Daily record visualization:
Helicorder



PGA (Peak Ground Acceleration)



Acceleration root mean square (Arms)



PGV (Peak Ground Velocity) and Velocity root mean square are also computed

TRAIN MARKER

Train earthquake discriminator module: Parameters & observable quantities



- Pa, Pv e Pd: maximum absolute value of acceleration, velocity and displacement, respectively;
- $\log (Pa/Pd)$ = ratio between peak acceleration and peak displacement;

- $$RUD = \frac{\int_P^{P+1} (ACC_{high})^2 dt}{\int_P^{P+1} (ACC_{low})^2 dt}$$

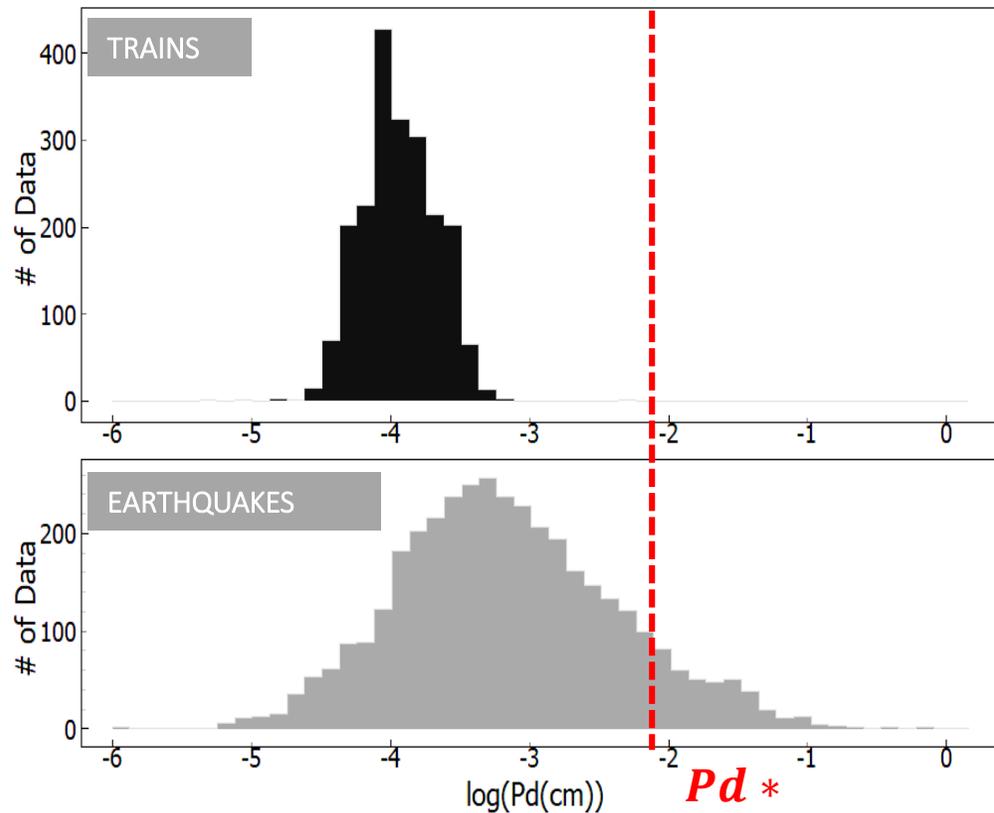
ACC_{high} = High-pass filtered acceleration (15-30 Hz)
 ACC_{low} = Low-pass filtered acceleration (0.075-3 Hz)

- $$\tau_c = 2\pi \sqrt{\frac{\int_0^{\tau_0} u^2(t) dt}{\int_0^{\tau_0} v^2(t) dt}}$$

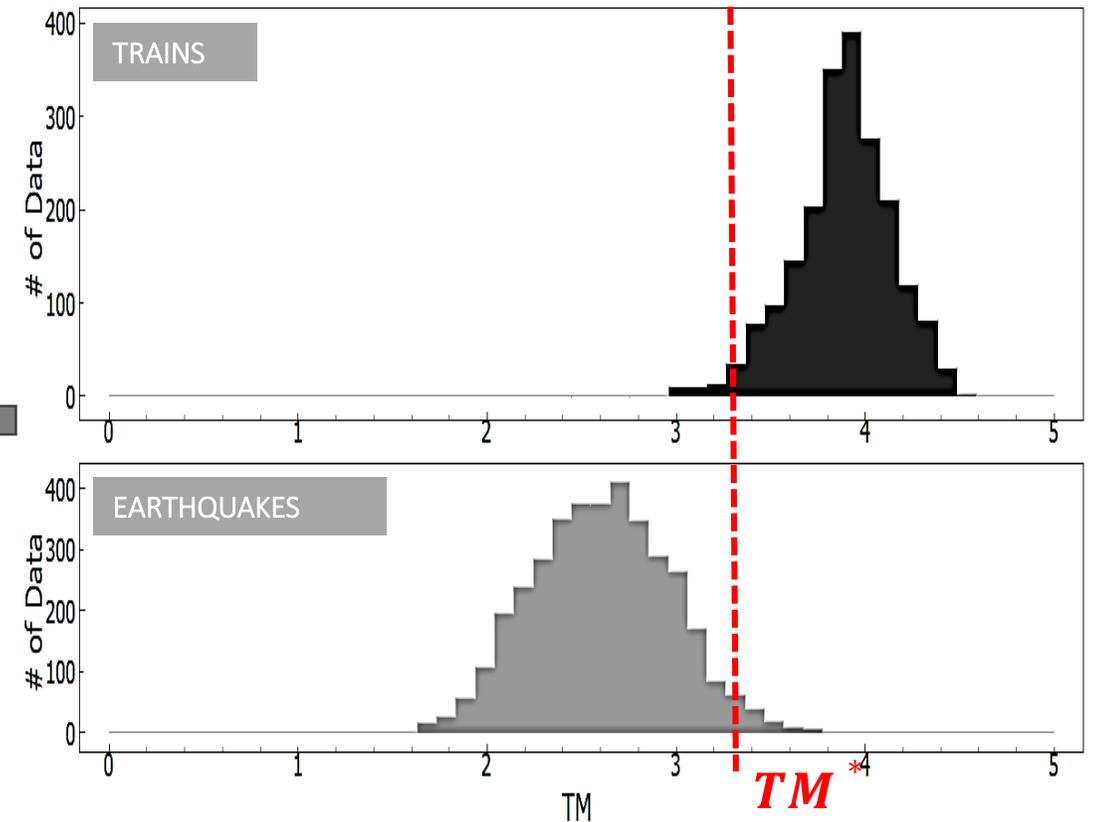
$u(t)$ = displacement signal
 $v(t)$ = velocity signal

Single station discrimination algorithm

Threshold on the recorded Pd value Log Pd
(1sec) > -2.16
(corresponding to $I_{MM} = IV$)

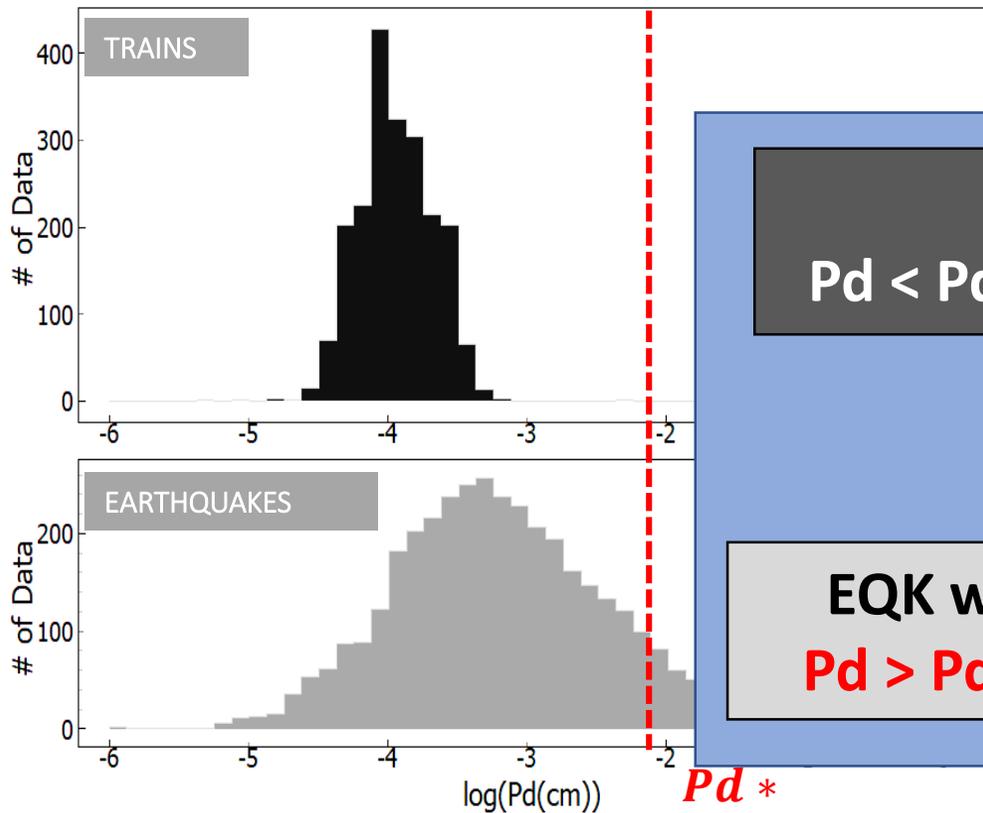


Threshold on the TM parameter:
 $\text{TM} = \alpha \text{Log}(\text{Pa}/\text{Pd}) + \beta \text{Log}(1/\text{Tauc}) + \gamma \text{log}(\text{RUD})$

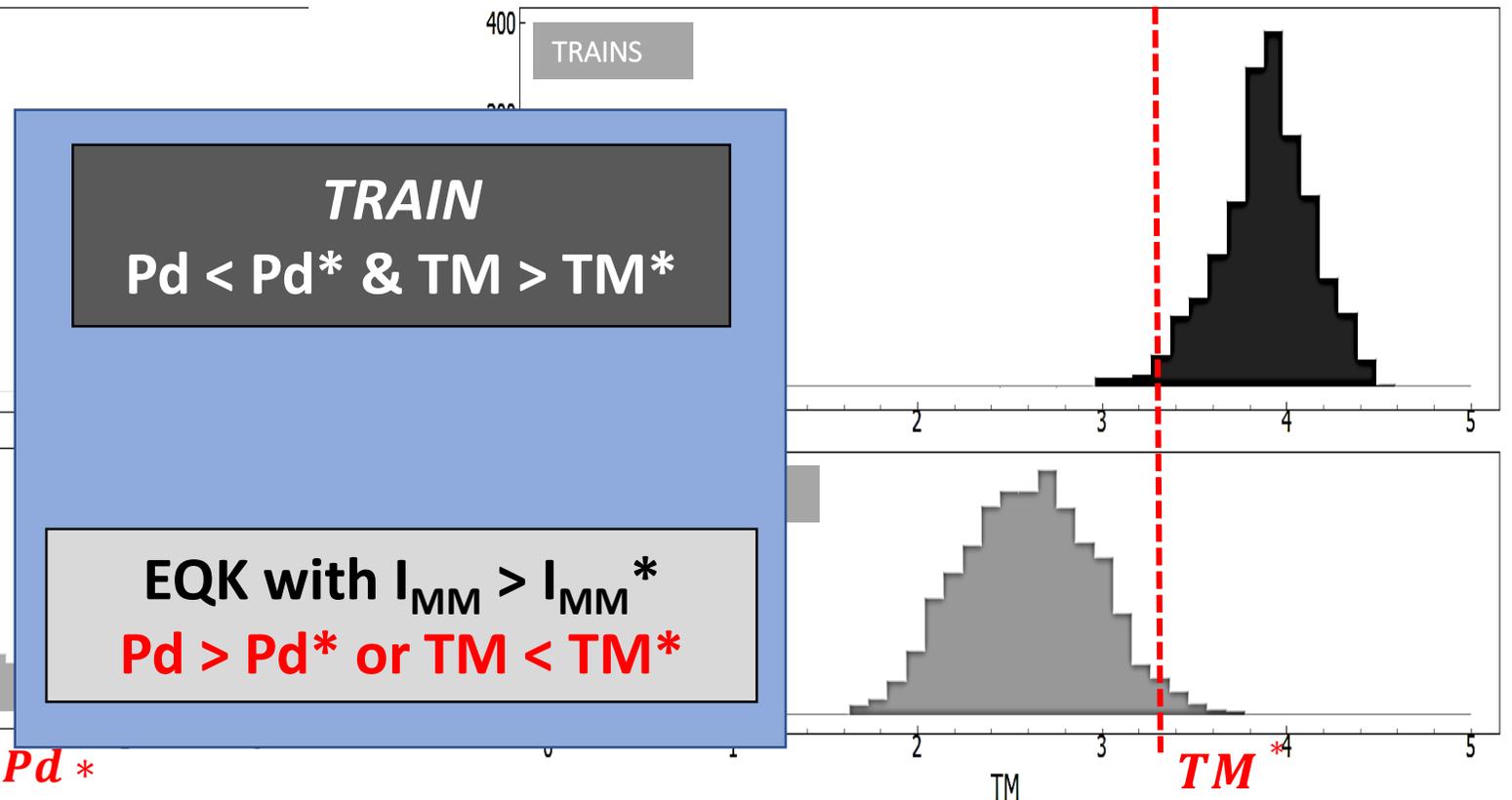


Single station discrimination algorithm

Threshold on the recorded Pd value Log Pd
(1sec) > -2.16
(corresponding to $I_{MM} = IV$)



Threshold on the TM parameter:
 $TM = \alpha \text{Log}(Pa/Pd) + \beta \text{Log}(1/Tauc) + \gamma \text{log}(RUD)$



TRAIN
 $Pd < Pd^* \ \& \ TM > TM^*$

EQK with $I_{MM} > I_{MM}^*$
 $Pd > Pd^* \ \text{or} \ TM < TM^*$

Definitions

TP

TRIGGER: whichever signal is output from the picker module

ED

EVENT TYPE A (single station):

A0: any trigger

A1: $TM < TM^*$ or $P_d > P_d^*$ with $P_d^* = P_d(I_{MM}=III)$

A2: $TM < TM^*$ or $P_d > P_d^*$ with $P_d^* = P_d(I_{MM}=IV)$

EVENT TYPE B (two or more stations):

B0: same as A0

B1: same as A1

B2: same as A2

+ coincidence criteria:

**2 or more type A events at different stations,
within X seconds for nodes within Y km**

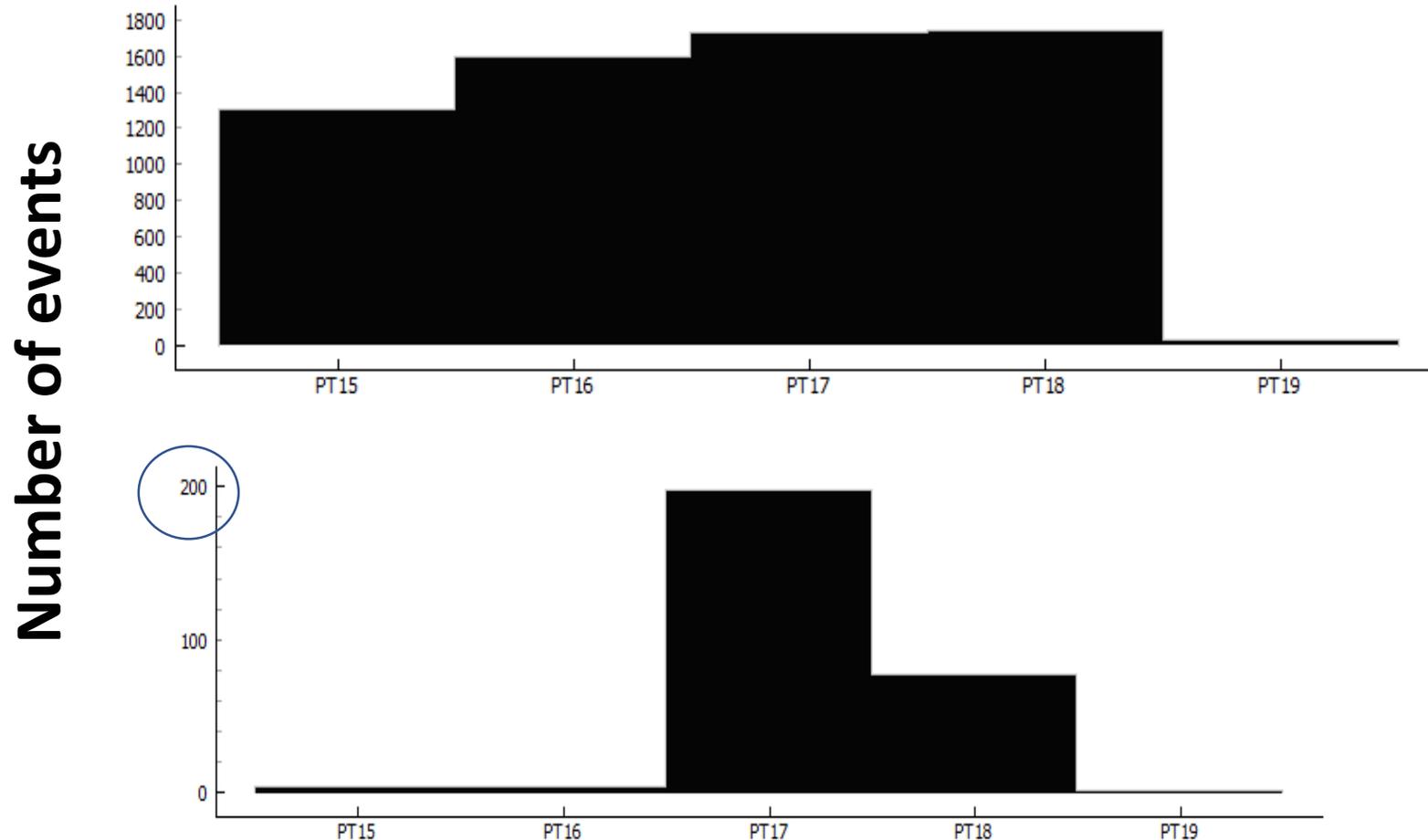
AD

Exceedance Probability depending on the threshold values on PGA:

2, 5, 8, 10, 15%g

Cumulative analysis of event declaration at single PTs

First two weeks of real-time testing with preliminary TM calibration



TYPE A0:

6406 total events

about 100 events per day at each PT, except PT19, where the sensor-line distance is largest

TYPE A1:

287 total events

($\approx 4\%$ of A0 type)

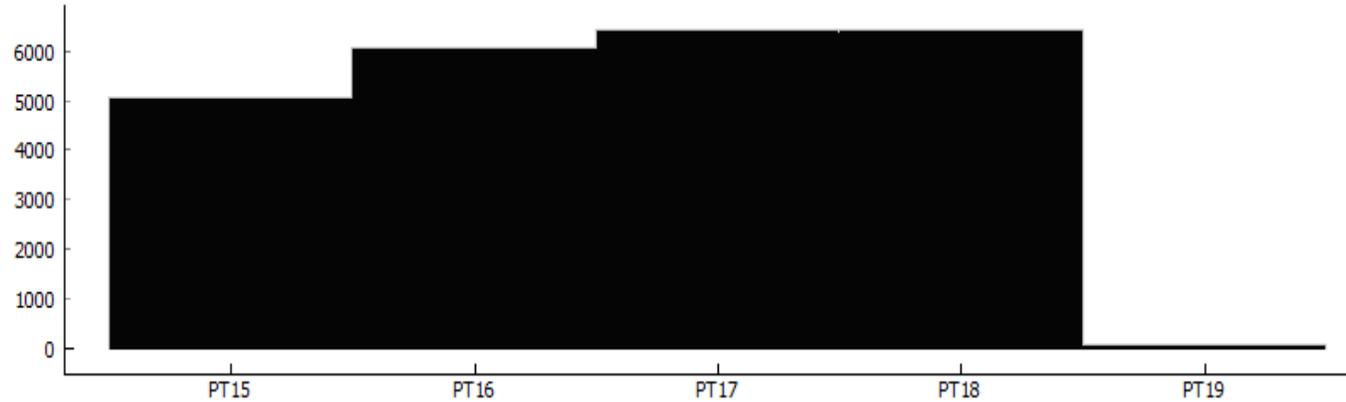
about 10-20 events per day at each PT, except PT17 and PT18

For the data acquired during this experiment, TYPE A2 events are the same as type A1

Cumulative analysis of event declaration at single PTs

Following weeks of real-time testing with ad-hoc TM calibration for each PT

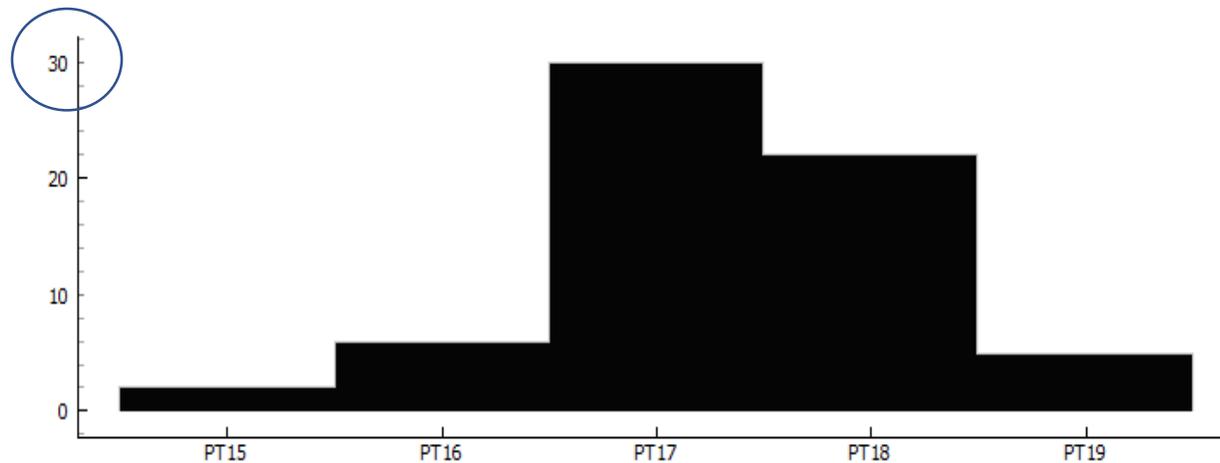
Number of events



TYPE A0:

24140 total events

about 100 events per day at each PT, except PT19, where the sensor-line distance is largest



TYPE A1:

65 total events

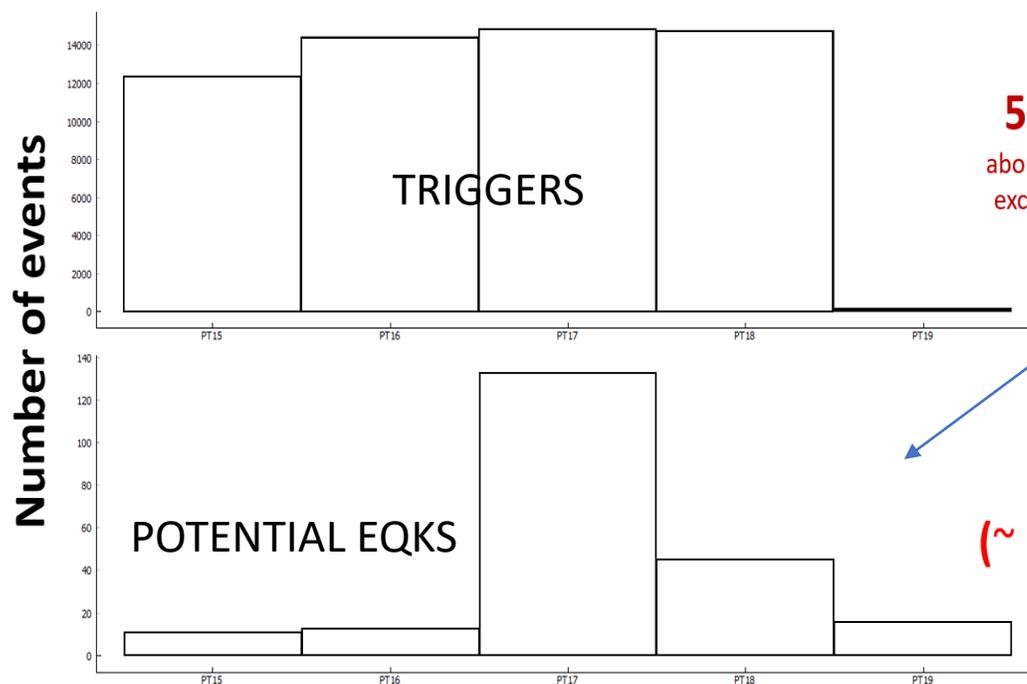
(< 0, 27% of A0 type)

< 1 event per week at each PT, except PT17 and PT18

For the data acquired during this experiment, TYPE A2 events are the same as type A1

Cumulative analysis of event declaration at single PTs

Following weeks of real-time testing with ad-hoc TM calibration for each PT



TYPE A0:

56816 total events

about 100 events per day at each PT, except PT19, where the sensor-line distance is largest

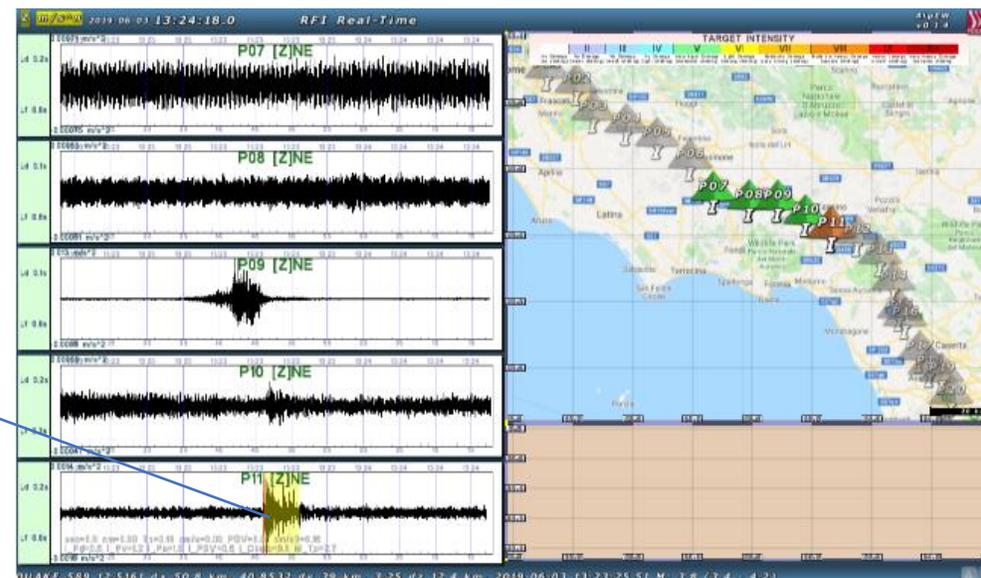
TYPE A1,A2:

217 total events

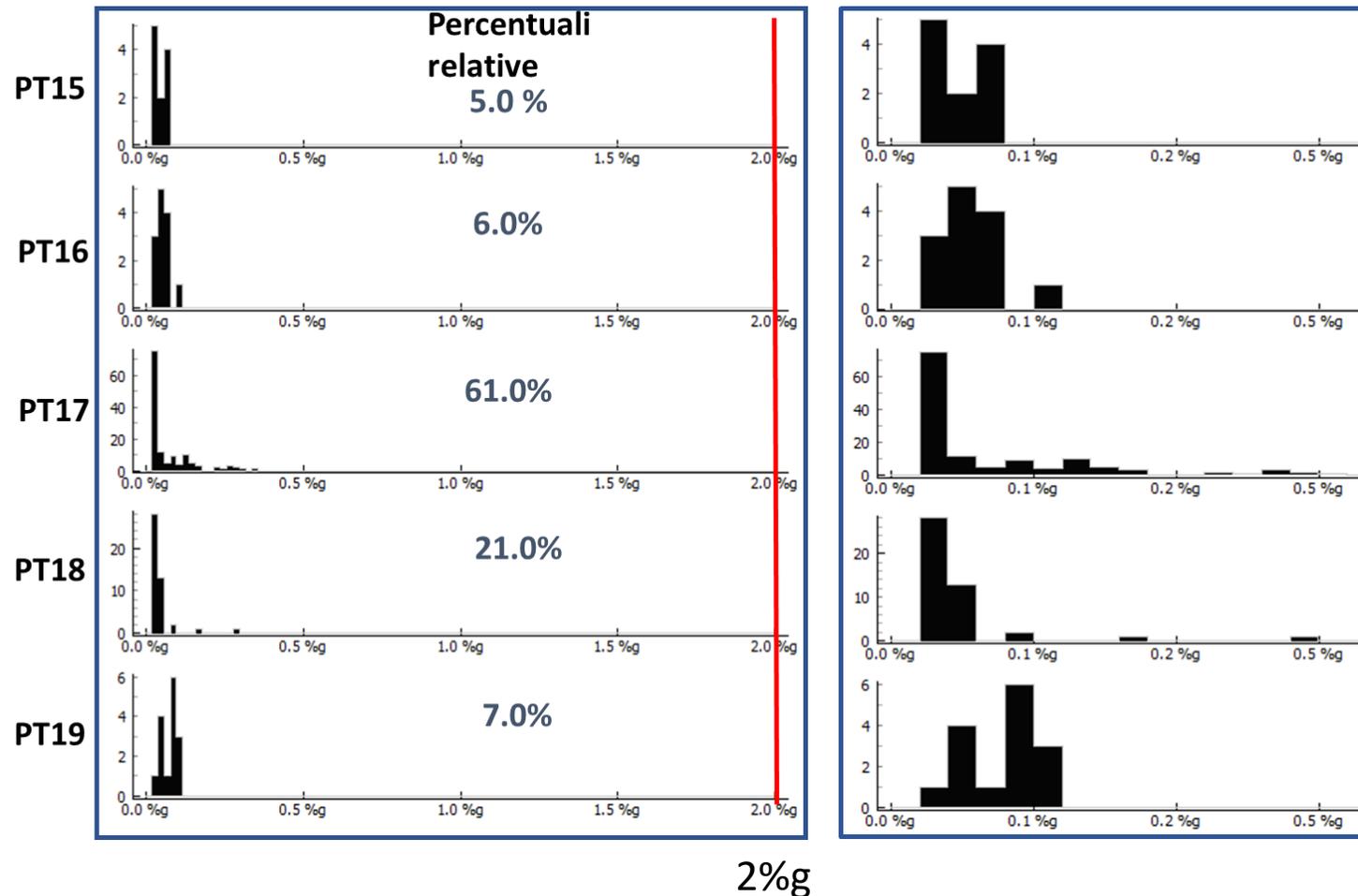
(~ 0,38% of A0 type)

< 1 events per week at each PT, except PT17 and PT18

For the data acquired during this experiment, TYPE A2 events are the same as type A1



Predicted/Observed PGAs for type A events

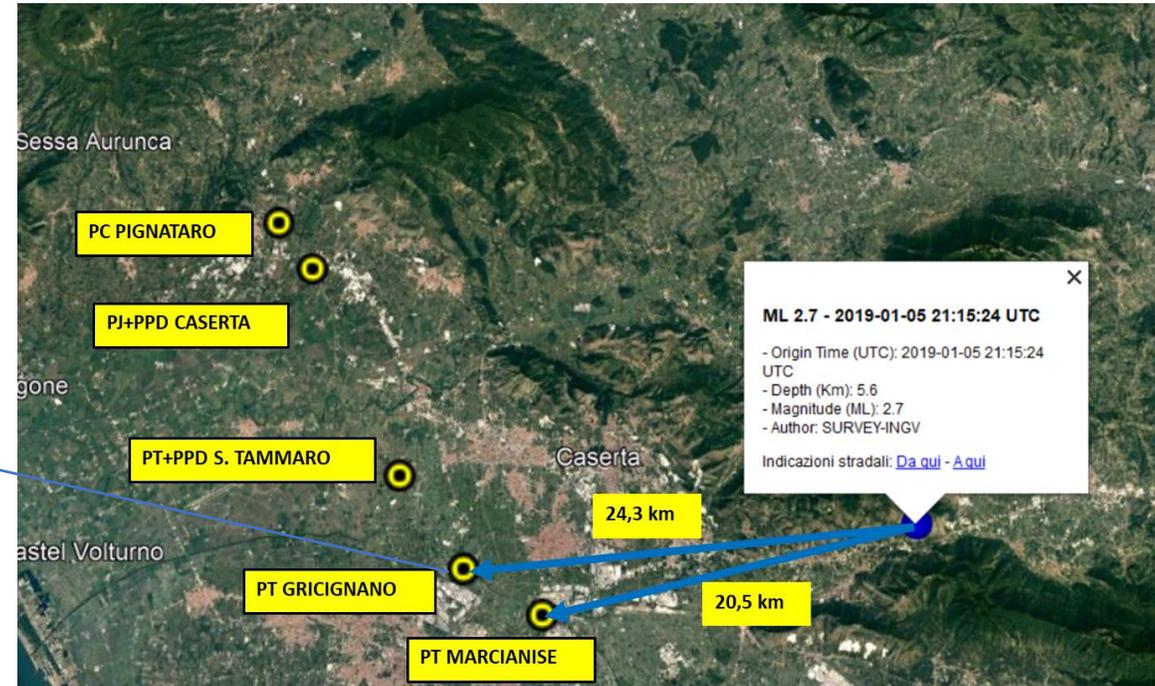


All the type A/B events detected during the experimentation are associated to predicted/observed PGAs that are 1 order of magnitude smaller than the minimum threshold of 2%g

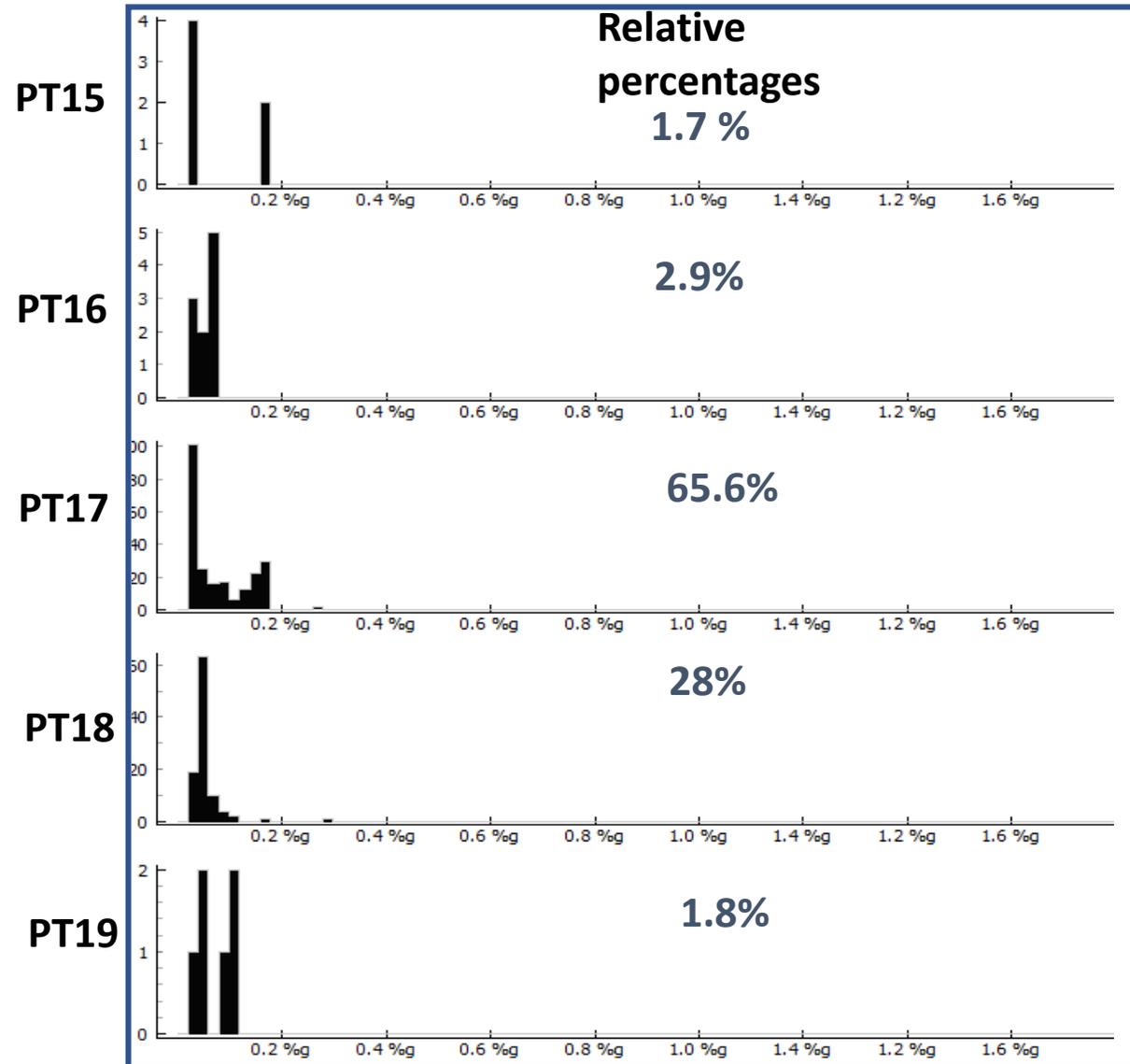
Summary Table of event declaration

EVENT TYPE	0	1	2
Type A	24140	65	65
Type B	9420	1	1

NO ALERT DECLARATION



Predicted Acceleration values for Events type A1 e A2

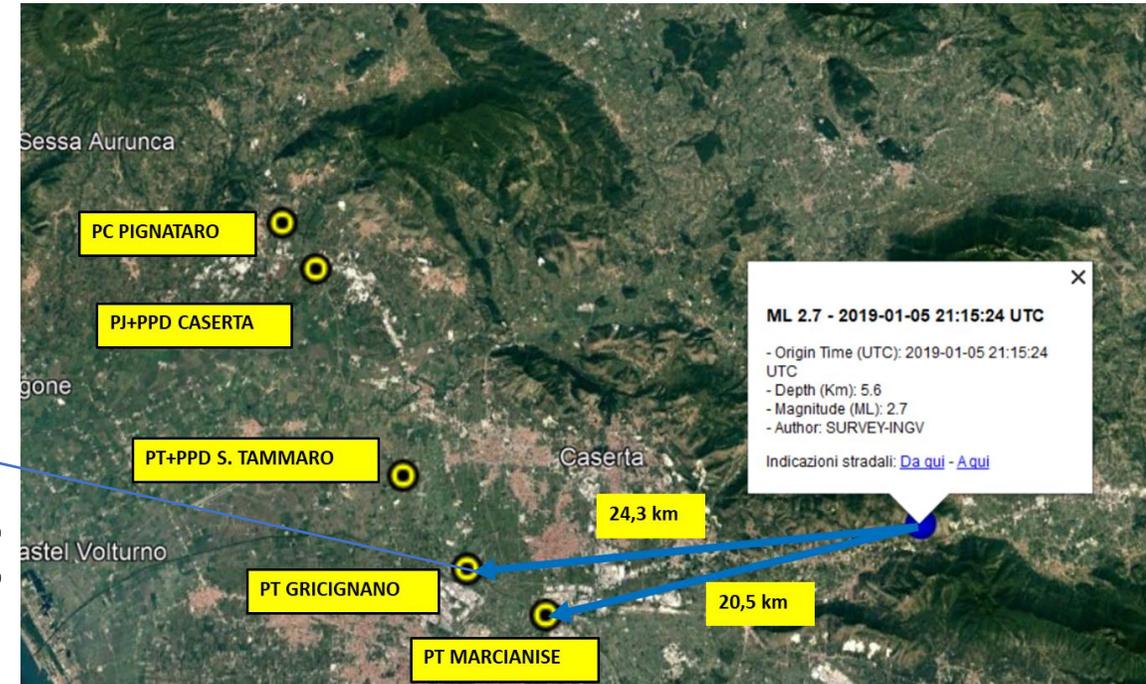


The acceleration predicted for the events of type A1 and A2 never exceeded 0.3%g.

Summary Table of event declaration

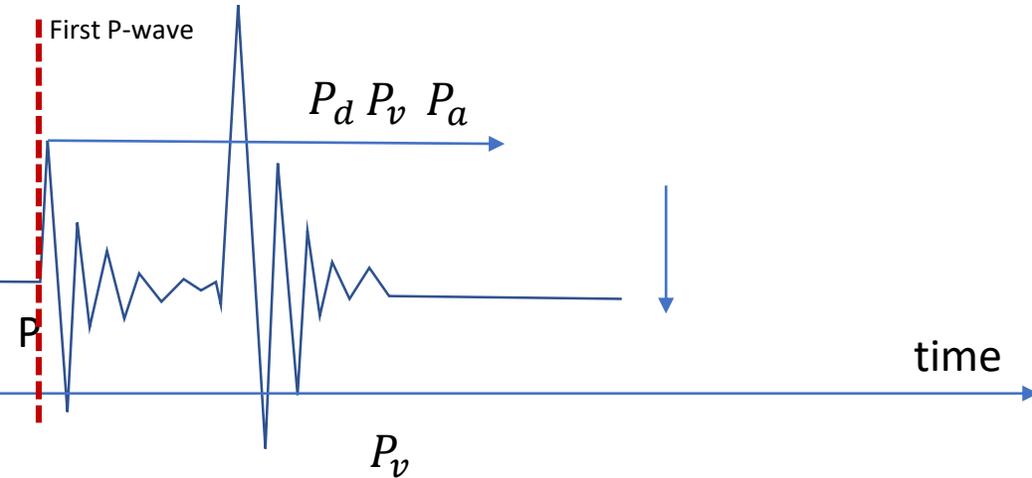
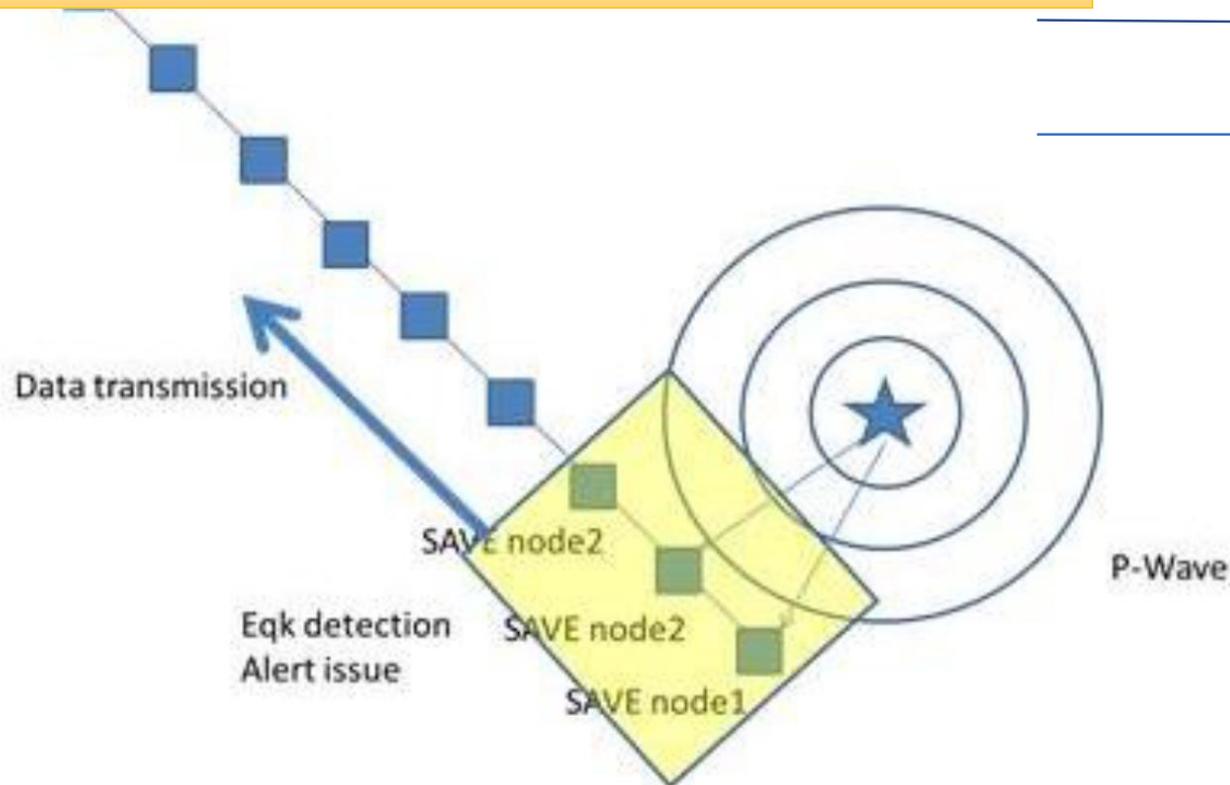
EVENT TYPE	0	1	2
Type A	24140	65	65
Type B	9420	1	1

**NO ALERT DECLARATION DURING THE
EXPERIMENTATION PERIOD**



P-Peak motion quantities as proxies for PGV- PGA-IMM

- In each considered time window three different P-peak amplitudes will be measured (displacement, velocity and acceleration) and used to estimate the final PGV-
PGA through region-specific GMPEs
- Real-time check with PGA recorded on the horizontal components



$$\log P_x \rightarrow \log PGV^{Pred} \rightarrow I_{MM}^{pred}$$

average $\langle \log PGV^{pred} \rangle$

variance $\sigma_{\log PGV^{pred}}^2$

Ld 0.0s	OPIO [Z]NE
Lf 0.0s	
Ld 0.0s	PIEI [Z]NE
Lf 0.0s	
Ld 0.0s	OCAN [Z]NE
Lf 0.0s	
Ld 0.0s	SIG [Z]NE
Lf 0.0s	
Ld 0.0s	FIU1 [Z]NE
Lf 0.0s	
Ld 0.0s	T1219 [Z]NE
Lf 0.0s	
Ld 0.0s	MCV [Z]NE
Lf 0.0s	
Ld 0.0s	FEMA [Z]NE
Lf 0.0s	
Ld 0.0s	CNE [Z]NE
Lf 0.0s	
Ld 0.0s	CLO [Z]NE
Lf 0.0s	
Ld 0.0s	T1244 [Z]NE
Lf 0.0s	
Ld 0.0s	ACC [Z]NE
Lf 0.0s	
Ld 0.0s	AMT [Z]NE
Lf 0.0s	
Ld 0.0s	PCB [Z]NE
Lf 0.0s	
Ld 0.0s	MSCT [Z]NE
Lf 0.0s	

