



Παρακολούθηση Επαγόμενης Σεισμικότητας στην Κεντρική ΗΠΑ και Μετριασμός των Επιπτώσεών της στην Κοινωνία

Monitoring Induced Seismicity in the Central US and Mitigating its Effects on Society

Γεώργιος Τσόφλιας

*Dean A. McGee Καθηγητής Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής
Κέντρο Ενέργειας και Περιβάλλοντος της Γης
Τμήμα Γεωλογίας
Πανεπιστήμιο του Κάνσας, Η.Π.Α.*



tsoflias@ku.edu



Σύνοψη

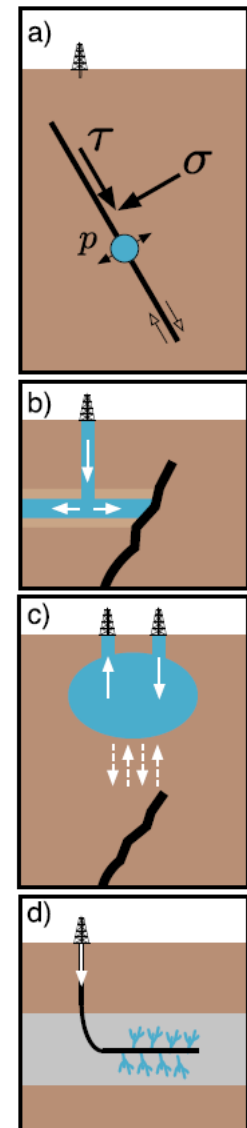
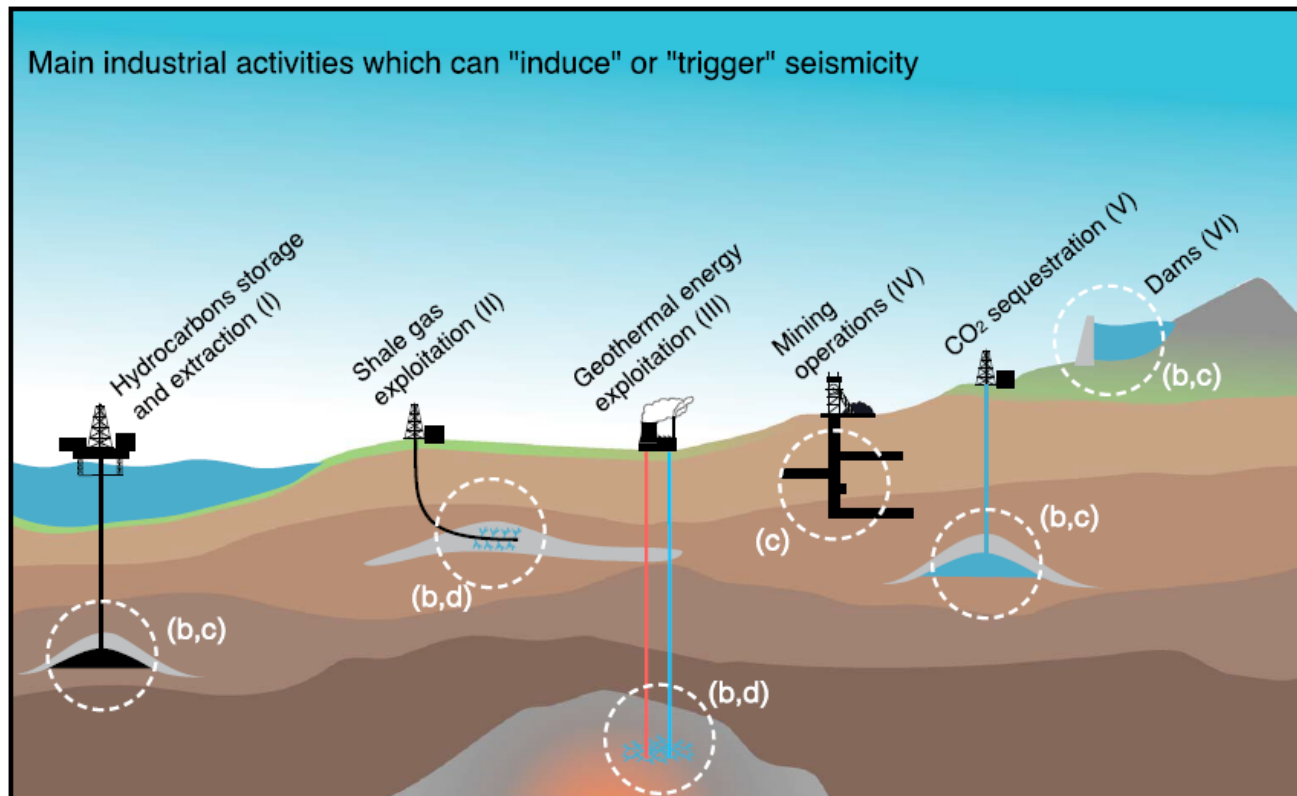
- Τι είναι η Επαγόμενη Σεισμικότητα
- Επαγόμενη Σεισμικότητα στην Κεντρική ΗΠΑ
- Παρατηρήσεις επαγόμενης σεισμικότητας από εγχύσεις υγρών αποβλήτων στο Κάνσας και την Οκλαχόμα
- Αποτελέσματα μελέτης επαγόμενης σεισμικότητας στην περιοχή Wellington, Κάνσας
- Μείωση του κινδύνου επαγόμενης σεισμικότητας
- Συμπεράσματα



Επαγόμενη Σεισμικότητα - Ανθρωπογενής Σεισμικότητα

Βιομηχανικές δραστηριότητες και φυσικοί μηχανισμοί

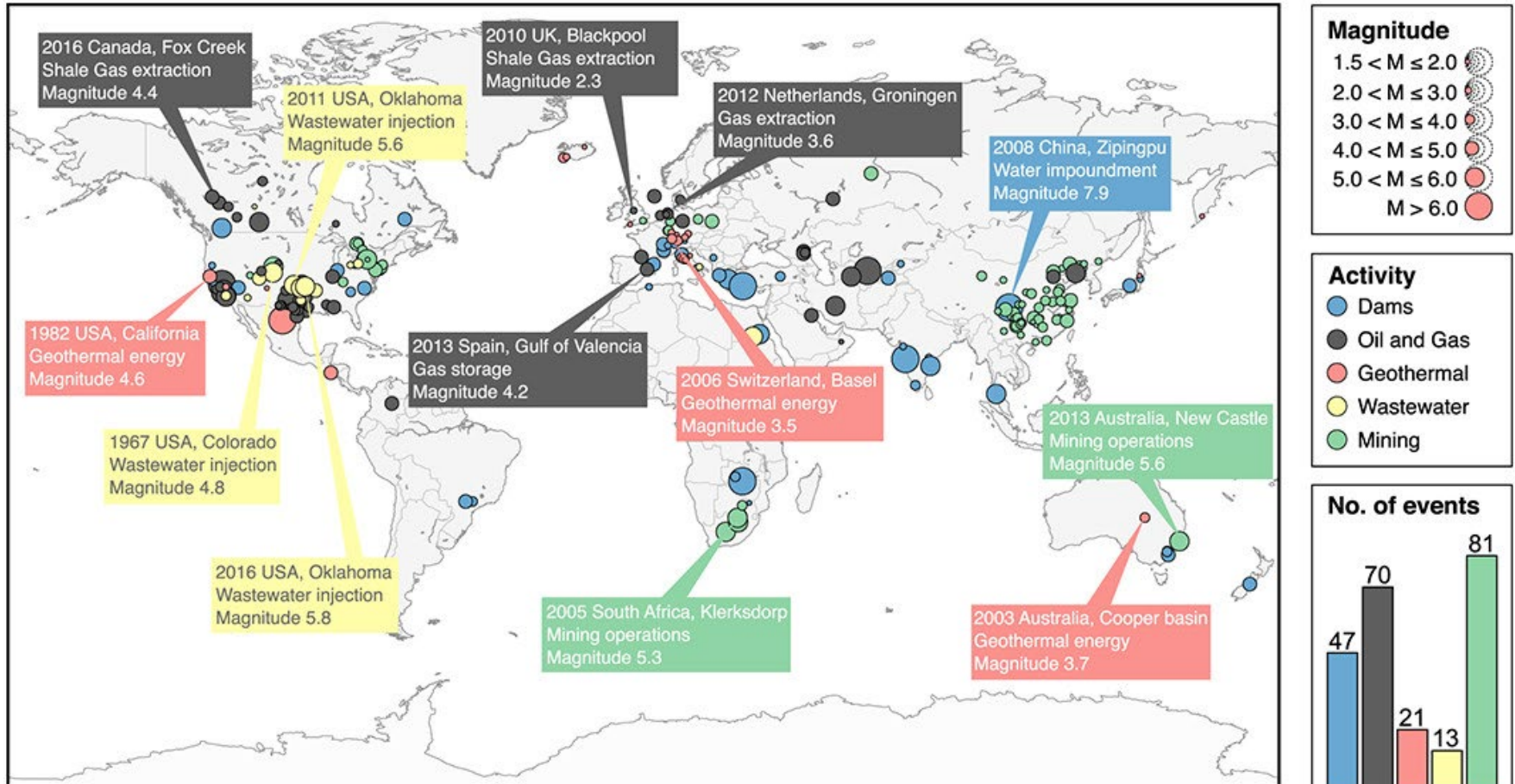
(Grigoli et al., 2017 – Reviews of Geophysics)



Προϋπάρχοντα ρήγματα μπορούν να επανενεργοποιηθούν:

- Αποθήκευση και εξόρυξη υδρογονανθράκων
- Εγχυση υγρών αποβλήτων
- Εκμετάλλευση γεωθερμικής ενέργειας
- Μεταλλευτικές δραστηριότητες
- Αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα
- Συγκράτηση νερού σε φράγματα

Επαγόμενη Σεισμικότητα



Wastewater injection = έγχυση υγρών αποβλήτων

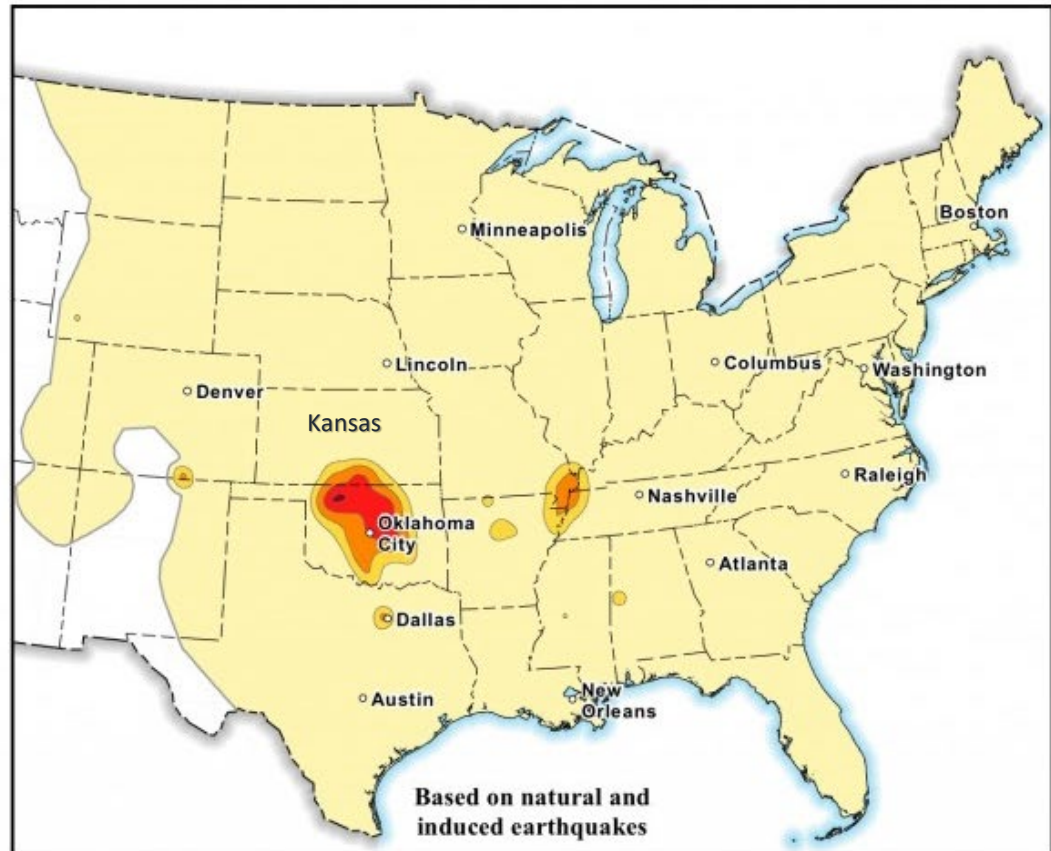
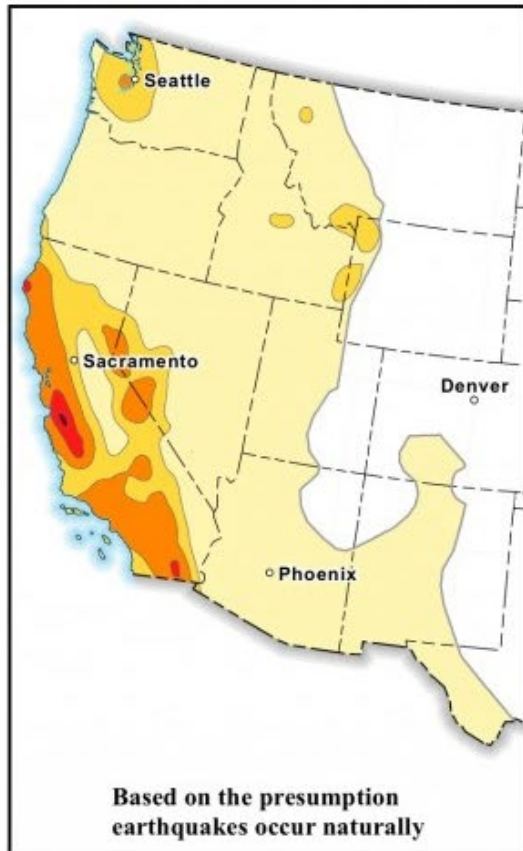
(Grigoli et al., 2017 – Reviews of Geophysics)

? Σεισμός Κοζάνης–Γρεβενών (1995, $M_s = 6.6$) φράγμα Πολυφύτου

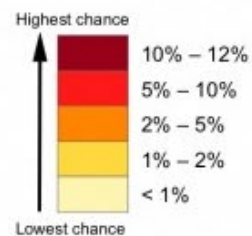
? Σεισμική ακολουθία φραγματος Κρεμαστών (1965–1966, $M_s = 6.6$)

USGS πρόβλεψη για καταστροφές από φυσικούς και επαγόμενους σεισμούς στις ΗΠΑ

USGS Forecast for Damage from Natural and Induced Earthquakes in 2016

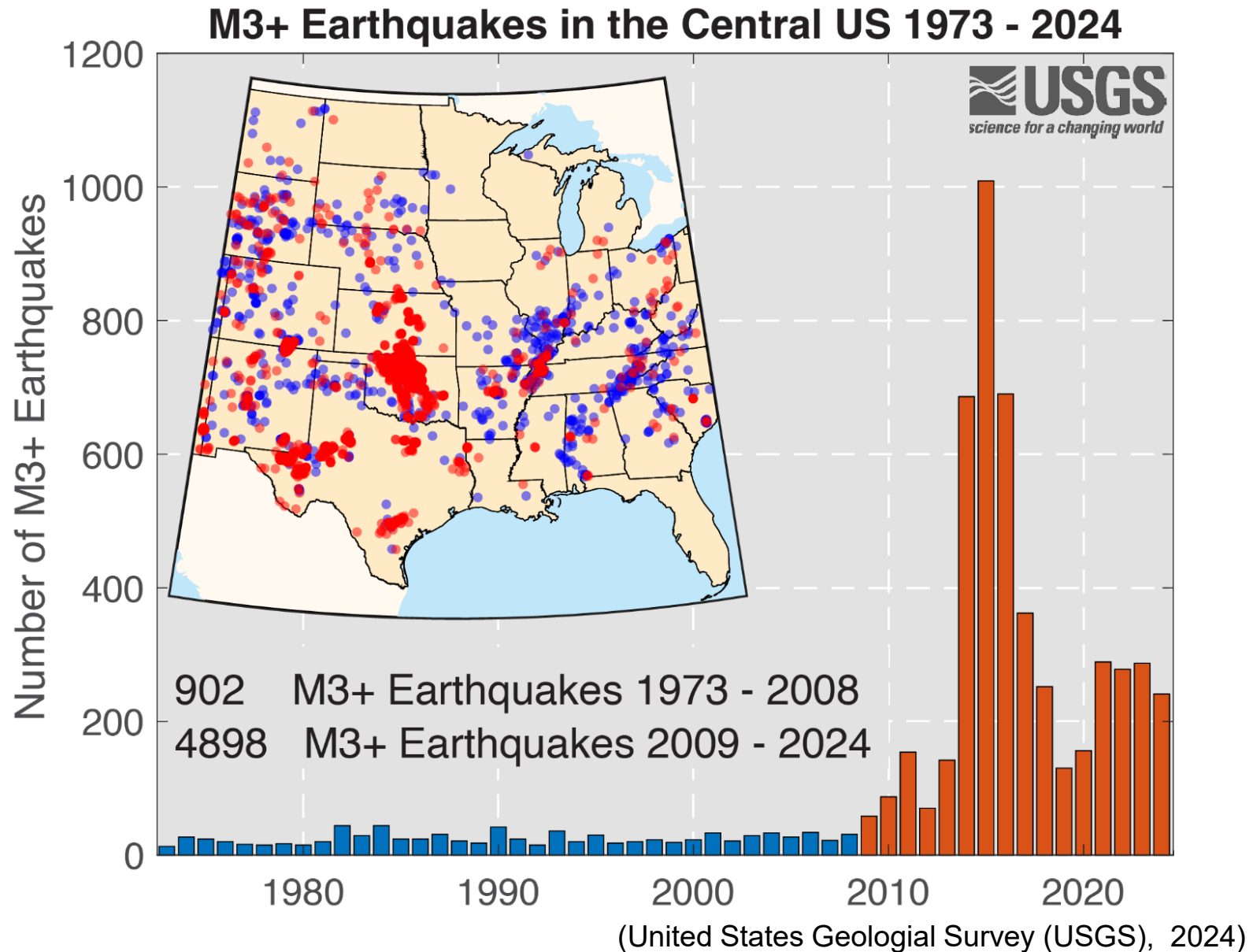


Chance of damage

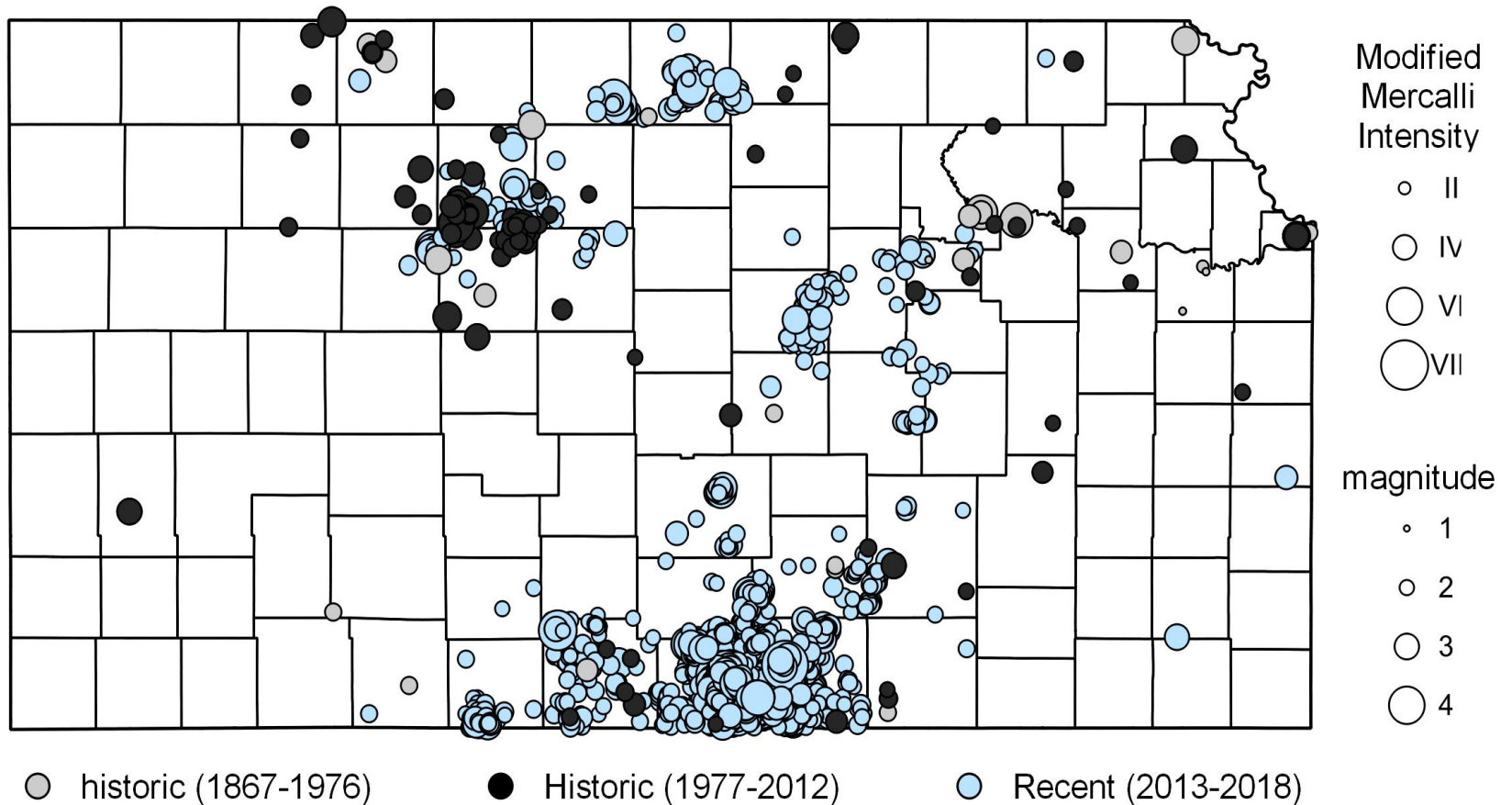


(USGS, 2016)

Σεισμικότητα στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα των ΗΠΑ από το 1973 έως το 2022



Σεισμικότητα στο Κάνσας – 1867-2018



- 1867-1976: ~30 felt earthquakes within Kansas
- 1977-2012: > 200 earthquakes recorded
- 2013 - 2018: > 7000 earthquakes recorded

(Kansas Geological Survey (KGS) 2022

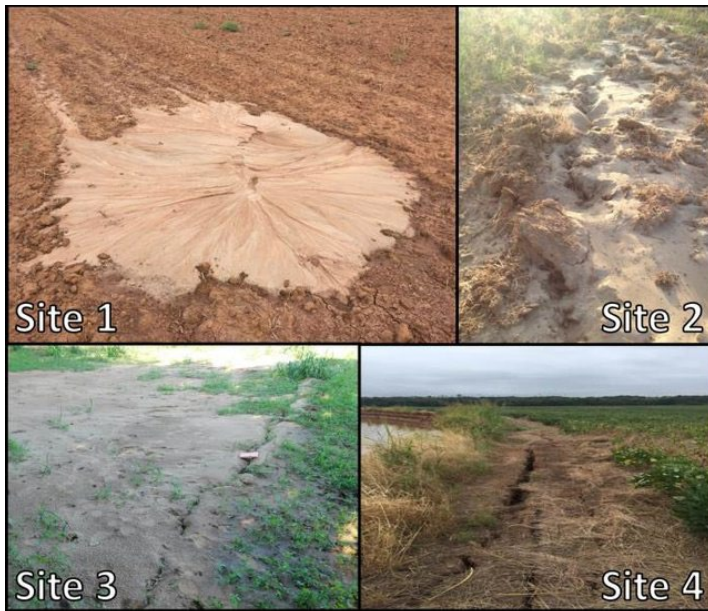
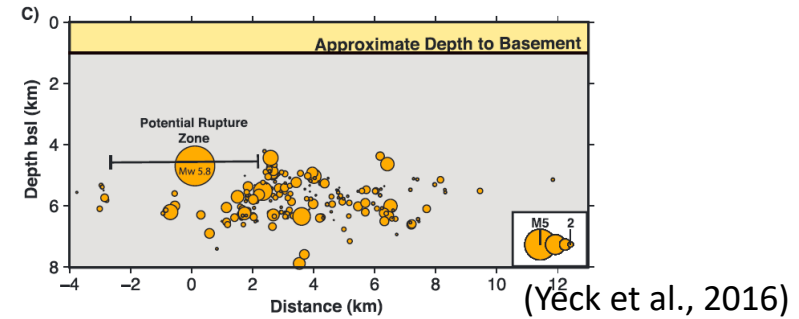
https://www.kgs.ku.edu/Geophysics/Earthquakes/q_gifs/Kansas_Earthquakes.jpg



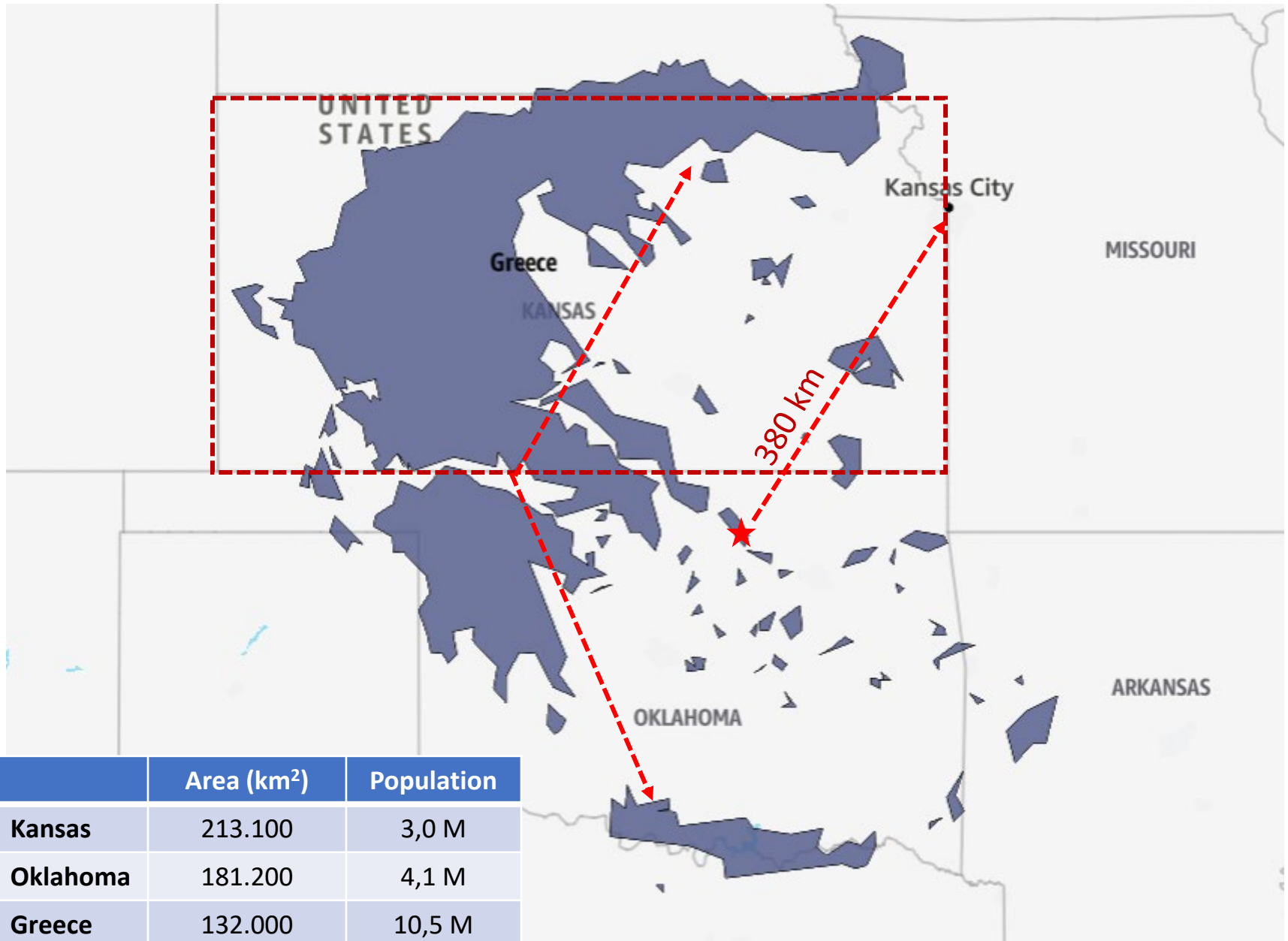
Sept. 3, 2016, Mw 5.8 Pawnee, OK



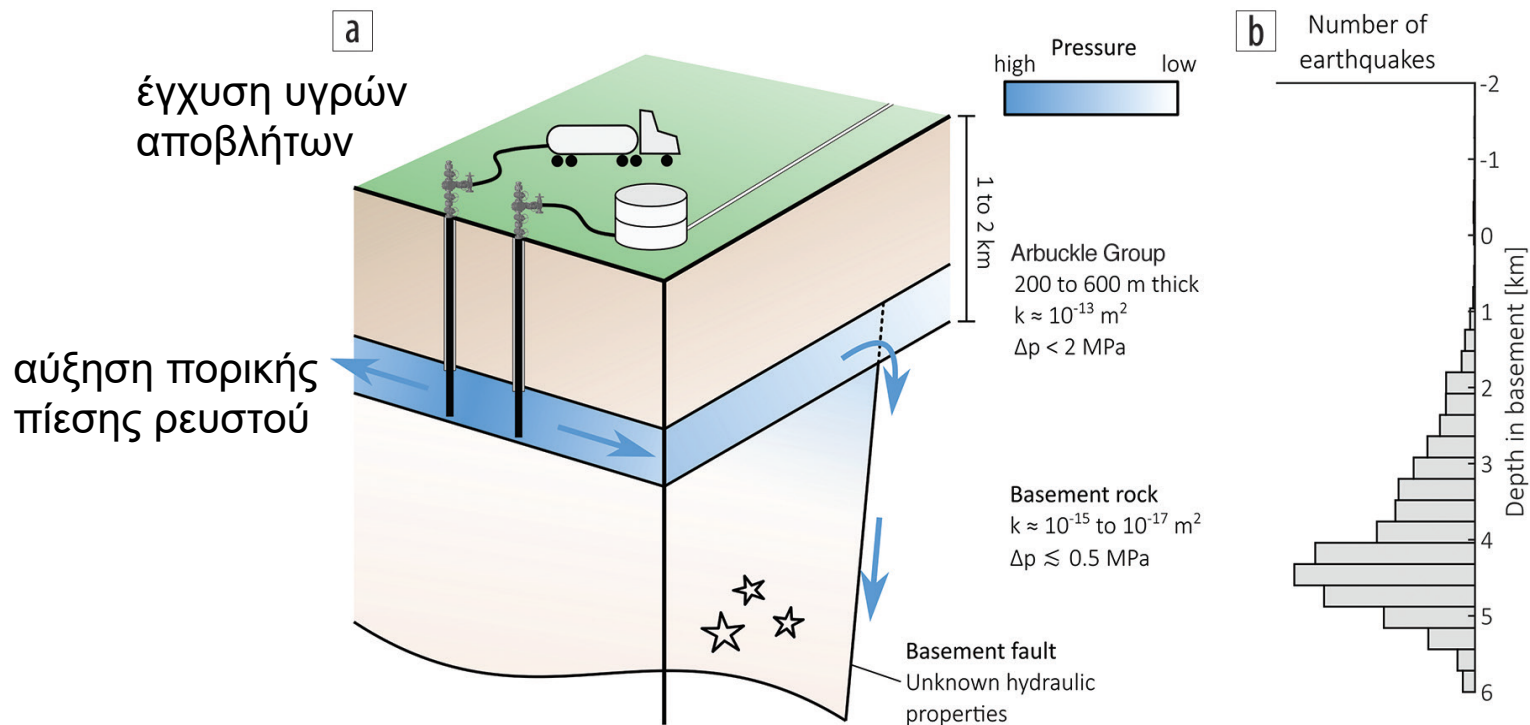
(Quick et al., 2020)



Felt > 1500 km: Denver CO, Chicago IL

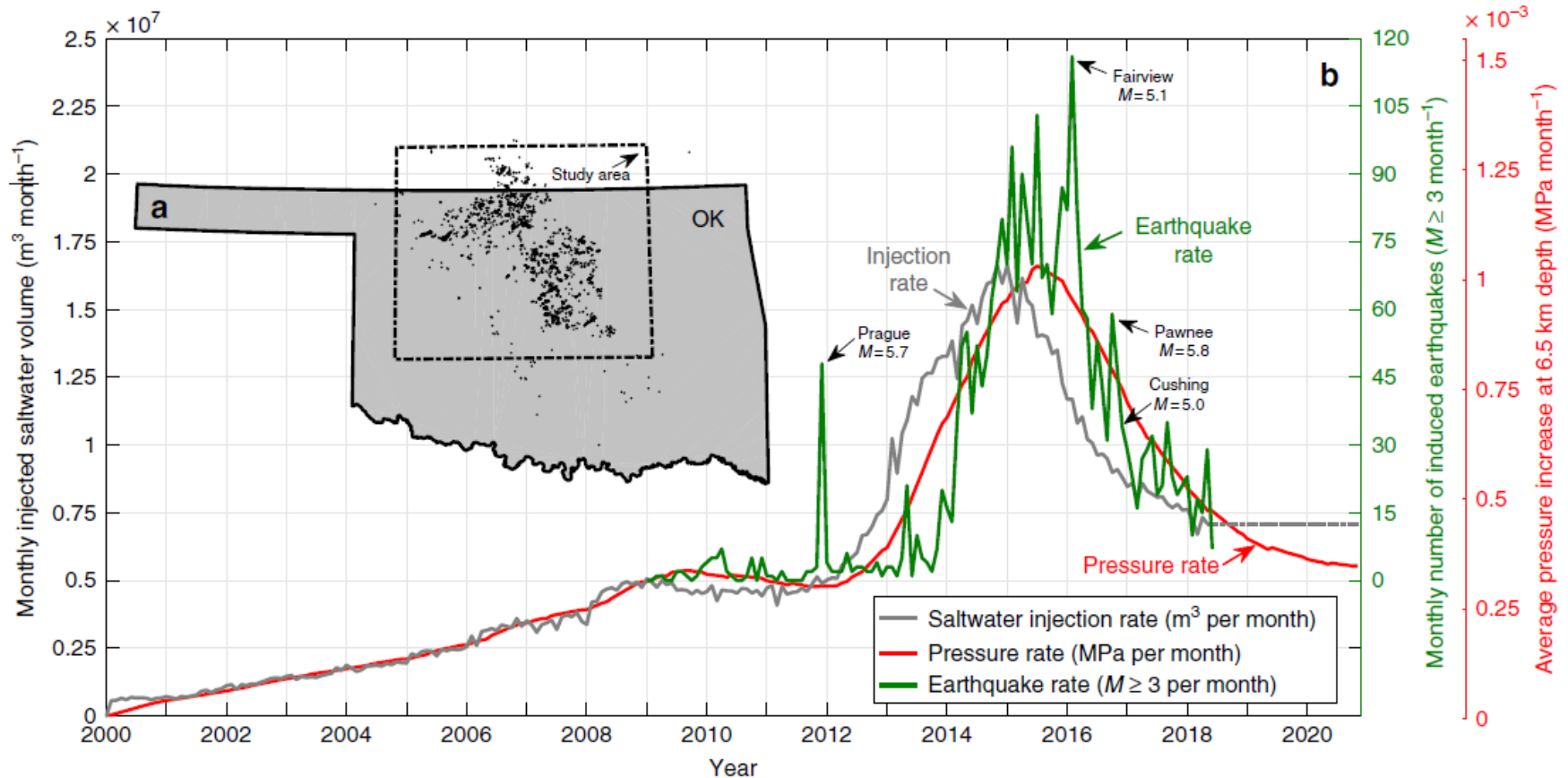


Εγχυση υγρών αποβλήτων στο Κάνσας και την Οκλαχόμα



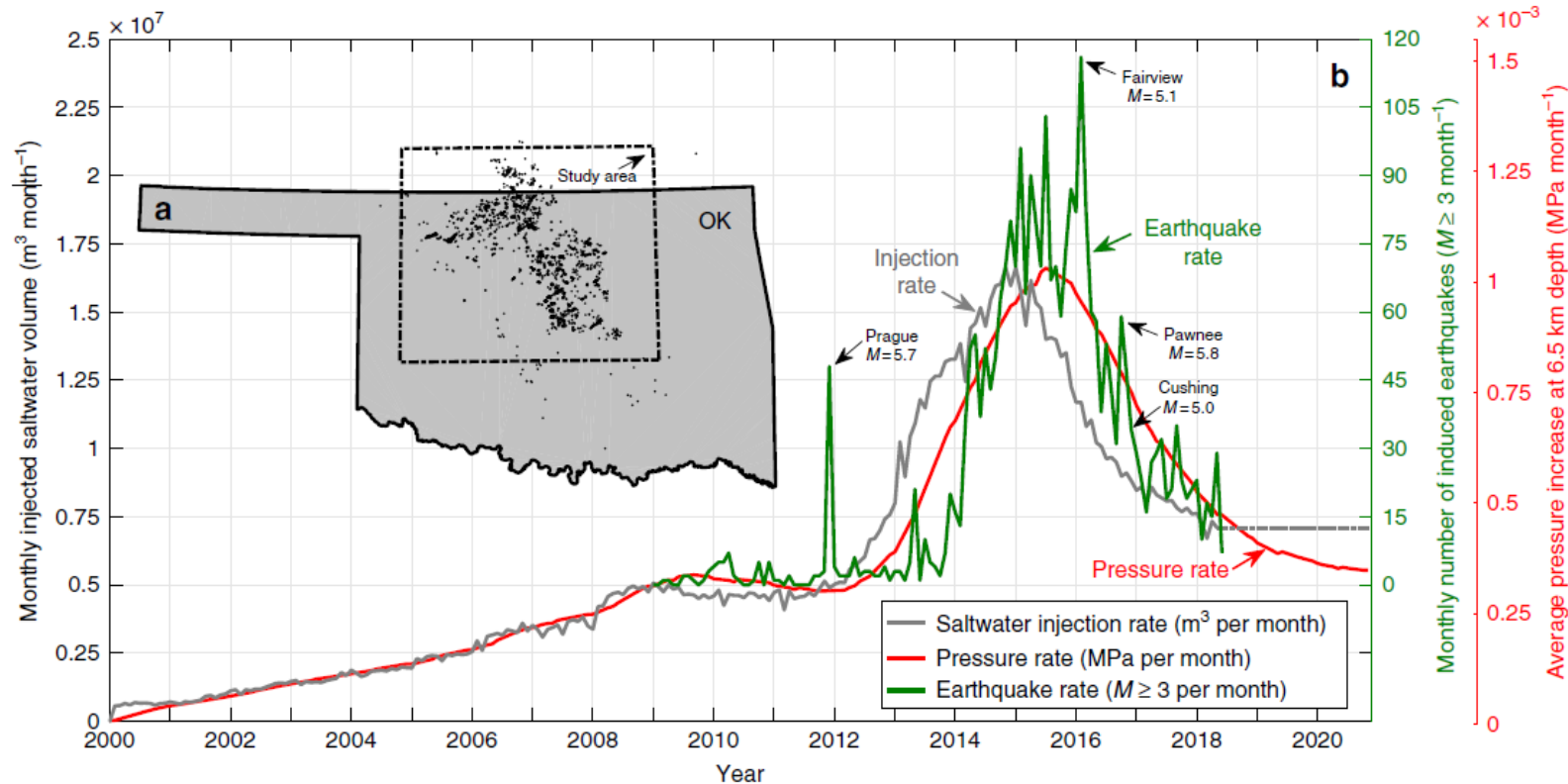
(Schoenball et al., 2018 – The Leading Edge)

Επαγόμενη Σεισμικότητα στο Κάνσας και την Οκλαχόμα



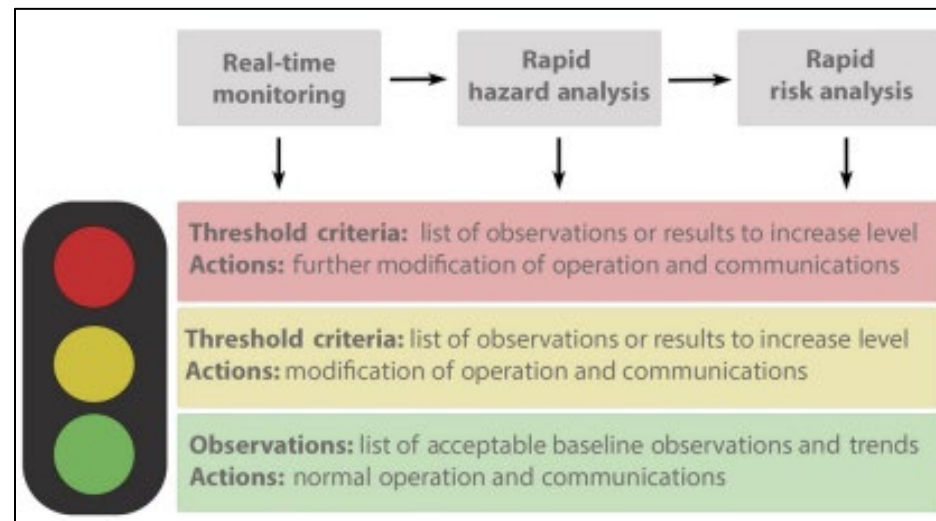
(Langenbruch et al., 2018 – Nature communications)

Επαγόμενη Σεισμικότητα στο Κάνσας και την Οκλαχόμα



(Langenbruch et al., 2018 – Nature communications)

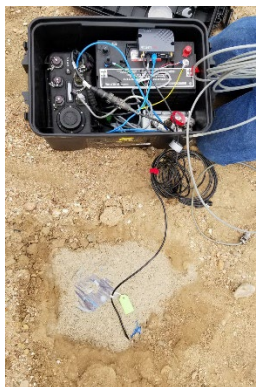
US EPA εφάρμοσε
λειτουργική διαχείριση
επαγόμενης σεισμικότητας
μέσω Συστήματος
“Φωτεινού Σηματοδότη”



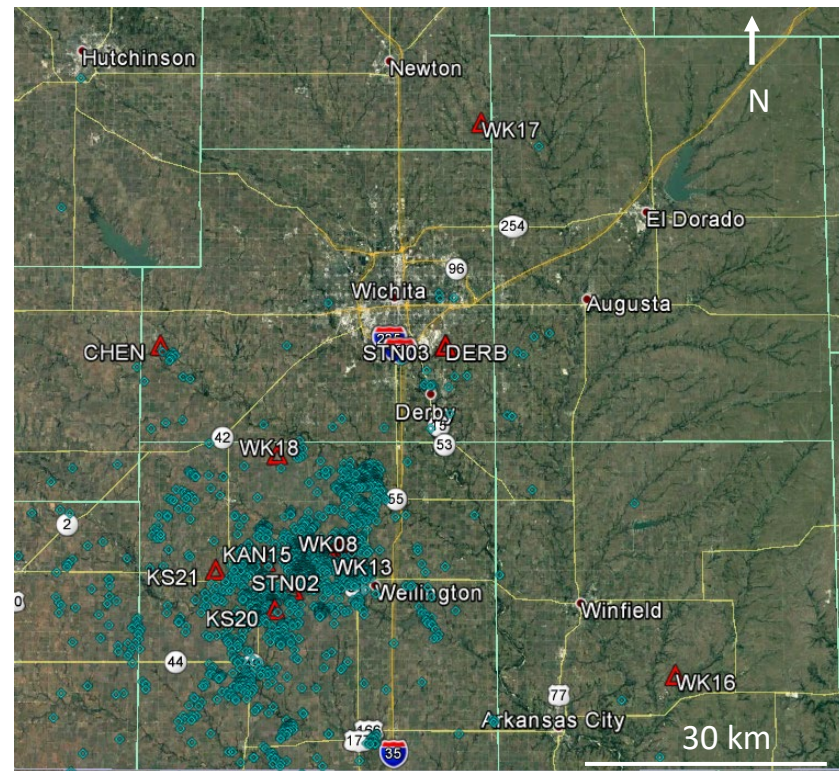
Σεισμολογικό δίκτυο, Wellington Oil Field, Sumner County, Kansas



Σεισμολογικό δίκτυο

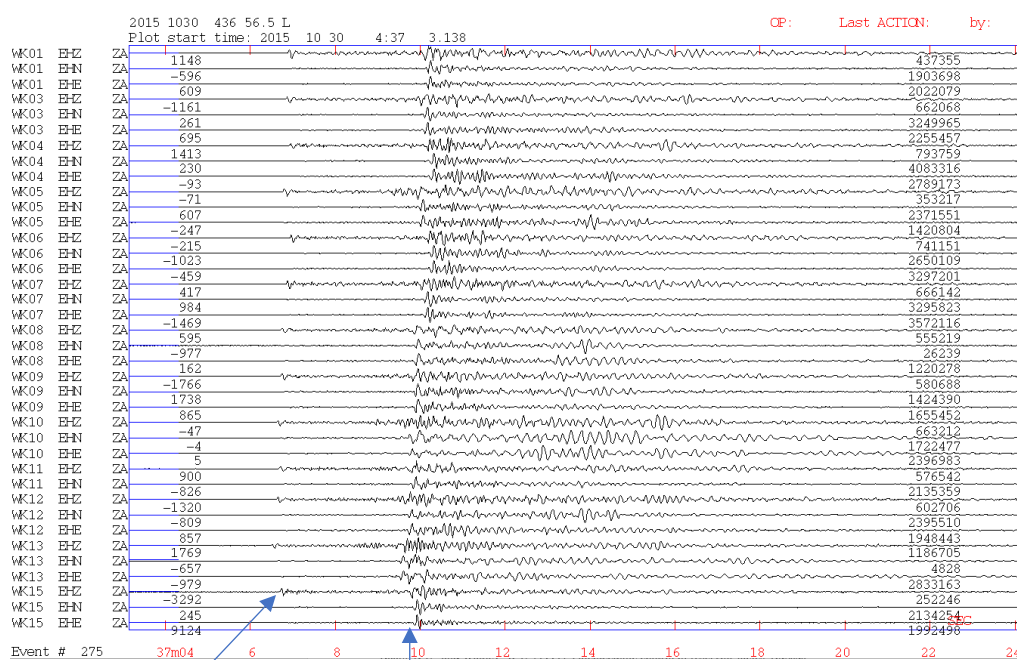


Seismometer installation

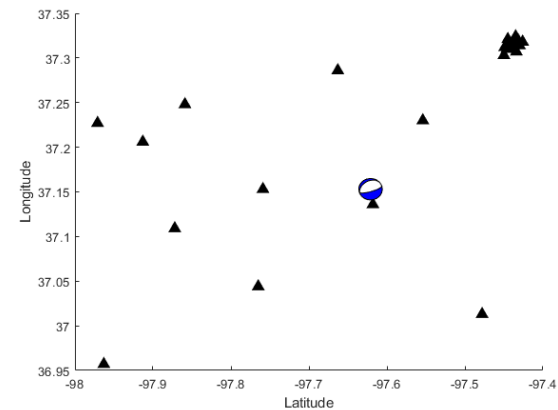


- 18 local stations at Wellington Field
Sercel L-22 Short Period, 3-C 2.0 Hz sensor
- 3 USGS stations

Σεισμογράφημα



- M_w 3.5
- October 30, 2015
- 4 km depth

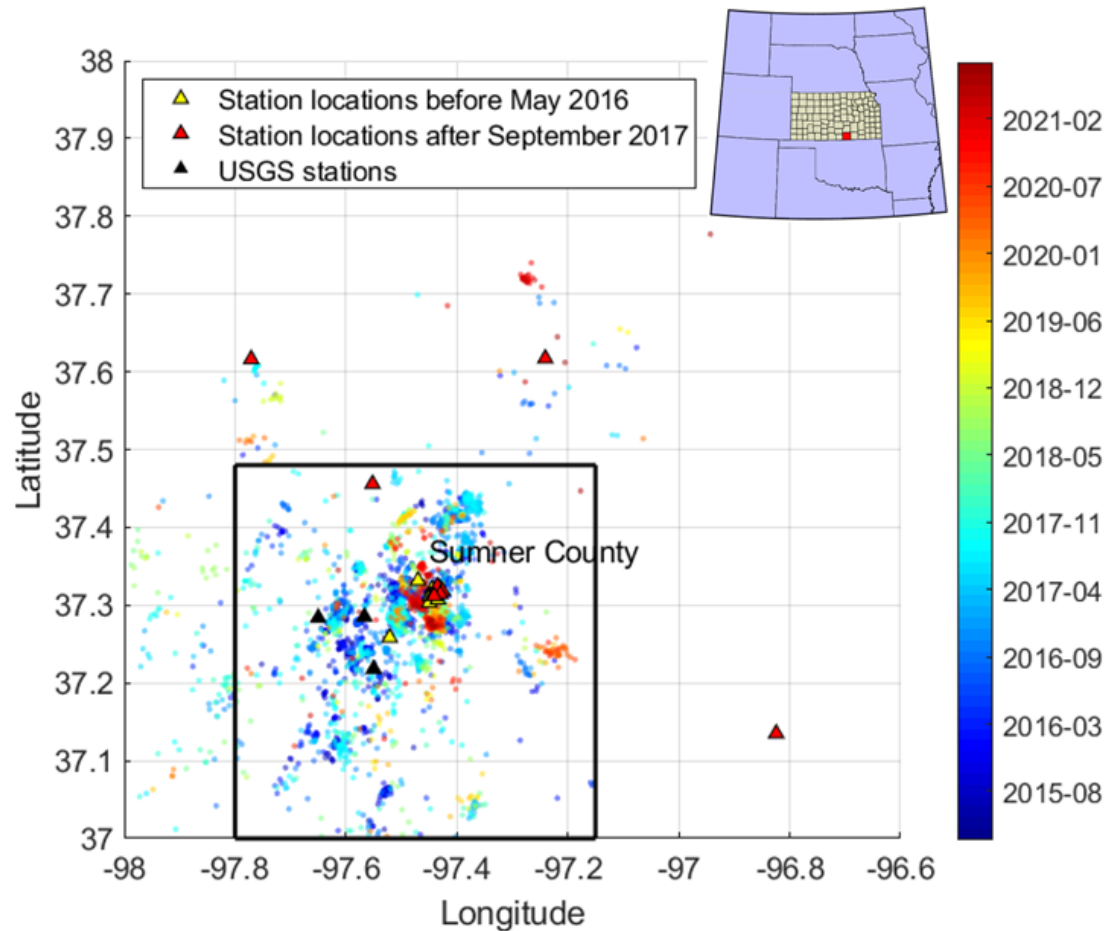


P-waves [επιμήκη κύματα]

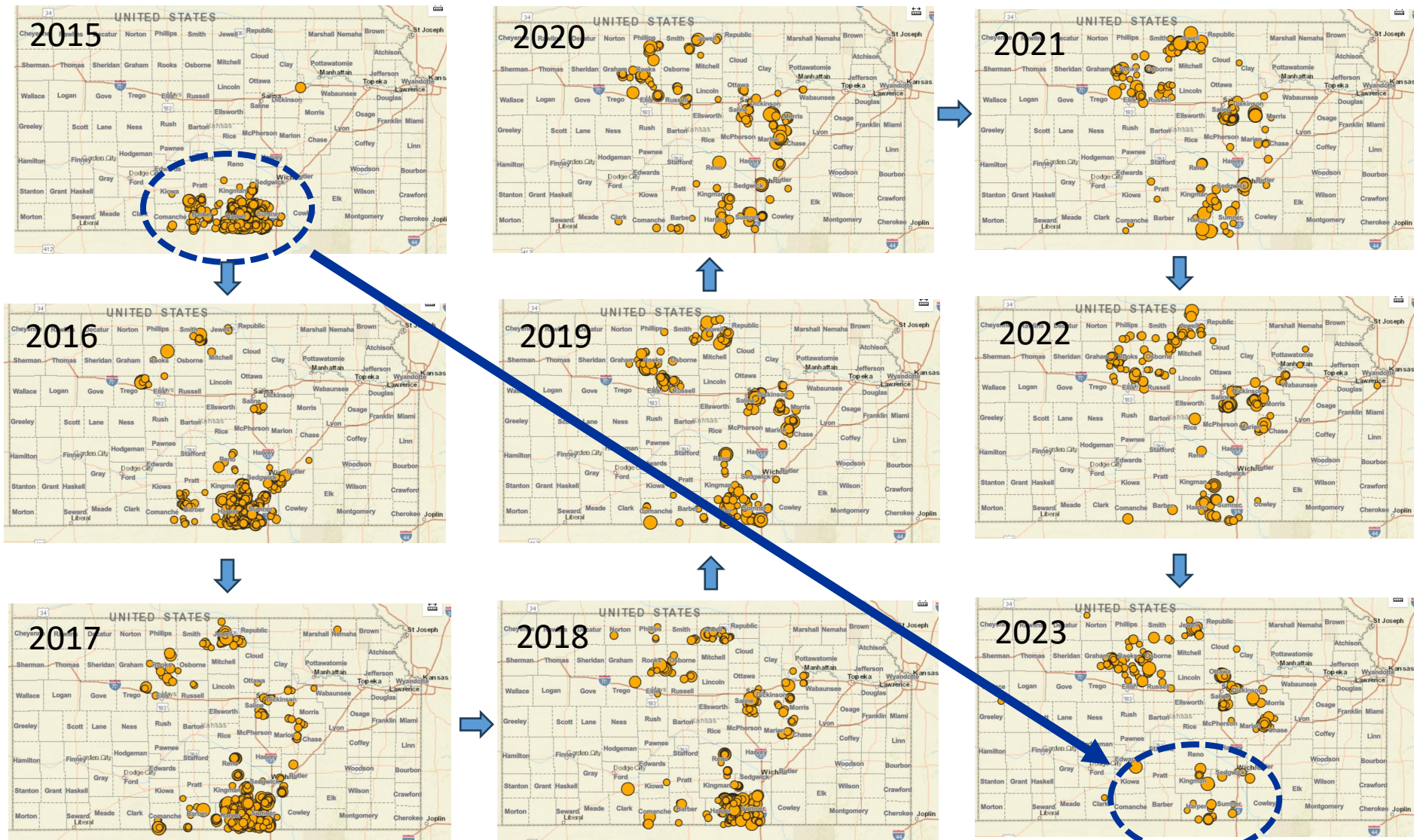
S-waves [εγκάρσια κύματα]

Κατάλογος σεισμών του δικτύου Wellington

- Sumner County
April 2015 – June 2021
- 3670 earthquakes
 - 2015 – 855 eqks (8 months)
 - 2016 – 982 eqks
 - 2017 – 1024 eqks
 - 2018 - 300 eqks
 - 2019 - 182 eqks
 - 2020 – 252 eqks
 - 2021 – 75 eqks (6 months)



Επαγόμενη Σεισμικότητα στο Κάνσας

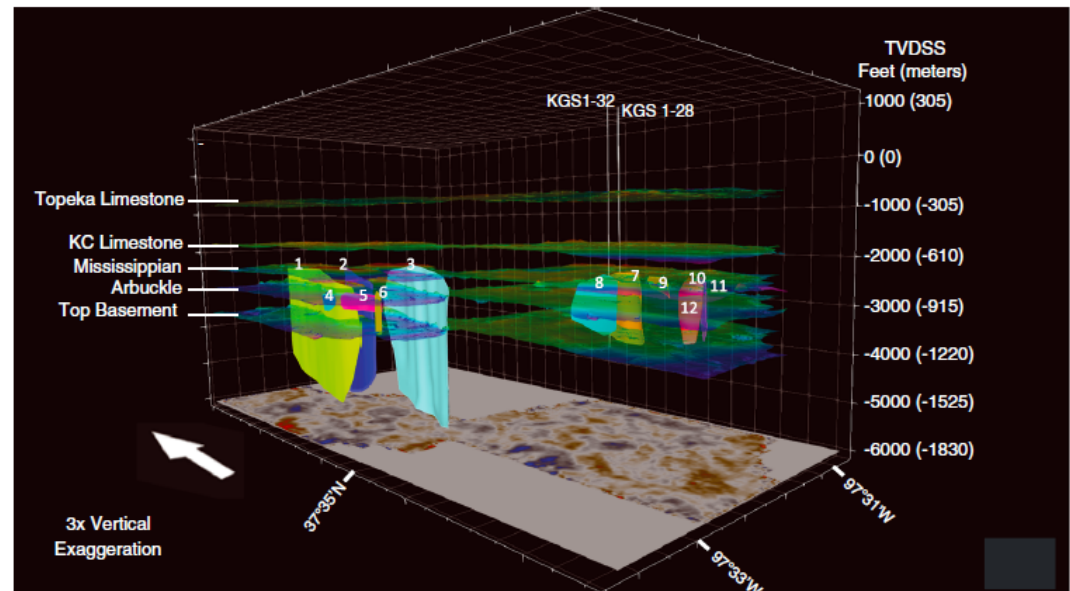
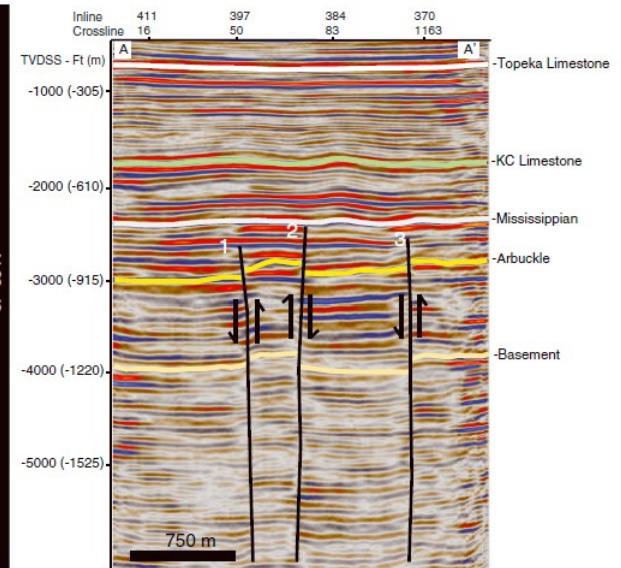
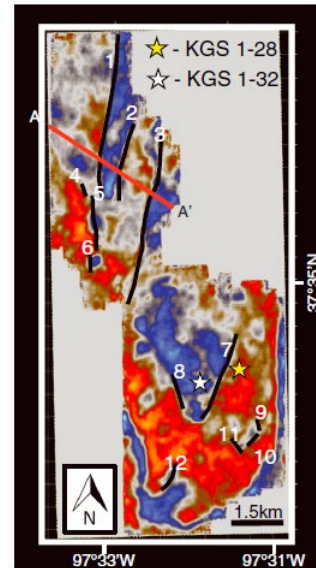


(Kansas Geological Survey, 2025 https://maps.kgs.ku.edu/earthquake_mini_viewer/)

Wellington τρισδιάστατη μελέτη του υπεδάφους

Era	System	Series	Stratigraphic Unit
Paleozoic	Pennsylvanian	Virgilian	Wabunsee Group
			Shawnee Group
			Douglas Group
		Missourian	Lansing Group
			Kansas City Group
			Pleasanton Group
		Desmoinesian	Marmaton Group
			Cherokee Group
	Mississippian	Chesterian	
		Meramecian	St. Genevieve Ls.
			St. Louis Ls.
			Salem (Spergen) Ls.
			Warsaw Ls.
		Osagian	
	Ordovician	Kinderhookian	Gilmore City Limestone
		Upper	Maquoketa Shale
			Viola Limestone
		Middle	Simpson Group
		Lower	Arbuckle Group
	Cambrian	Upper	Reagan Sandstone
Precambrian			Granite, Schist

Pre-Pennsylvanian unconformity



Generalized stratigraphic section for central KS. Modified from Nissen et al. (2009), originally from Cansler (2000)

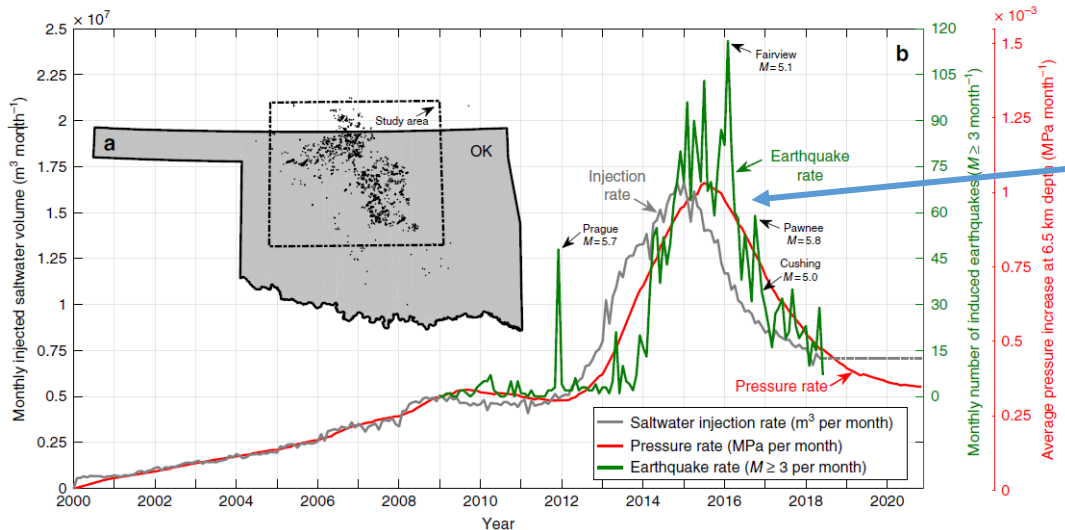
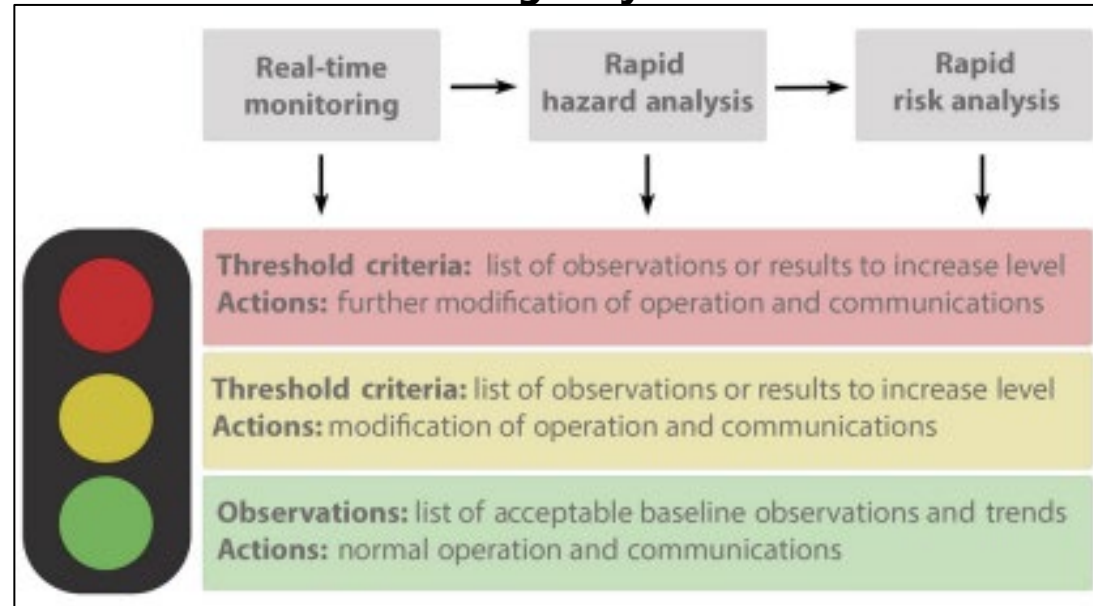
(Schwab et al., 2017)

Μείωση του Κινδύνου Επαγόμενης Σεισμικότητας

National Risk Assessment Partnership

Traffic Light System

US EPA εφάρμοσε
λειτουργική διαχείριση
επαγόμενης σεισμικότητας
μέσω Συστήματος
“Φωτεινού Σηματοδότη”



(Langenbruch et al., 2018 – Nature communications)

Η Οκλαχόμα θέτει όρια στην
έγχυση υγρών αποβλήτων τον
Μάρτιο του 2016

Τιμή πετρελαίου

- **2011–2013:** πάνω από 100\$/βαρέλι
- **2014–2016:** πτώση κάτω από 50\$/βαρέλι
- **2018:** ανάκαμψη στα 71\$/βαρέλι
- **2020:** πτώση στα 41\$/βαρέλι

Συμπέρασμα

- Σεισμοί μπορούν να προκληθούν από ανθρώπινες δραστηριότητες
- Στην κεντρική ΗΠΑ παρατηρήθηκε μεγάλη αύξηση σεισμικότητας λόγω υψηλού ρυθμού έγχυσης υγρών αποβλήτων
- Η τοπική μελέτη στο Wellington Field έδειξε σεισμικότητα παρά την απουσία κοντινών γεωτρήσεων υψηλού ρυθμού έγχυσης
- Ο κίνδυνος επαγόμενης σεισμικότητας μπορεί να μειωθεί με δίκτυα παρακολούθησης και εφαρμογή συστημάτων διαχείρισης όπως το «σύστημα φωτεινού σηματοδότη»



Acknowledgements

- KU Students:

- Graduate: Alex Nolte (MS, PhD), Alexis Ahlert (MS)
- Undergraduate RA: Zalma Molina, Ally Dowling, Hannah Proffitt, Lauren Haga, Patrick Ronnau, Luke Kingsley, Collin Frecking, Carl Gonzalez, Betina Sodré

- Collaborators:

- Kansas Geological Survey Energy Section
Lynn Watney, Eugene Holubnyak, Jennifer Raney
- Berexco: Dana Wreath

