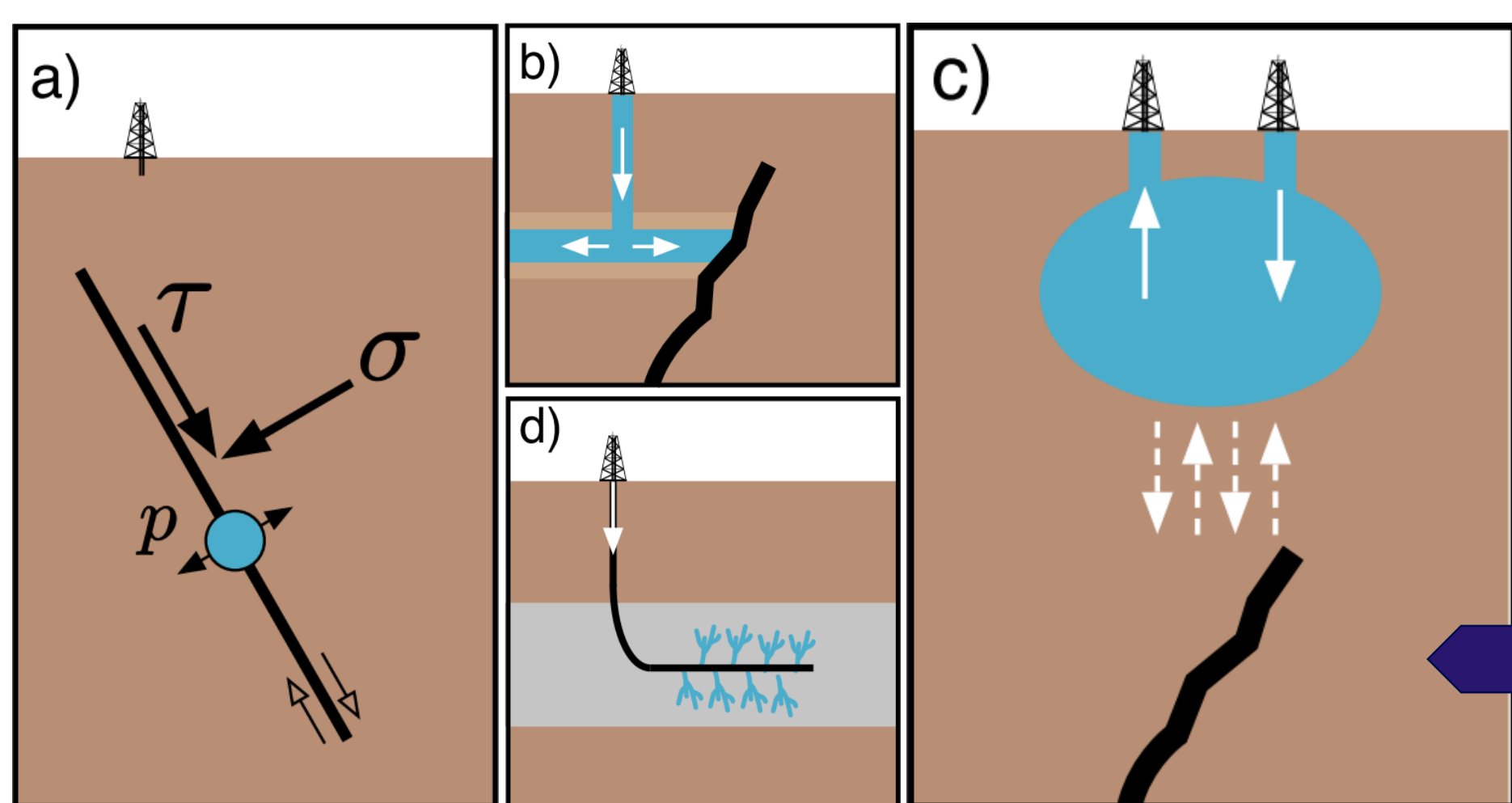




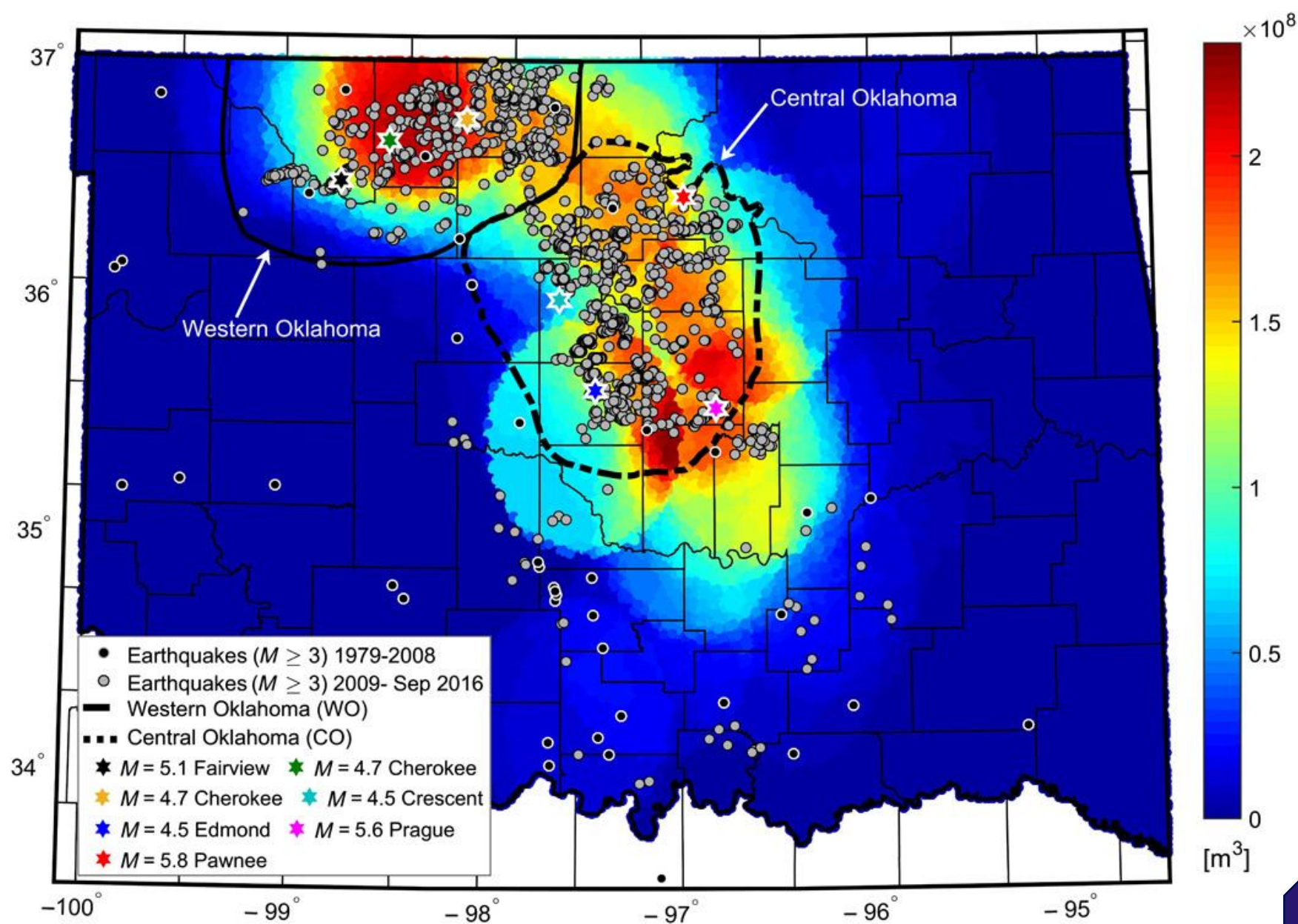
**PODZIEMNE  
ZATŁACZENIE  
PŁYNÓW**

**PODZIEMNE ZATŁACZANIE PŁYNÓW JEST STOSOWANE W NASTĘPUJĄCYCH SYTUACJACH:**

1. Szczelinowanie hydrauliczne podczas wydobycia gazu łupkowego
2. Eksploatacja pól geotermalnych
3. Podziemne magazynowanie gazu ziemnego
4. Podziemne składowanie ścieków oraz CO<sub>2</sub>



Rysunek 2. Źródło: Grigoli et al., 2017, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016RG000542>.



Rysunek 3. Źródło: Langenbruch i Zoback, 2016, <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1601542>.

**PRZYKŁADY**

Wstrząsy związane z podziemnym zatłaczaniem płynów obserwowane są właściwie w każdym miejscu, gdzie prowadzona jest taka działalność. W związku z tym konieczne jest stałe monitorowanie aktywności sejsmicznej podczas prowadzenia prac eksploatacyjnych. Poniżej przedstawiliśmy dwa przykłady sejsmiczności związanej z tą technologią.

**OKLAHOMA (USA)**

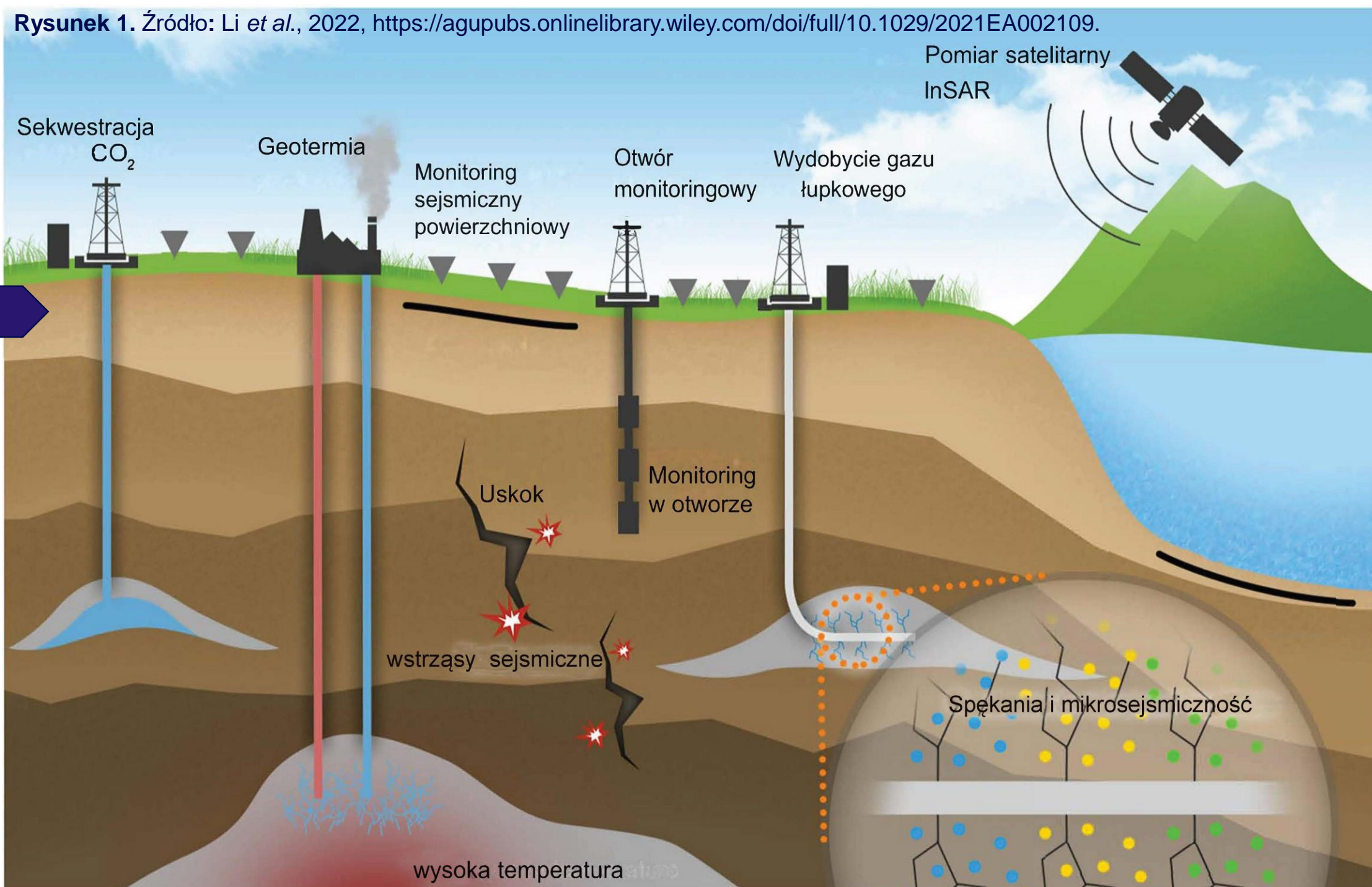
Na terenie stanu Oklahoma zarejestrowano gwałtowny wzrost aktywności sejsmicznej od roku 2009, kiedy to rozpoczęto podziemną utylizację solanki uzyskiwanej podczas eksploatacji ropy naftowej. Obszar o zwiększonej aktywności sejsmicznej dobrze odzwierciedla całkowitą objętość zatłoczonego płynu przedstawioną kolorem na Rysunku 3.

**POHANG (Korea Południowa)**

Najsilniejszy wstrząs spowodowany eksploatacją pól geotermalnych z zastosowaniem podziemnego zatłaczania wody miał miejsce okolicy miasta Pohang (Korea Południowa) 15.11.2017 roku. Był to wstrząs o magnitudzie Mw=5.5. Jego wystąpienie spowodowało wiele szkód w mieście, około 70 osób zostało rannych.

**LITERATURA**

Grigoli et al. (2017). Current challenges in monitoring, discrimination, and management of induced seismicity related to underground industrial activities: A European perspective. *Rev. Geophys.*, 55.  
Langenbruch i Zoback (2016). How will induced seismicity in Oklahoma respond to decreased saltwater injection rates? *Science Advances*, 2(11).  
Li et al. (2022). Seismology Perspectives on Integrated, Coordinated, Open Networked (ICON) Science. *Earth and Space Science*, 9(3), e2021EA002109.



Rysunek 1. Źródło: Li et al., 2022, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2021EA002109>.

**JAKIE PROCESY POWODUJĄ POWSTAWANIE WSTRZĄSÓW?**

**Prawo Coulomba**

Do wstrząsu na uskoku dochodzi wtedy, kiedy naprężenie ścinające działające na tym uskoku przekroczy wartość definiowaną jako

$$\tau = \tau_0 + \mu(\sigma - p)$$

gdzie  $\tau_0$  to kohezja,  $\mu$  to współczynnik tarcia,  $\sigma$  to naprężenie normalne na uskoku, a  $p$  to ciśnienie porowe (Rysunek 2a). Jak to prawo działa podczas podziemnego zatłaczania płynów? Możemy wyróżnić trzy sytuacje, które tworzą potencjał do występowania wstrząsów sejsmicznych podczas tego procesu.

**Sytuacja 1 (Rysunek 2b):**

Płyn jest zatłaczany do skał o wysokiej porowatości i przepuszczalności, jak na przykład piaskowce. Zatłoczony płyn migruje bezpośrednio do aktywnego uskoków. Wskutek podwyższenia ciśnienia porowego  $p$  w skale naprężenie normalne  $\sigma$  na uskoku ulega zmniejszeniu i dochodzi do powstania wstrząsu. Sytuacja taka może mieć miejsce w każdym przypadku podziemnego zatłaczania płynów, gdzie występuje bezpośrednie połączenie hydrauliczne pomiędzy otworem a uskokuem.

**Sytuacja 2 (Rysunek 2c):**

Zatłoczenie płynu (np. CO<sub>2</sub> lub gazu ziemnego) pod powierzchnię Ziemi powoduje zmianę rozkładu masy i objętości wewnątrz skały. Prowadzi to do zmiany naprężeń normalnych i ścinających działających na uskokuach, co może bezpośrednio powodować wystąpienie wstrząsów. Sytuacja taka najczęściej dotyczy podziemnego składowania płynów, np. ścieków, CO<sub>2</sub> lub gazu ziemnego. W tym wypadku bezpośrednie połączenie hydrauliczne pomiędzy otworem a uskokuem nie jest konieczne – możemy mieć tu do czynienia ze skałą nieprzepuszczalną, jak na przykład łupek.

**Sytuacja 3 (Rysunek 2d):**

Szczelinowanie hydrauliczne to technologia wykorzystywana podczas wydobycia gazu z łupków – skał o niskiej porowatości i przepuszczalności. Proces ten polega na zatłaczaniu cieczy do otworu pod wysokim ciśnieniem w celu wytworzenia sieci sztucznych spekań w warstwie gazonośnej. Podczas pęknięcia skały uwalniany jest gaz i generowane są niewielkie wstrząsy sejsmiczne rejestrowane na powierzchni Ziemi. Podobna technologia jest wykorzystywana podczas eksploatacji pól geotermalnych. W tym przypadku pierwotna obecność uskoków w skale nie jest konieczna do wystąpienia wstrząsów. Są to tak zwane wstrząsy indukowane.