

Man-made aardbevingen

IN DE VERENIGDE STATEN

Afgelopen maart publiceerde de United States Geological Survey een unieke kaart die het risico op aardbevingen in de VS aangeeft – voor het eerst ook die door menselijk handelen. Rond Oklahoma blijken het aantal en de omvang van zulke bevingen schrikbarende toegenomen.

Bernd Andeweg
Vrije Universiteit, Amsterdam

Over door menselijk handelen veroorzaakte aardbevingen weten we in Nederland heel wat vanwege de gaswinning in de provincie Groningen. Er zijn al bevingen gemeten tot 3.6 op de schaal van Richter en wellicht moet rekening gehouden worden met bevingen tot 5+.

Rond Oklahoma in de Verenigde Staten zijn door de mens veroorzaakte bevingen van die sterkte al jaren geen uitzondering meer. Op de dag van de publicatie van de nieuwe risicokaart (figuur 1) was er eentje van 4.2, maar dit is zo gewoon dat je niet meer van toeval kunt spreken. Wat is daar precies aan de hand?

Het centrale deel van de VS kent van oorsprong relatief veel natuurlijke aardbevingen in de New Madrid Zone. Hier zit midden in het continent een zwakke zone in de aardkorst die regelmatig

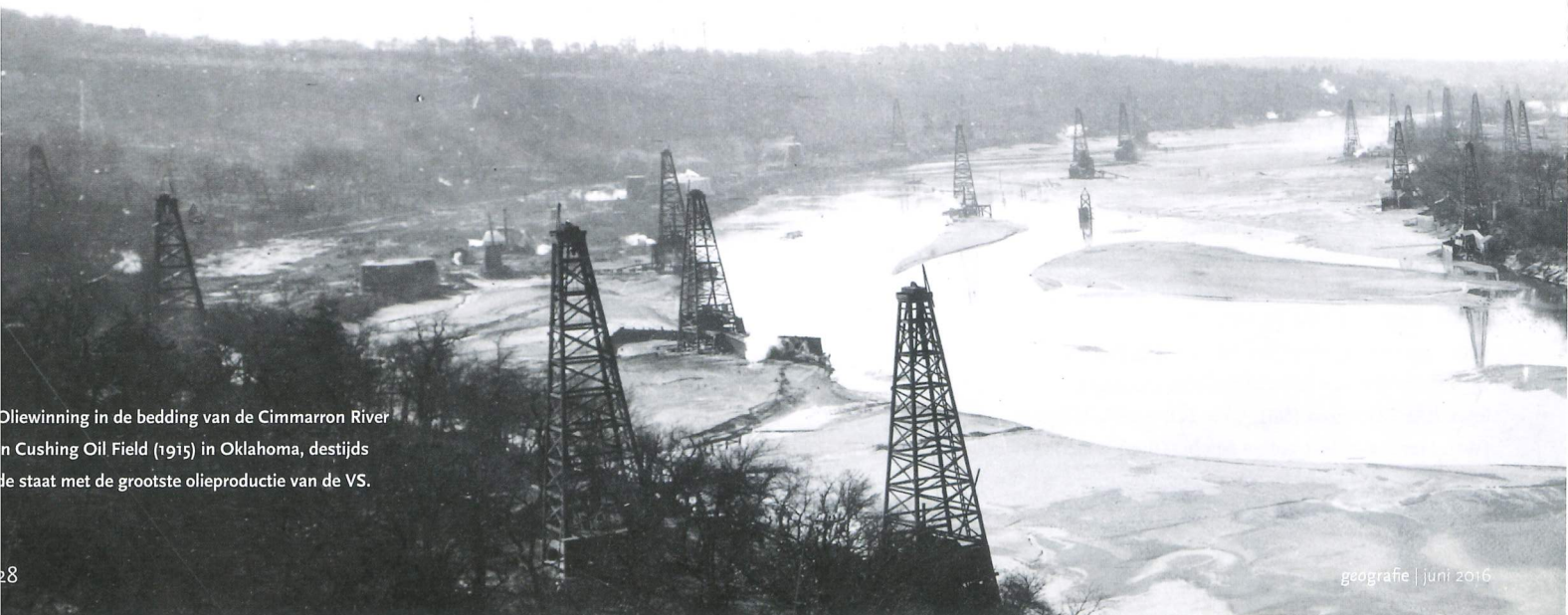
beweegt door de krachten die op de randen van de tektonische plaat worden uitgeoefend. Ook Californië is met de San Andreas-breuk bekend terrein voor seismologen.

De risicokaart toont een vreemde ontwikkeling: het voorheen stabiele centrale deel is de meest rode zone in de VS. Een kaartje met daarin de aardbevingen in de afgelopen decennia (figuur 2, pag. 30) laat gebieden zien in de staten Colorado, Texas, Arkansas, Kansas en vooral Oklahoma, waar een scherpe toename is waargenomen. De staat Oklahoma beleefde 10 tot 25 lichte natuurlijke bevingen per jaar, maar is in een mum van tijd koploper geworden. In 2014 traden er 565 bevingen op met een kracht boven de 3; in 2015 zelfs 907. Dat is dus meer dan 2 per dag, geconcentreerd in een zone van 100 bij 200 kilometer, iets kleiner dan België. En allemaal met een hypocentrum op slechts een paar kilometer diepte, waardoor het effect aan het aardoppervlak groter is dan tektonische aardbevingen op 10-15 kilometer onder de grond.

Behalve een scherpe toename in *aantal* bevingen, waren ze ook *zwaarder*. Enkele veroorzaakten lichte schade zoals omgevallen schoorstenen en scheuren in huizen. Koploper is voorlopig een beving van 5.6 bij Prague in Oklahoma, maar ook in andere staten werd kracht 5 benaderd of overschreden: in Colorado 5.3 (2011), Texas 4.8 (2012) en Arkansas 4.7 (2011).

OLIEWINNING

De toename in aantal en kracht van de bevingen heeft alles te maken met oliewinning. Bij de warme bronnen in de buurt van Salina (Oklahoma) welt zout en warm water op uit de kalkstenen



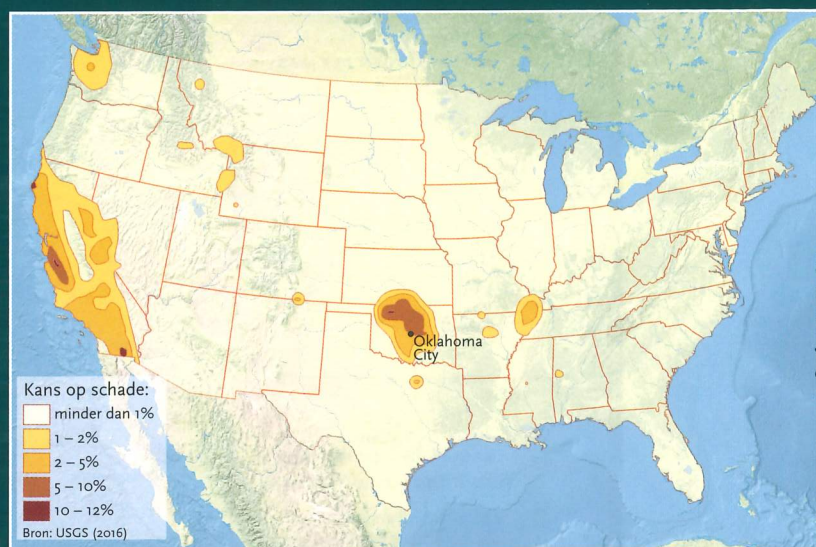
Oliewinning in de bedding van de Cimarron River
in Cushing Oil Field (1915) in Oklahoma, destijds
de staat met de grootste olieproductie van de VS.

heuvels. Indianen kookten dit water al in om zout te winnen. Op zoek naar meer zout werd in 1859 bij boringen in de buurt van Salina ('zout' in het Spaans) olie ontdekt. In de structuren in de ondergrond rond zoutlichamen bleek meer olie te zitten en toen Oklahoma in 1907 een staat werd, produceerde deze de meeste olie van de Verenigde Staten.

Door de vele boringen is de ondergrond ter plekke veranderd in een gatenkaas: vanaf 1875 tot nu zijn er meer dan 500.000 boorlocaties geweest. Na de productiepiek in 1927 (762.000 barrels/dag; 1 barrel is ongeveer 160 liter) nam de winning langzaam maar zeker af tot 2005, waarna de productie dankzij moderne technieken weer rendabel werd. Om energie te winnen, worden tegenwoordig vaak vloeistoffen of gas geïnjecteerd:

- injectie van water of CO_2 in vrijwel lege reservoirs, om de laatste beetje te winnen (de installatie staat er toch nog); olie en gas drijven op water, dus als je water inbrengt, kan dit de brandstof richting boorput sturen;
- injectie van superkritisch CO_2 in diepe reservoirs om het tijdelijk op te slaan (*Carbonate Capture and Storage, CSS*), of injectie van gas voor strategische voorraden;
- injectie van water om geothermische energie te winnen: het water gaat er koud in, je laat het door warm dieptegesteente heen trekken en pompt het verderop, opgewarmd, weer omhoog;
- injectie van water om scheurtjes te maken in reservoirs met een lage doorlatendheid: *hydraulic fracturing* (ook wel *fracken*); een procedure die al vaak werd toegepast in olie- en gasvelden, om meer uit die velden te kunnen winnen;
- injectie van *waste-water*: bij een boring wordt veel water gebruikt om de boorkop te koelen en de boring beter te laten verlopen. Ook komt er water uit de diepte mee omhoog. Dat is van nature verontreinigd en zout. Het zuiveren van deze boorvloeistof levert veel gedoe op, dus wordt het water weer teruggepompt naar de diepte, waar het ook grotendeels vandaan komt. En dan liefst dieper dan de lagen waaruit olie of gas wordt gewonnen, anders komt het weer opnieuw mee omhoog bij het pompen.

Figuur 1: De nieuwe risicokaart van schade door aardbevingen in de VS



De zone rond Oklahoma valt op, ten oosten daarvan langs de Mississippi is de New Madrid Zone.

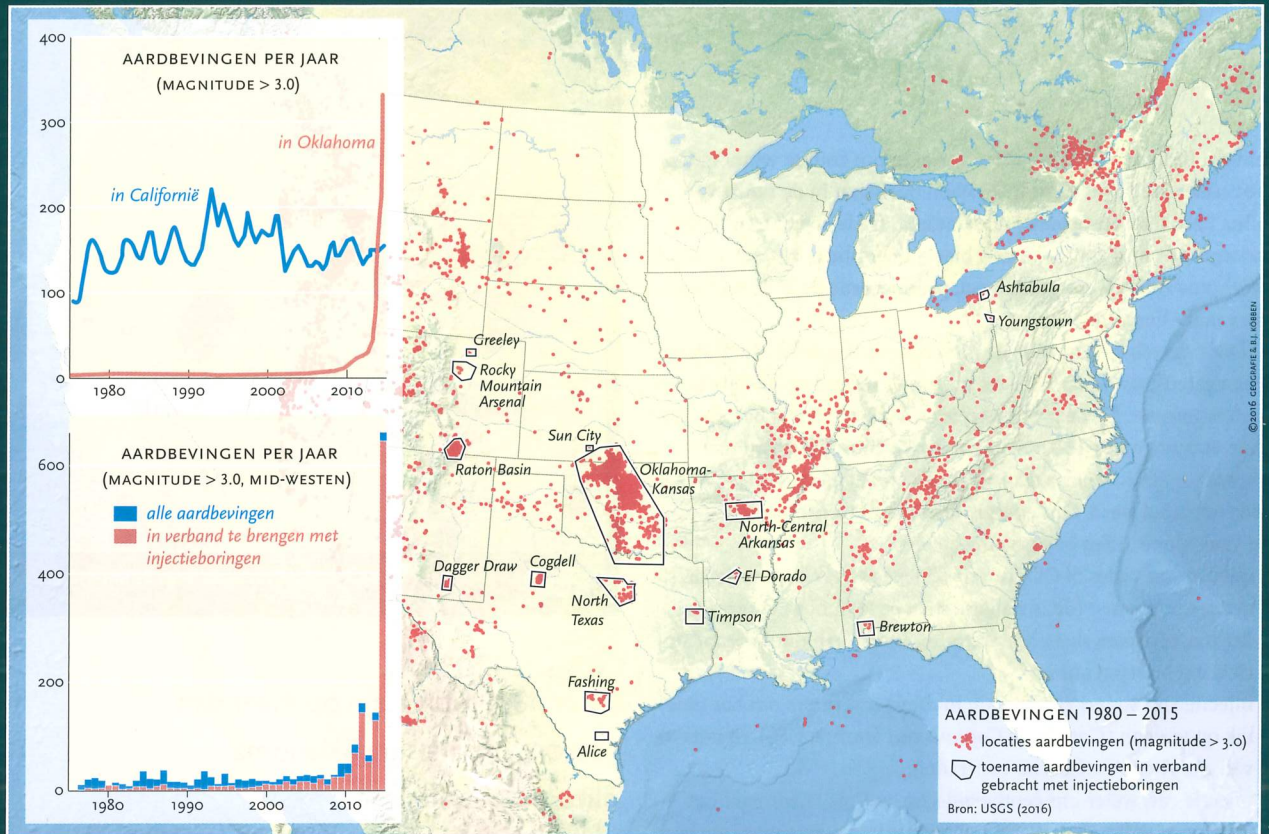
Vanaf 1875 tot nu zijn op meer dan 500.000 locaties in Oklahoma olieboringen verricht

De aardkorst staat altijd zodanig onder spanning dat een relatief kleine verandering al kan leiden tot een beweging langs breukvlakken in de ondergrond. Denk aan de aanleg van een groot stuwmeer (aardbeving bij Wenchuang, China in 2008), een enorme groeve, of zelfs grootschalige grondwateronttrekking (aardbeving bij Lorca, Spanje in 2011). Ook het in of uit de grond pompen van gas of vloeistoffen kan zo'n effect hebben. Aardbevingen die verband houden met menselijk handelen noemen we geïnduceerde bevingen.

Dat zulke bevingen door ingrepen in de ondergrond kunnen plaatsvinden, was in de VS al langer bekend. Tot de seismische activiteit rond Oklahoma begon, stond het record van de zwaarste aardbeving door menselijk handelen op naam van Rocky Mountain



Figuur 2: Bevingen in centrale en oostelijke VS



Arsenal, Colorado (4.9 tot 5.2 in 1967). Deze beving was de grootste in een serie die begon toen er water in de ondergrond teruggepompt werd bij oliewinning. Hij deed zich voor anderhalf jaar nadat het injecteren van water was gestopt. Ook de bevingen in Oklahoma en omgeving zijn aan de injectie van boorwater te wijten. Injectie van water verandert de lokale spanningstoestand, want water kan niet worden samengedrukt. Dat geeft in de diepe ondergrond direct tegendruk. Daar lopen allerlei breuken die ieder afzonderlijk niet voldoende onder spanning staan om te gaan bewegen. Maar als er water in een breuk loopt, duwt dat de breukwanden iets uit elkaar en dat verlaagt de druk die nodig is om te gaan schuiven. Op die manier ontlad het water energie die in de aardkorst zit. Zeker in het geval van waste-waterinjecties is dat het probleem: deze gaan diep, soms zelfs tot in het kristallijne gesteente (granieten of metamorfe gesteenten), onder alle sedimentaire bedekking. In die diepe ondergrond wemelt het vaak van de zwaktezones en is de spanning groter dan in de jongere gesteenten erboven.

De vier injectieputten bij Jones veroorzaakten 20% van alle aardbevingen in de centrale VS tussen 2008 en 2013

Afgezien van de schade die ze kunnen berokkenen, zijn die onnatuurlijke bevingen een interessant fenomeen. Anders dan natuurlijke seismiciteit varieert geïnduceerde seismiciteit namelijk per plek en in de tijd. Zodra projecten in activiteit verminderen of worden stopgezet, neemt het aantal aardbeving af met de tijd, vaak in een wat onregelmatig patroon. En omgekeerd, als in een ander gebied de winning wordt opgeschroefd, is daar een scherpe toename te zien. In het Slochterenveld is hetzelfde patroon zichtbaar: nu bij Loppersum de kranen dichtgedraaid zijn, is de seismische activiteit daar vrijwel direct verminderd en verschoven naar de randen van andere subvelden. Dat suggereert in sterke mate een relatie, maar worden de bevingen daadwerkelijk veroorzaakt door de boringen?

ONDERZOEK

Om te achterhalen of er een aantoonbaar verband bestaat, analyseerden aardwetenschappers in de VS de activiteit van maar liefst 187.570 putten (boorlocaties) in het midden van het continent, waarvan in december 2014 bij 56% actief vloeistoffen werden geïnjecteerd. De andere 44% was inactief of verlaten. In die putten verdwijnen aanzienlijke hoeveelheden water, helemaal sinds 2004, toen er nieuwe winningstechnieken in gebruik werden genomen. Zo wordt in vier putten rond Jones (Oklahoma) in totaal 600 miljoen liter/maand teruggepompt. In deze buurt wordt een olie-winningstechniek toegepast waarbij vele malen meer water vrijkomt dan bij gewone methoden. Afgezet tegen de pieken in waterinjectie vonden de zwaarste geïnduceerde aardbevingen in het-

zelfde gebied en dezelfde periode plaats, al zegt dat niet alles. De maximale zwaarte van een beving wordt normaal gesproken vooral bepaald door de lengte en diepte van een breuk en de oriëntatie van het breukvlak ten opzichte van het heersende spanningsveld.

Uit de onderzoeken komt vooral naar voren dat er duizenden putten zijn die geen enkele seismiteit veroorzaken, terwijl de groep van vier bij Jones tot 20% van alle aardbevingen in 2008-2013 in de centrale VS voor hun rekening nam. Een ander onverwacht resultaat is de grote afstand tussen enerzijds de putten waar water wordt geïnjecteerd en anderzijds de verste bevingen, tot wel 35 kilometer. Dat geeft te denken over de ideeën dat er duizenden putten zijn die geen enkele seismiteit veroorzaken, terwijl de groep van vier bij Jones tot 20% van alle aardbevingen in 2008-2013 in de centrale VS voor hun rekening nam. Een ander onverwacht resultaat is de grote afstand tussen enerzijds de putten waar water wordt geïnjecteerd en anderzijds de verste bevingen, tot wel 35 kilometer. Dat geeft te denken over de ideeën dat er duizenden putten zijn die geen enkele seismiteit veroorzaken, terwijl de groep van vier bij Jones tot 20% van alle aardbevingen in 2008-2013 in de centrale VS voor hun rekening nam.

GEÏNDUCEERD OF NIET

Als een seismograaf een aardbeving registreert, is op een seismogram niet zichtbaar of die natuurlijk is of door menselijk ingrijpen veroorzaakt. Beide hebben dezelfde opeenvolging van seismische golven. Je kunt spreken van een geïnduceerde beving als deze voldoet aan de volgende drie criteria.

- Er is sprake van een statistisch aantoonbare verandering in aantal en herhalingsstijl van aardbevingen. Dat kan dus betekenen: aardbevingen in een gebied waar ze voorheen niet optraden, of een toename van bevingen in een gebied waar al natuurlijke bevingen plaatsvonden. Van natuurlijke bevingen is het idee dat ze op de schaal van decennia niet in aantal verschillen.
- Een bekende injectie-operatie (actief of onlangs gestopt) en een opeenvolging van aardbevingen (hoofdschok en naschokken) vallen samen in tijd.
- De bevingen doen zich voor binnen een paar kilometer van een actieve put en op een diepte die overeenkomt met de lagen waarin water is ingebracht.

Het is echter technisch lastig precies te bepalen waar een aardbeving plaatsvindt en op welke diepte. Als het seismische netwerk niet al te veel meetstations omvat, treedt al snel een foutmarge op van enkele honderden meters. Bovendien planten seismische golven zich door verschillende gesteenten anders voort. Dus als de ondergrond niet in voldoende detail bekend is, kun je ook de locatie niet secuur genoeg vaststellen. Daarmee is dus niet exact vast te stellen of een serie aardbevingen langs eenzelfde breuk plaatsvindt en of er een verband bestaat met de injectie. Hoe voor de hand liggend dat ook lijkt.

Toch is het belangrijk zoiets wél te kunnen vaststellen. Zeker in de Verenigde Staten, waar men al snel naar de rechter stapt als iemand aansprakelijk kan worden gesteld. In alle gebieden verspreid over diverse staten wonen ongeveer 7 miljoen mensen die met dit soort bevingen rekening moeten houden, zo geeft de USGS met zijn nieuwe analyse aan.

Nou gaat het vaak om dunbevolkte, vrij afgelegen gebieden – lijkt het toch ergens weer op Groningen. Als er desondanks koppen



Een deel van de opslagtanks ten zuiden van Cushing, met de op-een-na-grootste strategische voorraad olie van de VS. Aardbevingen vormen hier een grote bedreiging.

als ‘Oklahoma Earthquakes Are a National Security Threat’ in de kranten verschijnen, moet er toch iets serieus aan de hand zijn. Wat blijkt: in Oklahoma ligt vlak bij het seismisch geactiveerde gebied het dorpje Cushing, dat omgeven wordt door gigantische olie-opslagtanks. Hier ligt de op-een-na-grootste strategische voorraad olie van de VS, met een capaciteit tot wel 13.500 miljard liter ruwe olie. Daar heeft de federale overheid liever geen beschadigende aardbevingen. •

BRONNEN

- <http://earthquake.usgs.gov/research/induced/>
- Petersen, M.D. et al. 2016. *One-year seismic hazard forecast for the Central and Eastern United States from induced and natural earthquakes*. USGS Open-File Report 2016-1035. Te raadplegen op <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20161035>.
- Rubinstein, J.L. & A. Babaie Mahani 2015. Myths and Facts on Wastewater Injection, Hydraulic Fracturing, Enhanced Oil Recovery, and Induced Seismicity. *Seismological Research Letters*, 86(4), July/August 2015.
- Walsh III, F.R. & M. Zoback 2015. Oklahoma's recent earthquakes and saltwater disposal. *Science Advances* 1(5). Te raadplegen op <http://advances.sciencemag.org/content/1/5/e1500195>
- Weingarten, M. et al. 2015. High-rate injection is associated with the increase in U.S. mid-continent seismicity. *Science* 348(6241): 1336-1340.