

Archeoseismologie – reconstructie van historische aardbevingen

door Johan H. ten Veen
TNO Bouw en Ondergrond, johan.tenveen@tno.nl

De laatste paar maanden is de wereld opgeschrokken door een aantal destructieve aardbevingen die ons doen beseffen dat veilig geachte bouwwerken als kaartenhuizen kunnen instorten en dat beschavingen tijdelijk volledig lamgelegd kunnen worden. Wie de wetenschappelijke beschouwingen en rapportages op bijvoorbeeld CNN heeft gezien, weet dat er op de wereld een zeer dicht netwerk van seismische meetstations is, dat de exacte locatie van epicentra kan bepalen. Bij de recente aardbeving in Chili (februari 2010) bleken de epicentra van de hoofd- en naschokken op het breukvlak te liggen van de subducerende Nazca-plaat en de bovenliggende Zuid-Amerikaanse plaat. De relatie tussen oorzaak en gevolg is in dit geval helder. De relatie tussen de kracht van de beving en de gevolgen aan het aardoppervlak is veel moeilijker te bepalen en is al meer dan 100 jaar onderwerp van onderzoek. Meer kennis hierover zou ons in staat stellen de grootte van oudere aardbevingen te schatten op basis van de aangerichte schade en zodoende uitspraken te doen over potentieel toekomstig aardbevingsgevaar.

Kracht en intensiteit van aardbevingen

Sinds ruim een eeuw worden aardbevingstrillingen op veel plekken gemeten door seismografen en spreken we van 'instrumentale' aardbevingen. In 1935 stelde de Amerikaanse seismoloog Richter een methode op om de kracht of magnitude (M) van een aardbeving te berekenen op basis van de uitslag van deze seismografen en hun afstand tot het epicentrum. Een aardbeving die de wijzer van een seismograaf op 100 km afstand van het epicentrum doet uitwijken met 1 mm, heeft een magnitude van 3 op de schaal van Richter. De schaal is logaritmisch, d.w.z. een aardbeving van magnitude 4 is tien maal sterker, een magnitude-2 aardbeving tienmaal zwakker dan een magnitude-3 aardbeving. Recentelijk heeft de richterschaal aan populariteit ingeboet, omdat deze voor de registratie op grote afstand van met name zwaardere bevingen onnauwkeurig bleek te zijn. Tegenwoordig wordt daarom bij zwaardere bevingen de kracht weergegeven als Moment Magnitude (Mw, waarbij w staat voor 'mechanical work'), een eveneens logaritmische schaal, gebaseerd op de lengte van het breuksegment en de omvang van de verplaatsing. Net als bij de richterschaal, komt een krachttoename van één stap overeen met een circa 30 ($10^{1.5}$) keer hogere energie; een toename van twee stappen komt overeen met een 1000 (10^3) maal hogere energie.

Geen van beide schalen meet echter de intensiteit van de aardbeving, die wordt gedefinieerd door de grootte van de schade en de mate waarin de grond geschud heeft. De intensiteit hangt van veel dingen af, zoals de grondsoort, de onderliggende lagen, de diepte, het type verplaatsing en de afstand tot het epicentrum. Oudere, pre-richtermethoden gingen wel uit van de intensiteit van een beving, al is deze sterk afhankelijk van de plaats van waarneming. In 1902 ontwikkelde de Italiaanse vulkanoloog en seismoloog Giuseppe Mercalli een methode om aardbevingsintensiteit te schatten door gebruik te maken van ooggetuigenverslagen. De relatie tussen de beschreven schade, de gebeurtenissen, en factoren als constructiestijl, grondtype en afstand tot het epicentrum worden beschreven in de zgn. schaal van Mercalli. Deze methode is erg gevoelig voor fouten omdat ooggetuigen de neiging hebben om te overdrijven en zelden een identiek verhaal naar voren brengen. De schaal van

Mercalli is in 1964 voor Europa aangepast en wordt aangeduid als de MSK-intensiteitsschaal, genoemd naar de ontwerpers Medvedev, Sponheuer en Karnik. Sinds 1992 hanteert men in Europa de Europese Macroseismische Schaal (EMS92).

Een groot probleem is dat de intensiteit van aardbevingen (en dus de schade aan het aardoppervlak) zich niet gemakkelijk laat vertalen in magnitude (kracht). Dit wordt duidelijk als we de oppervlakte-effecten van de recente aardbevingen in Haïti (Mw 7.0) en Chili (Mw 8.8) met elkaar vergelijken. De beving in Chili had een circa 500 maal ($10^{1.5 \times 1.8}$) grotere energie-inhoud, maar de schade en het aantal slachtoffers was daar veel minder groot dan in Haïti omdat het epicentrum in Haïti relatief ondiep lag.

The past is the key to the future

Ondanks de bezwaren die kleven aan intensiteitschalen, bieden ze het enige houvast bij aardbevingen vóór het tijdperk van de meetinstrumenten. Dan vormen schriftelijke ooggetuigenverslagen de belangrijkste tastbare informatiebron voor historische aardbevingen. Maar ook de schade aan bouwwerken op archeologische sites bevatten aanwijzingen voor aardbevingen. De archeoseismologie is een geowetenschappelijke tak die zich richt op bestudering van deze schade, zoals bouwstenen die gedraaid en gekanteld zijn, objecten die verplaatst zijn, omgevallen zuilen, etc., en gebruikt die karakteristieken om een relatie te vinden tussen historische en jongere (gemeten) aardbevingen. Het uiteindelijke doel is om de periodiciteit (hoe vaak) en intensiteit (hoe erg) van aardbevingen in een bepaald gebied beter te bepalen en zodoende aardbevingsrisico's beter te kunnen schatten (the past is the key to the future).

Archeoseismologisch onderzoek is vaak moeilijk doordat bouwwerken te erg verwoest zijn, of juist doordat de aard van de destructie te onbeduidend is. Een grote uitdaging voor de archeoseismoloog is om onderscheid te maken tussen seismische schade en schade veroorzaakt door een ander natuurlijk fenomeen of door de mens. Chaos is hierbij een kritieke factor, omdat vaak wordt gedacht dat verwoestingen door aardbevingen een vast patroon volgen, dat direct te koppelen is aan de karakteristieken van de oppervlaktegolven van die aardbeving, terwijl destructie door andere oorzaken willekeuriger zou zijn. Deze bewering staat echter ter discussie. Bij een aardbeving ontstaan verschillende soorten golven; één daarvan is een golf die zich alleen langs het aardoppervlak kan voortbewegen. Deze oppervlaktegolven zijn langzamer dan de golven die zich door de aarde kunnen voortplanten, maar zij hebben een grotere amplitude, waardoor ze verantwoordelijk zijn voor de meeste schade aan bouwwerken.

Valkuil

De grootste valkuil voor de archeoseismoloog is echter het samenvoegen of dupliceren van verschillende seismische gebeurtenissen door ervanuit te gaan dat alles wat in de historische record staat waar is. Samenvoeging gebeurt bijvoorbeeld door een slecht gedateerde beving aan de hand van een getroffen historische stad te vergelijken met geschreven informatie over een beving op een andere locatie in ongeveer dezelfde tijd. De grootte van het getroffen gebied – en dus de intensiteit van de beving – wordt dan al snel overdreven.

Foutieve of onnauwkeurige datering van aardbevingen kunnen ook tot opsplitsing van één en dezelfde gebeurtenis leiden, met onderschatting als gevolg. Betrouwbare archeoseismologische resultaten worden slechts verkregen wanneer archeologische stratigrafie, geologie en geomorfologie, en kwantitatieve daterings- en meetmethoden gecombineerd worden in een interdisciplinair methodologisch kader.

De ontwikkeling van betrouwbare criteria om archeologische aardbevingsindicatoren te identificeren en de realisatie van een dergelijk methodologisch kader vormen de belangrijkste doelen van het International Geoscience Programme IGCP 567 (2008-2012) "Earthquake Archaeology, Archaeoseismology along the Alpine-Himalayan seismic zone", geleid door Manuel Sintubin (2008).



Afb. 1. Locatie van Pinara en de Fethiye-Burdur breukzone (FBFZ). Gebieden met het hoogste aardbevingsrisico in Turkije zijn aangegeven in roze.

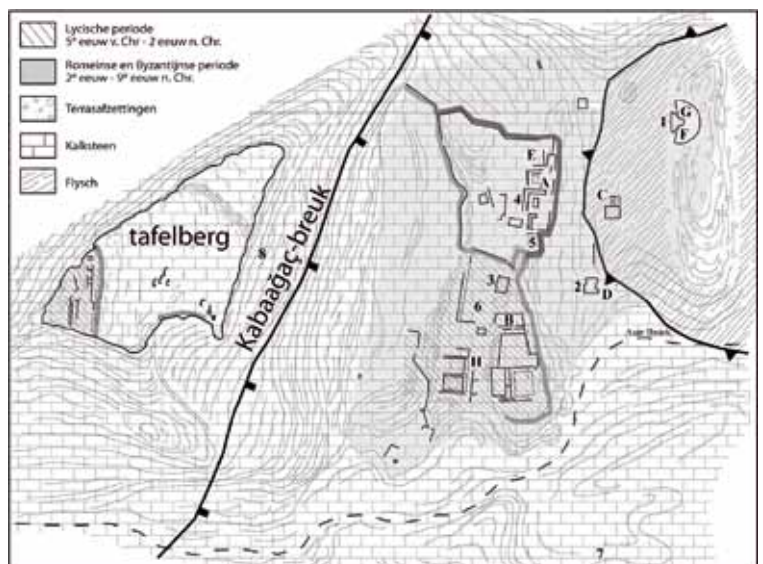
Hieronder wil ik een veldwerk in (de omgeving van) Pinara, een kleine Lycische stad in het zuidwesten van Turkije gebruiken als voorbeeld van archeoseismologisch onderzoek (afb. 1).

De geologie van Zuidwest-Turkije

Zuidwest-Turkije wordt gekarakteriseerd door een afwisseling van hoge bergketens en lager gelegen bekkens, gescheiden door vaak complexe breuksystemen. De Fethiye-Burdur Fault Zone (FBFZ) is een prominente, langgerekte breukzone bestaande uit vele subparallele breuken en bekkens, die mogelijk verbonden zijn met breuksystemen in de Helleense subductiezone (afb. 1). Van deze breukzone werd aanvankelijk aangenomen dat het een strike-slip systeem was (dus met horizontale bewegingen langs het breukvlak), maar zowel veldstudies als seismologische studies tonen aan dat de breukbewegingen van het Laat-Mioceen tot heden overwegend normale (verticale) afschuivingsbewegingen zijn geweest. Grote onduidelijkheid bestaat over de relatie tussen deze breukbewegingen en grootschalige, regionale tektonische krachten.

De FBFZ kent één van de hoogste seismische risico's van Turkije, vergelijkbaar met die van de beruchte Noord-

Afb. 2. Plattegrond van Pinara, met de belangrijkste overblijfselen: 1 - Romeins theater; 2 - badhuis; 3 - Odeon; 4 - tempel; 5 - tombe; 6 - Agora; 7 - Necropolis; 8 - breukvlak met tombes. A t/m H verwijzen naar de foto's in afb. 5.



Anatolische Breukzone. In 1999 vonden langs de Noord-Anatolische Breukzone enkele aardbevingen plaats waarbij meer dan 10.000 slachtoffers vielen. Ondanks het hoge seismische risico, komen er langs de FBFZ slechts middelgrote bevingen voor (met een kracht tot $M=6$ op de schaal van Richter) die voornamelijk in het noordelijk en zuidelijk deel geconcentreerd zijn. Het centrale deel van de zone is ogenschijnlijk seismisch inactief, al doet de schade aan de vele historische steden zoals Sagalassos, Hierapolis en Cibyra vermoeden dat dit niet altijd zo is geweest. In oktober 2007 werd de omgeving van Cameli, slechts 50 km ten noorden van Pinara, getroffen door een aardbeving met een kracht van 4.9 op de schaal van Richter. Ook volgden er vele naschokken. Deze schade is goed vergelijkingsmateriaal voor de verschillende typen schade die te vinden zijn in de archeologische overblijfselen in dit gebied.

Pinara en historische schade

De archeologische site in Pinara heeft een oppervlakte van vier km². Er staan uitsluitend nog ruïnes van Lycische en Romeinse bouwwerken (afb. 2). De 450 meter hoge tafelberg toont hoog boven de stad uit en is aan de oostzijde begrensd door de Kabaagaç-breuk (afb. 3). In het breukvlak zijn honderden graffombes uitgehouwen. De stad Pinara is gelegen langs de antieke 'Lycian Road', de belangrijkste Lycische handelsroute, en is tussen de 5e en 4e eeuw voor Christus gesticht door kolonisten uit Xanthos, de hoofdstad van het Lycische Rijk. Pinara was één van de belangrijkste steden van dit machtige rijk tot de verovering van Alexander de Grote in de winter van 334-333 voor Christus. Kort daarna begon de Romeinse overheersing, al is de eerste architectonische invloed daarvan in Pinara pas in de 2e eeuw na Christus een feit. Het is een van de minst bezochte archeologische sites van Zuidwest-Turkije, maar wordt vanwege haar verscholen ligging, onaantaste staat en geologische betekenis als een van de mooiste beschouwd (afb. 4).

De Lycische en Romeinse bouwwerken in Pinara zijn gebouwd met grote ('ashlar') blokken kalksteen of gecementeerd conglomeraat. Zij laten diverse typen van schade zien, waaronder scheve vloeren en muren, verschoven bouwstenen, scheuren en breuken, ingestorte muren en omgevallen zuilen (afb. 5). Metingen aan de 32 omgevallen zuilen in de Acropolis en de Agora (afb. 5) laten twee dominante valrichtingen zien, één naar het zuidoosten en één naar het oosten. Vaak wordt één enkele valrichting gezien als een indicatie voor aardbevingschade: sommige archeoseismologen geloven dat er een relatie bestaat tussen de valrichting en de voortplantingsrichting van oppervlaktegolven. Uit experimenten blijkt echter dat het gedrag van de zuilen tijdens een aardbeving van vele factoren



Afb. 3. A - Kabaagaç-breuk met uitgehouwen graftombes; B - detail van het breukvlak; C – graftombes.

afhankelijk is en daardoor niet goed te voorspellen valt.

Vaak bevatten de zuilen diagonale scheuren (afb. 5E) die toegerekend worden aan de enorme toename van de verticale druk die op dragende zuilen uitgeoefend wordt als een oppervlaktegolf 'langs komt'. Een ander fenomeen dat verklaard wordt door een oppervlaktegolf, zijn de verzakte sluitstenen in de top van architectonische bogen (afb. 5D). Deze verzakte sluitstenen komen alleen voor in seismisch actieve gebieden. Zo'n verplaatsing is immers niet mogelijk zonder (kortstondige) rek aangezien een boogstructuur juist bedoeld is om verticale spanning te weerstaan.

In Pinara zijn zeer veel muren te zien met golvende uitstulpingen, waarbij individuele bouwstenen een aanzienlijke rotatie hebben ondergaan. Ook dit fenomeen wordt wel verklaard door de effecten van oppervlaktegolven. Afbeelding 6 laat de grote overeenkomst zien tussen een Lovegolf (een type oppervlaktegolf dat zich door een vast medium voortplant) en de dislocatie van bouwstenen. Dat bouwstenen niet altijd bestand zijn tegen deze krachten, is te zien aan de vele breuken met verzet. Voor de reconstructie van een hoek van de tempelmuur is gebruik gemaakt van de twee typen bouwsteen waaruit de muur is opgebouwd: polygonale blokken die tijdens de Lycische periode werden gebruikt en rechthoekige blokken uit de Romeinse tijd (afb. 5A). Omdat beide tijdperken goed gedateerd zijn, is de ouderdom van de verantwoordelijke aardbeving nauwkeurig te bepalen.



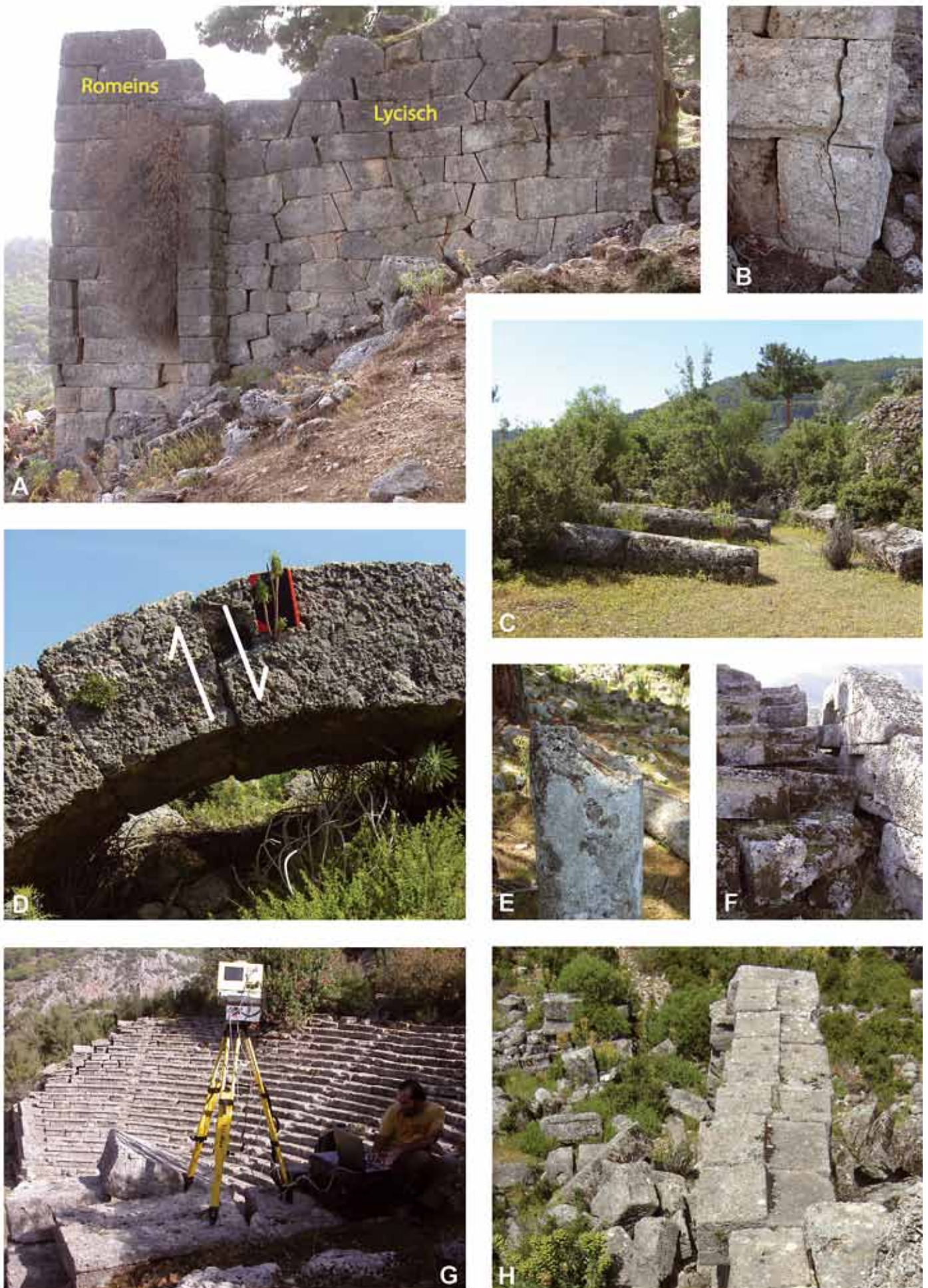
Afb. 4. Onderzoekslocatie in Pinara.

Laserstralen

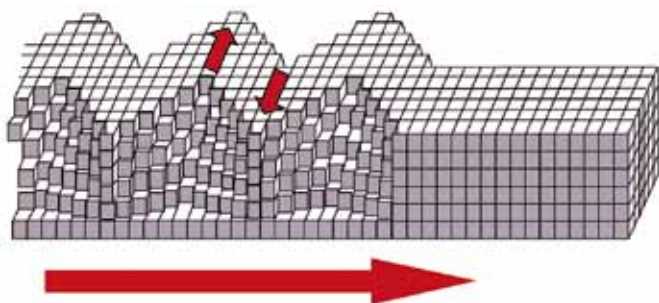
Een typisch kenmerk van afschuivingsbreuken is dat het afschuivende blok scheef gaat staan waardoor er een zgn. 'hanging wall dip' ontstaat. Als tijdens het schuiven langs de breuk ook sediment wordt afgezet, dan ontstaan 'fanning dips': oude lagen met een grotere hellingshoek met daar bovenop jongere lagen met een geringe hellingshoek. Constructies gebouwd op dergelijke sedimenten kunnen onder een kleine hoek scheefgesteld worden als de breuk ook na de bouw nog actief was.

Pinara beschikt over een Romeins theater dat is gebouwd op Pleistocene alluviale terrasafzettingen die naar het westen hellen. Deze afzettingen zijn de jongste van een Mioocene-Kwartaire opeenvolging die het 'hanging wall' blok bedekt. Omdat de terrasafzettingen geologisch jong zijn, rijst de vraag of ook deze afzettingen beïnvloed zijn door jongere breukbeweging en scheefstelling en of dit terug te vinden is in de ruimtelijke setting (bijvoorbeeld qua hellingsrichting en -hoek) van het theater. Een belangrijke aanname is dat de gesteenteblokken waaruit de zitrijen van het theater opgebouwd zijn, oorspronkelijk (nagenoeg) waterpas geplaatst zijn. Dit is redelijk aangezien de Romeinen befaamd waren om de nauwkeurigheid die zij in hun bouwstijl aan de dag legden. Die nauwkeurigheid is te danken aan de door de Romeinen toegepaste (landmeetkundige) instrumenten zoals de groma (om rechte hoeken te meten), de dioptra (om een rechte lijn in het landschap te bepalen) en de chorobates (een soort waterpas). Hiermee werd een exacte horizontale en verticale bouw mogelijk.

Om het idee of de zitblokken scheef zijn gesteld te testen, is een zeer nauwkeurige meetmethode nodig, omdat scheefstelling met het blote oog niet waarneembaar is. In eerste instantie hebben we de zitrijen van het theater opgemeten met een kompas, maar doordat de blokken een pokdalig oppervlak bleken te hebben als gevolg van karstverwerking, waren deze metingen zeer onnauwkeurig. Een geschiktere methode om de helling van het gehele theater aan te tonen, is het LIDAR-systeem (Light Detection and Ranging System; afb. 5G). Hiermee wordt met een laserstraal de exacte positie van een



Afb. 5. A - gereconstrueerde tempelmuur; B - verticale cracks; C - parallelle zuilen; D - omlaag geschoven sluitsteen; E - diagonale scheur als gevolg van verticale belasting; F - ontzette muur van het theater; G - theater tijdens LIDAR opname; H - gegolfde muur



Afb. 6. Verplaatsing als gevolg van een oppervlaktegolf (bron: Fowler, 2005) en voorbeelden uit Pinara.

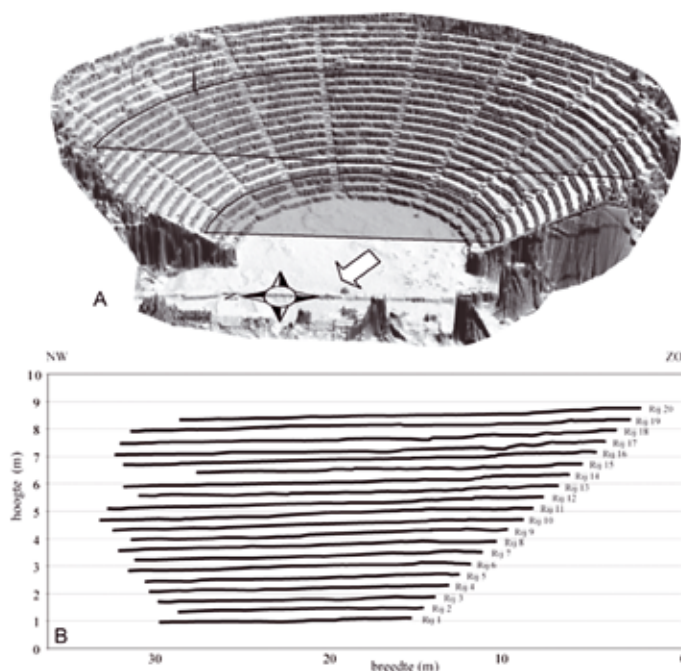
voorwerp gemeten. Met deze data zijn de zitrijen exact gereconstrueerd en kunnen ook andere metingen uitgevoerd worden (afb. 7).

Simpele wiskunde

Dip- en azimutmetingen van iedere rij afzonderlijk (de lengterichting en de helling van de zitblokken) laten een systematische helling naar het noordwesten zien, met een gemiddelde hellingshoek van $0,8^\circ$. Sceptici onder ons zullen beweren dat deze waarde ver beneden de detectiegrens van een hellingshoek ligt. Dit zou inderdaad zo zijn als wij een geologisch kompas gebruikt hadden. Ondanks de geringe hoek, kunnen we met simpele wiskunde berekenen wat het effect op het theater is. Met een breedte van ongeveer 20 m en een hoek van $0,8^\circ$ vertoont het theater een hoogteverschil van 28 cm tussen de noordelijke en zuidelijke kant (afb. 7). Dit is vele malen groter dan de 2 cm meetnauwkeurigheid van het LIDAR-systeem, en is dus significant. Op vergelijkbare wijze konden wij met behulp van de afstand tot de breuk en de hoek van het theater berekenen dat er 3,5 m vertikaal verzet langs de breuk moet zijn opgetreden om de gemeten scheefstelling te bewerkstelligen.

Op basis van het verzet langs de breuk, veroorzaakt door recente aardbevingen, hebben Wells and Coppersmith (1994) een relatie bepaald tussen de kracht van de beving en het verzet langs een breuk. Volgens deze relatie zou een aardbeving met kracht (Moment Magnitude) $M_w \approx 7$ verantwoordelijk geweest zijn voor de beweging langs de breuk en de scheefstelling van het theater in Pinara. De vraag is nu of zo'n krachtige aardbeving ook te rijmen is met de aard van de schade die bij andere bouwwerken in Pinara zichtbaar is. Zoals eerder uitgelegd, is er geen eenduidige relatie tussen kracht en intensiteit, maar algemeen wordt aangenomen dat een beving met een kracht van 7 op de schaal van Richter correspondeert met destructieve bevingen (klasse IX op de Mercalli-schaal). Bij destructieve bevingen is de schade aanzienlijk, waarbij zuilen en muren omvallen, gebouwen van hun fundament loskomen en de grond open kan scheuren. De inschatting van de aardbevingskracht spreekt de intensiteit van de archeoseismologische waarnemingen dus niet tegen. De herbouwde tempelmuur geeft aan dat ook tijdens de Romeinse periode aardbevingen

plaatsgevonden hebben, terwijl de schade aan de gehele muur toe te kennen is aan één of meer latere bevingen. Dit wordt ook bevestigd door historische gegevens die verklaren dat de stad na aardbevingen in 141 en ~240 AD financiële hulp ontving voor de wederopbouw (Guidoboni 1994; Lang 2003; Akşit 2006).



Afb. 7 A - Driedimensionale weergave van het Romeinse theater op basis van de LIDAR metingen; B - Hoogtemetingen van twintig zitrijen tonen een helling naar het noordwesten aan (witte pijl in A).

Slotwoord

Archeoseismologie is (nog) geen exacte wetenschap. Dat verklaart waarom soms met enige scepsis tegen de bewijsvoering voor historische aardbevingen wordt aangekeken. De continue ontwikkeling van technieken die het mogelijk maken de bewijsvoering te kwantificeren, zoals hier beschreven, kan de geloofwaardigheid van de archeoseismoloog echter zeker verbeteren. Verder is een interdisciplinaire bestudering van archeologische sites, gebruikmakend van archeologische, geologische, geofysische, bouwtechnische en grondmechanische kennis, zoals beoogd door het IGCP-programma, een eerste vereiste om de gevolgen van historische bevingen te kunnen vertalen naar hun oorzaken.

Dit artikel is geschreven naar aanleiding van het promotieonderzoek van Baris Yerli (Ruhr Universität Bochum) uitgevoerd onder begeleiding van Johan ten Veen (thans TNO Bouw en Ondergrond) en Manuel Sintubin (K.U. Leuven).

Referenties

- Akşit, I., 2006, The land of light Lycia: Akşit Yayıncılık, Istanbul;
- Fowler, C.M.R., 2005, *The solid earth: an introduction to global geophysics* (2nd ed.). Cambridge University Press;
- Guidoboni, E., 1994, Catalogue of ancient earthquakes in the Mediterranean area up to the 10th century: Rome, Istituto Nazionale di Geofisica;
- Lang, G., 2003, *Klassische antike Stätten Anatoliens, Band II*: Lang Verlag, St. Peter am Hart;
- Sintubin, M., juni 2008, KNGMG nieuwsbrief;
- Wells, D. L., and Coppersmith, K. J., 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement: *Seismological Society of America Bulletin*, v. 84, no. 4, p. 974-1002.