

Studiereis U-BASE 2018

Traditionele houten pagodes en hun onverwoestbaarheid voor aardbevingen

Afgelopen juli vertrokken 23 studenten Structural en Building Engineering van de studievereniging U-BASE en 2 professoren van de TU Delft richting Japan voor een studiereis. Tijdens deze reis zijn de steden Tokyo, Osaka, Kobe en Kyoto aangedaan. Er zijn veel interessante en unieke Japanse bouwwerken bezocht, waaronder meerdere pagodes. Aardbevingsbestendigheid stond tijdens deze reis uiteraard hoog in het vaandel. De werking en onverwoestbaarheid van deze pagodes wat betreft aardbevingsbestendigheid heeft veel indruk gemaakt op de studenten en de bevindingen zullen in dit artikel verder worden toegelicht.

Traditionele Japanse tempels zijn vaak gebouwd in de stijl van een pagode. Dit is een torenvormig, houten gebouw dat uit verschillende, steeds kleiner wordende verdiepingen bestaat en waarbij elke verdieping haar eigen dak heeft. De pagode is altijd een losstaand gebouw zodat de gelovige er als ritueel omheen kan lopen uit respect voor de relikwieën die binnen worden bewaard. De eerste pagodes werden gebouwd tijdens de opkomst van het boeddhisme in China en Japan in de zesde eeuw na Christus. De oudste pagode in Japan is de Horyu-Ji tempel in Tokyo uit 607 na Christus en is ongeveer 38 meter hoog. De hoogste pagode in Japan is de Toji pagode in Kyoto en dit is tevens ook het hoogste houten gebouw in Japan. Deze bijna 55 meter hoge toren werd gebouwd in de Edo-periode in het jaar 1643. (Tarantola, 2011)



Figuur 1: Horyu-Ji Tempel (Japan Deluxe Tours)



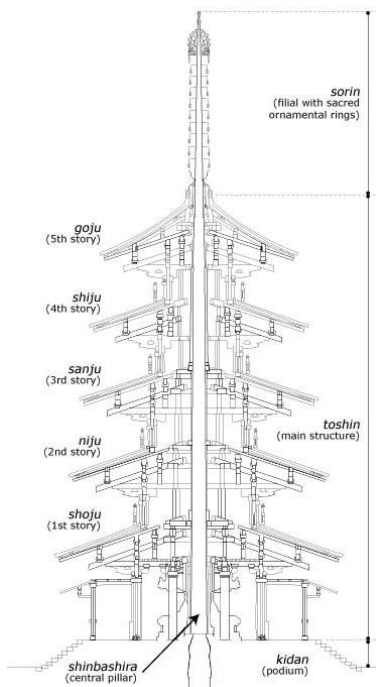
Figuur 2: Toji Tempel (Wordpress)

In de afgelopen 1400 jaar zijn er slechts twee tempels ingestort, dit ondanks het feit dat Japan geteisterd wordt door tyfoons en aardbevingen. (The Econometrist, 1997) Zelfs tijdens de aardbeving in Kobe in 1995, waar vele moderne gebouwen instortte, bleven alle traditionele pagodes overeind staan. (Nipponia, 2005) De tempels die in de loop van de tijd wel zijn verdwenen zijn verbrand door blikseminslag of verwoest tijdens burgeroorlogen. (The Econometrist, 1997) Hoe is het mogelijk dat deze oude, relatief hoge gebouwen al die eeuwen hebben doorstaan?

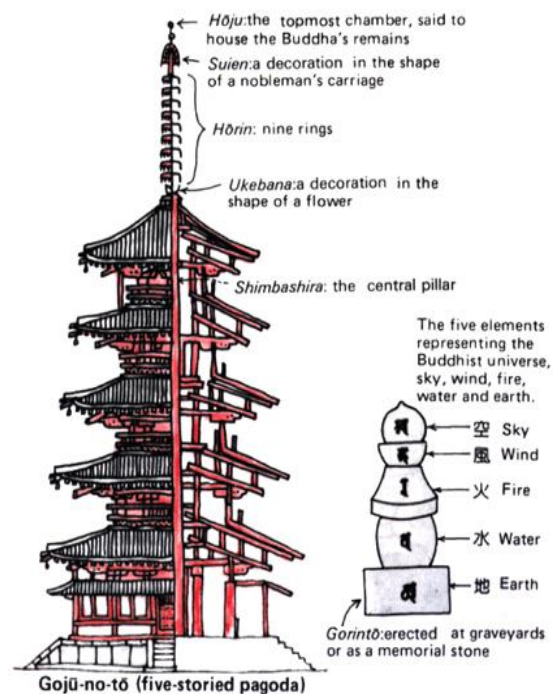
Draagconstructie

Traditionele Japanse pagodes bestaan uit een gelaagd houten raamwerk. Elke verdieping is als het ware een aparte box die los niet recht overeind blijft staan, maar door het stapelen boven elkaar (in afnemende grootte) wordt dit wel mogelijk. Zodra de grond begint te beven zal elke verdieping apart van elkaar beginnen te slingeren. Wat opvallend is, is dat de verdiepingen in tegengestelde richting van elkaar beginnen te slingeren. Om te voorkomen dat de vloeren te ver zullen uitwijken werd de *shinbashira* bedacht. Dit is een grote verticale kolom die geen kracht afdraagt, maar een ander doel dient. Deze grote dennenbomen stam hangt vanaf het dak omlaag in de schacht van het gebouw. Het laagste punt kan zowel in de grond worden vastgezet maar ook los gelaten blijven. Het werkt als een *tuned mass damper* die de bevingen in het gebouw beperkt en ervoor zorgt dat het gebouw niet zal slingeren tot het punt van omvallen. (Hanazato, 2012)

De pagodes zijn een opvallende en herkenbare verschijning. Vanwege de grote regenval in Japan was het belangrijk dat het regenwater niet direct af wordt afgevoerd naar de grond rond de fundering om zettingen in de grond te voorkomen. Door de dakranden verder weg van de gevel, en dus van de constructie, te houden was het mogelijk dit te realiseren. Naast deze klimaat technische functie brachten de wijde en zware dakranden ook enorme stabiliteit in het gebouw door hun enorme traagheid die overwonnen moet worden voordat een gebouw begint te slingeren bij aardbevingen. Hoewel de pagodes de aardbevingen en tyfoons vaak goed hebben doorstaan braken de masten wel regelmatig af. Dit valt echter te repareren na de aardbeving.



Figuur 3: Draagconstructie pagode ((Nipponia, 2005)



Figuur 4: Religieuze achtergrond pagode (Maikoya, 2018)

Hout

Hiernaast is het gebruik van hout een van de redenen van de onverwoestbaarheid van de Japanse pagodes. Onder belasting zal hout verbuigen, maar het zal niet gauw breken. Als de belasting niet meer aanwezig is, zal het hout zich terug naar de originele positie verplaatsen. Deze flexibiliteit geeft de houten pagodes de capaciteit om seismische spanningen te absorberen. (Karlovic, 2017)

Verbindingen

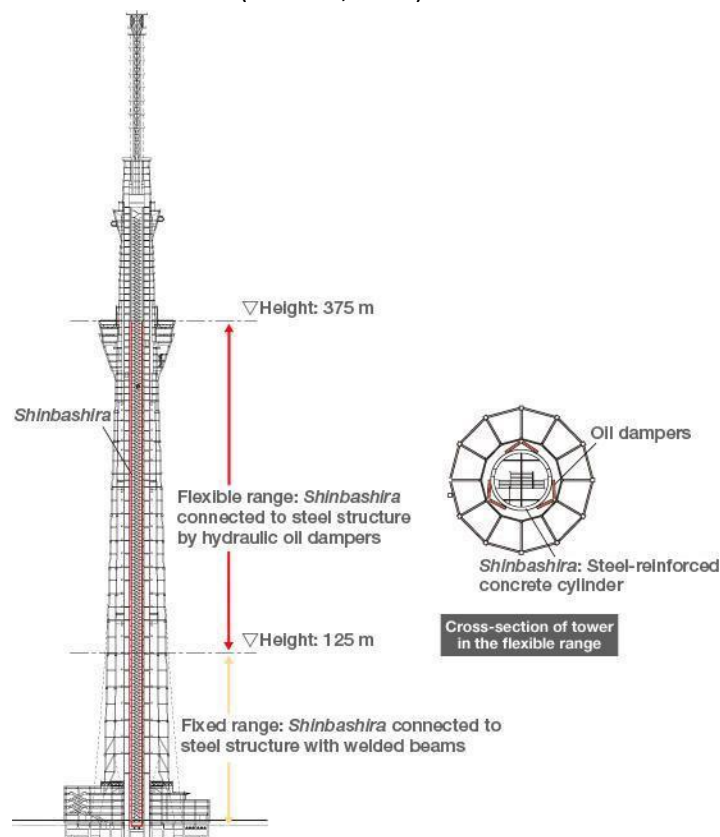
Een ander voordeel ligt in de verbindingen van deze pagodes. Er wordt vrijwel geen spijker gebruikt, in plaats hiervan worden zogenaamde pen en gat verbindingen toegepast. Bij deze verbindingen wordt gebruik gemaakt van smallere stukken hout die in de gleuf van een ander element worden aangebracht. Ten tijde van een aardbeving zullen deze elementen kunnen bewegen en verdraaien zonder te beschadigen, dit voorkomt dat de seismische energie zich hoger in het gebouw kan verplaatsen. Een pagode heeft ongeveer duizend van deze verbindingen, wat resulteert in een flexibel gebouw. (Nipponia, 2005)



Figuur 5: Houten verbindingen in een pagode (Nipponia, 2005)

Moderne toepassingen

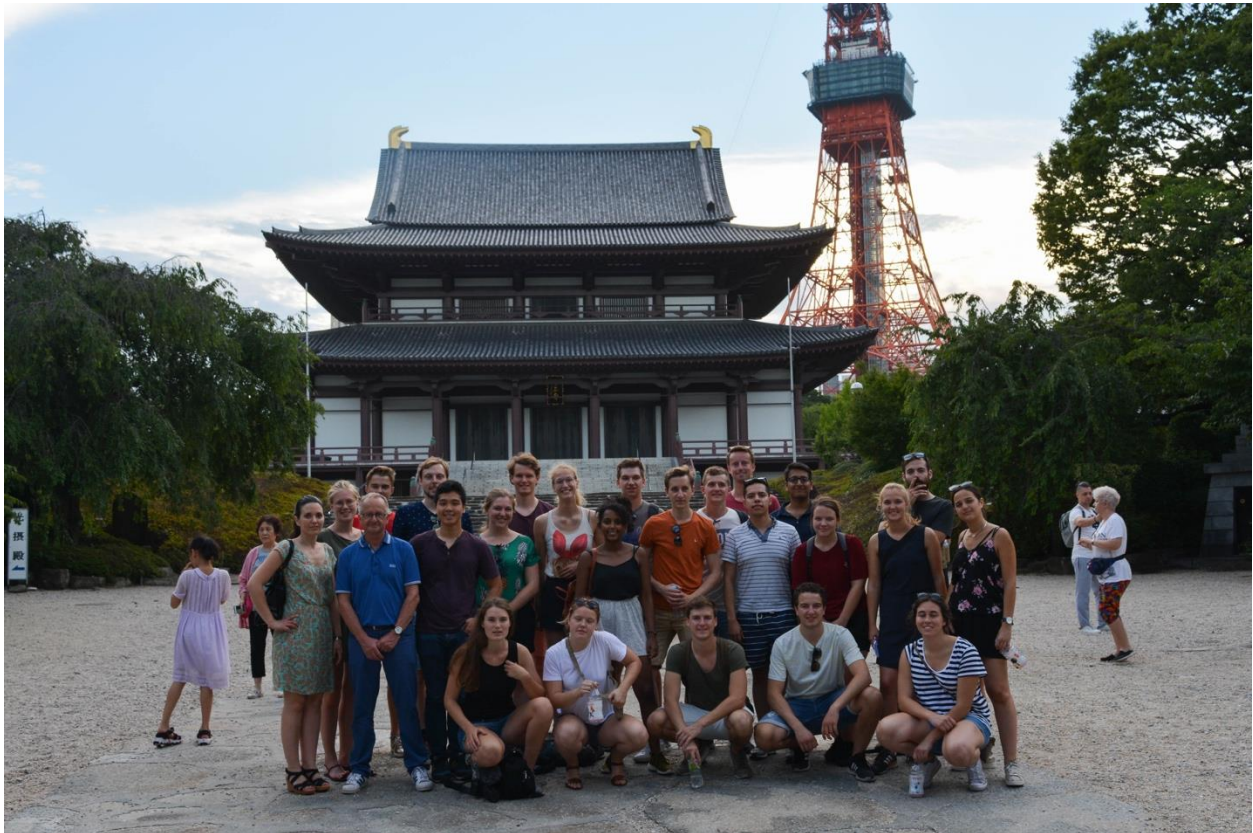
De techniek die is gebruikt in de oude pagodes van Japan zijn nog steeds terug te vinden in moderne constructies, zoals bijvoorbeeld in de Tokyo Skytree. Een belangrijke toepassing in het stabiliteitssysteem van deze 634 meter hoge toren is de toepassing van een moderne *shinbashira*. Deze toren is voorzien van een 375 meter lange gewapend betonnen kern waarvan de onderste 125 meter vastzit maar het bovenste deel met *fluid dampers* is verbonden aan het stalen frame van de toren zelf. Deze betonnen kern zal het slingeren tijdens een aardbeving aanzienlijk verminderen door een tegenbeweging te simuleren. Op deze manier kunnen trillingen door stevige winden of aardbevingen worden gedempt en zal de slingering worden verminderd tot maar liefst 50%. Tijdens de bouw moest het systeem al in werking komen, en dit bleek een succes te zijn. Een week na een zware aardbeving in het oosten van Japan kon de bouw hervat worden zonder ongefallen of incidenten. (Karlovic, 2017)



Figuur 6: Shinbashira in de Tokyo Skytree (Yanagashiwa, 2012)

Conclusie

De traditionele Japanse pagodes zijn door de eeuwen heen aardbevingsbestendige monumenten van de Japanse cultuur gebleken. Het traditionele houten materiaalgebruik en de verbindingen in combinatie met de gelaagde opbouw en het gebruik van de zogenaamde *shinbashira* zorgt ervoor dat deze pagodes onverwoestbaar zijn onder belasting van aardbevingen. De principes in de constructie van de pagode zijn nog steeds terug te vinden in hedendaagse hoogbouw zoals te zien in de Tokyo Skytree. Voor de studenten van U-BASE was het een unieke ervaring om deze indrukwekkende bouwwerken in het echt te mogen aanschouwen, ondanks dat we de werking tijdens een aardbeving helaas (of gelukkig) niet hebben meegemaakt.



Figuur 7: De groep U-BASE studenten in Japan

Geciteerde werken

- Hanazato, T. A. (2012). Seismic Design and Construction of a Traditional Timber-Made Five-Storeyed Pagoda by Applying Coupled Vibration Control . Opgehaald van IITK: http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_0595.pdf
- Japan Deluxe Tours. (sd). Opgehaald van <https://japandeluxetours.com/experiences/nara-horyuji-temple>
- Karlovic, A. (2017). Shinbashira — pagoda's exceptional earthquake resistance. Opgehaald van Medium: <https://medium.com/konsiteo-today/shinbashira-pagodas-exceptional-earthquake-resistance-9d7e3eac1d6d>
- Maikoya. (2018). Maikoya. Opgehaald van Mai-ko: <https://mai-ko.com/japanese-buddhist-temples/>
- Nipponia. (2005). Five Storey Pagodas: Why Can't Earthquakes Knock Them Down? Opgehaald van Web Japan: <https://web-japan.org/nipponia/nipponia33/en/topic/>
- Nipponia. (2005). Nipponia. Opgehaald van Web Japan: <https://web-japan.org/nipponia/nipponia33/en/topic/index02.html>
- Tarantola, A. (2011). How Japan's Oldest Wooden Building Survives Earthquakes. Opgehaald van Gizmodo: <https://gizmodo.com/5846501/how-japans-oldest-wooden-building-is-still-standing>
- The Economist. (1997). Why Pagodas Don't Fall Down. Opgehaald van The Economist : <https://www.economist.com/christmas-specials/1997/12/18/why-pagodas-dont-fall-down>
- Wordpress. (sd). Opgehaald van <https://tpsosaka.wordpress.com/2014/03/23/toji-%E6%9D%B1%E5%AF%BA-temple-kyo-o-gokoku-ji-%E6%95%99%E7%8E%8B%E8%AD%B7%E5%9B%BD%E5%AF%BA-kyoto-japan-9/>
- Yanagashiwa, M. (2012). Tokyo Skytree, a fusion of traditional beauty and new technologies. Opgehaald van Nippon: <https://www.nippon.com/es/views/b01101/>