



Onderbouw Groninger Forum  
Over de onderbouw van het Groninger Forum  
zijn in 2014 drie artikelen verschenen in *Cement*.  
Deze artikelen zijn net als de twee artikelen  
over de oplossingen, te raadplegen op  
[www.cementonline.nl/Groninger\\_Forum](http://www.cementonline.nl/Groninger_Forum).

Op zoek naar een oplossing

# Groninger Forum aardbevingsveilig (2)

Begin 2015 werd de bouw van het Groninger Forum stilgelegd. Dat had alles te maken met twijfel over de veiligheid vanwege de seismische activiteit in de omgeving. Ongeveer een jaar en vele uitvoerige analyses verder werd de bouw weer hervat. Eind 2016 werd in Cement [1] inzichtelijk gemaakt welke impact aardbevingsbelasting heeft op het gebouw. In dit vervolgartikel wordt ingegaan op de zoektocht naar een oplossing en de uiteindelijke uitwerking.

Zoals al bleek uit [1] bestaat het Groninger Forum uit twee betonnen kernen waaraan grote stalen volumes hangen, opgebouwd uit hoge stalen vakwerkspanten en staalplaatbetonvloeren. Deze kernen verzorgen de stabiliteit. De grote stijfheid van de kernen is voor een aardbevingsbestendig ontwerp nadelig. Immers, hoe hoger de stijfheid, hoe hoger de spectrale versnellingen en daarmee de opgeroepen belastingen. Daarnaast zijn de kernen vanwege hun afmetingen in feite gedrongen liggers waardoor dwarskracht maatgevend is ten opzichte van buiging. Bezwijken op dwarskracht is echter een ongewenst brosmechanisme bij een aardbevingsbelasting.

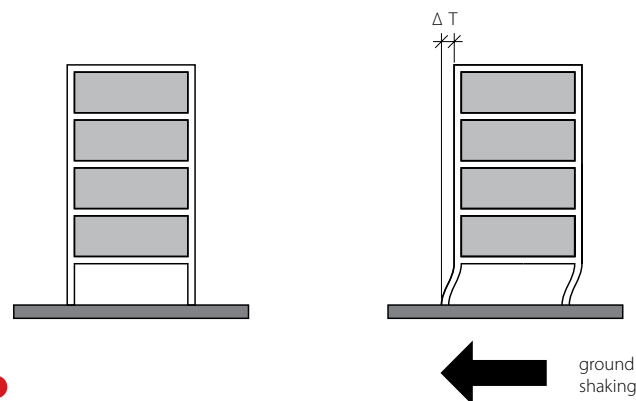
### Onderzoeksfase aardbevingsbestendig ontwerp

Om tot een oplossing te komen voor een aardbevingsbestendig ontwerp heeft een onderzoek plaatsgevonden naar alternatieve constructiesystemen. Het betreft varianten om de seismische last in de bovenbouw te reduceren. De onderbouw (kelder) was toen al gereed en dus zijn daar geen varianten voor beschouwd. Vanuit een brede ideëenronde zijn vier kansrijke varianten geselecteerd, die aan een nadere analyse zijn onderworpen. In het navolgende worden de volgende vier alternatieven nader uiteengezet:

- weak storey;
- staalconstructie kernen;
- base isolation;
- huidige ontwerp versterken.

### Weak storey

Door bewust een lagere stijfheid in de constructie aan te brengen op één locatie, bijvoorbeeld de begane grondlaag (weak storey, zie kader), vormt de constructie zelf een isolator. Het is



in principe te beschouwen als een vorm van base isolation (zie ook derde variant) waarbij een toegewezen laag de zekering van het gebouw vormt. Alle vervorming en daarmee de opname van energie vindt plaats in deze laag (fig. 2). Door de afname in stijfheid, door de inelastisch reagerende constructie, wordt de in rekening te brengen aardbevingsbelasting op de bovenliggende constructie verlaagd. De energieopname kan nog verder worden verhoogd door de toepassing van speciale voorzieningen in de vorm van elementen die werken op basis van wrijving en demping in deze laag.

### Beoordeling

De onderste laag van de kernen moet bij deze methode worden vervangen door een staalconstructie, aangezien deze werkwijze in beton nauwelijks mogelijk is. De weerstand van de kernen wordt met name bepaald door afschuiving. Maar afschuiving is geen te prefereren wijze om inelastisch gedrag te introduceren, omdat het bezwijkgedrag meestal broos is.

Energieopname treedt op indien de constructie bij een aardbeving plastisch reageert. De optredende verplaatsingen bij een aardbeving volgens het spectrum uit de NPR 9998 van februari 2015 zijn echter maar beperkt (ca. 50 mm). Hierdoor treden er ook maar beperkte plastische vervormingen op. De verwachte reductie van de belasting is daarmee ook beperkt.

### Weak storey

De term weak storey heeft bij seismisch ontwerpen een negatieve associatie. Dit omdat er grote instortingen bekend zijn waarbij er een weak storey-mechanisme is opgetreden. Bij deze gevallen waren dit echter onvoorziene mechanismen. Door een juiste detaillering aangevuld met een schoorconstructie met een dempingsmechanisme en beheersing van de analyse is het mechanisme echter ook in positieve zin te gebruiken.

<sup>1)</sup> ir. Erwin ten Brincke RC (ABT) en ir. Mischa Falger (BAM Advies & Engineering) hebben bijgedragen aan de totstandkoming van het artikel.



3

### Staalconstructie kernen

Door de volledige kernen in een staalconstructie uit te voeren, ontstaat er een flexibele constructie die, in combinatie met massareductie, zorgt voor lagere belastingen.

#### Beoordeling

Naar verwachting zou de omzetting van het huidige ontwerp van betonkernen naar een staalconstructie een grote impact hebben op het huidige ontwerp, zowel functioneel als architectonisch. Daarnaast zou er een hernieuwde, statische engineering moeten plaatsvinden van de bovenbouw. Grote vervormingen hebben verder een grote impact op de geveldetailering. Dat fenomeen komt wel vaker voor bij seismisch ontwerpen: wat goed is voor het seismische ontwerp is vaak moeilijker voor het statische ontwerp of andere aspecten van het ontwerp zoals de bouwkundige afwerkingen.

### Base isolation

Base isolation is het principe waarbij het gebouw wordt losgekoppeld van de ondergrond. Dit wordt bereikt door in een horizontale snede het gebouw te ontkoppelen van de fundering door het op speciale blokken te zetten (isolatoren). Hierdoor wordt de aardbevingsbelasting gereduceerd. De aardbeving bereikt namelijk via de ondergrond het gebouw en door het gebouw te ontkoppelen/isoleren, wordt deze minder in beweging gebracht. Dit principe wordt geïllustreerd in figuur 4.

Ten aanzien van het gedrag bij een aardbeving heeft base isolation de volgende effecten:

- De trillingstijden van de eerste trillingsmodi worden langer, wat resulteert in een lagere spectrale versnellingscoëfficiënt, dus minder belasting.

- Een groter deel van de meewerkende massa verschuift naar deze eerste trillingsmodus. Hierdoor treedt eveneens een lagere belasting op (de hogere modi krijgen een lagere bijdrage).
- De base isolation kan de demping verhogen, wat het aantal schadelijke wisselingen in de beweging en belasting beperkt. Met een hogere demping worden de spectrale versnellingen, en dus de belasting, lager.

#### Beoordeling

Om de effectiviteit van de base isolation te kwantificeren, zijn aan het SAP2000-model, dat is gebruikt om seismische analyses uit te voeren, eenvoudig horizontale veren toegevoegd. De stijfheid van deze veren is gebaseerd op isolatoren in de vorm van schalen (frictiependulums). De relatie tussen horizontale stijfheid en type isolator is namelijk met eenvoudige regels te beschrijven. Een andere eenvoudige relatie heeft bijvoorbeeld de toepassing van rubberblokken, waarbij eenvoudig een secante stijfheid kan worden gedefinieerd op basis van de verplaatsingen. Hiermee is met een Modale Response Analyse het effect van een base isolation te onderzoeken.

De analyse gaf aan dat er circa 50% reductie van de afschuifkracht op de fundering wordt bereikt. Base isolation gaf hiermee een kansrijke oplossing voor de horizontale richting waarmee het wijzigen van de kernen waarschijnlijk niet nodig zou zijn. Omdat de aardbevingsbelasting nog steeds groter is dan de windbelasting, was wel te verwachten dat de wapening niet voldoet.

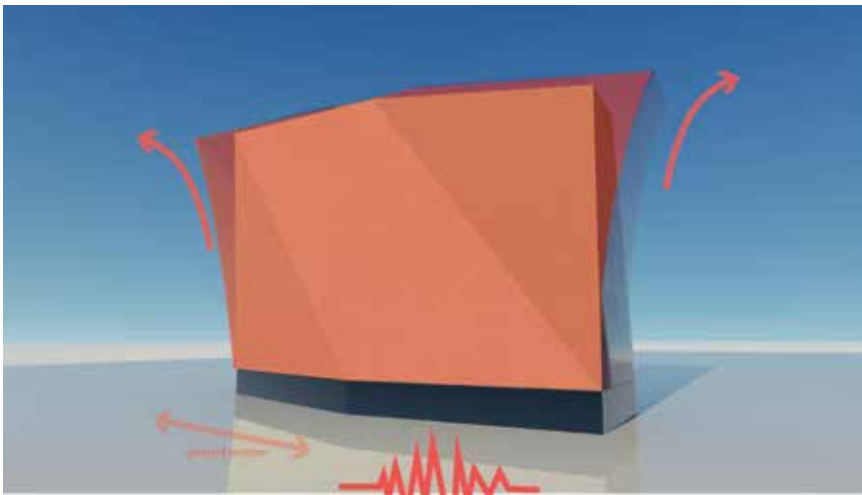
In verticale richting is de effectiviteit beperkt, aangezien er verticaal geen isolatie kan worden bereikt. Hierdoor bleef de impact op de staalconstructie aanwezig, die het meeste wordt beïnvloed door de verticale versnelling. Daarmee waren er nog de nodige aanpassingen van de staalconstructie te verwachten.

Opgemerkt wordt dat de gereduceerde belasting ook gunstig is voor de niet-constructieve onderdelen in het gebouw (gevel en bouwkundige wanden) en de aanwezige functies (bijvoorbeeld voor de inventaris van het museum), omdat de totale invloed van de aardbeving – die op alles in het gebouw een effect heeft – reduceert.

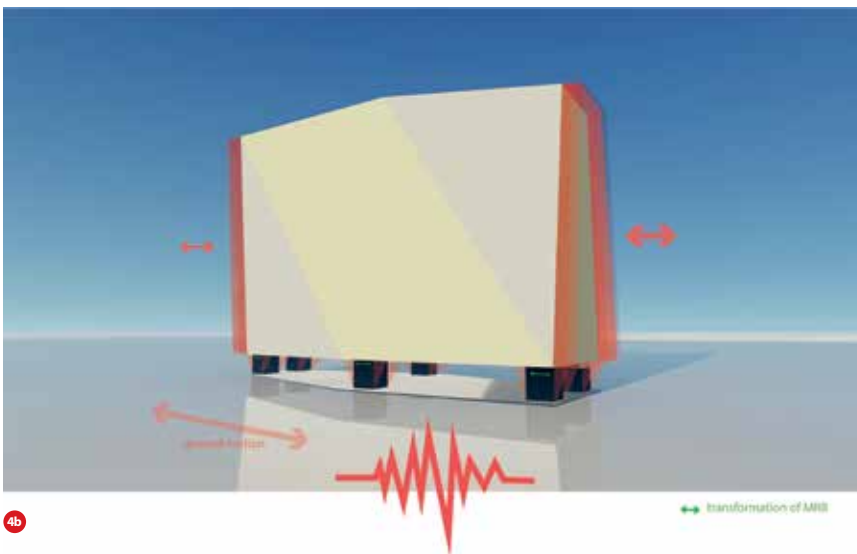
#### Plek isolatievlak

De meest logische plek om het isolatievlak aan te brengen is onder de begane grond. De begane grondvloer vormt de schijf die ervoor zorgt dat de bovenbouw als een massa beweegt ten opzichte van de onderliggende fundering. De kolommen en wanden in de kelder moeten in staat zijn de excentriciteiten, die door het doorsnijden onder de begane grondvloer ontstaan, op te nemen. Daarnaast moeten de horizontaalkrachten die door wrijving bij elke isolator ontstaan nu op de uitkraging van





4a



4b

deze niet meer gesteunde kolommen en wanden worden opgenomen.

Het isolatievlak geeft op een aantal plekken nog wel moeilijkheden. Dit wordt veroorzaakt doordat kolommen van de bovenbouw worden gedragen door wandliggers in de kelder, die het isolatievlak doorkruisen. De torsie vanuit de kernen moet daarbij volledig door de beganegrondvloer worden opgenomen, omdat de onderliggende constructie hier niet aan kan meehelpen. Dat betekent dat deze vloer nog aanzienlijke extra krachten krijgt te verwerken.

#### Geen totaaloplossing

Geconcludeerd werd dat het systeem van base isolation kansrijk is, maar dat het voor het Groninger Forum geen totaaloplossing biedt: aanpassingen in overige constructies blijven noodzakelijk. Daarnaast zou het implicaties hebben op de functionaliteit van de -1-laag van de kelder. Het ontwikkelpad van het systeem van base isolation werd ingeschat als langdurig met een nog onzekere uitkomst, vanwege het ontbreken van ervaringen met base isolation in Groningen (situatie voorjaar 2015).

De belangrijkste overweging om uiteindelijk niet te kiezen voor base isolation was dat de krachtwerving ook voor de statische

situatie zou wijzigen. Dat zou betekenen dat de bouwvergunning op essentiële onderdelen zou wijzigen, met gevolgen voor de te doorlopen procedures die veel tijd zouden gaan vergen. Maar de opgave was nu juist om zo snel mogelijk weer te gaan bouwen!

#### Of toch versterken?

Het bestaande ontwerp is altijd als referentie gebruikt om voorgestelde oplossingen te beoordelen. Zo was er ook een mogelijkheid om te bekijken of het huidige ontwerp qua capaciteit kon worden versterkt, waarmee de aardbevingsbelasting wellicht zou kunnen worden opgenomen.

#### Beoordeling

Uit initiële toetsingen van uitkomsten bleek dat er weliswaar overschrijdingen plaatsvinden op de huidige capaciteiten van het ontwerp, maar dat het met aanpassingen mogelijk zou moeten zijn voldoende capaciteit te creëren. Ook enkele toetsingen van de kelder en fundering gaven aan dat de problemen met enkele wijzigingen en ingrepen oplosbaar zouden moeten zijn.

#### Afweging ideeën

Geen van de ideeën leidde tot een oplossing waarbij de impact beperkt kon blijven; versterken van een deel van het gebouw zou altijd nodig zijn. Indien dicht bij het bestaande ontwerp kon worden gebleven, leverde dat het gunstigste alternatief omdat er geen herontwerp van de functionele invulling nodig zou zijn. Daarnaast dicteerde het proces dat er snel een doorstart moest worden gemaakt, waarbij er geen tijd zou zijn het vergunningstraject opnieuw te doen, of opnieuw een aanbestedingstraject te moeten doorlopen.

De initiële toetsingen van de fundering en kelderconstructie en de opneembare impact van enkele wijzigingen in de bovenbouw hebben het vertrouwen gegeven om te kiezen voor het versterken van het bestaande ontwerp.

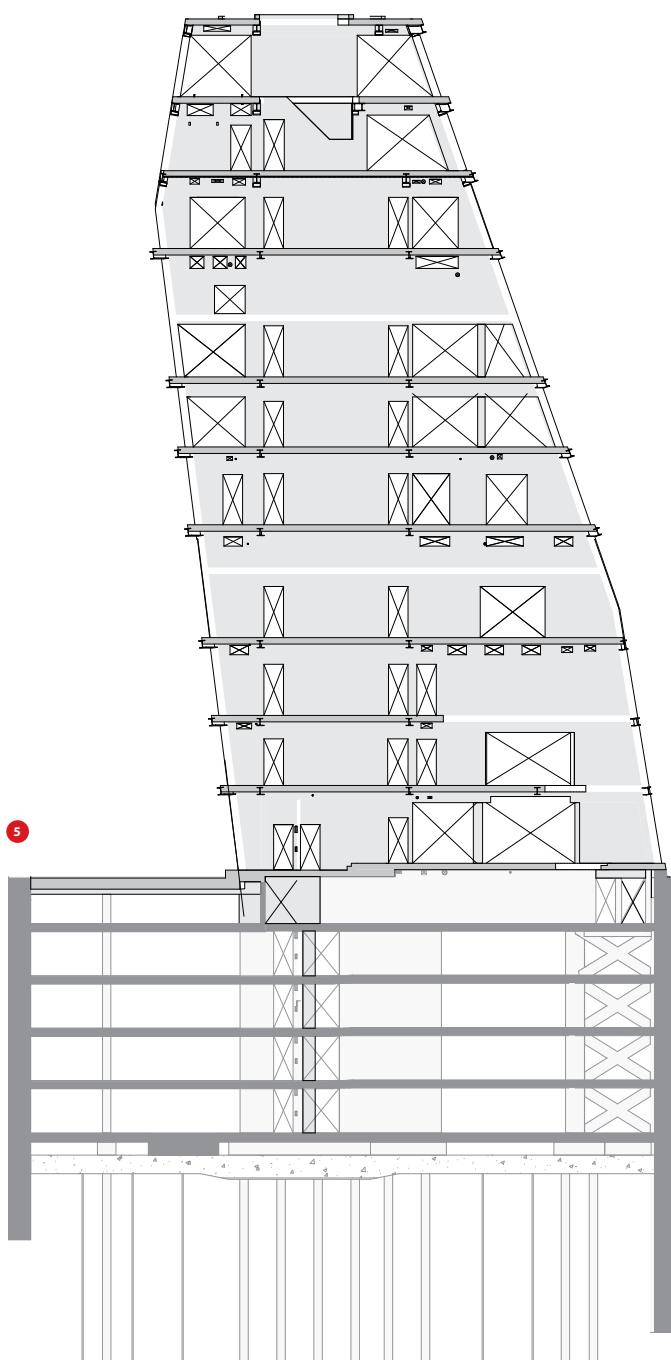
#### Aanpak versterken

Nadat de keuze was gemaakt, is onder hoge druk de uitwerking gestart om de stilstand zo veel mogelijk te beperken. Het ging er daarbij om de gekozen versterking ook in detail waar te maken.

Het criterium voor de veiligheidstoets volgens NPR 9998 is Near Collapse. Hierbij blijft de constructie na een aardbeving nog nét overeind staan, en waaruit de mensen veilig kunnen vluchten, maar die volledig is afgeschreven. Veiligheid was dus de kern van het vraagstuk en leidend in de uitwerking.

### Hoofddraagconstructie

Het gebouw bestaat in hoofdlijnen uit drie onderdelen: de bovenbouw, die nog niet gebouwd was, de onderbouw (kelder) die al wel gereed was, en de overgangslaag tussen de bovenbouw en de onderbouw. Deze tussenlaag verdeelt de krachten uit de bovenbouw over de onderbouw en bestaat uit de begane-grondvloer (verdeling horizontale krachten / base shear) en de wanden op laag -1 en -2 (verdeling verticale krachten / overturn-momenten). De overgangslaag is bouwtechnisch een onderdeel van de onderbouw en was al gereed.



In het navolgende worden de versterkingen van de drie onderdelen verder toegelicht.

#### Versterkingen bovenbouw (fig. 5)

1. De kernen moeten worden versterkt door een aantal sparingen dicht te zetten of te verkleinen. Dit is nodig waar hoge seismische belastingen moeten worden doorgevoerd. In de grote driedimensionale logistieke puzzel van het gebouw was wel de nodige creativiteit van de architect nodig om aan de functionele eisen te blijven voldoen. Daarnaast zijn de kernen zwaarder gewapend. Dit hield wel in dat het eerste deel van de kernen dat al gemaakt was (tot de eerste verdieping) weer moest worden gesloopt.
2. Een aantal stalen onderdelen als vakwerkstaven, liggers en kolommen moeten worden versterkt door deze zwaarder uit te voeren of door extra knik- of kipsteunen aan te brengen.
3. Verbindingen van de staalconstructie moeten worden versterkt in verband met de seismische belastingen. Brosse bezwijkmechanismen als boutbreuk / afschuiving moeten hierbij worden voorkomen. Dit betekende een herontwerp van vele knopen.
4. De vloerschijven moeten worden versterkt door de staalplaat-betovloer te koppelen met de staalconstructie door middel van bijvoorbeeld deuvels. Deze koppeling kan dan tevens als knik- en/of kipsteun worden toegepast.

#### Versterkingen onderbouw

De versterkingen in de onderbouw zijn tot een minimum beperkt gebleven, wat uiteraard een belangrijke randvoorwaarde voor de gekozen oplossing was. Zoals in [1] beschreven, is de kelder een grote, robuuste constructie van beton die in staat is de krachten vanuit de bovenbouw zodanig te spreiden dat de kelderconstructie en fundering de last kunnen opnemen. Daar

- 5 Overzicht versterkingen westkern
- 6 Versterking bestaande kolom in kelder
- 7 Gecontroleerd slopen beganegrandvloer
- 8 Wapening trekbanden begane grond in 3D uitgezocht

waar nodig zijn enkel een paar kolommen versterkt door aan de buitenzijde wapening toe te voegen en aan te storten (foto 6).

#### Versterkingen tussenlaag

Het meest complexe onderdeel van de versterkingsopgave bevindt zich tussen de bovenbouw en de onderbouw in (globaal de -1 en -2 laag), de zogeheten tussenlaag die fungeert als overdrachtsconstructie. Om de belastingen in deze laag te kunnen overdragen:

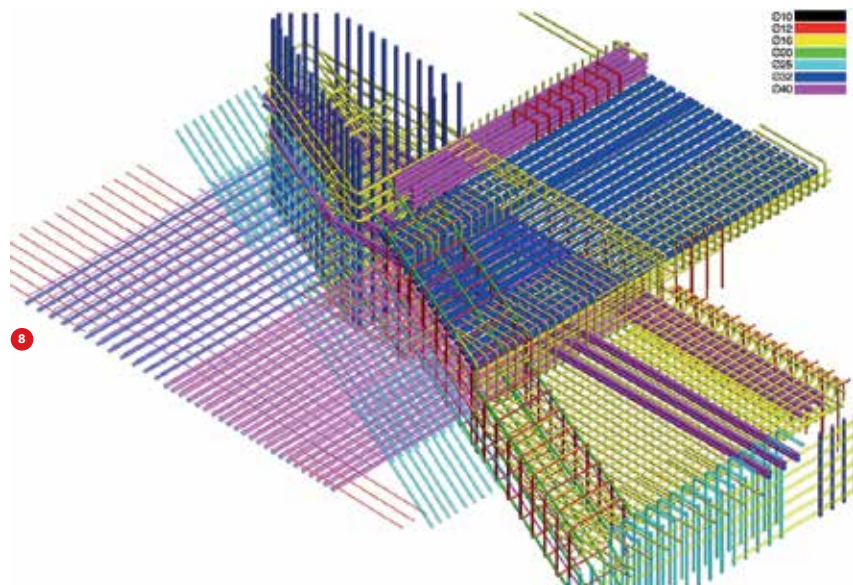
1. is de beganegrandvloer deels gesloopt en versterkt teruggebracht (foto 7);
2. is de trekband in de beganegrandvloer middels opstortingen op de beganegrandvloer versterkt (fig. 8);
3. zijn de wanden onder de kernen gesloopt (foto 9 en 10) en versterkt teruggebracht of opgedikt (foto 11).

Alvorens de bouw weer kon worden gestart, is een periode ingelast waarbij er eerst is gesloopt.

#### Bouwkundige onderdelen

De kern van het Near Collapse-criterium is veiligheid. Nog iets specifieker: mensen moeten tijdens en kort na een aardbeving veilig uit het gebouw kunnen vluchten. Dit betekent dat ontwerpen van uitsluitend een (net) niet-ingestorte hoofd-draagconstructie nog niet voldoende is. Om veilig vluchten te garanderen of individuele onderdelen met een hoog risico (High Risk Building Element, HRBE) uit te sluiten, zijn de volgende onderdelen ook seismisch versterkt:

- Gevels (natuursteen en glas): ter voorkoming van vallende (zware) onderdelen van grote hoogten. Merk op dat de gevels tevens hellend zijn, zowel voorover als achterover.
- Trappen: om een veilige vluchtroute te garanderen.
- Zware plafonds: ter voorkoming van letsel door zware vallende onderdelen worden deze extra geschoord / vastgezet.



- Zware binnenwanden: ter voorkoming van letsel bij bezwijken en ter voorkoming van obstakels / blokkades bij vluchtroutes.
- Aanpassen sprinkler en omroepsysteem ter voorkoming van brand (vaak een gevolg van een aardbeving) en behoud van communicatie om veilig te kunnen vluchten.

Bij de uitwerking hiervan is gebruikgemaakt van artikel 4.3.5 van de groene NPR en Eurocode 8, en ook Nieuw-Zeelands normen.

#### Impact op voorbereiding uitvoeringsproces

Het gebouw is nu op papier aardbevingsveilig gemaakt. Het uitvoeringsproces van het gebouw neemt echter meerdere jaren in beslag en het gebouw in uitvoering kan dus, met een geringere kans, ook een aardbeving meemaken.







9



10

Hiervoor zijn onder meer de volgende onderdelen seismisch gescreend:

- bekistingen
- steigerwerk
- ondersteuning
- tijdelijke schoorwerken
- kranen
- vluchtwegen

Uit deze screening is gebleken dat de maatregelen beperkt konden blijven. De kranen bleken niet gevoelig te zijn voor een aardbeving, doordat deze door hun slanke constructie buiten het frequentiegebied van de trilling van de aardbeving liggen. Tijdelijke schoorconstructies van de hoofdconstructie die meer dan twee weken de stabiliteit tijdens de bouwfase moeten verzorgen, zijn op een lichte aardbeving getoetst. Dit geldt ook voor de verankeringen van het steigerwerk en andere hulpconstructies als bekistingen. De belangrijkste maatregel tijdens de uitvoering is vooral het gebruik van gezond verstand; vermijd bijvoorbeeld opslag dicht bij vloerranden (valgevaar), en laat geen losliggend materieel en materiaal rondslingeren. Zaken die uit het normale veiligheidsdenken al belangrijk zijn, maar nu nog eens extra onder de aandacht komen.

### Impact en omstandigheden

De impact van een aardbeving op het uitvoeringsproces mag dan relatief beperkt zijn, op de voorbereiding van de aangepaste constructie is dat allerm minst het geval. De constructie was zonder de seismische aanpassingen al een complex geheel en dit is met de seismische versterkingen niet eenvoudiger geworden.

Bijzonder ook waren de omstandigheden. Onder grote tijdsdruk en een politiek en publiek vergrootglas moesten ideeën worden gevormd, analyses worden uitgevoerd en beslissingen worden genomen. Relatief kleine aanpassingen in de modellen leidden soms tot grote wijzigingen van de uitkomsten. De capaciteit van de bestaande constructie van de kelder was steeds een ijkpunt voor de haalbaarheid. Uiteindelijk is de sloop van bestaande onderdelen beperkt gebleven, maar heeft het deels slopen ervan desondanks toch geleid tot Kamervragen.



11





12

## Aardbevingsveilig

De kennis die is opgedaan in de ontwerpfase van het Groninger Forum nog vóór het aardbevingsonderzoek, is dankbaar ingezet bij het inpassen van de seismische versterkingen. Hierbij hebben het ontwerp- en uitvoeringsteam zeer nauw samengewerkt om de seismische aanpassingen uitvoerbaar in het ontwerp uit te werken. Uiteindelijk heeft dit geresulteerd in de uitvoering van dit complexe gebouw, dat gaandeweg de uitvoering ook aardbevingsveilig is gemaakt, zonder al te veel afbreuk te doen aan het oorspronkelijke ontwerp van de architect. Nadat in oktober 2015 is gestart met de sloop van enkele onderdelen, is in maart 2016 (een jaar na het stilleggen) de feitelijke bouw weer opgepakt. In 2018 zal het gebouw, aardbevingsveilig, in gebruik kunnen worden genomen. ☒

### ● LITERATUUR

- 1 Krijgsman, H., Spanenburg, M., Groninger Forum aardbevingsveilig (1). *Cement* 2016/8.
- 2 NPR 9998:2015 Ontw. Beoordeling van de constructieve veiligheid van een gebouw bij nieuwbouw, verbouw en afkeuren – Grondslagen voor aardbevingsbelastingen: Geïnduceerde aardbevingen, februari 2015.
- 3 Eurocode 8 (NEN-EN 1998-reeks) 'Ontwerp en berekening van aardbevingsbestendige constructies'.

- 9 Sloop kern
- 10 Gecontroleerd slopen met behoud van stekken en randbalken
- 11 Wapening in nieuwe versterkte kern
- 12 Bouw Groninger Forum in vogelvlucht

### ● PROJECTGEGEVENS

- project Groninger Forum
- opdrachtgever Gemeente Groningen
- architect NL Architects
- hoofdconstructeur ABT
- installaties Huisman & Van Muijen
- bouwfysica DGMR
- hoofdaannemer BAM Bouw & Techniek
- coördinerend constructeur uitvoering BAM Advies & Engineering

### Video's online

Op [www.cementonline.nl](http://www.cementonline.nl) zijn bij dit artikel enkele interessante video's beschikbaar. In een van de video's licht Erwin ten Brincke de voor het Groninger Forum gekozen oplossingen toe. Een tweede video laat de presentatie zien van René Sterken, Erwin ten Brincke, Han Krijgsman en Jos Roona op de Betondag 2015. Verder staan er diverse extra foto's en links met meer informatie.

