

Onderbouw Groninger Forum

Over de onderbouw van het Groninger Forum zijn in 2014 drie artikelen verschenen in *Cement*. Deze artikelen zijn te raadplegen op www.cementonline.nl/Groninger_Forum.



Constructieve opzet gebouw en impact aardbevingsbelasting

Groninger Forum aardbevingsveilig (1)

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.

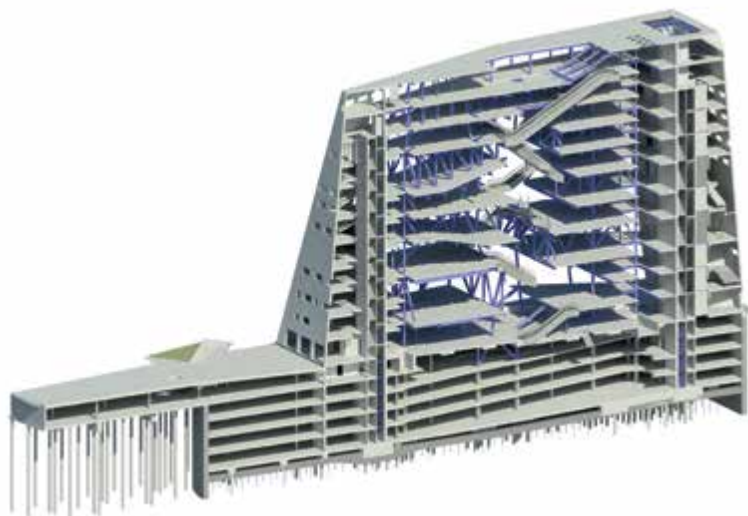
Het Groninger Forum is een indrukwekkend gebouw, in het hartje van de stad, dat ruimte moet bieden aan diverse culturele activiteiten. Na een periode van vijf jaar van ontwerpen en bouwvoorbereiding werd in september 2012 gestart met de bouw. In de loop van 2014 – de bouw was na de vijfjarige parkeergarage inmiddels gevorderd tot het beganegrondniveau – ontstond een nieuw veiligheidsvraagstuk als gevolg van de aardbevingsbelasting in de regio. In diezelfde periode verscheen het 'Interim Advies aardbevingsbestendig bouwen' van Economische Zaken [1], met voorlopige ontwerpuitgangspunten voor nieuwbouw onder aardbevingsbelasting en vervolgens, begin 2015, de 'groene versie' van NPR 9998 [2]. Gemeente Groningen vroeg daarop BAM (de bouwer) en ABT (de adviseur voor onder andere de constructie) onderzoek te doen naar de aardbevingsveiligheid van het gebouw. Dit heeft er uiteindelijk zelfs toe geleid dat de bouw tijdelijk moest worden stilgelegd.

In twee artikelen wordt ingegaan op de impact van de aardbevingsdreiging op het ontwerp. In dit eerste deel wordt de oorspronkelijke opzet van de constructie toegelicht en wordt de impact van de aardbevingsbelasting behandeld. In een vervolgartikel worden de onderzochte varianten en gekozen specifieke oplossingen nader toegelicht.

Constructieve opzet

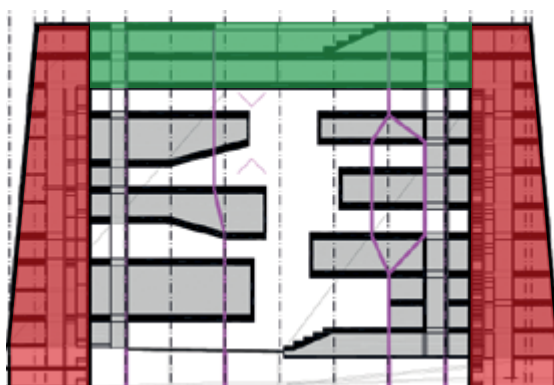
Het Groninger Forum is een bijzonder gebouw gekenmerkt door diverse gevelvlakken die schuin naar voren of naar achter hellen. Het gebouw bestaat uit twee betonnen kernen aan de linker- en rechterzijde, met een atrium ertussen (fig. 2). Aan de kernen hangen grote stalen volumes ('doosjes'), opgebouwd uit hoge stalen vakwerkspanten en staalplaatbetonvloeren. In de 'doosjes' zijn flexibel indeelbare vloervelden aanwezig, die kunnen worden aangepast aan toekomstige gebruiks- en indelingswijzigingen. Het dak wordt als een brug tussen de kernen gehangen. Om de overspanningen en uitkragingen te beperken, zijn extra verticale dragende lijnen toegepast in de vorm van stalen kolommen (fig. 3).

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



2

■ kernen
■ brug
■ stalen kolommen die de overspanningen en uitkragingen beperken



3

Door de combinatie van beton en staal kent de constructie een hybride opzet. De krachtswerking van de betonnen kernen en de – met een beperkt aantal kolommen ondersteunde – stalen 'doosjes', grijpt in het atrium op complexe wijze in elkaar.

De plattegronden verschillen per verdieping en kennen een knik. Ook de positie van de verticale dragende elementen is onregelmatig. Voor de spanten betekenen de knikken en het hellende gevelvlak dat er verbanden in de vloer nodig zijn om de spatkrachten uit de spanten op te vangen (fig. 4).

De beganegrondvloer vormt de overgang van het onregelmatige ritme uit de bovenbouw naar het regelmatige stramien in de onderbouw. Deze vloer moet dus de krachten uit de bovenbouw naar de onderbouw overdragen.

- 4 Principeplattengrond constructie (in rood de spanten)
 5 Overzicht stabiliteitskrachten
 6 Aspecten beïnvloed door het aardbevingsonderzoek
 bron: Twynstra Gudde

Onderzoeksteam

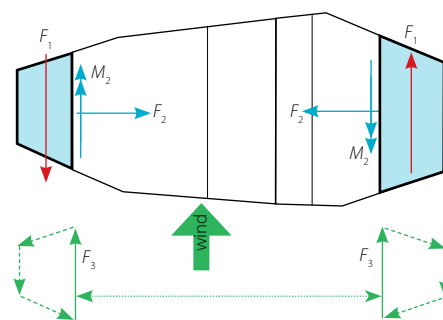
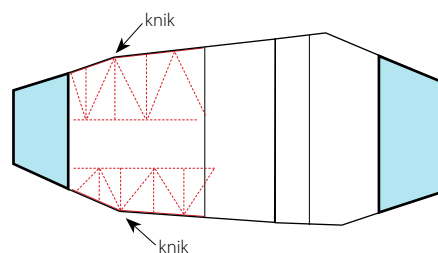
Het seismische onderzoek is aangestuurd door een kernteam met een afvaardiging van de gemeente Groningen, NL Architects, ABT, BAM Advies & Engineering, en professor Vambersky als onafhankelijk deskundige. Het onderzoek zelf is uitgevoerd door specialisten op het gebied van aardbevingsbestendig bouwen, vanuit ABT en BAM Advies & Engineering. ABT heeft samen met Ingenieursbureau Wassenaar (inmiddels onderdeel van ABT) specialisten samengebracht onder de vlag van ABT|Wassenaar Seismisch Advies. Hiermee is de kennis gebundeld van meerdere – door beide bureaus geadviseerde – projecten in en om Groningen ten tijde van het uitkomen van het Interim Advies. BAM Advies & Engineering kan bogen op opgedane kennis met projecten in het buitenland.

Bovendien zijn er twee Nieuw-Zeelandse ingenieursbureaus betrokken geweest. Aurecon als relatie van ABT|Wassenaar, en Holmes Consulting Group (HCG) als relatie van BAM Advies & Engineering. Op deze wijze is alle benodigde kennis van het bestaande ontwerp, de Groningse situatie ten aanzien van aardbevingen, en de seismische expertise vanuit Nieuw-Zeeland samengevoegd.

Stabiliteit

De stabiliteit van het gebouw wordt ontleend aan de betonkernen. Naast de wind zijn er nog specifieke krachten te benoemen die de kernen belasten.

Ten eerste staat het gebouw scheef. Hierdoor ontstaan aandrijvende krachten (fig. 5, F_1). Voor de linker- en rechterkern zijn deze krachten tegengesteld van richting, zodat de brug die de kernen koppelt (op niveau 9 en hoger) dit via dwarskracht in de vloeren moet overdragen. Door het zwaartepunt van de fundering en de bovenbouw overeen te laten komen, is deze aandrijvende kracht beheerst. De complexiteit is echter dat het zwaartepunt van de belasting gedurende de bouw verplaatst. Ten tweede zorgen de volumes aan beide kernen voor een kracht en koppel op de kernen (fig. 5, F_2 en M_2). Deze krachten aan beide zijden werken naar elkaar toe. Dit betekent dat in de brug een drukkracht ten gevolge van de veranderlijke vloerbelasting zal ontstaan. Het eigen gewicht levert hieraan geen bijdrage omdat de volumes eerder aanwezig zijn dan de brug. Ten derde staan de kernen aan de buitenzijde van het gebouw, terwijl de meeste wind juist tegen het midden van het gebouw zal waaien. Hierdoor zal de kracht uit wind als eerste naar de wanden aan de binnenzijde van het atrium worden afgedragen, via de vloeren van de doosjes (fig. 5, F_3). Afhankelijk van de stijfheid van de kernwanden en de stijfheid van het vloerveld,



leidt dit tot een wringkracht op de kern (fig. 5, F_3 stippellijn). Ten vierde zijn er nog de eerdergenoemde horizontale spatkrachten als gevolg van de knikken in de plattengronden.

Seismisch onderzoek

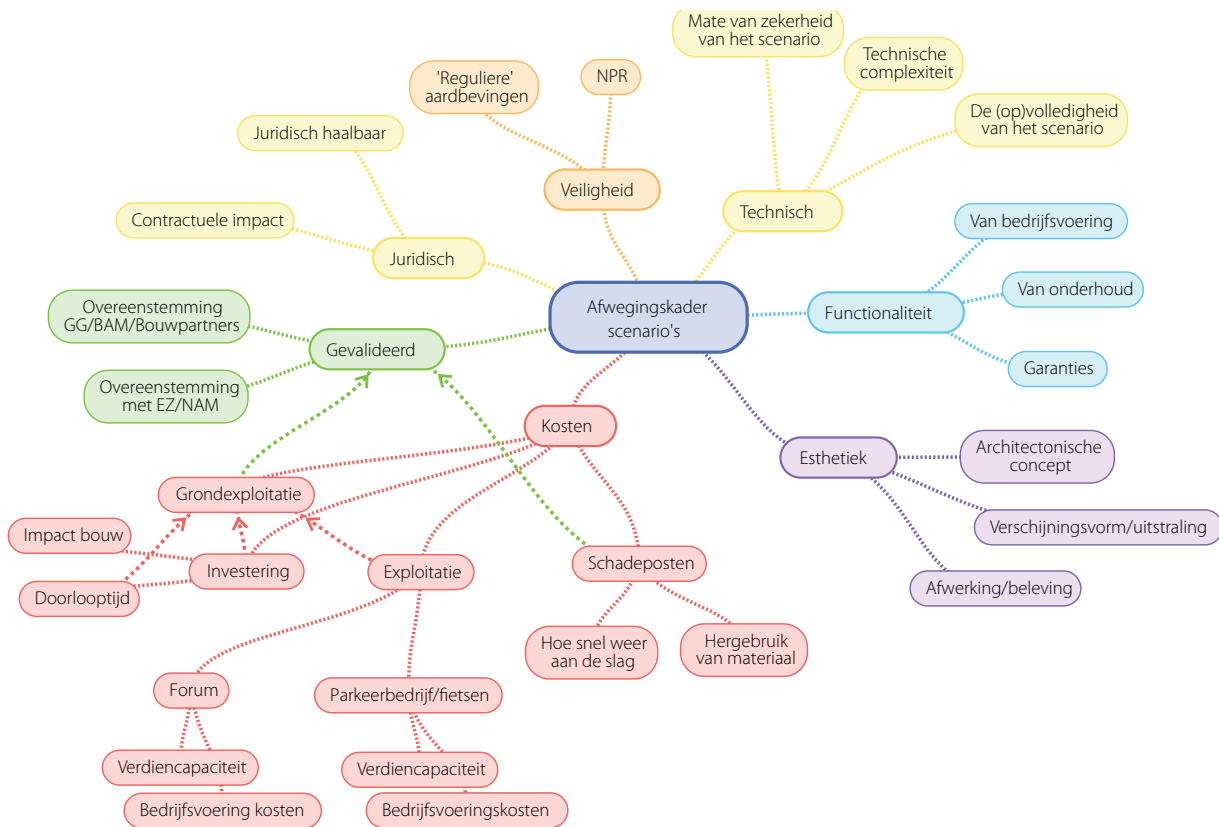
Op basis van het Interim Advies [1] en enkele werkdocumenten van NPR 9998 [2], is in 2014 en begin 2015 na een korte, intensieve analyse, geconcludeerd dat het ontwerp van het Groninger Forum op meerdere aspecten niet voldeed aan de eisen voor een aardbevingsveilig gebouw. Toen begin 2015 de 'groene versie' van NPR 9998 verscheen was dit voor de gemeente aanleiding tot het afroepen van een bouwpaauze van (aanvankelijk) vier maanden, met ingang van 10 februari 2015. Deze bouwpaauze is ingezet om ontwerp oplossingen te formuleren.

Er moest dus in vier maanden een oplossing worden bedacht. Een oplossing waarmee de bouw weer kon worden opgestart en met uiteraard een zo'n klein mogelijke impact op het ontwerp. Om dit vraagstuk op te lossen, is er een onderzoeksteam vanuit de betrokken partijen opgezet (zie kader 'Onderzoeksteam').

Kaders

Het kernteam heeft de volgende kaders gehanteerd bij de aansturing van het proces:

1. Het Groninger Forum moest voldoen aan NPR 9998, 'groene versie' 9 februari 2015.
2. Eventuele functionele en architectonische aanpassingen moesten worden beperkt.



6

3. Aanpassingen moesten vallen binnen de aanwezige juridische kaders (bijvoorbeeld aanbestedingsrechtelijk).
4. De bouw moest zo spoedig mogelijk worden herstart.
5. De oplossingen moesten worden gevalideerd door Economische Zaken / NAM.

Het feit dat het ontwerp van het Groninger Forum reeds volledig was uitgewerkt en volop in uitvoering was, zorgde voor de nodige extra praktische randvoorwaarden. Figuur 6 brengt dat in beeld. Feitelijk is gestreefd naar minimale schade voor de opdrachtgever. Deze schade wordt gevormd door onder meer de aanpassingskosten, de stilstand en de veranderingen die de functionaliteit raken. Bij alle afwegingen gold echter: veiligheid heeft prioriteit.

Uitgevoerde onderzoeken en toetsingen

Om te bepalen wat de beste oplossingsrichting was voor het aardbevingsveilig maken van het gebouw, moest eerst goed in beeld worden gebracht waar het huidige ontwerp niet voldeed of zou kunnen voldoen zonder aanpassingen. Een belangrijk gegeven hierbij was dat de kelderconstructie inclusief de begane grond gereed was en de kernen tot eerste verdiepingsniveau waren gerealiseerd. Volledig (seismisch) herontwerpen was dus niet mogelijk. Daarom richtte het onderzoek zich eerst op een diepgaande analyse van het bestaande ontwerp, om van daaruit de stap te kunnen zetten naar een oplossing.

Computermodel

In nauwe betrokkenheid met ABT heeft het Nieuw-Zeelandse bureau Aurecon een computermodel opgezet, waarmee de seismische analyses zijn uitgevoerd. Hierbij is gebruikgemaakt van SAP2000, software die internationaal bekend is bij seismisch ingenieurs. Voor deze analyses is de berekening met een Spectrale Modale Responsieberekening (MRSA, ofwel modal response spectrum analysis) uitgevoerd. Het SAP2000-model is samengesteld op basis van de invoer van het statische SCIA-model zoals ontwikkeld in de reguliere ontwerpfase. Voordat dit model kon worden geïmporteerd in SAP2000 moesten speciale bewerkingen worden uitgevoerd en scripts geprogrammeerd. De softwarepakketten zijn immers niet uitwisselbaar. Het SAP2000-model bevatte alleen de bovenbouw, zoals gemodelleerd in het SCIA-model, en niet de constructie van de onderbouw van de kelder. De randvoorwaarden voor de bovenbouw zijn zodanig gekozen dat deze de onderbouw representeerden. Het basismodel was zeer omvangrijk: circa 27 000 knopen, 3300 staafelementen en 26 000 2D-elementen. Het model en de uitkomsten ervan zijn gevalideerd door onder meer HCG en schaduwmodellen van BAM A&E in RFEM en met het oorspronkelijke SCIA-model van ABT.

Respons

Ter bepaling van de respons is het spectrum van de NPR ingevoerd met een piekgrondversnelling van 0,24 g, verschaald met een belangrijkheidsfactor van 1,6. Deze belangrijkheidsfactor is een factor waarmee de belasting wordt vermenigvuldigd bij

- 7 Bijdrage trilvormen volumes in atrium
 8 Typisch beeld van overschrijdingen; op grotere hoogte door de hogere trilmodi

hogere of lagere belangrijkheid van de bouwconstructie ten opzichte van de standaard.

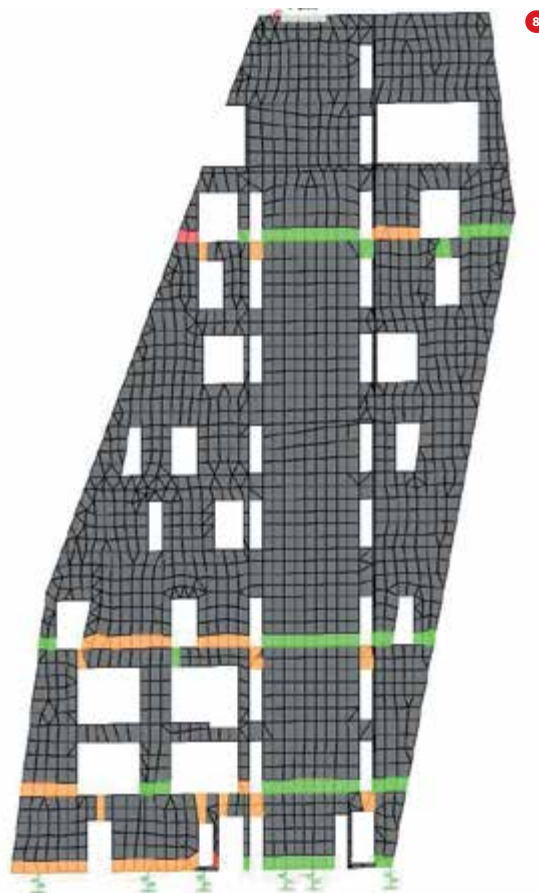
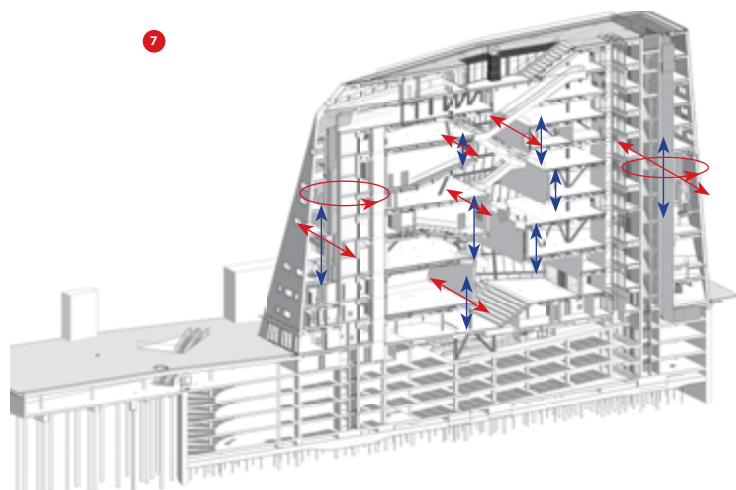
In het model is gerekend met een gedragsfactor $q = 1$. Deze q -factor is een reductiefactor waarmee de impact van het spectrum wordt verlaagd, om in rekening te brengen dat er energie door ductiel gedrag wordt opgenomen. Hoe hoger de q -factor, hoe meer energie er door het ductiele of plastische gedrag wordt opgenomen. Voor de toetsing van onderdelen is waar mogelijk met een hogere q -factor gerekend.

Uit diverse analyses is gebleken dat er constructieonderdelen en belastingspaden aanwezig zijn die bros reageren. Maar vooral de gereede onderbouw, die gerealiseerd is op basis van statische ontwerpuitgangspunten, en de kleine verplaatsingen ten gevolge van de aardbeving (ca. 60 mm topverplaatsing kernen) waren leidend om voor een q -factor van 1 te kiezen. Door deze kleine verplaatsingen is er immers geen sprake van grote scheurvorming en vloeit van de wapening, waarmee de energieopname beperkt is.

Modale analyse

Uit de modale analyse is gevonden dat er zeer veel eigenfrequenties van het gebouw (trillingsperioden) zijn te bepalen, waarbij aan de NPR-eis (art. 4.3.3.3.1) wordt voldaan dat ten minste 90% van de massa van het gebouw in trilling is gebracht. Hierdoor kostte het veel tijd de berekening uit te voeren en de resultaten te verkrijgen.

Een verklaring voor het hoge aantal eigenfrequenties is de grote stijfheid van de betonkernen en de hybride constructie. Hierbij is er geen overheersende trillingsmodus, maar leveren allerlei trillingen (hogere modi) van onderdelen een bijdrage. Dit kunnen zijn de volumes in het atrium, maar bijvoorbeeld ook de vloerliggers (fig. 7).



Schuifspanningen

Uit de analyse volgen relatief kleine vervormingen, maximaal circa 60 mm uitbuiging. Deze zijn in lijn met de gedragsanalyse volgend uit het spectrum. Door de vorm van het spectrum uit de groene versie van de NPR zijn de opgelegde vervormingen en daardoor de respons relatief klein.

Er is gekeken naar de schuifkrachten die door de kernen moeten worden afgedragen. De meest kritieke plek is de buitenwand van de westelijke kern in dwarsrichting. Hierin zijn grote openingen op beganegrondniveau aangebracht. Uit een initiële toets bleek dat de toelaatbare schuifspanning ruim wordt overschreden. Dit is op meer plaatsen het geval (fig. 8). Vanwege de hogere trilmodi vanuit de ingehangen volumes, wordt ook vaak de spanning in penanten en lateien overschreden.

Staalconstructies

De staalconstructies zijn getoetst op basis van de bepaling van een doorsnedecontrole van elk individueel element (ca. 3300 stuks). Ze zijn gecontroleerd voor de seismische belastingscombinaties, zoals verkregen met de SAP-analyse. Uit beschouwing van de resultaten kan worden afgeleid dat nagenoeg alle overschrijdingen ontstaan bij een seismische combinatie waarin de verticale component van het spectrum substantieel aanwezig is. Gebleken is dat er elementaire staalementen overbelast kunnen raken die in het primaire belastingspad aanwezig zijn. Bezijken van die elementen kan zonder waarschuwing leiden tot instorting van grotere delen. Maar er zijn ook secundaire



9

elementen waar een bepaalde mate van overbelasting niet leidt tot instorting (bijvoorbeeld vloerliggers). Voor de verbindingen is een diepere analyse nodig om ervoor te zorgen dat de plastische vervorming ook kan optreden en er geen bros bezwijken (van de verbinding en daarmee het profiel) optreedt.

Conclusies

Het Groninger Forum is ontworpen met twee robuuste en voor de constructieve werking overmaatse kernen. Voor het statische ontwerp heeft dat veel voordelen. Zo zijn de vervormingen door het overhellen beperkt. Hierdoor zijn de maatbeheersing in de bouw en de detaillering van de gevel relatief eenvoudig. Het geeft ook de flexibiliteit om grote sparingen te maken die nodig zijn voor de functionaliteit van het gebouw.

Voor een aardbevingsbestendig ontwerp is echter de grote stijfheid van de kernen eerder nadelig. Immers, hoe hoger de stijfheid, hoe hoger de spectrale versnellingen en daarmee de opgevoerde belastingen. Daarnaast zijn de kernen vanwege hun afmetingen in feite gedrongen liggers (een grote breedte ten opzichte van de hoogte). Hierdoor is dwarskracht maatgevend ten opzichte van buiging. Bezwijken op dwarskracht is echter een ongewenst bros mechanisme bij een aardbevingsbelasting. Opvallend is verder de impact van de verticale component van de aardbevingsbelasting. Vanwege de grote overspanningen van de topverdiepingen en de uitkragingen van de volumes in het atrium, moet deze component ook worden meegenomen.

De reeds gemaakte kelder geeft uiteraard beperkingen. Zo kan in de kelder niet worden gerekend op ductiel gedrag, aangezien de normen speciale detailleringen en wapeningsklassen voorschrijven die uiteraard niet zijn aangebracht. Tegelijkertijd is de kelderconstructie door zijn grote omvang en robuuste uitwerking in ter plaatse gestort beton ook een belangrijk intermediair gebleken. De kelder kan de krachten vanuit de bovenbouw over grote breedte spreiden, waardoor er geen problemen ontstaan in de fundering. Dit gegeven is een belangrijke rol gaan spelen

bij de keuze voor de te nemen maatregelen. Hierop wordt in het volgende artikel ingegaan. ☒

● LITERATUUR

- 1 Walraven, J., Lurvink, M., Voorlopig ontwerpuitgangspunten voor nieuwbouw en verbouw onder aardbevingsbelasting ten gevolge van de gaswinning in het Groningenveld, ten behoeve van minister Economische Zaken, 2014.
- 2 Technische Grondslagen voor Bouwconstructies, praktijkrichtlijn NPR 9998, Beoordeling van de constructieve veiligheid van een gebouw bij nieuwbouw, verbouw en afkeuren - Grondslagen voor aardbevingsbelastingen: Geïnduceerde aardbevingen, februari 2015.

● 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 zijn bij dit artikel enkele interessante video's beschikbaar. In een van de video's licht auteur Erwin ten Brincke de gekozen oplossingen toe (komt aan bod in het tweede artikel in deze serie). 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.

