

Het nieuwe kantoor van RCE+KADE in Amersfoort ligt langs de druk bereden spoorlijn Amersfoort – Apeldoorn / Zwolle. Om hinderlijke trillingen door het railverkeer te voorkomen, is het gebouw geplaatst op trillingsisolatoren in de vorm van rubber blokken. De dynamische randvoorwaarden hebben grote invloed gehad op het constructieve ontwerp.



Trillingsisolatie in kantoor RCE+KADE in Amersfoort

Kantoor op veren

Langs het Smallepad in Amersfoort is recent de nieuwe huisvesting voor de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed (RCE) opgeleverd. Naast deze Rijksdienst biedt het gebouw ook onderdak aan het cultureel expositiecentrum KADE (Kunst aan de Eem) met een museumcafé, artotheek en tentoonstellingsruimte. Het innovatieve en transparante gebouw is een ontwerp van de Spaanse architect Juan Navarro Baldeweg. Bepalend voor het ontwerp van het gebouw was de locatie aan de rand van de

historische binnenstad en de ligging langs de spoorlijn Amersfoort – Apeldoorn / Zwolle. Aan de voorzijde komt een vijver, een grote luifel en een gefacetteerde achterover hellende gevel waarmee op zorgvuldige wijze de relatie met het Zocherpark tot stand wordt gebracht. Aan de achterzijde is het gebouw meer gesloten, in verband met de aanwezigheid van het spoorwagetracé op korte afstand. In het gebouw zijn een aantal laboratoriumruimten, een fotostudio en presentatiezalen onderge-

bracht, die gevoelig zijn voor bouwtrillingen. Ook bleek hinder voor personen in het gebouw een reëel risico. Door de ligging van het gebouw langs het spoor was het nodig het gebouw te voorzien van integrale trillingsisolatie. Dit is gerealiseerd met rubber blokken tussen onder- en bovenbouw.

Constructief ontwerp

Het gebouw bestaat uit vijf verdiepingen, een dakopbouw en een ondergrondse parkeergarage. Begane grond- en 1e verdiepingvloer beslaan het gehele oppervlak van het gebouw; de hoger gelegen vloeren liggen terug ten opzichte van de voorgevel, zodat een hoog atrium ontstaat achter de glazen voorgevel (fig. 2, foto 3).

De vloeren zijn ontworpen als vlakke plaatvloeren, ten behoeve van een vrij tracé voor installatiecomponenten in combinatie met een minimale verdiepinghoogte, en worden ondersteund door betonnen kolommen. In de lengterichting heeft het gebouw een stramienmaat van 8,10 m, afgestemd op drie parkeerplaatsen per travee in de kelder. In de breedterichting is gekozen voor een stramienmaat van 6,90 m, aansluitend op gangbare kantoorindelingen.

In verband met de lengte van het gebouw (130 m) is in het midden een dilatatie aangebracht. De beide bouwdelen worden gestabiliseerd door betonnen kernen (ten behoeve van trap-

penhuizen en liften) in combinatie met betonnen stabiliteitswanden aan de kopzijden van het gebouw.

De voorgevel bestaat uit een binnengevel voorzien van isolerend dubbelglas en een buitengevel van enkelglas, een zogenaamde tweede-huidfaçade. In de spouwruiimte zijn op verdiepingniveau stalen roostervloeren aangebracht. De hellende binnengevel wordt ondersteund door stalen HE-profielen, opgelegd op de rand van de 1e verdiepingvloer, en afgesteund tegen de dakvloer (fig. 2). Om de puntlasten uit de gevelkolommen op de rand van de 1e verdiepingvloer te kunnen overdragen op de teruggeplaatste kolommen van de begane grond, zijn zware stalen liggers opgenomen in de 1e verdiepingvloer. De buitengevel wordt ondersteund door consoles, uitkragend bevestigd aan de HE-profielen. Ter hoogte van de 1e verdiepingvloer gaan de stalen HE-profielen van de voorgevel over de breedte van het entreegebied over in een 12 m uitkragende luifel.

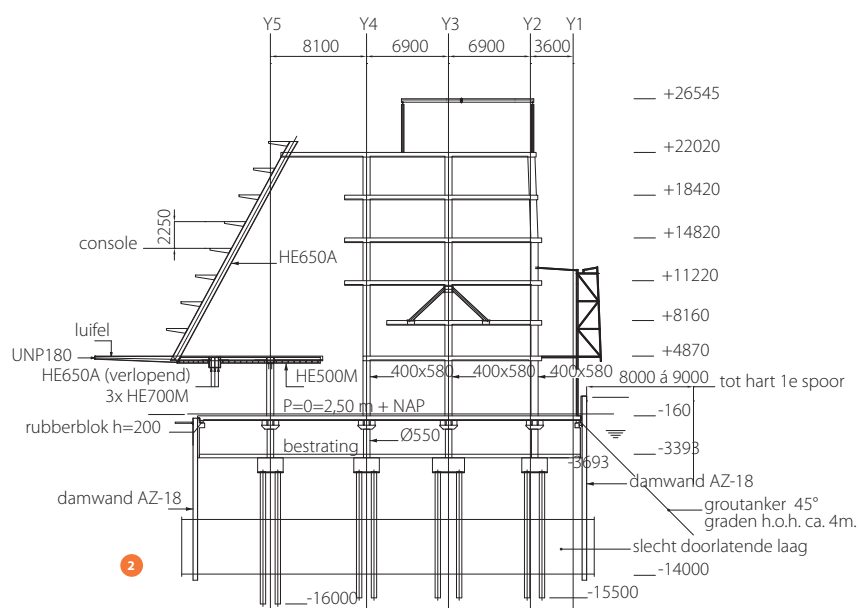
De achtergevel wordt ondersteund door een vrijstaande staalconstructie over de volledige lengte van het gebouw, verticaal opgelegd op de kelderwanden, en horizontaal afgesteund op de betonconstructie van de bovenbouw.

De parkeerkelder is uitgevoerd volgens het 'klein-polder-principe'. Dat wil zeggen dat damwanden tot in een waterafsluitende grondlaag worden aangebracht waardoor de watertoevoer in de bouwkuip beperkt blijft. Door de aanwezigheid van een afsluitende grondlaag en de noodzaak van een gesloten bouwput, in verband met de naastliggende spoordijk en omliggende bebouwing en infrastructuur, was dit de meest economische oplossing. De stalen damwanden zijn aan de spoorzijde verankerd. Om corrosie als gevolg van zwerfstromen vanuit de spoorlijn te voorkomen zijn deze ankers dubbel geïsoleerd uitgevoerd en zijn de stalen damwandplanken onderling gekoppeld, zodat een ringleiding ontstaat.

Trillingshinder

De nieuwbouwlocatie ligt langs het spoortracé. De afstand tussen de fundering van het gebouw en de hartlijn van het 1e spoor bedraagt slechts 9 m. In de sporen naast het gebouw bevinden zich 4 wissels! Elke 3 minuten (in 2015 zelfs elke 2 minuten) passeert een trein het gebouw. Doordat de locatie op 500 m van het station Amersfoort ligt, hebben de treinen nog/al een aanmerkelijke snelheid. Geregeld passeren er twee treinen tegelijkertijd het gebouw.

Railverkeer veroorzaakt herhaald kortdurende trillingen met impulsachtig karakter (stootvormige excitatie). Dit wordt veroor-





- 3 Door terugliggende vloeren ontstaat een hoog atrium achter de glazen voorgevel
- 4 Bij trillingshinder spelen bron, overdrachts-pad, de vloerdynamica en ruimte eigenschappen bij de ontvanger een rol [1]

zaakt door platte vlakken op de wielen ('vierkante wielen'), onef-heden op de spoorrails en verhoogde ruwheid van wiel en spoorstaaf. De eerste twee oorzaken zijn de belangrijkste bronnen van voelbare trillingen, de laatste levert trillingen bij hoorbare frequenties en manifesteert zich vooral als laag frequent (lucht)geluid dat binnen wordt afgestraald door vloeren en wanden. Het complete model van trillingsoverdracht onderscheidt de bron, het overdrachtspad en de ontvanger (fig. 4).

Railverkeer vormt de bron voor trillingshinder. Via het ballast-bed worden de trillingen overgedragen op de ondergrond. Trillingsoverdracht in de bodem (in de vorm van oppervlakte- en volumegolven) is moeilijk te voorspellen. Dit geldt vooral in de Nederlandse bodem omdat de bodemopbouw hier heterogeen is. Op de RCE-locatie bestaat de bodem uit klei- en zandlagen, met verschillende dynamische eigenschappen als materiaal-damping, golfvoortplantingssnelheid en stijfheid. Om die reden is het gebruikelijk om in een vroeg stadium een trillingsonderzoek te doen. In de VO-fase zijn trillingsmetingen verricht op de bouwkaavel en in drie nabijgelegen gebouwen om inzicht te krijgen in de heersende trillingssterkte ten gevolge van hetzelfde railverkeer dat als trillingsbron fungeert bij de nieuwbouw. Op grond hiervan kon de overdracht in de ondergrond beter worden voorspeld.

Tabel 1 Dampingfactoren voor verschillende constructiematerialen [1]

materiaal	dampingfactor (materiaalconstante)
gewapend beton	
- ongescheurd	0,007 – 0,010
- gescheurd (zonder vloeiende wapening)	0,010 – 0,040
- gescheurd (met vloeiende wapening)	0,005 – 0,008
voorgespannen beton	0,004 – 0,007
gedeeltelijk voorgespannen beton	0,008 – 0,012
staal-beton	0,002 – 0,003
staal	0,001 – 0,002

Als fundering van het gebouw is gekozen voor een niet-trillingsgevoelige fundering. Volgens de SBR-richtlijn [2] gelden als niet-trillingsgevoelig:

- funderingen met grondverdringende palen, die een belangrijk deel van hun draagvermogen onttelen aan het punt-draagvermogen;
- funderingen met niet-grondverdringende palen die verwaarloosbare zettingen zullen vertonen door extra negatieve kleeft;
- staalfunderingen op een zeer vast zandpakket.

Voor dit project, met een diepliggende draagkrachtige zandlaag met daarboven plaatselijk aanwezige zeer vastgepakte zandlagen, is gekozen voor een grondverdringend paalsysteem met groutinjectiepalen Ø 380 / 450 mm.

Voor het dynamische gedrag van de gebouwconstructie is de keuze van het materiaal van groot belang. Materialeigenschappen die van invloed zijn op het dynamische gedrag zijn: soortelijke massa ρ , elasticiteitsmodulus E en de dampingfactor ξ . De totale dissipatie van trillingsenergie vindt plaats door materiaaldamping in combinatie met damping ter plaatse van opleggingen en verbindingen.

Vanwege de hoge dampingfactor (tabel 1) en massa is gekozen voor een betonnen constructie van de bovenbouw.

De ontvanger is de mens die zich in het gebouw bevindt en hinder ondervindt van voelbare trillingen of in ruimte opgestelde trillingsgevoelige apparatuur. De eigenfrequenties van de vloer, in relatie tot de trillings-signatuur in de constructie en de inwendige damping bepalen sterk de trillingsresponsie. In het Programma van Eisen zijn maximale waarden gegeven voor de effectieve trillingssterkte ($V_{\max}$) in kantoorruimten (maximaal 0,3 mm/s) en werkruimten met een kritische gebruiksfunctie, zoals laboratorium- en depotfuncties (maximaal 0,1 mm/s). Verder is ook een limiet gesteld aan de periode(dag)gemiddelde trillingssterkte V_{per} van 0,07 mm/s.

Het trillingsonderzoek leidde tot een verwachte trillingssterkte in het geprojecteerde gebouw tot circa 1,0 mm/s. Dit betekent goed voelbaar en een factor 3 hoger dan de limiet. Ook zou bij de berekende trillingssterkte van de vloervelden een aanmerkelijke afstraling van laagfrequent geluid optreden. Geadviseerd werd dan ook om **integrale trillingsisolatie** toe te passen, waarbij de bovenbouw verend wordt opgesteld op de onderbouw. Hierbij moet de bovenbouw ook in horizontale richting zoveel mogelijk worden losgehouden van de omringende bodem.

Trillingsisolatie

Trillingsisolatie wordt bereikt door het invoegen van een dragend element met een betrekkelijk lage stijfheid (een veer). Voor isolatie is echter ook een zekere massa benodigd. Zo ontstaat een massa-veersysteem dat trillingen met frequenties ruim boven de 'afveerfrequentie' verzwakt. Bij verder oplopende trillingsfrequentie stijgt in principe ook de isolatie. De effectiviteit van trillingsisolatie wordt aangegeven met het 'invoegverlies': het verschil in trillingssterkte met en zonder trillingsisolatie, en wordt bepaald door:

- de eigenfrequenties van de massa-veeropstelling;
- de inwendige demping van het materiaal van de veren;
- de impedantie van de gebouwconstructie boven de veren, bepaald door massa, stijfheid, demping en specifieke trilvormen van het gebouw.

De afveerfrequentie moet vele malen lager zijn dan de stoofrequentie van de railverkeertillingen. De stoofrequentie ligt tussen 20 en 60 Hz; de afveerfrequentie is gekozen op circa 4 Hz. Daarnaast moet er een voldoende hoge impedantiesprong (> 20 dB) optreden bij de overgang van veren naar bovenbouw. Ook worden er eisen gesteld aan het dynamische gedrag van de bovenbouw. Zo moet het samenvallen van eigenfrequenties van belangrijke constructiedelen worden voorkomen. Ook moet er een voldoende verschil zijn tussen de eigenfrequentie van de vloervelden en de verende opstelling (factor > 2). Om die reden werd een eigenfrequentie van de vloervelden van minimaal $2,5 \times 4 = 10$ Hz vereist.

Er bestaan geen softwarepakketten waarmee de keten: bron – overdrachtspad – ontvanger volledig in 3D kan worden gemodelleerd. DGMR heeft een dynamicastudie verricht door gebruik te maken van het door ABT opgezette 3D eindigelementenmodel in ESA Prima Win (tegenwoordig Scia Engineer) van de bovenbouw (fig. 5). Hiermee zijn de eigenfrequenties behorende bij de vele trilvormen van de constructie en de trillingsresponsie van de vloeren bepaald. Aan de hand van deelmodellen zijn eerst responsie-berekeningen gemaakt van de constructieve opzet, waarna aan de hand van het complete model het globale gedrag van de constructie is beschouwd.

Ook is het effect van extra vloerbalken nog onderzocht. Op basis van deze dynamicastudie kon het materiaal, de stijfheid en de positie van de veren worden bepaald.

Stalen of rubber veren?

Integrale trillingsisolatie kan plaatsvinden met veren van staal of rubber, al dan niet voorgespannen. Elk type veermateriaal heeft voor- en nadelen (tabel 2). Op basis van een vergelijkend onderzoek is uiteindelijk gekozen voor toepassing van rubber blokken.

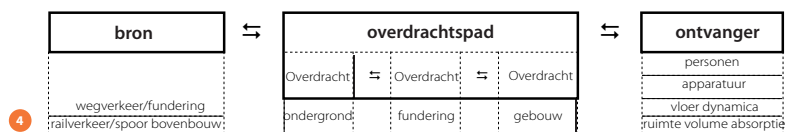
Verder is besloten geen voorgespannen veerpakketten te gebruiken, vanwege de meerkosten (45% duurder) en de grotere afmetingen. Vooral bij de kelderwanden zou dit plaatsingsproblemen opleveren. Om de indrukking van de rubber blokken tijdens de bouw te compenseren, zijn passende maatregelen getroffen (zie hierna).

Van de totale massa van de bovenbouw (22 000 ton) wordt 85% gedragen door de kolommen en 15% door de kelderwanden.

Voor de trillingsisolatie zijn twee typen blokken geselecteerd:

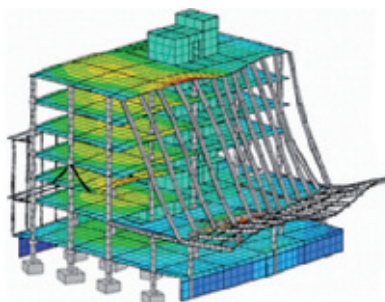
- primaire blokken (twee uitvoeringen) met een maximale belasting van 1100 en 1500 kN, 1 tot 4 stuks per kolomkop, afmetingen circa 500 x 500 x 300 mm;
- secundaire blokken met een maximale belasting van 200 kN, afmetingen circa 250 x 250 x 200 mm.

Voor de draagveren is door de adviseur trillingstechniek in samenwerking met de constructeur de technische specificatie voor prestaties, prototype test en levering opgesteld.



Tabel 2 Vergelijking stalen veerpakketten en rubber blokken

type veer	voordelen	nadelen
stalen veerpakketten	lagere afveerfrequentie	duurder dan rubberblokken
	toepasbaar voor zeer groot frequentiebereik	trillingsisolatie voor hoge stoofrequenties slecht zonder extra maatregelen
	veerconstante kan door variatie in materiaal en afmetingen de gewenste waarde krijgen	lage inwendige demping
rubber blokken	goedkoper dan stalen veren	hogere afveerfrequentie
	hoge inwendige demping	rubber vertoont een kruipgedrag
	gunstige verhouding draagkracht/oppervlak	



5



6

Gevolgen voor de constructie

De keuze voor trillingsisolatie leverde een grote impact op de constructie van het gebouw. Allereerst moest er, voor een goede werking van de trillingsisolatie, een bepaalde verhouding worden gerealiseerd tussen de eigenfrequenties van het gebouw en de rubber blokken. Hoe stijver het gebouw, des te beter de werking van de trillingsisolatie. Een stijf gebouw vraagt om veel constructieve wanden, maar deze beperken de flexibiliteit van de plattegronden enorm. Daarom is de oplossing gezocht in toepassing van relatief stijve vloeren met kleine overspanningen (c.q. kolomafstanden). Om het eigen gewicht van de verdiepingvloeren met behoud van stijfheid te beperken is gekozen voor toepassing van bollenplaatvloeren (BD 390), die een circa 30% lagere massa hebben dan massieve betonvloeren van gelijke dikte (foto 6).

Vervolgens moest een geschikte positie worden gevonden waar de trillingsisolatie kon worden aangebracht, zodanig dat inspectie van de rubber blokken mogelijk is. Direct onder de beganegrondvloer is de gebruikelijke plaats. Uitzondering hierop vormen de kernen, omdat in de liftschachten geen rubber blokken konden worden ingebouwd. Hier zijn de blokken onder de liftvloer aangebracht in een extra omhullende betonbak, iets boven keldervloerniveau.

Ter plaatse van de kolommen zijn maximaal vier blokken nodig. Om voldoende oplegvlak te creëren zijn de kolommen uitgevoerd met een kegelvormige kolomkop tot een diameter van 1650 mm (foto 7). Zodoende bleef er nog voldoende ruimte tussen de blokken onderling, om 'uitbuiken' ten gevolge van het indrukken van de blokken mogelijk te maken. Daarnaast is hierdoor ook ruimte aanwezig naast de rubberblokken om vijzels te plaatsen, zodat vervanging van de rubberblokken aan het einde van de technische levensduur mogelijk is.

Om lastige stelconstructies te voorkomen is de betonvloer van de begane grond met een tussenfolie direct op de rubber blokken gestort. Hiertoe zijn de blokken in de bekisting opgenomen en is de ruimte tussen de blokken opgevuld met zand, dat naderhand eenvoudig kon worden verwijderd. De blokken zijn daarna afgeschermd met een brandwerende beschieting.

Berekend was dat de blokken na gereedkomen van de ruwbouw circa 13 mm, en uiteindelijk in de gebruiksfase zelfs 20 mm zouden zijn ingedrukt. Met deze indrukking is tijdens de bouw rekening gehouden door de begane grondvloer 20 mm 'hoger' aan te brengen, en de maatvoering van de hoger gelegen vloeren te bepalen ten opzichte van de bovenkant begane grondvloer.

Het aanlegniveau van de parkeerkeldervloer is zodanig dat geen waterdichte betonvloer nodig is, maar kan worden volstaan met een bestrating in zand, voorzien van drainage. Door het ontbreken van een betonnen keldervloer is de fundering lichter en minder stijf. De koppeling tussen gebouw en bodem in verticale richting is daardoor minder (dus gunstig). Wel ontstaat een hogere trillingsresponsie op de fundering (dus ongunstig).

Een ander constructief aspect betreft de horizontale stabiliteit. De rubber blokken zijn dan wel in staat om grote verticale belastingen op te nemen, de stijfheid is betrekkelijk laag. In horizontale richting is de stijfheid echter nog lager. Hierdoor kunnen ze geen stabiliteitskrachten opnemen zonder eerst een grote verplaatsing te doorlopen. Ook waren geen stabiliteitswanden in de parkeerkelder aanwezig om via nokverbindingen krachten over te brengen. Daarom is de begane grondvloer op een beperkt aantal locaties met dezelfde rubber blokken horizontaal afgesteund (foto 8). In verticale (afschuif) richting bezitten deze rubber blokken een lage stijfheid. Hiermee blijft het directe contact van het gebouw met de omringende bodem tot een minimum beperkt.

- 5 EEM-model ESA Prima Win
- 6 Door toepassing van bollenplaatvloeren is een reductie van 30% op de vloermassa gerealiseerd
- 7 Om voldoende oplegvlak te creëren zijn de kolommen uitgevoerd met een kegelvormige kolomkop
- 8 Horizontale afsteuning van de begane grondvloer ter plaatse van de kelderwand (voorgespannen rubber blokken)

Samenvattende conclusies

- toepassing van trillingsisolatie is sterk bepalend voor het constructieve ontwerp van een gebouw, zowel de bovenbouw als de onderbouw;
- trillingsisolatie vraagt om een directe dialoog tussen constructie adviseur (ABT) en adviseur trillingstechniek (DGMR), vanaf het begin van het ontwerpproces t.m. de uitvoering;
- er is een effectieve en efficiënte oplossing gerealiseerd dankzij de ontwikkeling in een vroeg stadium van de integrale trillingsisolatie én doordat met de technische specificatie de omvangrijke en bijzondere levering van de draagveren kon worden aangevraagd;
- trillingsisolatie leidt weliswaar tot een sterke verlaging van de voelbare trillingen ten gevolge railverkeer in een gebouw, echter ook tot een verhoging van de bouwkosten (ca. 5%).



7

LITERATUUR

- 1 Mark, M.J. van der, (2004), Bouwen nabij een verkeersader. Afstudeerverslag TU Eindhoven
- 2 SBR meet- en beoordelingsrichtlijn 'Schade aan gebouwen' deel A

Tot slot

Medio februari 2009 zijn trillingsmetingen uitgevoerd om de trillingssterkten in het gebouw in de gebruikstoestand te bepalen, en deze te toetsen aan de gestelde eisen. Hierbij is vastgesteld dat bij treinpassages het vereiste maximum van de trillingssterkte (0,3 mm/s) niet werd overschreden.

De gemeten trillingssterkten, behorende bij zwaardere treinpassages, liggen binnen de voorspelde range van 0,10 tot 0,25 mm/s. Hieruit mag worden geconcludeerd dat de trillingsisolatie van het gebouw naar behoren functioneert. ☒

PROJECTGEGEVENS

- project** Nieuwbouw RCE+KADE, Amersfoort
- opdrachtgever** Rijksgebouwendienst, 's-Gravenhage
- architect** Navarro Baldeweg Asociados (Juan Navarro Baldeweg) i.s.m. ADP architectuur design en planning BV, Amsterdam
- adviseur constructie** ABT BV, Velp
- adviseur installatie** HE adviseurs, Rotterdam
- bouwfysica, trillingstechniek en brandveiligheid** DGMR Bouw B.V., Arnhem
- directievoering** Stevens Van Dijk, 's-Hertogenbosch
- aannemer** Visser & Smit bouw BV, Papendrecht
- installateurs** Burgers Ergon Installatietechniek Apeldoorn en Van Galen Klimaattechniek BV
- leverancier bollenplaatvloer** BubbleDeck Nederland BV
- leverancier rubber blokken** Trelleborg

8

