



1

Robuustheidsanalyse

Het nieuwe collectiegebouw voor Museum Boijmans Van Beuningen oogt door de vorm van nature robuust. Toch zijn er in het ontwerp en de uitwerking enkele maatregelen genomen om de robuustheid te vergroten. Dit op basis van een praktische robuustheidsanalyse.

Volgens NEN-EN 1990 moet een gebouwconstructie worden ingedeeld in gevolgklasse CC3 als het bezwijken ervan leidt tot 'grote gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, en/of zeer grote economische of sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving'. In tabel NB21 wordt een aantal voorbeelden gegeven van bouwwerken die in deze categorie vallen. Daaronder ook bouwwerken met een publieksfunctie, waarbij in geval van bezwijken meer dan 500 personen gelijktijdig gevaar lopen. Het depot valt in die categorie en daarom is, in overleg met Museum Boijmans Van Beuningen, besloten het gebouw in te delen in gevolgklasse CC3.

Gevolgklasse CC3

Volgens het Bouwbesluit moeten bij het ontwerp van een constructie alleen de bekende buitengewone belastingen in rekening worden gebracht. Maar de *informatieve* bijlage A4 van NEN-EN 1991-1-7 gaat verder. Voor

auteur



**IR. MICHIEL
NIENS RC**

Projectleider
IMd Raadgevende
Ingenieurs

gevolgklasse CC3 staat aangegeven: 'Er behoort een systematische risicoanalyse van het gebouw te zijn uitgevoerd, waarbij met zowel voorziene als onvoorziene gevaarlijke voorvallen rekening is gehouden'. Omdat de eisen aan de analyse niet duidelijk zijn omschreven, is er vroegtijdig overleg gevoerd met de dienst bouw- en woningtoezicht. Al bij de aanvraag van de omgevingsvergunning in 2016 is een robuustheidsanalyse van de hoofddraagconstructie ingediend. Deze robuustheidsanalyse bestaat uit een gevoeligheidsanalyse, risicoanalyse en een omschrijving van de risicobeperkende maatregelen. Hierin zijn zowel de voorziene als onvoorziene voorvallen behandeld. Omdat de onvoorziene voorvallen minder tastbaar zijn en vaak onderwerp van discussie, worden alleen deze in dit artikel behandeld.

Gevoeligheidsanalyse

De randvoorwaarden voor de constructieve berekeningen zijn niet allemaal exact bekend en/of te bepalen. Met name de veer-

Op basis van de gevoeligheidsanalyse is besloten de krachten volgens het basismodel met 10% te verhogen

stijfheid van de paalfundering en de E-moduli van de gewapende betonconstructies zijn slechts bij benadering bekend. Daarom zijn bij de berekeningen van de diverse dragende onderdelen gevoeligheidsanalyses uitgevoerd om de invloed van deze onzekerheden te onderzoeken. De maatgevende krachtswerking per onderdeel is vervolgens afgestemd op de meest ongunstige randvoorwaarde.

Zo is bij het bepalen van de reactiekracht in de kolommen uitgegaan van een starre ondersteuning, waarbij de atriumwand en de schaal verend zijn ondersteund. Bij het bepalen van de reactiekracht in de wanden zijn deze juist star ondersteund gedacht, waarbij de kolommen verend zijn ondersteund.

Bij het bepalen van de krachtswerking in de schaal en de eersteverdiepingsvloer is gevarieerd met de stijfheid van de funderingspalen onder de schaal en de E-moduli. De E-modulus van de schaal is zowel op de begane grond als op de eerste verdieping gevarieerd, de E-modulus van de eersteverdiepingsvloer was de derde variabele.

Uit de gevoeligheidsanalyse bleek dat de variatie in krachtswerking gemiddeld ongeveer 5% bedroeg met een enkele uitschieter naar 10%. Als gevolg hiervan is besloten de krachten volgens het basismodel met 10% te verhogen en deze als input voor de verschillende wapeningsberekeningen te gebruiken.

Risicoanalyse

Voor de onderdelen van de hoofddragconstructie is het gevolg van falen van elk onderdeel geanalyseerd. Hiermee konden de kritieke elementen (key elements) worden geïdentificeerd. Voor de analyse van de kolommen onder de atriumwand wordt deze werkwijze in het navolgende omschreven.

KOLOMMEN ONDER ATRIUM-

WAND Bij falen van een kolom onder één van de twee atriumwanden wordt de belasting door de wand herverdeeld over de resterende kolommen. De wapening in deze wanden in de UGT is met behulp van een plaatmodel bepaald. Ten behoeve van de

robuustheidsanalyse is er een eenvoudiger model gemaakt: een doorgaande ligger op meerdere steunpunten, voorzien van een gelijkmatig verdeelde belasting van 1200 kN/m. Deze gestileerde belasting is afgeleid uit de wapeningsberekening van de wanden.

De wand is als ligger ingevoerd met een dikte van 250 mm en een hoogte van 11 m (twee verdiepingen). De kolommen bestaan uit ronde staal-betonkolommen met een diameter van 600 mm. Deze steunpunten zijn geschematiseerd als veren, rekening houdend met het aantal funderingspalen (met stijfheid $k = 100$ MN/m per paal).

De wand werkt samen met de betonbalk onder de eersteverdiepingsvloer. Aan de rechterzijde, nabij kolom K11 is alleen deze betonbalk aanwezig. Het aandeel van deze balk is in rekening gebracht door onder het rechter uiteinde van de wand een veer te modelleren met een stijfheid passend bij de afmetingen van de balk.

De krachtsverdeling over de steunpunten in het vereenvoudigde liggermodel wijkt enigszins af van de wapeningsberekening, doordat er geen rekening wordt gehouden met wandsparringen. De berekening is echter voldoende accuraat om af te tasten of er voldoende herverdelingscapaciteit in de constructie aanwezig is.

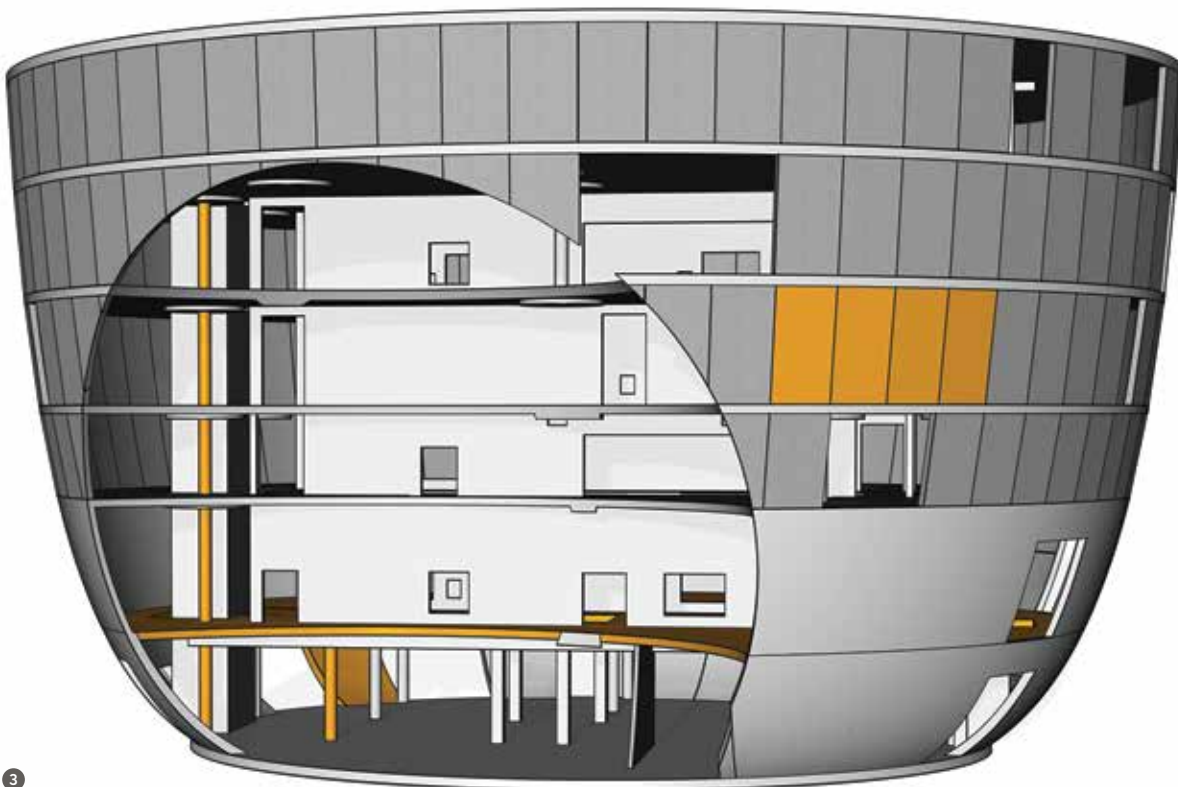
In tabel 1 is in de eerste kolom de reactie in de UGT getoond, inclusief een gewogen belastingsfactor $\gamma = 1,5$. Vervolgens wordt telkens een kolom weggenomen, met een wijziging van de kolomreacties tot gevolg. Deze zijn afgedrukt met een belastingsfactor $\gamma = 1,0$.

Indien de kolomreacties bij falen lager zijn dan in de gebruiksfase, is herverdeling mogelijk. Dit is meestal het geval. De blauw afgedrukte waarden zijn hoger dan de waarden in de gebruiksfase. De kolommen onder de wand zijn echter allemaal gelijk gewapend en in staat een maximale reactiekracht van 17.100 kN op te nemen. Daarmee voldoen dus ook de blauwe waarden. Ook de funderingspalen hebben voldoende restcapaciteit.

De rood afgedrukte waarde is niet opneembaar voor de kolom en de fundering.



2



3

2 Aanzicht atriumwand met kolommen, waarvan is geanalyseerd wat de gevolgen zouden zijn bij falen 3 De kritieke elementen zijn geel gemarkeerd

Tabel 1: Belastingen bij falen kolommen

Wand as E	Gebruiksfase	Falen K6	Falen K7	Falen expwand	Falen K8	Falen K9	Falen K10
Belasting in kN	$\gamma=1,5$	$\gamma=1,0$	$\gamma=1,0$	$\gamma=1,0$	$\gamma=1,0$	$\gamma=1,0$	$\gamma=1,0$
K6	9.837	-	10.164	7.096	7.020	6.485	2.546
K7	9.455	12.675	-	7.084	7.647	7.008	3.574
expeditiewand	4.505	4.306	4.071	-	4.156	3.848	2.999
K8	10.764	8.106	8.705	8.135	-	10.084	12.332
K9	10.613	6.928	7.888	7.787	10.020	-	18.389
K10	12.529	6.773	7.824	8.417	9.623	10.816	-
balk	2.056	1.052	1.187	1.321	1.374	1.600	-
Totaal $\gamma=1,5$	59.759						
Totaal $\gamma=1,0$	39.839	39.840	39.839	39.840	39.840	39.841	39.840

Hieruit wordt geconcludeerd dat kolom K10 een kritiek element is, waarvoor risicobeperkende maatregelen moeten worden genomen.

Risicobeperkende maatregelen

Op een vergelijkbare manier als de kolommen onder de atriumwand, zijn met behulp van de risicoanalyse alle kritieke elementen geïdentificeerd. Hier zijn vervolgens risicobeperkende maatregelen voor getroffen, onder te verdelen in toevoegingen aan de constructie en extra aandacht voor uitwerking en uitvoering.

KOLOM K10 De eerder benoemde kolom K10 is voorzien van een zwaarder staalprofiel (HEM340 i.p.v. HEM300) en zwaardere wapening (10Ø32 i.p.v. 8Ø20), waardoor het draagvermogen met circa 18% toeneemt en de kans op falen wordt verkleind. Ter hoogte van de eerste-, tweede- en derdeverdiepingsvloer zijn trekbanden in de atriumwanden aangebracht, die in combinatie met de verticale wandwapening de voor de herverdeling benodigde wandliggerwerking mogelijk maken.

SCHAALDELEN Als toevoegingen aan de constructie zijn op meerdere plekken koppelingen en trekbanden opgenomen. In de prefab schaaldelen zijn gevelopeningen aanwezig, waarboven wandliggerwerking van de prefab gevel moet kunnen optreden. Deze wandliggerwerking wordt mogelijk gemaakt met lasplaten tussen de elementen onder-

ling en trekbanden in de vloer. Deze wandliggers kunnen een grotere overspanning maken dan de breedte van de gevelopening. Mede dankzij deze maatregel zal het bezwijken van een willekeurige prefab geveldeel (met een breedte van ca. 2,5 m) niet leiden tot voortschrijdende instorting.

EXTRA AANDACHT VOOR UITWERKING EN UITVOERING

De eerste verdiepingsvloer speelt een cruciale rol in het opnemen van de trekkracht die vanuit de dragende geperforeerde schaal ontstaat. Daardoor is deze vloer een kritiek element. Naast een aantal toevoegingen aan dit constructieonderdeel, zoals het aanbrengen van trekbanden, is er ook bewust voor gekozen deze vloer in het werk te storten. Hierdoor is er niet alleen maximale ruimte voor wapening beschikbaar, maar wordt ook de engineering van de vloerwapening in eigen hand gehouden. De kans op fouten door miscommunicatie en/of onduidelijke demarcaties tussen verschillende partijen wordt hiermee verkleind.

De delen van de constructie die door deelconstructeurs worden uitgewerkt (hogere verdiepingen, prefab schaaldelen, staalconstructie), worden technisch inhoudelijk gecoördineerd door de engineeringcoördinator van de aannemer. Om aan deze rol extra gewicht te geven, is in het bestek gevraagd om een Register constructeur. De kritieke elementen in deze detailengineering zijn door IMd als coördinerend constructeur uitgebreid gecontroleerd. Dit





Door de kritische eerste verdiepingvloer in het werk te storten, wordt de engineering in eigen hand gehouden en wordt de kans op fouten door miscommunicatie en/of onduidelijke demarcaties verkleind



Om aan de rol van engineeringscoördinator bij de aannemer extra gewicht te geven, is gevraagd om een Register-constructeur

betekent dat er naast de gangbare controle op uitgangspunten en constructieve samenhang, schaduwberekeningen zijn gemaakt van onderdelen als de staal-betonkolommen en de prefab gevelelementen die als wandligger werken. Voor de interne controle van de door Imd geproduceerde tekeningen en berekeningen is een onafhankelijk schaduwteam bij het werk betrokken. De controles hiervan zijn vastgelegd en, net als alle andere stukken, gedeeld met bouw- en woningtoezicht.

Tot slot zijn er voor de kritieke onderdelen uitgebreide inspecties voorgeschreven. Zo zijn er voor de staal-betonkolommen inspecties geweest in de fabriek en meerdere malen op de bouwplaats. Om deze inspecties mogelijk te maken, heeft Imd de opdracht gekregen om twee dagdelen per week op de bouw het dagelijks toezicht te ondersteunen. Dit toezicht is verzorgd door de constructeur van Imd die ook de berekeningen heeft gemaakt. Vanwege de kennis van de berekeningen is dit toezicht een belangrijke aanvulling gebleken en kon er ook snel worden geschakeld als er omwille

van de maakbaarheid varianten voor de wapening moesten worden onderzocht.

Meerkosten

De risicoanalyse van het depot heeft geleid tot een grotere robuustheid van het gebouw. Een objectieve weging van de robuustheid is echter onmogelijk. Bovendien moeten extra investeringen, die gepaard gaan met het verhogen van de robuustheid, niet uit het oog worden verloren. In het voorbeeld van de behandelde kolom K10 is de keuze voor het staalprofiel dat in de kolom is gestort, ingegeven door wat er praktisch, zonder te veel meerkosten, mogelijk is. Hierdoor neemt het draagvermogen met 18% toe. Uiteraard is het ook mogelijk het draagvermogen verder te verhogen door bijvoorbeeld de kolom te vergroten, maar wanneer is het voldoende?

De ervaring bij het depot heeft geleerd dat het waardevol is de kritieke elementen te benoemen en hier bewust extra aandacht aan te besteden bij de uitwerking, uitvoering en controle. Ook dit verlaagt immers de kans op falen, met een lager risico tot gevolg. ●