

Samenvatting resultaten onderzoeken TNO, Hageman en OVV

Oorzaken instorting parkeergarage Eindhoven



ir. Jacques Linssen
Redactie *Cement* / Aeneas Media

Nederland werd op 27 mei 2017 opgeschrikt door de instorting van een in aanbouw zijnde parkeergarage bij Eindhoven Airport. Direct klonk de vraag hoe dit kon gebeuren. Diverse onderzoeken volgden. Die wijzen min of meer in dezelfde richting: daar waar bij de plaatnaad een groot positief moment aanwezig was, kon de trekkracht in de wapening niet van de ene naar de andere breedplaat worden overgedragen.

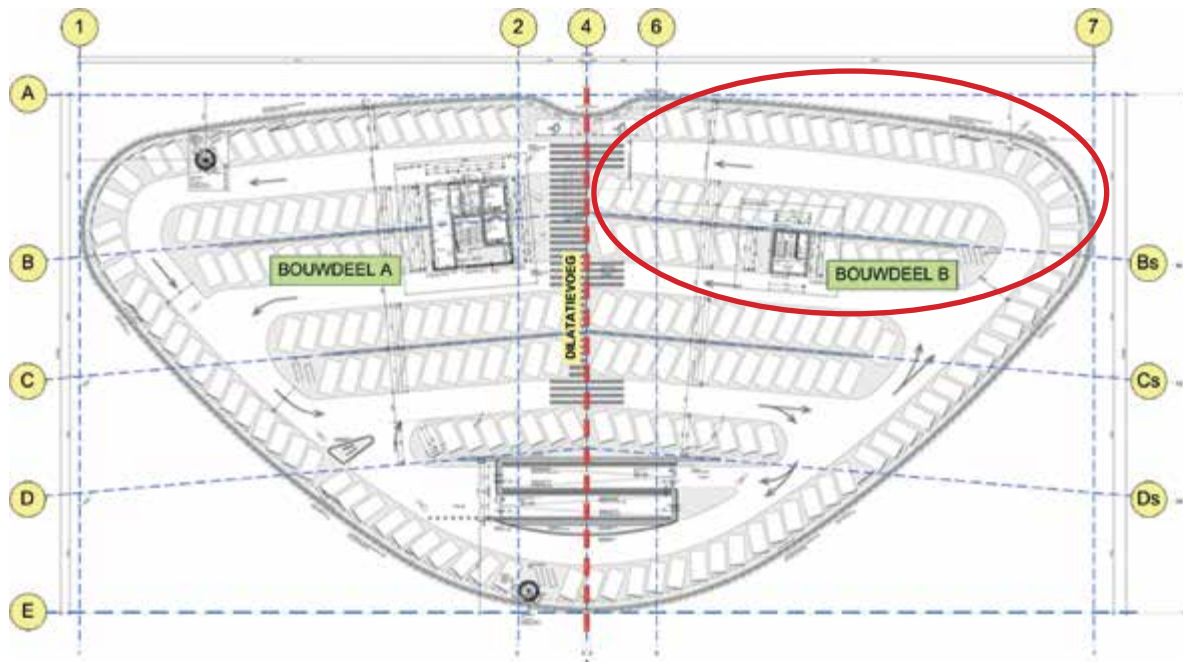
Verantwoording

De redactie van *Cement* heeft ervoor gekozen zelf een samenvatting van de onderzoeksrapporten te schrijven. Dit onder meer vanwege de grote overeenkomsten tussen de conclusies van de onderzoeken.

De leverancier van het betreffende vloersysteem en de branchevereniging van de prefabbetonindustrie is de gelegenheid geboden een artikel te schrijven over hun visie op het ongeval in Eindhoven. Die hebben daar echter om verschillende redenen vanaf gezien.

1 Ingestorte parkeergarage P1 Eindhoven Airport
foto: SQ Vision Mediaproducties

Eind mei 2016 werd gestart met de bouw van het zogenoemde Multi Purpose Building (MPB) van Eindhoven Airport, met als belangrijk onderdeel parkeergarage P1. Het plan was het gebouw in juni 2017 in gebruik te nemen. De instorting in mei 2017 gebeurde dus vlak vóór de geplande opening. Op het moment van het ongeluk vonden er geen bouwwerkzaamheden plaats en waren er geen mensen aanwezig op het terrein. Slachtoffers zijn er daardoor gelukkig niet gevallen.

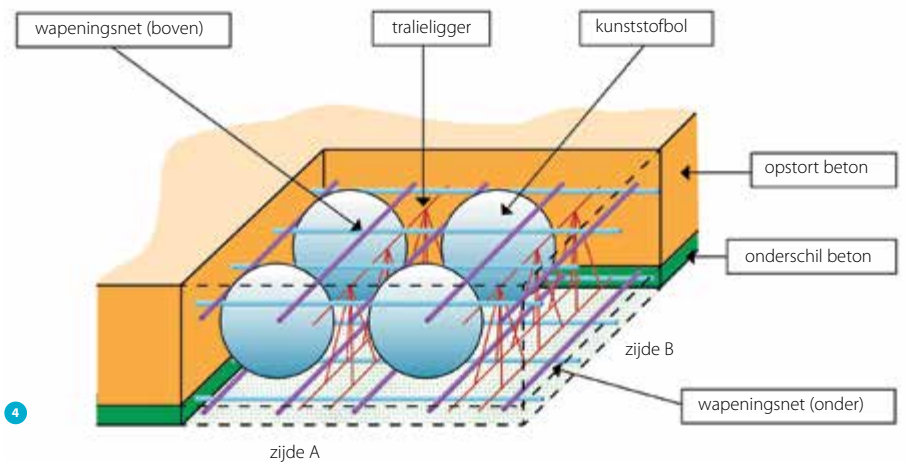


2

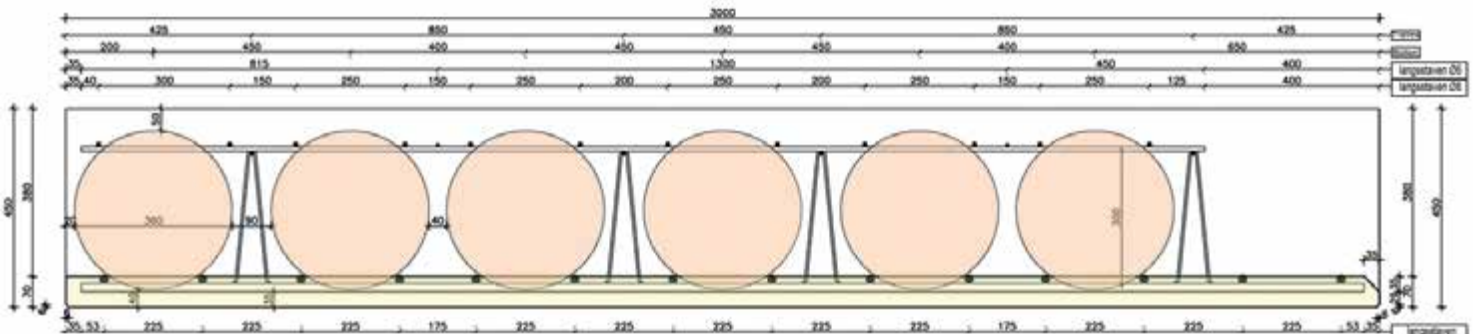
Direct na de instorting zijn diverse onderzoeken gestart, waarmee de technische oorzaak moest worden achterhaald. Opdrachtgever Eindhoven Airport gaf opdracht aan TNO [1] en bouwer BAM schakelde Adviesbureau Hageman [2] in. De OVV besloot, na een review van deze onderzoeken, aanvullend onderzoek te doen [3] en beoordeelde daarbij onder andere de restanten van de garage. Voor de technische onderbouwing liet de OVV zich bijstaan door Horvat & Partners en SGS INTRON. In het onderzoek is met name aandacht besteed aan de wijze waarop de bouwsector omgaat met (constructieve) veiligheid.

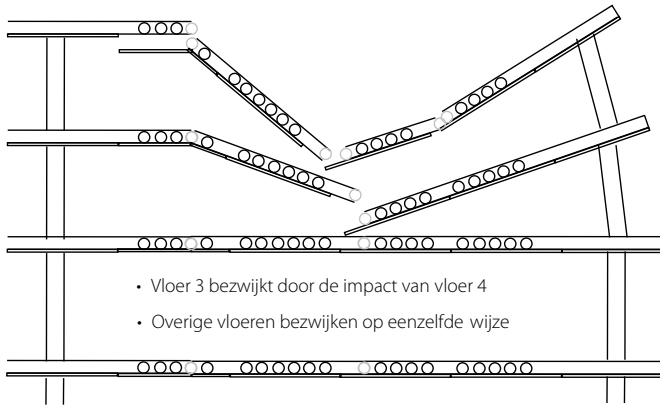
De onderzoeken van TNO en Adviesbureau Hageman werden nagenoeg gelijktijdig afgerond. De resultaten werden gezamenlijk toegelicht op een persconferentie op 25 september 2017, zo'n vier maanden na het ongeval. Het rapport van de OVV kwam ruim een jaar later, op 18 oktober 2018, beschikbaar.

3



4





5

Dit artikel is gebaseerd op alle drie de onderzoeken. Er wordt alleen ingegaan op de technische oorzaken. Op de procesmatige oorzaken, waarop de OVV zich ook heeft gericht, wordt met uitzondering van het kader 'Tekortkomingen proces' niet ingegaan.

Omdat grote delen van de bevindingen uit de (technische) onderzoeken overeenkomen, worden ze niet afzonderlijk behandeld. Daar waar de informatie specifiek uit één van de drie onderzoeken afkomstig is of afwijkt van de andere onderzoeken, is dit in het artikel vermeld.

Beschikbare informatie

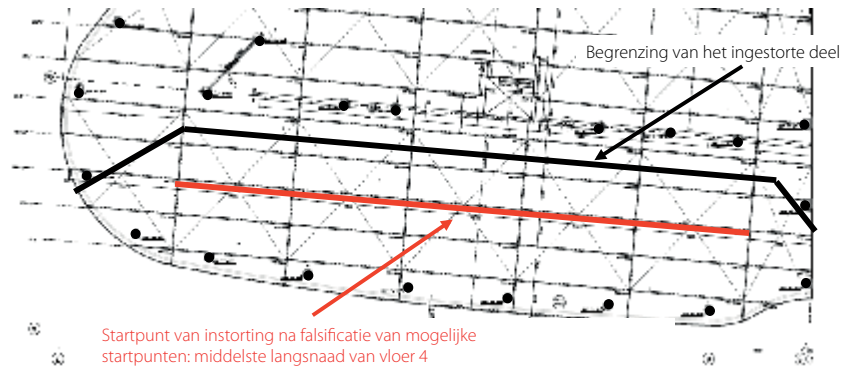
Bij de onderzoeken is gekeken naar het ontwerp en de uitvoering van de draagconstructie van het gebouw. Relevante informatie is door de betrokken partijen beschikbaar gesteld. Ook zijn inspecties ter plaatse uitgevoerd. Omdat de bouwplaats, in verband met veiligheid, in de eerste maanden na het ongeval niet toegankelijk was, moesten die inspecties aanvankelijk van enige afstand gebeuren, bijvoorbeeld vanuit een verreiker. Omdat het onderzoek van de OVV langer liep, konden alleen daarbij restanten na de instorting technisch worden onderzocht.

Voorts hadden de onderzoekers beschikking over beelden die zijn opgenomen door bewakingscamera's en over enkele getuigenverklaringen.

Bij het onderzoek van Adviesbureau Hageman zijn beproevingen uitgevoerd in het Structures Laboratory van de TU Eindhoven.

Gebouwopzet

Het MPB heeft vier verdiepingen, is ongeveer 120 m breed en 65 m diep. De vierde verdiepingvloer is tevens de dakvloer en is bedoeld als parkeerdek. Halverwege de lengterichting van het gebouw is over de volle breedte een dilatatie aangebracht, waardoor het gebouw is onderverdeeld in twee driehoekvormige delen (fig. 2). Het deel van het gebouw dat is ingestort, bevond zich in gebouwdeel B.



6

De verdiepingvloeren zijn uitgevoerd in zogenoemde bollenplaatvloeren (type BubbleDeck). Dit zijn vloeren die zijn opgebouwd uit breedplaten van 70 mm dik, waarin onderwapening en tralieliggers zijn opgenomen. Op de breedplaten (deels erin) worden gewichtsbesparende kunststofbollen aangebracht. Op de bouwplaats wordt op de vloeren een laag beton gestort, de druklaag.

De totale vloerdikte in het gehele project bedraagt 450 mm (fig. 3). Het grootste deel van de breedplaten heeft een oppervlakte van $10 \times 3 \text{ m}^2$.

De vloer rust op ronde kolommen, uitgevoerd in ter plaatse gestort beton. Daarmee ontstaat dus een puntvormig ondersteunde vloer die in twee richtingen belasting moet afdragen. De overspanning tussen de kolommen bedraagt maximaal 15 m, in de richting van de cijferassen (fig. 4). In de andere richting (letterassen) varieert de overspanning van 5 tot 9 m. De breedplaten zijn dwars op de hoofdoverspanning geplaatst. Omdat de breedte van de platen 3 m bedraagt, bevinden zich in die richting dus meerdere platen en dus meerdere plaatnaden. De tralieliggers liggen in de lengterichting van de breedplaten en op enige afstand van de plaatnaden. Ten behoeve van de krachtsoverdracht tussen de breedplaten zijn ter plaatse van de plaatnaden koppelstaven aangebracht. In de zones nabij de kolommen zijn de bollen weggelaten en is extra wapening aangebracht om dwarskracht- en ponsbezwingen te voorkomen.

Bezwijken vloer

De instorting van de parkeergarage is begonnen bij de vierde verdiepingvloer, zo volgt uit beelden van bewakingscamera's en getuigenverklaringen. Doordat deze bovenste vloer na het bezwijken op de onderliggende vloeren terecht kwam, zijn ook deze andere vloeren bezwaken (progressive collapse).

Het eerste breukvlak in de vierde verdiepingvloer ontstond ter plaatse van de middelste langsnaad tussen twee naast elkaar gelegen breedplaten (fig. 6). Ter plaatse van dit breukvlak was de

- 2 Plattegrond MPB, met rood omcirkeld het ingestorte deel
bron: Adviesbureau Hageman
- 3 Doorsnede breedplaatvloer
bron: Adviesbureau Hageman
- 4 Principe opbouw bollenplaatvloer
bron: OVV
- 5 Wijze van instorten in drie fasen
bron: TNO
- 6 Startpunt instorting bij langsnaad
bron: TNO



7a



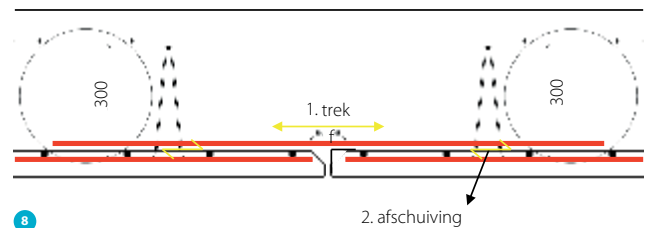
7b

breedplaat van de druklaag 'afgepeld' (fig. 7). Deze scheur liep nabij de beëindiging van de aanwezige koppelstaaf omhoog de druklaag in (fig. 8). Bij het bezwijken zijn de tralieliggers uit de breedplaat getrokken en zijn de uiteinden van de koppelwapeningsstaven over een beperkte lengte uit de druklaag getrokken.

Krachtenverdeling in de vloer

In het midden van de vloer was een positief buigend moment aanwezig (en dus trek aan de onderzijde, druk aan de bovenzijde). Het maximale veldmoment bevond zich ongeveer ter plaatse van de bezwiken plaatnaad.

Een positief moment leidt tot een trekkracht in de onderzijde van de vloer en dus in de wapening in de breedplaat. De eerdergenoemde koppelstaven dienen ervoor om deze trek-



8

kracht te kunnen overdragen tussen twee naast elkaar gelegen platen. Om de krachtoverdracht plaats te kunnen laten vinden, moet de trekkracht in de wapening in de breedplaten worden overgedragen naar de koppelstaven.

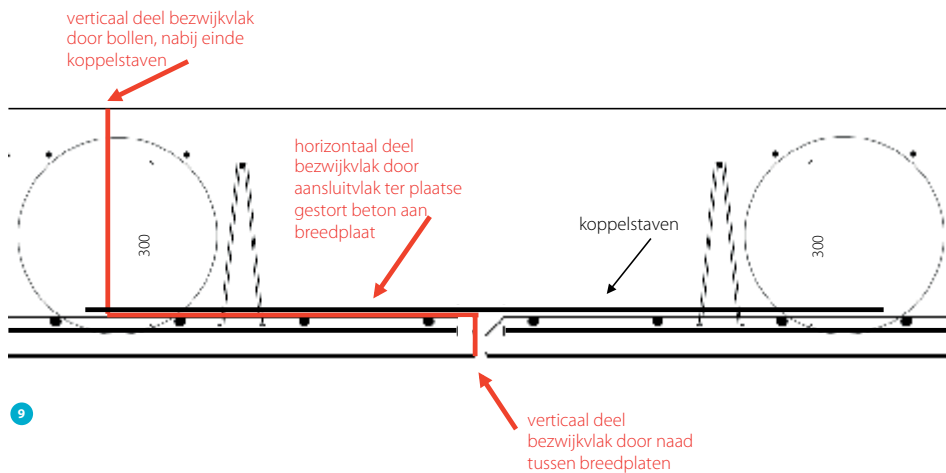
Ten behoeve van de benodigde krachtoverdracht zijn voldoende koppelstaven nodig, met genoeg laslengte met de wapening in de breedplaat. Omdat de koppelstaven in de druklaag zijn opgenomen, is de sterkte van de overlappingslas ook afhankelijk van de schuifsterkte in het aansluitvlak tussen breedplaat en druklaag ter plaatse van de overlappingslas. Daarnaast is het mogelijk dat door het direct op de breedplaten leggen van de koppelstaven, de verankering van deze staven aan het omhullende beton minder capaciteit zou kunnen hebben.

Beoordeling

Er bestonden vooral twijfels over de momentweerstand in het veld van de vloer ter plaatse van de langsnaden tussen de breedplaten. Deze weerstand is in de onderzoeken beoordeeld, zowel rekenkundig als op basis van experimenteel onderzoek.

Rekenkundig

De constructieve berekeningen van de draagconstructie zijn nauwkeurig beoordeeld. Daarbij zijn een aantal onjuistheden



- 7 Breedplaten van de druklaag afgepeld
bron foto 7a: Adviesbureau Hageman;
foto 7b: OVW
- 8 Verloop scheur ter plaatse van de plaatnaad
bron: TNO
- 9 Krachtoverdracht ter plaatse van plaatnaad
bron: TNO

aan het licht gekomen. Dit werd bevestigd door controleberekeningen, onder meer aan de hand van de geldende norm NEN-EN 1992-1 en een additionele controle volgens *fib* Model Code 2010 (dit laatste specifiek bij het onderzoek van TNO). Om de oorzaak van de instorting te achterhalen is er door TNO ook gekeken naar de belastingssituatie ten tijde van de instorting, gecombineerd met een inschatting van de capaciteit op basis van engineering judgement door TNO en de opsteller van de *fib* Model Code 2010.

In de detailberekening van de vloeren is een aantal zaken niet getoetst, zoals de afschuifsterkte van het aansluitvlak. Ook zijn enkele parameters voor de laslengte niet in rekening gebracht, zoals voor het bundelen van staven en het 'koud' op de plaat leggen van de staven.

Opgemerkt wordt dat bij een dergelijke berekening het aansluitvlak tussen de breedplaatvloer en de druklaag als 'glad' had moeten worden aangemerkt, omdat het oppervlak na storten niet kon worden opgeruwd. Uit de door Adviesbureau Hageman uitgevoerde proeven bleek dat vanwege het gebruik van zelfverdichtend beton bij de fabricage van de betreffende vloeren men beter uit kan gaan van 'zeer glad', zoals ook aangegeven in VARCE 12, vraag 39 [5].

Dat de hechting van het contactvlak slecht was, bleek overigens ook uit betonkernen uit het puin van de ingestorte parkeergarage, die in het onderzoek van de OVW door SGS INTRON zijn geanalyseerd.

Experimenteel onderzoek

Bij het onderzoek van Adviesbureau Hageman is zoals gezegd ook gebruikgemaakt van beproevingen in het Structures Laboratory Eindhoven. Er zijn twee vloervelden nagemaakt, elk met een afmeting van $5 \times 6 \text{ m}^2$. Uit deze vloervelden zijn in totaal tien proefstukken gezaagd met een lente van 3,8 m en een breedte van 0,8 m. Deze proefstukken varieerde wat betreft koppelwapening en bolconfiguratie.

De proefstukken zijn beproefd met een vierpuntsbuigproef. Het bezwijkgedrag van de proefstukken kwam onderling redelijk goed overeen. Alle proefstukken zijn bezweken door het ontstaan van een scheur in het aansluitvlak tussen de breed-

plaat en de druklaag (foto 10). De in deze scheur aanwezige tralieligger is bij het bezwijken uit de breedplaat getrokken. De capaciteit van het aansluitvlak bleek daarbij in alle gevallen maatgevend voor de momentweerstand van het detail.

Naast de eerder beschreven proeven zijn ook langsafschuifproeven uitgevoerd, waarbij een druklaag is gestort op een breedplaat met een lengte van 3 m, dus zonder naad. Bij de voor deze proeven vervaardigde proefstukken zonder tralieliggers is gebleken dat de hechting tussen de druklaag en de breedplaat zeer beperkt was.

De proeven hebben laten zien dat er een groot verschil is tussen de momentweerstand op basis van het volledig benutten van de wapening (uitgaande van gemiddelde materiaaleigenschappen bedroeg die 260 tot 300 kNm) en de momentweerstand die gevonden wordt in de proeven (100 kNm).

Analyse oorzaak

Zoals gezegd zijn er drie belangrijke criteria voor een voldoende krachtoverdracht in de naad: de treksterkte van de koppelwapening, de verankeringslengte, en de afschuifsterkte in het aansluitvlak.

Afschuifsterkte

De afschuifsterkte van het aansluitvlak ter plaatse van kritische de naad was onvoldoende. Dit bleek uit het verloop van het bezwijkvlak, de berekeningen én de proefresultaten. Die laatste lieten zien dat de verbinding niet de constructieve capaciteit heeft om de koppelwapening op de breedplaten of de wapening in de breedplaten tot bezwijken te krijgen. Volgens TNO en Adviesbureau Hageman was dit de belangrijkste oorzaak van het bezwijken.

Belangrijke oorzaak van de onvoldoende afschuifsterkte is waarschijnlijk het gladde oppervlak van de aansluiting vanwege toepassing van zelfverdichtend beton. In tegenstelling tot normaal beton is het oppervlak zeer glad, zeker als dat niet wordt opgeruwd, wat hier het geval was.



10

Een andere factor die volgens alle onderzoekers een rol speelde bij de onvoldoende afschuifsterkte was een gebrek aan goed verankerde wapening die de breedplaat en de druklaag met elkaar verbindt, zoals tralieliggers. Bij de onderhavige vloeren lagen deze liggers echter relatief ver van de rand af. Een scheur in het aansluitvlak die begint ter plaatse van de naad kan dan relatief ver open gaan staan, alvorens de wapening van de tralieligger effectief wordt.

Verankeringslengte

Ten aanzien van de verankeringslengte van de koppelstaven bestaat een verschil van inzicht tussen de onderzoekers. Het verloop van het bezwijkvlak duidt volgens zowel Hageman als TNO op het bezwijken als gevolg van onvoldoende capaciteit van het aansluitvlak en niet op bezwijken als gevolg van onvoldoende lengte van de koppelstaven. Ze concluderen weliswaar dat deze lengte volgens de normen mogelijk onvoldoende was om de maximale kracht over te kunnen dragen, maar dat deze door lagere aanwezige spanning in de staven ten tijde van de instorting (nog niet alle belasting was aanwezig) niet noodzakelijkerwijs kritisch was.

De OVV is daarentegen van mening dat in het ontwerp aanzienlijk langere wapeningsstaven nodig waren. Volgens de OVV was zelfs een doorlopende (koppel)wapening nodig.

Adviesbureau Hageman heeft in een aanvullende rapportage, dat het bureau heeft geschreven in opdracht van het ministerie van BZK, laten weten het niet eens te zijn met die conclusie. Het bureau baseert zich daarbij onder meer op het eerdergenoemde experimenteel onderzoek maar ook op vervolgonderzoek dat recent op de TU/e is uitgevoerd. Over de inhoud van deze rapportage is overeenstemming in een klankbordgroep van BZK ¹⁾ [4].

Oriëntatie platen

Een van de belangrijke conclusies van de OVV was dat de instorting het gevolg was van de overspanningsrichting van de breedplaten, namelijk dwars op de langste overspanning van de vloer in plaats van evenwijdig eraan, een voor dit vloersysteem meer gebruikelijke oriëntatie. Dit resulteerde in plaatnaden ter plaatse van het maximale moment in de vloer, waardoor de naad extra kritisch werd. De benodigde ontwerp- en detaileringsaanpassingen zijn niet afdoende beschouwd. Deze problemen hadden volgens de OVV voorkomen kunnen worden bij een andere ontwerpkeuze.

¹⁾ In deze klankbordgroep hebben zitting: TNO, Vereniging Bouw- en Woningtoezicht Nederland, Bouwend Nederland, VNconstructeurs, Bond Federatie van Betonfabrikanten (Betonhuis), TU Delft, Rijksvastgoedbedrijf en Adviesbureau ir. J.G. Hageman.

Hageman laat in [4] weten dat ook bij andere plaatconfiguraties de plaatnaden een significant positief moment hadden moeten weerstaan.

Trigger

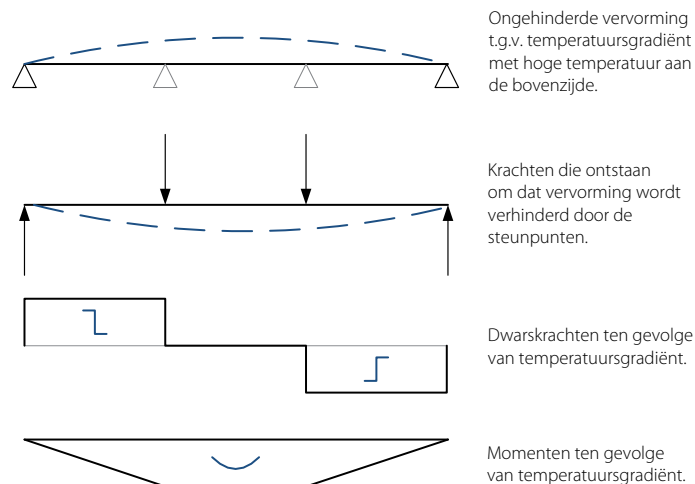
De onderzoekers zijn ook nagegaan waarom de vloer juist op 27 mei is ingestort, circa vier maanden nadat de vloer was aangebracht. Er was geen sprake van een belastingstoename; doordat de parkeergarage nog niet in gebruik was, was de veranderlijke belasting nog niet aanwezig.

De reden moet worden gezocht in de omgevingsfactoren. Het was die dag bijzonder warm, warmer dan op enige dag ervoor sinds het storten van de betreffende vloer. Door de zoninstraling ontstond een temperatuurverschil over de dikte van de vloer. Vanwege de verhinderde vervorming door de kolommen, heeft dit geresulteerd in extra trekspanningen aan de onderzijde van de vloer nabij de betreffende naad of een toename van de rotatie, als door de aanwezige belasting de momentweerstand al was bereikt.

De opwarming was niet de oorzaak, maar wel de trigger.

Tot slot

In de onderzoeken zijn diverse andere mogelijke oorzaken onderzocht. Ook zijn er diverse zaken bekeken die tijdens de uitvoering hebben gespeeld. Voorbeelden hiervan zijn plassen op de vloer, scheurvorming rond de kolommen, het 'schrikken' van de vloeren en het hoogteverschil tussen de breedplaten. Alles beschouwend is volgens de onderzoekers de meest aannemelijke oorzaak dat daar waar bij de plaatnaad een groot positief moment aanwezig was, de trekkracht in de wapening in de breedplaten ter plaatse van de naad niet van de ene naar de andere breedplaat kon worden overgedragen. ☒



11

LITERATUUR

- 1 Rapport 2017 R11127, Onderzoek naar de technische oorzaak van de gedeeltelijke instorting van de in aanbouw zijnde parkeergarage P1 Eindhoven Airport. Delft: TNO, 22 september 2017.
- 2 Rapport 9663-1-0, Bezijken parkeergarage Eindhoven Airport – Analyse naar de oorzaak. Rijswijk: Adviesbureau ir. J.G. Hageman, 25 september 2017.
- 3 Bouwen aan constructieve veiligheid - Lessen uit instorting parkeergebouw Eindhoven Airport. Den Haag: Onderzoeksraad voor Veiligheid, oktober 2018.
- 4 Onderzoek constructieve veiligheid breedplaatvloeren in bestaande bouwwerken opgeleverd na 1999. Rijswijk: Adviesbureau ir. J.G. Hageman B.V., 5 december 2018.
- 5 Varce 12 Detaillering aansluitvlak breedplaatvloeren, Vraag 39 aansluitvlak breedplaatvloeren. *Cement* 2017/7.

Tekortkomingen proces

De Onderzoeksraad voor Veiligheid (OVV) heeft in zijn onderzoek aandacht besteed aan de wijze waarop de bouwsector omgaat met (constructieve) veiligheid. De OVV heeft daarbij tekortkomingen in de uitvoeringsfase geconstateerd maar die waren niet hoofdzakelijk de oorzaak van de instorting. De OVV is zeer kritisch over het proces in de bouwsector. Zo is een van de conclusies dat de bouw onvoldoende leert van ongevallen, ondanks bevindingen uit eerdere onderzoeken van de OVV. Bouwwerken worden nog te veel als uniek beschouwd. Daarnaast wordt de schuldcultuur genoemd als probleem.

Partijen lijken na een incident meer bezig te zijn met het afwentelen van de schuld dan dat zij centraal stellen wat zij zelf kunnen bijdragen aan het verbeteren van de veiligheid. Die schuldcultuur moet worden omgezet in een leercultuur. Ook de versnippering wordt als probleem gezien. Een bouwproject wordt uitgevoerd door verschillende ondernemingen, en dat worden er eerder meer dan minder. Door deze opdeling wordt de kans op fouten groter. Dit onder meer door de diffuse verantwoordelijkheidsverdeling. Ook wordt de bouw de focus op de laagste prijs kwalijk genomen.

Tot slot stelt de OVV dat de sector niet zonder publiek toezicht kan en dat er vooruitlopend op de wet Kwaliteitsborging voor het bouwen een vacuüm is ontstaan in het toezicht. Anticiperend op de gevolgen van dit wetsvoorstel, hebben veel gemeenten gesneden in hun afdeling bouw- en woningtoezicht. De bouwsector slaagt er volgens de Onderzoeksraad voor Veiligheid al met al onvoldoende in om het proces van ontwerp en uitvoering zo te organiseren dat constructieve veiligheidsrisico's goed worden beheerst.