



Praktijkvoorbeeld parkeergarage P1 Eindhoven Airport

Forensic engineering instorting parkeergarage

Op 27 mei 2017 is de in aanbouw zijnde parkeergarage P1 op Eindhoven Airport gedeeltelijk ingestort. Om de oorzaak van deze instorting te achterhalen, heeft Eindhoven Airport aan TNO opdracht gegeven voor een onderzoek [2]. Ten behoeve van dit onderzoek heeft TNO gebruikgemaakt van de methodiek van forensic engineering.

Forensic engineering

Forensic engineering is een methodiek waarbij op een gestructureerde manier oorzaken van schade of ongevallen kunnen worden herleid. De kracht van deze methodiek zit in het heel gericht verzamelen en analyseren van informatie. Enerzijds wordt hiermee voorkomen dat onnodig veel onderzoek wordt uitgevoerd en anderzijds wordt de kans op tunnelvisie, met een onjuiste conclusie, sterk verkleind.

In het artikel 'Schadeonderzoek met forensic engineering' in *Cement* 2016/1 [1] is deze methodiek beschreven. Het onderhavige artikel geeft een praktijkvoorbeeld van een dergelijk



ir. Huibert Borsje,
ir. Gerrie Dieteren
TNO

1 Ingestorte parkeergarage Eindhoven Airport
2 Stroomschema forensisch engineering

Meerdere onderzoeken

Parallel aan het onderzoek van TNO heeft Adviesbureau ir. J.G. Hageman, in opdracht van BAM, ook een onderzoek uitgevoerd [3]. Deze twee onderzoeken, die onafhankelijk van elkaar zijn uitgevoerd, zijn beide tot dezelfde conclusie gekomen wat betreft de oorzaak van de instorting. Meer over deze onderzoeken staat in het artikel 'Oorzaken instorting parkeergarage Eindhoven', elders in dit nummer. Daarin wordt ook ingegaan op het onderzoek van de Onderzoeksraad voor Veiligheid.

Gezien de overeenkomst in het onderwerp bestaat er overlap tussen dat artikel en het onderhavige artikel.

constructief ontwerp aanwezig zijn en die worden dan als mogelijke oorzaken verder geanalyseerd. Eventuele onvolkomenheden in de uitvoering worden via deze benadering niet geïdentificeerd, waardoor onzekerheid blijft over de compleetheit van het aantal mogelijke oorzaken.

Bij de bottom-upbenadering ligt de nadruk in fase 1 van het onderzoek op het analyseren van het ingestorte deel van het gebouw (fase 1C). Daarbij wordt eerst geanalyseerd welke (onder)delen van het gebouw zijn bezweken. Op basis van de bezweken (onder)delen wordt een overzicht opgesteld van mogelijke oorzaken, die vervolgens nader worden onderzocht. Indien dit op een juiste wijze wordt uitgevoerd, wordt een compleet overzicht van mogelijke oorzaken verkregen.

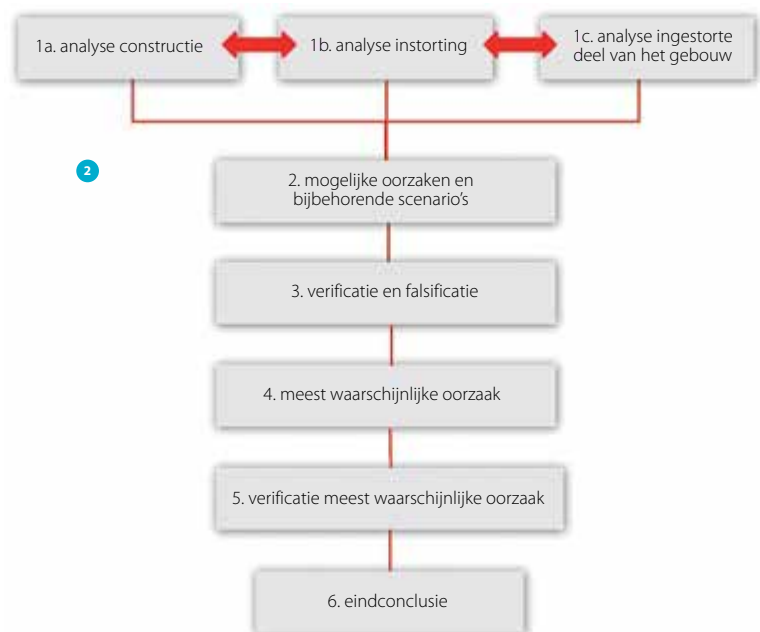
onderzoek: de instorting van de parkeergarage op Eindhoven Airport (foto 1).

Structuur van het onderzoek

Het schadeonderzoek met forensisch engineering is uitgevoerd volgens de structuur die is weergegeven in het stroomschema in figuur 2. Dit is de structuur die al is besproken in *Cement* 2016/1 [1], echter nu aangevuld met een 'Analyse van de instorting'. Er waren namelijk getuigenverklaringen en CCTV-opnamen beschikbaar die belangrijke informatie gaven over de instorting zelf.

De hoofdpunten van deze structuur zijn terug te vinden in vrijwel alle onderzoeken naar de oorzaak van instortingen. Waarin forensisch engineering zich onderscheidt, is de bottom-upbenadering in plaats van de veelal toegepaste top-downbenadering.

Bij de top-downbenadering wordt de nadruk in fase 1 van het onderzoek gelegd op het analyseren van de constructie (fase 1A). De kern van het onderzoek ligt daarbij in het identificeren van mogelijk zwakke/kritische punten in de constructie en die vervolgens beschouwen als mogelijke oorzaken. Hiervoor wordt veelal nagegaan welke kritische punten er in het





3

- 3 Overzicht van het gebouw vóór de instorting
- 4 Legplan breedplaten in het ingestorte deel van het gebouw
- 5 Bezijsvlakken in vloer 4 en bezwken kolommen (rood)

In figuur 4 is het legplan gegeven van de individuele elementen van de bollenplaatvloer in het deel van de constructie waar de instorting heeft plaatsgevonden. Ten behoeve van het afschot in de vloer zijn de elementen tussen langснаad 1 en 5 onder een helling gelegd. Langснаad 3 is daarbij het hoogst gepositioneerd, 125 mm hoger dan de naden 1 en 5.

Bouw

De bouw is begonnen in de zomer van 2016. Ten tijde van de instorting was de ruwbouw afgerond en waren afbouw- en coatingwerkzaamheden in uitvoering. Ten behoeve van de vervaardiging van de vloeren zijn eerst de prefab breedplaten op een ondersteuningsconstructie geplaatst. Vervolgens is daarop de laag ter plaatse gestort beton aangebracht. Na het bereiken van een druksterkte van het ter plaatse gestorte beton van circa 18 MPa heeft men de vloeren laten schrikken. Dit schrikken houdt in dat de ondersteuning onder de vloer eerst wordt losgedraaid en vervolgens weer handvast wordt aangedraaid.

Gedrag van de constructie (fase 1A)

Het werkelijke gedrag van de constructie moet altijd worden geanalyseerd, ongeacht of wordt gekozen voor een top-down- of een bottom-upbenadering. Om het werkelijke gedrag van de constructie op een goede manier te kunnen doorgronden, moet de constructie ‘van wieg tot graf’ worden geanalyseerd. Deze analyse moet gericht zijn op drie hoofdaspecten:

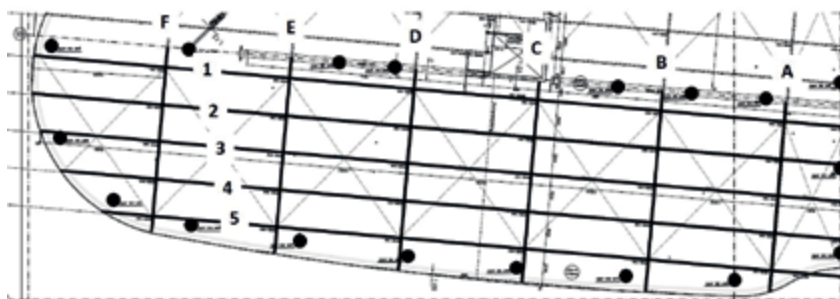
- opbouw van de constructie;
- wbouw van de constructie;
- optredende belastingen en omgevingscondities.

Opbouw

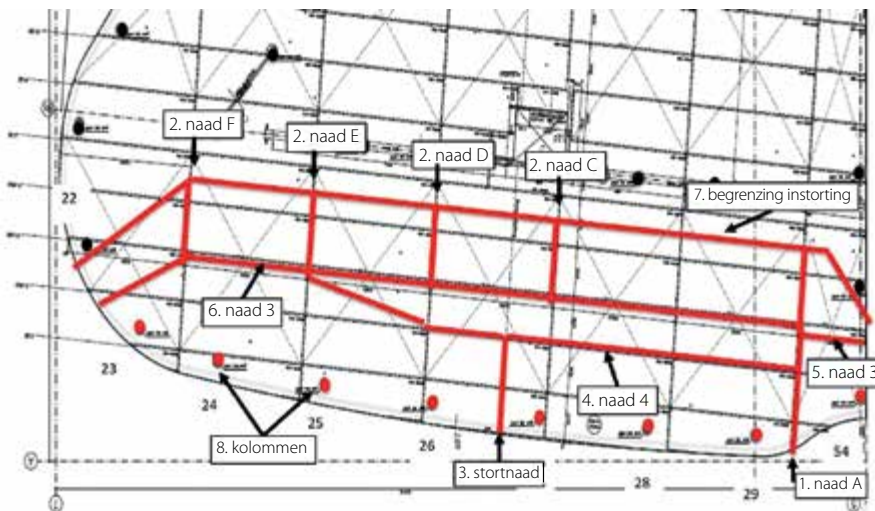
De parkeergarage telt vier verdiepingen, met een totale lengte van circa 120 m en breedte van circa 65 m. Halverwege de lengterichting van het gebouw is over de volle breedte een dilatatie aangebracht (fig. 3). De bouwdeelen aan beide zijden van de dilatatie beschikken elk over eigen stabiliteitsvoorzieningen. Deze bestaan uit een stabiliteitskern van prefab-betonwanden rondom het trappenhuis en twee stabiliteitsbokken.

Het gebouw is gefundeerd op betonpoeren met daaronder in de grond gevormde betonnen funderingspalen. Elke verdieping wordt ondersteund door kolommen, vervaardigd van ter plaatse gestort gewapend beton, met veelal een diameter van 450 mm.

De verdiepingvloeren zijn bollenplaatvloeren met een totale dikte van 450 mm. Deze vloeren zijn opgebouwd uit prefab-betonnen breedplaten met kunststofbollen, met daarop een laag ter plaatse gestort beton. De prefab breedplaten hebben een basisafmeting van 3,0 x 10,0 m² en een dikte van 70 mm. Aan de bovenzijde steken tralieliggers uit de breedplaten, die zorgdragen voor de bevestiging van de bovenwapening en voor de koppeling tussen de breedplaten en het ter plaatse gestorte beton. Tevens zorgt het geheel van tralieliggers en bovenwapeningsnet ervoor dat de bollen tijdens het storten van het ter plaatse gestorte beton niet opdrijven.



4



5

Van het ingestorte deel van het gebouw is het storten van het beton afgerond op 1 februari 2017. Op 9 februari 2017 is de onderstempeling onder vloer 3 verwijderd. De onderstempeling onder vloer 4 is ongeveer 28 dagen na het storten van het beton verwijderd, circa drie maanden voor de instorting.

Belastingen en omgevingscondities

Ten tijde van de instorting was in het ingestorte deel van het gebouw geen materiaal en/of materieel opgeslagen. Op de dag van de instorting was sprake van een hoge buitentemperatuur met vrijwel de gehele dag zonneshijn. Voertuigen hadden tot aan de instorting nog niet in de parkeergarage gereden.

Analyse van de instorting (fase 1B)

Na de instorting is met getuigen gesproken die in de buurt van het MPB aanwezig waren. Vier van deze getuigen hadden ten tijde van de instorting direct zicht op het gebouw. Zij verklaarden unaniem dat het gebouw van boven naar beneden is ingestort.

In de omgeving van het MPB bevonden zich vijf CCTV-camera's die opnamen hebben gemaakt van een deel van de instorting. Helaas waren op de individuele camerabeelden slechts delen van de constructie zichtbaar en werd daarmee geen compleet beeld van de instorting verkregen.

Ten aanzien van de instorting gaven deze CCTV-beelden de volgende informatie ten aanzien van de start van de instorting:

- Vloer 4 begon als eerste te verplaatsen. Deze vloer roteerde om de buitenste kolomrij, waarbij de buitenrand van de vloer, het deel voor de kolommen, omhoog kwam en het vloerdeel achter de kolommen, gelijktijdig, omlaag ging.
- De overige vloeren bezweken vervolgens op eenzelfde wijze als beschreven bij vloer 4.

Op basis van de combinatie van getuigenverklaringen en CCTV-camera's kon worden geconcludeerd dat de instorting is gestart in vloer 4.

Analyse van het ingestorte deel van het gebouw (fase 1C)

De analyse van het ingestorte deel was erop gericht twee aspecten van de instorting nader te kunnen onderzoeken:

- Het startpunt van de instorting. De instorting is gestart in vloer 4. Dat betekent dat het startpunt van de instorting gesitueerd moet zijn ter plaatse van een van de bezwijkvlakken in vloer 4 of in een bezweken kolom onder vloer 4. Daarom zijn alle bezwijkvlakken in vloer 4 en de bezweken kolommen onder vloer 4 in kaart gebracht (fig. 5).
- De wijze van instorten. De locatie en de positionering van de

verschillende delen van de constructie na de instorting kan informatie verschaffen over de wijze waarop de constructie is ingestort. De wijze van instorten kan vervolgens weer informatie geven over het startpunt van de instorting.

Vanwege instortingsgevaar van het niet-ingestorte deel van het gebouw was alleen een inspectie op afstand mogelijk. De inspectie heeft daarom, in hoofdzaak, plaatsgevonden met drones en vanuit een hangbak aan een kraan.

Uit het onderzoek naar de bezwijkvlakken in vloer 4 is het volgende naar voren gekomen (fig. 5):

- De begrenzing van de instorting bevond zich in het ter plaatse gestorte beton tussen langsnaad 1 en 2, circa 3 m voor de kolomrij in het niet-bezweken deel van de parkeergarage. Ter plaatse van de breedplaten bevond de begrenzing zich in hoofdzaak in langsnaad 1 van de breedplaten vanaf de kolomrij.
- Aan beide uiteinden van de instorting boog de begrenzing af richting de voorgevel, vlak voor een kolom langs.
- In lengterichting bevond zich nabij naad 3 een bezwijkvlak dat over nagenoeg de gehele lengte van het ingestorte deel doorliep. Nabij langsnaad 4 bevond zich ook een bezwijkvlak, maar dat bezwijkvlak liep minder ver door.
- In het achterste deel van vloer 4 bevond zich in breedterichting in nagenoeg elke plaatnaad een bezwijkvlak. In het voorste deel bevond zich in breedterichting alleen een bezwijkvlak nabij de uiteinden en halverwege de lengte.

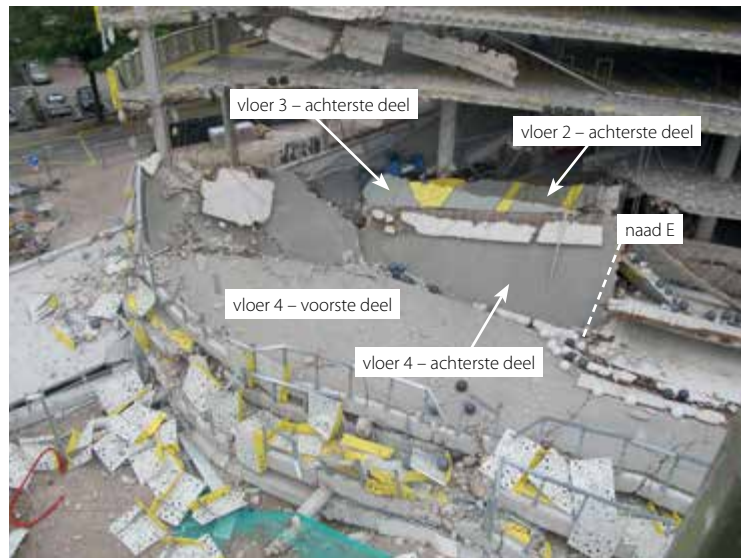
Uit het onderzoek naar de locatie en de positie van de vloeren is het volgende naar voren gekomen (foto 6 en 7):

- Het voorste deel van vloer 4 lag over de volledige lengte op vloer 3, met daaronder vloer 2 en 1.
- Het achterste deel van vloer 4 lag over het deel rechts van naad E ondersteboven. Dit deel lag deels op het voorste deel van vloer 4 en onder het achterste deel van vloer 3. Het achterste deel van vloer 3 lag weer onder het achterste deel van vloer 2.
- Het achterste deel van vloer 4 stond over het deel links van naad E schuin omhoog, tegen vloer 3, die vervolgens weer tegen vloer 2 stond.

Mogelijke oorzaken (fase 2)

De mogelijke oorzaken van de instorting zijn bepaald met de bottom-upbenadering. Dit is als volgt uitgevoerd:

- Uit fase 1B bleek dat de instorting is gestart in vloer 4. Eventuele onvolkomenheden in vloer 1 tot en met 3 konden daarmee worden uitgesloten als mogelijke oorzaken van de instorting.
- Het bezwijken van vloer 4 moet zijn veroorzaakt doordat een



6

7

- 6 Achterste deel van de vloeren ondersteboven, met vloer 4 onder vloer 2 en 3
- 7 Achterste deel van de vloeren links van naad E schuin tegen elkaar, met vloer 4 voor vloer 3 en 2
- 8 Bezwijkmechanisme bij start instorting in begrenzing van het ingestorte deel
- 9 Bezwijkmechanisme bij start instorting in langснаad 3
- 10 Verloop bezwijkvlak nabij naad 3
- 11 Verloop bezwijkvlak nabij naad 3 zoals waargenomen in het werk (onderaanzicht vloer)

van de kolommen is bezweken of doordat vloer 4 zelf is bezweken. Daarom zijn alle bezweken kolommen en alle bezwijkvlakken in vloer 4 in kaart gebracht.

Alle bezweken kolommen en alle bezwijkvlakken in vloer 4 zijn uiteindelijk geïdentificeerd als mogelijk startpunt van de instorting. Daarmee is een compleet overzicht verkregen van alle mogelijke startpunten van de instorting. Vanuit het geïdentificeerde startpunt kan vervolgens worden vastgesteld wat de oorzaak is geweest van de instorting.

Verificatie en falsificatie (fase 3)

Alle in fase 2 geïdentificeerde, mogelijke startpunten van de instorting zijn stuk voor stuk geanalyseerd via verificatie en falsificatie. Verificatie betekent dat de waarnemingen een mogelijk startpunt bevestigen en falsificatie betekent dat de waarnemingen een mogelijk startpunt tegenspreken. Hiermee wordt niet alleen een overzicht gekregen van de startpunten

waar de instorting daadwerkelijk kan zijn begonnen, maar wordt ook de uitsluiting van de onwaarschijnlijke startpunten onderbouwd.

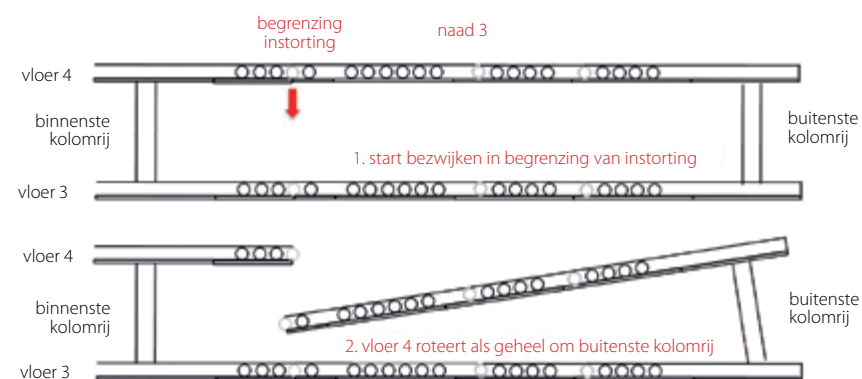
Voor de analyse van de mogelijke startpunten is gebruikgemaakt van de in fase 1C verkregen informatie over de bezwijkvlakken in vloer 4 en over de locatie en de positionering van de verschillende onderdelen van de constructie na de instorting. In het navolgende worden twee voorbeelden van een dergelijke analyse gegeven: de eerste waarbij sprake is van falsificatie van een startpunt en de tweede waarbij sprake is van verificatie van een startpunt.

Falsificatie

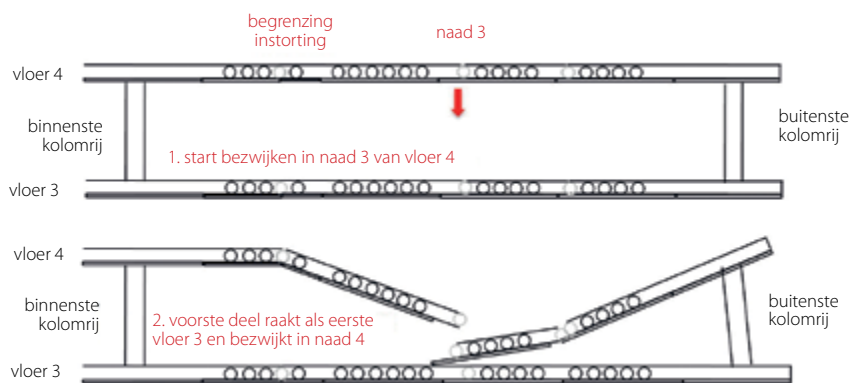
Als de instorting start ter plaatse van de begrenzing aan de achterzijde (nummer 7 in figuur 5), zal het gehele ingestorte deel van vloer 4, tussen de buitenrand en de begrenzing, roteren om de as van de buitenste kolomrij (fig. 8). Indien het gehele vloerdeel omlaag draait, zal de achterzijde van dat deel als eerste vloer 3 raken. Dan is het waarschijnlijk dat vloer 3 in dezelfde zone bezwijkt en eveneens, op vergelijkbare wijze, omlaag zal roteren. Vervolgens zal hetzelfde gebeuren met achtereenvolgens vloer 2 en vloer 1. Bij dit bezwijkmechanisme is het weliswaar mogelijk dat de vloervelden in tweede instantie bezwijken in naad 3 en 4, maar is het zeer onwaarschijnlijk dat het deel van vloer 4 tussen naad 3 en de begrenzing van de instorting afbreekt en vervolgens doordraait en ondersteboven onder vloer 3 en 2 terechtkomt. Op basis hiervan is geconcludeerd dat het zeer onwaarschijnlijk is dat het bezwijkvlak ter plaatse van de begrenzing van de instorting het startpunt is geweest van de instorting van vloer 4.

Verificatie

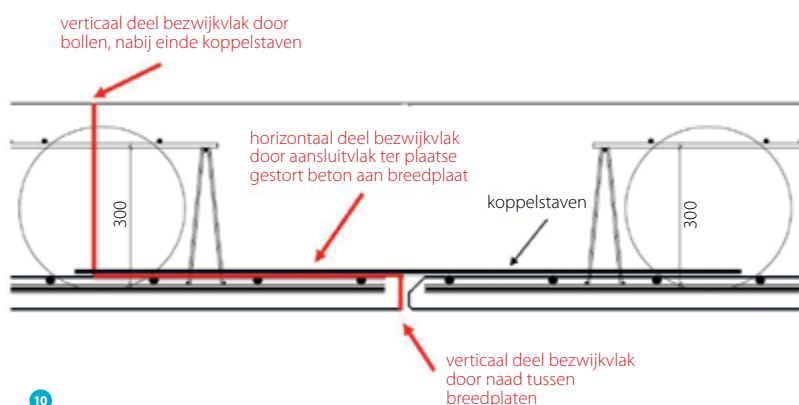
Als de instorting start nabij naad 3, zal het voorste deel van de vloer, tussen de buitenrand en naad 3, roteren om de as van de



8



9



10



11

buitenste kolomrij (fig. 9). Gelijktijdig met het roteren van het voorste deel van de vloer, zal ook het achterste deel van de vloer, het deel van naad 3 tot aan de begrenzing van het ingestorte deel, omlaag roteren. Omdat het achterste deel dat omlaag draait korter is dan het voorste deel, zal het voorste deel als eerste vloer 3 raken. Door de impact van vloer 4 op vloer 3 bezwijkt deze op een vergelijkbare wijze als vloer 4, evenals de daaronder gesitueerde vloeren. Het achterste deel van vloer 3 bezwijkt voordat het achterste deel van vloer 4 op vloer 3 terechtkomt. Daardoor wordt het achterste deel van vloer 4 niet geremd en kan dit deel ongehinderd omlaag komen en doordraaien. Doordat dit ook gebeurt met de daaronder gesitueerde vloeren, kunnen de achterste delen van de vloeren doordraaien en ondersteboven, met vloer 4 onderop, op de grond terechtkomen. Op basis hiervan is geconcludeerd dat het bezwijkvlak in naad 3 een startpunt kan zijn geweest van de instorting.

Meest waarschijnlijke oorzaak (fase 4)

Uit de verificatie en falsificatie van alle mogelijke startpunten van de instorting is naar voren gekomen dat de instorting gestart moet zijn in naad 3 van vloer 4, in het deel tussen dwarsnaad A en F. Er zijn geen andere mogelijke startpunten geïdentificeerd die aansluiten bij één de locaties van de bezwijk-

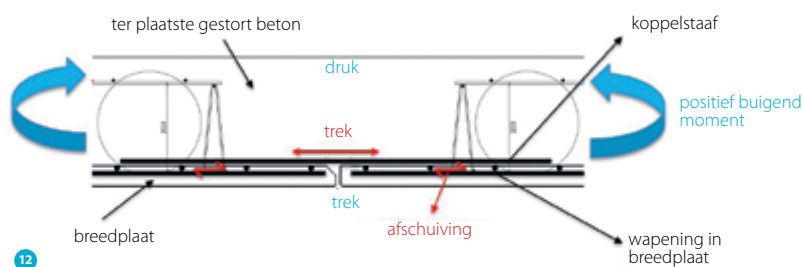
vlakken in vloer 4 én de positionering van de onderdelen van het ingestorte deel van het gebouw.

Over de wijze waarop naad 3 is bezweken, is tijdens het onderzoek slechts beperkte informatie beschikbaar gekomen, omdat deze naad over het grootste deel van de lengte was gepositioneerd onder vloer 2 en 3. Op basis van de wel beschikbare informatie is het aannemelijk dat het bezwijkvlak als volgt verliep, van onder naar boven (fig. 10):

- eerst verticaal in naad 3 tussen de breedplaten;
- dan horizontaal via het aansluitvlak van het ter plaatse gestorte beton aan de breedplaat, tot in de eerste bollenrij na de tralieligger;
- tot slot verticaal omhoog door het ter plaatse gestorte beton.

In een later stadium, ten tijde van de sloop van de parkeergarage, was het wel mogelijk het betreffende bezwijkvlak in detail te beoordelen (fig. 11). De eerdergenoemde aanname bleek juist te zijn geweest.

Het startpunt van de instorting bevond zich in de zone van de vloer waar in het oorspronkelijke constructief ontwerp de hoogste veldmomenten (positief buigende momenten) waren berekend. Als gevolg van deze buigende momenten was er in die zone sprake van een trekkracht onder in de vloer en een



drukkracht boven in de vloer. Het verloop van het bezwijkvlak in het startpunt van de instorting duidde op een bezwijkmechanisme waarbij de constructie niet in staat was de trekkracht in de wapening van de ene breedplaat over te brengen naar de andere breedplaat.

Verificatie meest waarschijnlijke oorzaak (fase 5)

Teneinde na te gaan of het eerder beschreven bezwijkmechanisme daadwerkelijk de oorzaak is geweest van de instorting, is de aansluiting tussen twee breedplaten in detail nader constructief geanalyseerd.

Als gevolg van het positief buigend moment was er in het onderste deel van de vloer sprake van trekspanningen (fig. 12). De breedplaten waren daartoe van de juiste hoeveelheid wapening voorzien. Ter plaatse van de voegen werd deze trekwapening echter onderbroken. De trekspanningen in de breedplaat moesten ter plaatse van de naad tussen de breedplaten worden overgebracht van de ene breedplaat naar de andere en daarvoor was koppelwapening voorzien. Deze koppelwapening was in het onderhavige geval uitgevoerd door het plaatsen van wapeningsstaven op de breedplaten ter plaatse van de naad.

De sterkte van de koppeling ter plaatse van deze voeg werd bepaald door:

- de verankeringscapaciteit van de koppelstaven / overdracht lengte naar de wapening in de breedplaat;
- afschuifsterkte van het aansluitvlak tussen breedplaat en ter plaatse gestort beton;
- de capaciteit/treksterkte van de koppelstaven / wapening in de breedplaat.

Voor het achterhalen van de oorzaak van het bezwijken is een constructieve analyse uitgevoerd, die zich heeft toegespitst op de situatie ten tijde van de instorting, dus met de op dat moment werkelijk aanwezige belasting door eigen gewicht en temperatuuffecten. Tevens is daarbij niet uitgegaan van de rekenwaarden voor de belasting en de capaciteit maar van de gemiddelde waarden. Dit om de werkelijke situatie zo goed mogelijk te benaderen, zonder alle in het ontwerp ingebouwde

Leren van

Het doel van forensic engineering was uiteraard om op een gestructureerde wijze de oorzaak van de instorting te achterhalen. Echter, minstens zo belangrijk is het om uit deze case lering te trekken, om te voorkomen dat een dergelijke instorting niet nog eens kan optreden. De heer Ratay, voorzitter van de IABSE-werkgroep Forensic Engineering, heeft in dit kader eens aangegeven: "We don't just pay-up, rebuild, and walk away – we delve, we learn, and we improve". Dat dit voor het onderhavige onderzoek zeker het geval is geweest, blijkt wel uit de noodzakelijke herbeoordeling die inmiddels bij meerdere vergelijkbare constructies heeft plaatsgevonden, na het bekend worden van de resultaten van het onderzoek.

veiligheden. Uit deze constructieve analyse is naar voren gekomen dat ten tijde van de instorting de benodigde capaciteit van het aansluitvlak 0,76 tot 1,52 maal de in het werk aanwezige capaciteit van het aansluitvlak bedroeg. Maatgevend hierbij was mechanisme b), de afschuifsterkte van het aansluitvlak. Op basis hiervan is geconcludeerd dat de instorting vrijwel zeker is veroorzaakt door een te lage capaciteit van het aansluitvlak tussen het ter plaatse gestorte beton en de breedplaat ter plaatse van naad 3.

Conclusie

Bij het onderzoek naar de oorzaak van de gedeeltelijke instorting van de parkeergarage is gebruikgemaakt van de methodiek forensic engineering. Voor het opstellen van een overzicht van mogelijke oorzaken is daarbij gekozen voor een bottom-upbenadering. Deze benadering lijkt op het eerste gezicht omslachtig en uitgebreid, omdat daarbij relatief veel mogelijke oorzaken worden geanalyseerd. Echter, door die gestructureerde aanpak van het onderzoek was het mogelijk niet alleen te concluderen wat de oorzaak was van de instorting, maar ook te concluderen dat er geen andere mogelijke oorzaken waren. ☒

LITERATUUR

- Borsje, H., & Van Zon, Q.F., Schadeonderzoek met forensic engineering, *Cement* 2016/1.
- 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.
- Rapport 9663-1-0, Bezwijken parkeergarage Eindhoven Airport – Analyse naar de oorzaak. Rijswijk: Adviesbureau ir. J.G. Hageman, 25 september 2017.