
Wat is forensic engineering?

Met forensic engineering betrouwbaar
de oorzaak van falen bepalen



Ontstaat er een schade aan een constructie of stort een constructie (gedeeltelijk) in, dan kan 'forensic engineering' een rol gaan spelen. Forensic engineering wordt in de praktijk gebruikt als aanduiding voor onderzoek naar de oorzaak van dergelijk falen. Het proces van het onderzoek is van groot belang; het moet leiden tot betrouwbare uitkomsten. Bij een onbetrouwbaar proces is het immers mogelijk dat niet de juiste oorzaak wordt gevonden of niet de juiste partijen verantwoordelijk worden gehouden.

Forensic engineering moet leiden tot betrouwbare uitkomsten met betrekking tot de oorzaak van falen van een constructie.

Forensic engineering heeft ook nog een hoger doel: het leren van wat is misgegaan, om ervoor te zorgen dat het niet nog een keer kan gebeuren. Daarmee kunnen toekomstige faalkosten, (nieuw) persoonlijk letsel of zelfs het vallen van dodelijke slachtoffers worden voorkomen. Een sprekend voorbeeld hiervan is het onderzoek naar de oorzaak van het gedeeltelijk instorten van een parkeergarage in Eindhoven in 2017 [1] (foto 2). Uit het onderzoek bleek dat de oorzaak lag in een onjuist detail in het vloersysteem. Dat detail bleek ook in veel andere gebouwen met hetzelfde vloersysteem aanwezig te zijn, waardoor die constructies niet voldeden aan het in Nederland vereiste veiligheidsniveau. Toen dit bekend werd, konden bij die constructies preventieve maatregelen worden getroffen om eventueel toekomstig falen te voorkomen.

Bij zaken met slachtoffers blijkt het daarnaast heel belangrijk dat er op een begrijpelijke manier wordt gereconstrueerd wat er precies is gebeurd. Dat is voor nabestaanden zeer belangrijk in het verwerkingsproces (zie kader 'Didcot').

auteurs



IR. HUIBERT BORSJE

Forensisch Ingenieur
TNO



DR. IR. KAREL TERWEL

Projectleider /
Raadgevend Ingenieur /
Universitair Docent
IMd Raadgevende
Ingenieurs / TU Delft

Doel van het onderzoek

Bij de start van een onderzoek naar de oorzaak van het falen van een constructie moet duidelijk worden afgesproken wat het doel is van het onderzoek en tot welke diepgang het onderzoek moet worden uitgevoerd. Dit artikel gaat over onderzoeken met als doel het achterhalen van de technische oorzaak van het falen. Dat kan dan vervolgens weer de basis zijn voor een onderzoek naar bijvoorbeeld degene die verantwoordelijk is voor het falen, wat weer een heel andere expertise van de onderzoekers vereist.

De gewenste diepgang van een onderzoek wordt bepaald door het doel van het onderzoek en de wens van de opdrachtgever. Een voorbeeld hiervan is het falen van een moot van de toerit van de Prinses Margriet-tunnel in december 2022 (foto 1) (Meer over de schade in de Prinses Margriet-tunnel staat in het artikel 'Onderzoek naar falen fundering Prinses Margriet-tunnel', in dit nummer). Die moot is omhoog gekomen doordat de opwaartse belasting, de waterdruk tegen de onderzijde van de moot, groter was dan de sterkte van de paalfundering. Uit het onderzoek bleek dat er in de periode voorafgaand aan het falen geen sprake is geweest van een significante verhoging van de waterdruk. Dat betekent dat de sterkte →



DIDCOT

In 2016 werd in Engeland een kolencentrale (Didcot Power Station) ontmanteld. Toen een sloopbedrijf bezig was met de voorbereidingen voor het opblazen van het ovenhuis, is dat gedeeltelijk ingestort (foto 3). Daarbij zijn vier arbeiders omgekomen.

Meer dan vijf jaar na het ongeval stonden er op de nieuwssite van de BBC enkele artikelen over dit ongeval. De politie had hun onderzoek toen nog steeds niet afgerond, zodat nog niet bekend was wat de oorzaak was. In die artikelen stonden twee quotes die het belang van forensic engineering heel treffend weergaven:

- Het belang van het onderzoek voor de sloopbedrijven werd verwoord met: *"Experts around the world need to know why the Didcot Power Station collapse happened so fatal errors are not repeated, specialists have said."* [2]

- Het belang van het onderzoek voor de nabestaanden werd verwoord met een uitspraak van de weduwe van een arbeider die was omgekomen: *"She said a lack of progress in the Thames Valley Police-led probe has been "shocking" and "really hard" to endure."* [3]

van de paalfundering in de tijd is afgenomen, totdat die sterkte onvoldoende werd om de opwaartse belasting op te nemen. In feite is daarmee de oorzaak van het falen vastgesteld. Rijkswaterstaat had echter belang bij een diepgaander onderzoek, om zo ook de oorzaak van de afname van de sterkte van de fundering te kunnen vaststellen.

Een dergelijk stapsgewijs onderzoek naar de oorzaak van falen, waarbij steeds een niveau dieper onderzoek wordt uitgevoerd, wordt ook wel aangeduid als een multi-level onderzoek.

Opzet van het onderzoek

Er zijn meerdere methoden voor het uitvoeren van een onderzoek naar de oorzaak van het falen van een constructie. Op hoofdlijnen heeft elke degelijke methode een vergelijkbare structuur (fig. 4). De kern is dat eerst een overzicht moet worden opgesteld van mogelijke oorzaken (hypothesen; scenario's). Vervolgens moet van elke mogelijke oorzaak

Een hoger doel van forensic engineering is het leren van wat is misgegaan



worden onderzocht of die kan zijn opgetreden (verificatie) of juist niet (falsificatie). Met nadruk wordt er hierbij op gewezen dat niet moet worden gestopt als een mogelijke oorzaak is gevonden. Bij een betrouwbaar onderzoek moeten idealiter alle mogelijke oorzaken worden onderzocht. Enerzijds omdat er soms meerdere oorzaken een rol gespeeld kunnen hebben. Anderzijds omdat een vastgestelde oorzaak pas echt waarde krijgt, als wordt aangetoond dat andere mogelijke oorzaken niet zijn opgetreden.

Naast de vergelijkbare structuur moet elk onderzoek ook enkele standaard onderdelen bevatten.

→ *Belasting én sterkte*. Falen van een constructie betekent altijd:

- de actuele belasting > de actuele sterkte, of
- de actuele sterkte < de actuele belasting.

In feite staat hier twee keer hetzelfde, maar in de beeldvorming gaat het in het eerste geval om een te hoge belasting en in het tweede geval over onvoldoende sterkte. Om te voorkomen dat in de praktijk te snel een (mogelijk verkeerde) conclusie wordt getrokken, is het noodzakelijk om in ieder onderzoek zowel de belasting als de sterkte te beschouwen.

→ *Historische informatie*. In veel gevallen is het falen van een constructie het 'eindstation' van een reeks gebeurtenissen. Om dan de daadwerkelijke oorzaak te achterhalen, is het noodzakelijk om die reeks gebeurtenissen te

reconstrueren en daarbij is historisch informatie een belangrijk onderdeel.

Verder kan het moment van ontstaan van schade van belang zijn. Want bij het waarnemen van een schade geldt niet per definitie dat die schade 'recent' is. Er zijn meerdere voorbeelden van scheuren waarvan werd aangenomen dat ze nieuw waren, waarna werd besloten om rigoureuze maatregelen voor de constructie te treffen. Maar bij een gerichte detailspectie kon later worden vastgesteld dat het toch oude scheuren waren.

Foto 5 geeft een voorbeeld van een scheur die al aanwezig was vóór het aanbrengen van een cementgebonden mortel op het betonoppervlak. De mortel is namelijk naar buiten gedrukt, wat alleen kan worden verklaard door een drukspanning in de mortel. En een drukspanning in de mortel betekent dat de breedte van de scheur kleiner is geworden nadat de mortel was uitgehard.

De verschillen tussen de methoden van onderzoek zitten in de wijze waarop het overzicht van mogelijke oorzaken tot stand komt. De twee meest gangbare methoden zijn de top-down methode en de bottom-up methode, genoemd naar de wijze waarop het overzicht van mogelijke oorzaken tot stand komt.

Bij de top-down methode wordt systematisch de levenscyclus van een constructie geanalyseerd en wordt op basis daarvan een



3 Gedeeltelijk ingestort ovenhuis [2], bron: Thames Valley Police

4 The six steps of a forensic investigation [4]



overzicht opgesteld met mogelijke oorzaken. Bij de bottom-up methode wordt de schade in detail geanalyseerd en wordt van daaruit onderzocht welke mechanismen de betreffende schade veroorzaakt zouden kunnen hebben. Na bepaling van de technische oorzaak kan vervolgens, indien gewenst, worden nagegaan welke (proces)oorzaken in ontwerp, uitvoering of gebruik/onderhoud hieraan ten grondslag lagen.

Bij beide van deze methoden kan gebruik worden gemaakt van de 'Delft approach' ([4]; zie kader 'Delftse aanpak').

DELFTSE AANPAK

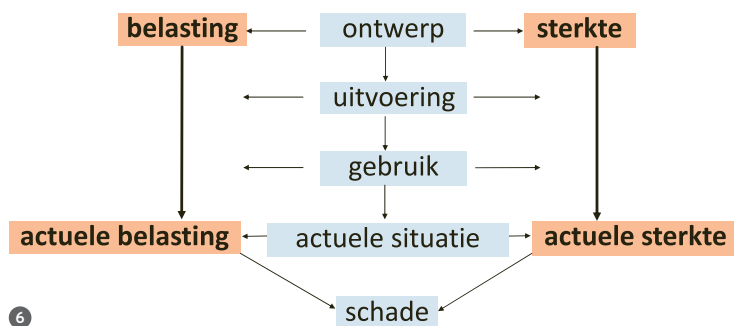
In 2017 ontwikkelden drie onderzoekers van verschillende TU Delft-faculteiten, op basis van literatuuronderzoek en praktijkervaring, de *Delft Approach for forensic investigations*, nadat zij hadden geconstateerd dat forensische onderzoeken in de luchtvaart, de bouw en de medische sector veel overeenkomsten hadden. Deze aanpak, die bestaat uit een standaard stappenplan (fig. 4), een overzicht van levenscycli, een categorisatie van mogelijke oorzaken (*Tree House of Failure*) en een overzicht van criteria om tot een betrouwbaar onderzoek te komen (*Ring of trustworthiness*). Deze aanpak is geschikt voor onderzoek in verschillende vakgebieden, en kan zowel 'top-down' als 'bottom-up' worden gebruikt. Het prijswinnende artikel over deze aanpak (*Improving reliability in forensic engineering: the Delft approach* [4]) is vrij toegankelijk. Daarnaast is het mogelijk de bijbehorende online cursus *Forensic Engineering: learning from failures* te volgen, die al door duizenden deelnemers is afgerond.

Top-down methode

Bij de top-down methode wordt de gehele levenscyclus van een constructie geanalyseerd, van het ontwerp tot aan de schade. Per fase van die levenscyclus wordt gecontroleerd of daar mogelijke oorzaken liggen voor het falen (fig. 6). Dit resulteert in een zo compleet mogelijke lijst met potentiële oorzaken, waarna per oorzaak wordt gecontroleerd of die wel of niet kan zijn opgetreden (verificatie en falsificatie).

Het uitgangspunt bij de top-down methode is dat ten tijde van het falen van de constructie sprake was van een actuele belasting en een actuele sterkte, die gezamenlijk hebben geresulteerd in het falen van de constructie. Er zullen echter variaties zijn geweest in zowel de belasting als de sterkte gedurende de levenscyclus van de constructie. Daarom moet eerst worden gekeken naar de belasting en de sterkte die in het ontwerp zijn aangehouden. Vervolgens moet voor de overige fasen van de levenscyclus worden nagegaan of daarin gebeurtenissen zijn opgetreden die geresulteerd kunnen hebben in een verandering van de belasting en/of de sterkte. Alle negatieve veranderingen zijn dan mogelijke oorzaken voor het falen van de constructie.

Er moet niet direct worden gestopt met onderzoeken als een mogelijke oorzaak is gevonden



6

Mogelijke oorzaken die meestal worden beoordeeld zijn:

Ontwerp:

- De aangehouden belasting en/of de sterkte is onjuist.
- Er zijn fouten gemaakt in de berekening.
- De resultaten van de berekening zijn niet goed op tekening verwerkt.
- Er is geen rekening gehouden met opgelegde dan wel verhinderde vervormingen.

Uitvoering:

- De gerealiseerde constructie is niet gebouwd conform het ontwerp.
- De gerealiseerde sterkte van de toegepaste materialen is onvoldoende.

Gebruik:

- De belastingen zijn in het gebruik hoger dan de ontwerpbelasting.
- Verbouwingen hebben geresulteerd in een afname van de sterkte van de constructie.
- De sterkte van constructieonderdelen is afgenomen als gevolg van materiaaldegradatie.

Daarnaast moet per fase worden gecontroleerd welke projectspecifieke mogelijke oorzaken er nog meer zijn.

Bij het opstellen van het overzicht met mogelijke oorzaken moeten geen irreële oorzaken worden meegenomen, waarvan op voorhand al kan worden gesteld dat dat geen mogelijke oorzaken kunnen zijn. Dat zou een indrukwekkend aantal mogelijke oorzaken geven, maar in werkelijkheid wordt het onderzoek daardoor vertroebeld.

Ook moet duidelijk onderscheid worden gemaakt tussen eerste-orde-oorzaken en tweede/derde-orde-oorzaken. In eerste instantie moeten alleen eerste-orde-oorzaken worden opgenomen. Dit zijn directe oorzaken voor het falen, zoals: *de bij de uit-*

voering gerealiseerde sterkte van het beton is onvoldoende. Als dat daadwerkelijk een oorzaak blijkt te zijn, kan worden besloten om in een tweede fase tweede-orde-oorzaken mee te nemen. Bijvoorbeeld de oorzaak voor de eerder genoemde onvoldoende sterkte. Daarmee wordt het onderzoek een multi-level onderzoek. Die tweede fase kan op eenzelfde wijze worden uitgevoerd, aan de hand van een nieuwe lijst met mogelijke oorzaken.

De top-down methode kan geschikt zijn wanneer er ruimte is voor een uitgebreid onderzoek en waarbij er behoefte is om per fase van de levenscyclus na te gaan wat mogelijke en meest waarschijnlijke oorzaken zijn geweest. Daarnaast kan het geschikt zijn voor gevallen waarbij er het vermoeden is dat het veel vaker voorkomt dan alleen bij de geconstateerde schade.

Het nadeel van de top-down methode is dat vaak onvoldoende zekerheid wordt verkregen over de compleetheit van de lijst met mogelijke oorzaken. Na afloop blijft er dan twijfel bestaan of er niet toch een mogelijke oorzaak is gemist. Een belangrijke reden hiervoor is dat uitvoeringsfouten heel divers kunnen zijn en soms moeilijk van te voren zijn te bedenken, waardoor ze snel kunnen worden gemist. Een andere reden is dat bij complexe gevallen het aantal mogelijke oorzaken zo groot is, dat de kans reëel is dat mogelijke oorzaken worden gemist.

Bottom-up methode

De bottom-up methode legt de focus van het onderzoek op de 'plaats delict', waarmee de forensisch ingenieur het denkproces in principe in omgekeerde volgorde doorloopt. De schade wordt in detail geanalyseerd →

De twee meest gangbare onderzoeksmethoden zijn de top-down methode en de bottom-up methode

en van daaruit wordt, in eerste instantie kwalitatief, onderzocht welke mechanismen de betreffende schade veroorzaakt zouden kunnen hebben. In feite wordt daarbij gereconstrueerd wat er in de tijd is gebeurd, maar dan vanaf de schade, terug in de tijd. Deze methode sluit het meest aan bij forensisch onderzoek zoals de politie dat uitvoert (zie kader 'De forensisch ingenieur').

Bij deze methode start het onderzoek met een visuele inspectie van de constructie die heeft gefaald. Die visuele inspectie omvat dan de volgende hoofdonderdelen:

→ *Beoordelen van de constructie.* Dit dient om inzicht te verkrijgen in de opbouw en in het constructief gedrag van de constructie, en in het gedrag bij opgelegde dan wel verhinderde vervormingen.

→ *Beoordelen van de omgeving.* Dit dient om inzicht te krijgen in de belastingen op de constructie, met name welke belastingen op welke wijze zijn opgetreden. Belangrijk is dat daarbij ook opgelegde en verhinderde vervormingen door temperatuurs- en vochtinvloeden worden betrokken.

→ *Beoordelen van de schade.* Hierbij wordt de schade in detail opgenomen, teneinde inzicht te verkrijgen in de wijze waarop de schade is ontstaan. Dit omvat tevens een opname van de verdeling van de schade over de constructie. Voor een forensisch ingenieur vertellen de details van de schade vrijwel altijd heel veel over de oorzaak van het falen.

Bij deze methode is het grondig analyseren van de verschijningsvorm van de schade het startpunt. Om dit nader te duiden, wordt als voorbeeld een gescheurde betonconstructie genomen. Voor de meeste mensen is het gewoon een scheur. Een forensisch ingenieur kijkt echter direct naar de locaties waar wel en waar geen scheuren aanwezig zijn, naar het start- en eindpunt van de scheur, naar het verloop van de breedte over de lengte en de diepte van de scheur, en naar de kenmerken van de scheurranden. Op basis van die gezamenlijke informatie kan vrijwel altijd worden vastgesteld welke vervormingen in de constructie hebben geresulteerd in de scheuren. Daarna kan dan worden afgeleid welke faalmechanismen ten grondslag heb-

ben gelegen aan die vervormingen, met in het meest eenvoudige geval maar één faalmechanisme. Wat echter minstens zo belangrijk is, is dat op basis van een dergelijke, kwalitatieve, analyse van de detailinformatie bepaalde faalmechanismen al direct kunnen worden uitgesloten, waardoor die dus niet verder hoeven te worden onderzocht. Als deze wijze van analyseren stapsgewijs wordt uitgevoerd, door op verschillende niveaus faalmechanismen te verifiëren en te falsificeren, blijven er in de praktijk veelal maar één of enkele mogelijke faalmechanismen over. Vervolgens kan dan heel gericht diepgaander onderzoek worden uitgevoerd naar die faalmechanismen, zoals het uitvoeren van een controleberekening van een specifiek detail of het uitvoeren van een boorkernonderzoek.

Het grote voordeel van de bottom-up methode is dat je het onderzoek in een vroeg stadium al onderbouwd kan inperken tot wat noodzakelijk is voor het achterhalen van de oorzaak, zonder het gevaar voor tunnelvisie. Het nadeel van deze methode is dat er niet altijd voldoende (historische) informatie over de schade beschikbaar is om deze methode te kunnen inzetten.

Case: loswal Een voorbeeld van een dergelijke stapsgewijze aanpak is een loswal, die bestond uit een boven water gesitueerde betonplaat van circa 11 m breed en 250 m lang, gefundeerd op palen. Ter plaatse van de aansluiting van die palen aan de betonplaat werden bij een duikinspectie scheuren geconstateerd (foto 7). Om de oorzaak van die scheuren te achterhalen is eerst gekeken naar het verloop van de scheuren in de palen en naar de verdeling van de gescheurde palen over de lengte van de loswal. Op basis van die informatie kon worden vastgesteld dat de scheuren waren veroorzaakt door buigende momenten, in lengterichting van de loswal. Vervolgens is op basis van een analyse van de belastingen (laden en lossen van schepen) vastgesteld dat er geen belastingen waren die de betreffende buigscheuren zouden kunnen verklaren en daardoor was het voor het vaststellen van de schadeoorzaak niet nodig om een controleberekening te maken. Er bleek sprake te zijn van



opgelegde vervormingen door temperatuursinvloeden, wat via een analyse van de optredende temperatuursbelasting kon worden geverifieerd.

Rapportage

Bij het rapporteren van een gedegen en volledig onderzoek naar de oorzaak van het falen van een constructie is het uiteraard van belang om alle ondernomen onderzoeksstappen eenduidig vast te leggen. Voor een goede begripsvorming wordt aanbevolen de rapportage af te sluiten met een volledige reconstructie van wat er volgordelijk heeft plaatsgevonden. Het is het beste om de verschillende levensfasen van de constructie te doorlopen en per levensfase aan te geven of er aspecten hebben gespeeld die uiteindelijk invloed hebben gehad op het ontstaan van de schade. In deze reconstructie moet dan ook de historische informatie over de schade worden opgenomen, zoals die lopende het onderzoek beschikbaar is gekomen.

Instorting

Een (gedeeltelijke) instorting van een constructie kan ook met de bovengenoemde methoden worden onderzocht, mits het ingestorte deel overzichtelijk is en er niet teveel constructieonderdelen bij betrokken zijn. Bij meer complexe instortingen moet

een andere aanpak worden gekozen, omdat de bovengenoemde methoden vrijwel zeker teveel onzekerheid geven ten aanzien van de eventueel gevonden oorzaak.

De beste manier om een complexe instorting te onderzoeken, is om eerst te zoeken naar het beginpunt van de instorting. Zodra dat is gevonden, kunnen de bovengenoemde methoden weer worden toegepast. Om het beginpunt van een instorting te achterhalen, moet eerst worden onderzocht of er camerabeelden zijn, op basis waarvan het beginpunt kan worden vastgesteld of een volgorde van bezwijken. Bij de instorting van een deel van het dak van het stadion De Grolsch Veste waren beelden van een beveiligingscamera beschikbaar, waarop te zien was bij welk hoofdspant de instorting was begonnen (foto 8).

Vervolgens moet worden nagegaan of er ooggetuigen zijn. Daarbij moet men voorzichtig zijn bij het interpreteren van wat ooggetuigen hebben waargenomen, omdat die zelden een volledig overzicht van de constructie hebben gehad.

Indien deze informatie onvoldoende is, moet een onderzoek worden uitgevoerd met de volgende stappen:

→ Vaststellen van de opbouw van de constructie voor de instorting. Daarbij moet zoveel mogelijk specifieke informatie →

DE FORENSISCH INGENIEUR

In de dagelijkse praktijk wordt er vaak vanuit gegaan dat een forensisch ingenieur in staat is om zelfstandig het falen van een constructie te onderzoeken. Dat is niet altijd het geval. In feite is het werk van een forensisch ingenieur vergelijkbaar met het werk van de forensische opsporing bij de politie (vroeger de Technische Recherche), die haar werk vaak ook niet zelfstandig uitvoert.

De forensische opsporing van de politie houdt zich bezig met waarheidsvinding door middel van sporenonderzoek op de plaats delict (PD). Het werk omvat het zoeken naar sporen, het veiligstellen en onderzoeken van deze sporen en het interpreteren van de resultaten die hieruit volgen. De afdeling Forensische Opsporing heeft deskundigen tot haar beschikking die zich toeleggen op verschillende soorten van onderzoek, variërend van vingersporenonderzoek tot onderzoek aan werktuigsporen en schoensporen. Afhankelijk van de complexiteit van het onderzoek wordt samengewerkt met externe partners zoals het Nederlands Forensisch Instituut.

Parallel hieraan houdt de forensisch ingenieur zich in hoofdzaak bezig met het onderzoeken van de schade, het veilig stellen van monstermateriaal en het interpreteren van wat ter plaatse is waargenomen. Zijn hoofdtaak is om te reconstrueren wat er volgordelijk in de tijd is gebeurd, een zogenoemde scenario-analyse. Daarvoor heeft hij vaak wel specifieke materiaal- en/of constructiekennis nodig en die kennis moet dan worden ingebracht door deskundigen. De in te schakelen deskundigen zullen daardoor per project verschillen, een en ander afhankelijk van het probleem.



LITERATUUR

- 1 Borsje, H., Dieteren, G., Forensic engineering instorting parkeergarage – Praktijkvoorbeeld schade-onderzoek parkeergarage P1 Eindhoven Airport. *Cement* 2019/1.
- 2 <https://www.bbc.com/news/uk-england-oxfordshire-57946382>; juli 2021.
- 3 <https://www.bbc.com/news/uk-england-oxfordshire-60467854>; februari 2022.
- 4 Terwel, K., Schuurman, M., Loeve, A., Improving reliability in forensic engineering: the Delft approach. *Forensic Engineering Volume 171 Issue FE3*.
- 5 Borsje, H., Renier, B., Burggraaf, H., Collapse of the roof of a football stadium. IABSE symposium 2014.

over de verschillende constructieonderdelen worden verzameld, om die onderdelen later in het onderzoek te kunnen identificeren.

- Onderzoeken van het ingestorte deel van de constructie, waarbij de locatie, de positie en de onderlinge positie van zoveel mogelijk constructieonderdelen moet worden vastgelegd. Hierbij moet gebruik worden gemaakt van de bij het vorige punt genoemde identificatie.
- Vastleggen van de schade aan de verschillende onderdelen van de constructie. Hierbij moet waar mogelijk worden bepaald of die schade oorzaak of gevolg is van de instorting.

Vervolgens moet aan de hand van deze informatie worden gereconstrueerd in welke volgorde de instorting heeft plaatsgevonden. Veelal is het daarvoor nodig om meerdere mogelijke scenario's te onderzoeken. Per scenario moet dan worden onderzocht of de locatie en de positie van alle constructieonderdelen bij dat scenario passen. Daarnaast is het belangrijk om te bepalen of de schade aan de verschillende constructieonderdelen past bij het scenario. Bij het onderzoek naar de oorzaak van de gedeeltelijke instorting van de parkeergarage van Eindhoven Airport is met deze wijze van onderzoek eenduidig vastgesteld waar de instorting was begonnen (foto 2; [1]).

Kwaliteitscontrole

Een betrouwbaar onderzoek moet objectief, reproduceerbaar en verifieerbaar, compleet en correct zijn. Dit kan onder andere worden bereikt door een gestructureerd onderzoeksproces en het hanteren van het vierogen-principe.

De betrouwbaarheid van de uitkomst van een onderzoek kan worden gecontroleerd aan de hand van de tijdens het onderzoek verkregen informatie over de constructie en de schade. Als de oorzaak van het falen bekend is, moet worden gecontroleerd of alle verkregen informatie past in het gevonden faalscenario. Als dat niet het geval is, is het faalscenario niet juist of niet compleet.

Indien sprake is van constructief falen van een constructie, wordt geadviseerd om aan de hand van een controleberekening na te gaan of het gereconstrueerde faalscenario daadwerkelijk heeft kunnen plaatsvinden. Een dergelijke berekening moet dan worden uitgevoerd met de werkelijke waarden voor de sterkte van de materialen en de werkelijk opgetreden belastingen, zonder partiële factoren. Dat is daarmee een geheel andere berekening dan een ontwerp-berekening.

Sherlock Holmes

Bij het falen van een constructie en zeker bij een instorting is iedereen altijd gefocust op de oorzaak. Bij forensic engineering is het echter minstens zo belangrijk om naast het bepalen van de meest waarschijnlijke oorzaak, ook andere mogelijke oorzaken gemotiveerd uit te sluiten. Als dat niet wordt gedaan, blijft er altijd ruimte voor twijfel, of er toch niet nog een andere oorzaak kan zijn die over het hoofd is gezien. Zeker bij rechtszaken is zo iets zeer onwenselijk. Sherlock Holmes heeft dit al vroeg ingezien met zijn beroemde uitspraak *“When you have eliminated all which is impossible then whatever remains, however improbable, must be the truth.”* ●