



Adviesbureau ir. J.G. Hageman B.V.

Dossier 9663

BEZWIJKEN PARKEERGARAGE EINDHOVEN AIRPORT

Rapport 9663-1-0

Analyse naar de oorzaak

25 september 2017

INHOUD

Voorwoord

1	Inleiding.....	5
1.1	Opdracht	5
1.2	Beschikbare gegevens.....	5
1.3	Leeswijzer.....	5
2	Beschrijving van de constructie en de uitvoeringswijze.....	6
2.1	Beschrijving van de constructie.....	6
2.2	Beschrijving van de uitvoeringswijze.....	8
2.2.1	Inleiding	8
2.2.2	Uitvoeringswijze	8
2.2.3	Waarnemingen voorafgaand aan het bezwijken van de constructie.....	12
3	Gegevens afgeleid uit observaties en beschikbare analyses	14
3.1	Inleiding.....	14
3.2	Verslag van de observaties en waarneming dronebeelden	14
3.2.1	Inleiding	14
3.2.2	Bouwdeel B.....	15
3.2.3	Bouwdeel A.....	20
3.3	Het weer tijdens het bezwijken.....	21
3.4	Getuigenverklaringen	21
3.5	Beelden van het bezwijken van de constructie	22
3.5.1	Zichtbare delen van de constructie.....	22
3.5.2	Beelden van de instorting.....	23
3.5.3	Samenvatting van bevindingen	29
4	Beoordeling constructief ontwerp	30
5	Eerste verkenning naar oorzaken van de schade.....	32
5.1	Inleiding.....	32
5.2	Analyse videobeelden van de instorting	32
5.3	Analyse van TNO	33
5.4	Samenvatting en voorlopige conclusie	34
6	Pons van de dakvloer.....	35
7	Dwarskrachtweerstand tijdens de uitvoering	37
8	Momentweerstand van de langsvogerverbinding in de BubbleDeck vloer	39
8.1	Inleiding.....	39
8.2	Experimenteel onderzoek	40
8.2.1	Algemeen	40
8.2.2	Gedrag van de proefstukken.....	41
8.2.3	Langsafschuifproeven	45

8.3	Analyse	46
8.3.1	Beoordeling van momentweerstand	46
8.3.2	Spanningen in het aansluitvlak.....	47
8.3.3	Beantwoording van het doel van het onderzoek.....	48
8.4	Relatie met het ontstaan van de schade	48
8.5	Vershil tussen beoogde weerstand en aangetroffen weerstand	49
9	Analyse naar de oorzaak van de schade	52
10	Samenvatting en conclusie	54

Bijlage

A Beschikbare gegevens en referenties

Inhoud Rapport met bijlagen

I	Beschrijving van de constructie
II	Analyse van foto's en gegevens van de uitvoering
III	Waarnemingen observaties
IV	Analyse van dronebeelden
V	Meteogegevens voorafgaand aan de instorting
VI	Samenvatting getuigenverklaringen
VII	Beveiligingscamera's Eindhoven Airport en KMAR
VIII	Beoordeling constructief ontwerp Archimedes en Opzeeland
IX	Beoordeling ponsweerstand van kolom-vloer aansluiting
X	Beoordeling dwarskracht bij het laten 'schrikken' dakvloer
XI	Experimenteel onderzoek momentweerstand langsvogverbinding
XII	Verslag storten breedplaten

Voorwoord

In het voorliggende rapport is verslag gedaan van het onafhankelijk onderzoek dat door Adviesbureau Hageman in opdracht van BAM Bouw en Techniek is uitgevoerd naar de oorzaak van het gedeeltelijk bezwijken van de in aanbouw zijnde parkeergarage bij Eindhoven Airport. Het voorliggende rapport kan op zichzelf worden gelezen. Er is op een aantal plaatsen verwezen naar aanvullende informatie die in bijlagen is opgenomen. Deze bijlagen zijn beschikbaar in een separaat rapport.

Het in dit rapport beschreven experimentele onderzoek is uitgevoerd bij het Structures Laboratory Eindhoven van de faculteit Bouwkunde van de TU/e. De medewerkers van BAM hebben daarbij de betonnen vloervelden, waaruit de proefstukken zijn genomen, vervaardigd. Zowel deze medewerkers van BAM als de medewerkers van het Structures Laboratory worden hartelijk bedankt voor hun inzet bij de werkzaamheden.

Tijdens het uitgevoerde onderzoek heeft er op 14 augustus 2017 overleg plaatsgevonden tussen diverse betrokken partijen. Tijdens dit overleg hebben TNO en Hageman hun bevindingen tot op dat moment toegelicht. In dit rapport is bij het analyseren van de locatie waar de instorting begonnen is, mede gebruik gemaakt van de analyse die TNO op dat moment had uitgevoerd.

Het beschreven onderzoek is uitgevoerd en gerapporteerd door de volgende medewerkers van Hageman: dr.ir.drs. C.R. Braam, ir. L.T.H. Ensink, ir. J.J. Meester, ir. W.A.P. de Vos en prof.ir. S.N.M. Wijte.

1 Inleiding

1.1 Opdracht

In opdracht van BAM Bouw en Techniek is door Adviesbureau Hageman een onafhankelijk onderzoek uitgevoerd naar de oorzaak van het bezwijken van een deel van de betonconstructie van de in aanbouw zijnde parkeergarage bij Eindhoven Airport. Op zaterdag 27 mei 2017 omstreeks 19:00 uur is een deel van de betreffende constructie bezweken, zie foto 1.



foto 1 Overzicht van bezwiken deel van de constructie

1.2 Beschikbare gegevens

Een overzicht van beschikbare gegevens is opgenomen in bijlage A bij dit rapport.

1.3 Leeswijzer

Het voorliggende rapport geeft een samenvatting van de bevindingen die zijn opgedaan tijdens het uitgevoerde onderzoek. Een meer uitgebreid verslag van een aantal zaken zoals:

- de beschrijving van de constructie
- de uitvoeringswijze van de constructie
- een beoordeling van het constructieve ontwerp
- een observatie ter plaatse
- een beoordeling van de ponsweerstand van de dakvloer bij de gevelkolommen
- een beschrijving van het experimentele onderzoek naar de weerstand van de langsvogverbinding;

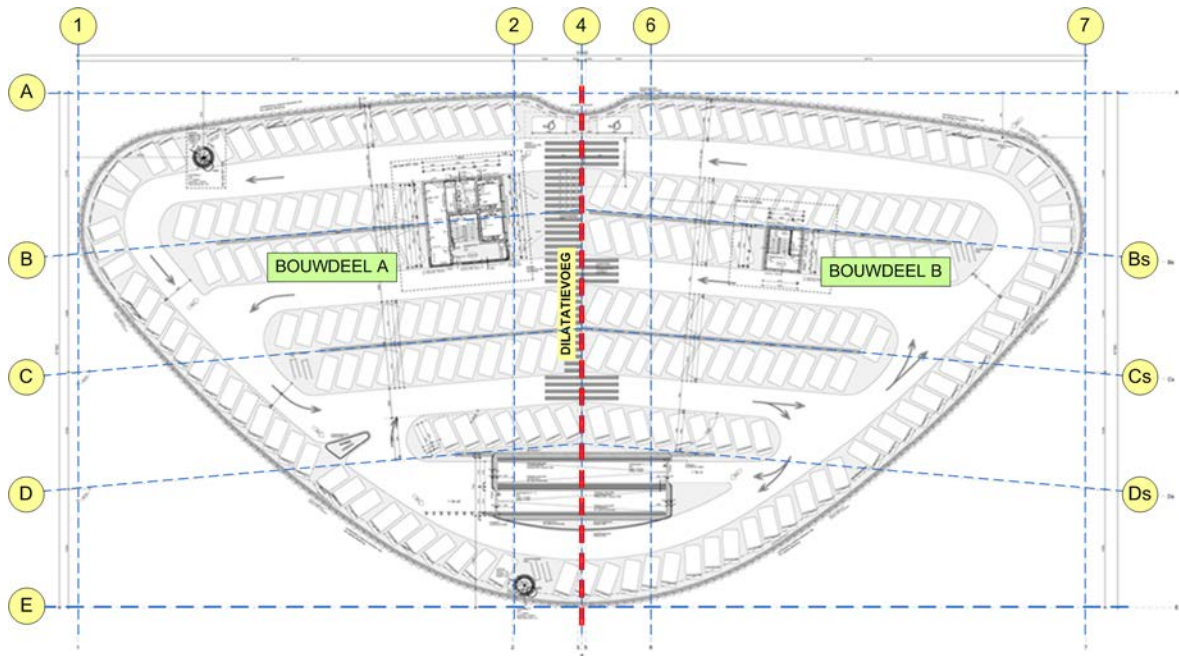
zijn opgenomen in het bijlage document dat bij voorliggend rapport gelezen kan worden.

2 Beschrijving van de constructie en de uitvoeringswijze

2.1 Beschrijving van de constructie

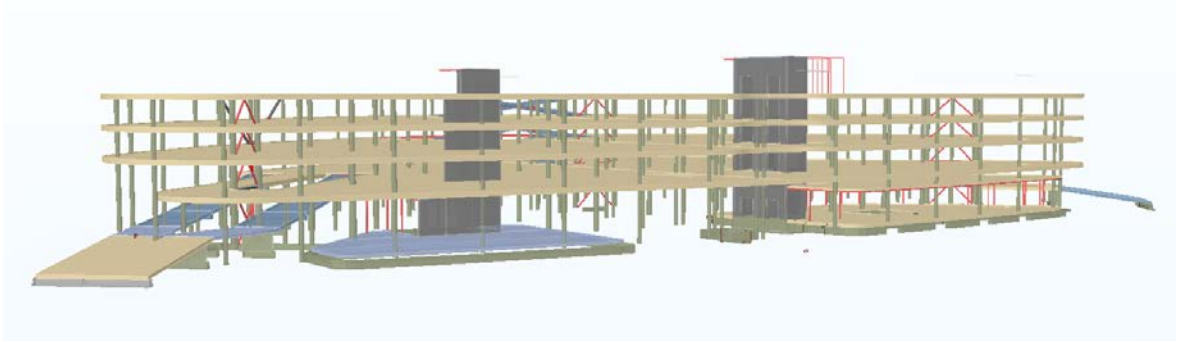
Het werk aan de parkeergarage van Eindhoven Airport is meer formeel bekend als het Multi Purpose Building Eindhoven Airport. Dit komt voort uit het feit dat het beoogde gebouw meer functies dan alleen een parkeerfunctie zou herbergen. Op de begane grond zouden gebieden en ruimten aanwezig zijn voor een busterminal, taxi's en een vestiging van McDonalds.

Een uitgebreide beschrijving van de constructie is opgenomen in bijlage I.



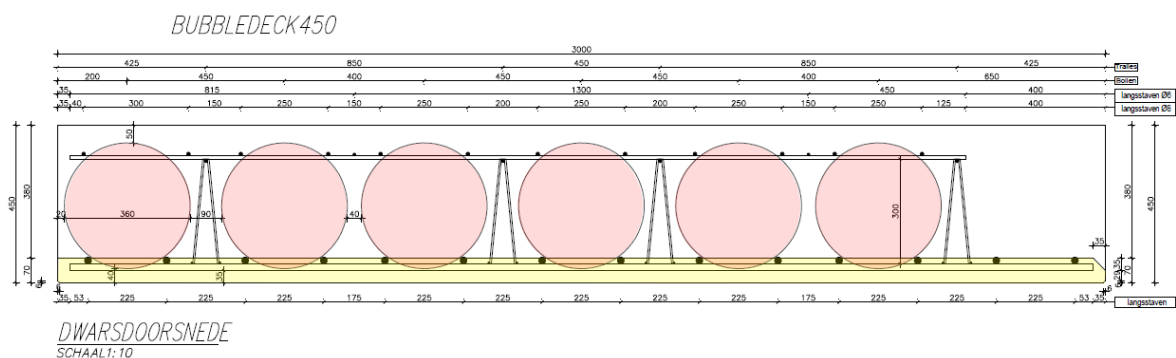
figuur 1 Plattegrond parkeergarage met assen, verschillende bouwdeelen en de dilatatievoeg tussen beide bouwdeelen [6]

De constructie van het gebouw is nagenoeg symmetrisch, zie figuur 1. De symmetrielij wordt gevormd door een dilatatievoeg ter plaatse van as 4. Het deel tussen as 1 en as 4 wordt aangeduid als bouwdeel A. Het bouwdeel tussen as 4 en as 7 betreft bouwdeel B. Het gebouw bestaat uit 4 verdiepingvloeren, waarvan de bovenste de dakvloer is, die worden ondersteund door een kolommenstructuur. Zowel in bouwdeel A als B is over de gehele hoogte een betonnen stabiliteitskern aanwezig. Daarnaast zijn in ieder bouwdeel nog twee over de gehele hoogte doorlopende stalen stabiliteitsbokken aanwezig, zie figuur 2.



figuur 2 Aanzicht met de basis constructieve onderdelen [9]

De verdiepingvloeren zijn uitgevoerd met 450 mm dikke BubbleDeck vloeren. Dit is een vloersysteem waarbij geprefabriceerde betonnen breedplaten met een dikte van 70 mm, waarin de onderwaping is opgenomen, tezamen met gewichtsbesparende bollen met een diameter van 360 mm, tralieliggers en een bovennet, op de bouwplaats worden aangevoerd. De breedplaten worden vervolgens op een tijdelijke ondersteuning geplaatst om tenslotte, nadat de additionele wapening is aangebracht, te worden afgestort met een ter plaatse gestorte druklaag met een dikte van 380 mm, zie doorsnede figuur 3.



figuur 3 Principe doorsnede breedplaatvloer [46]

De verdiepingvloeren worden ondersteund door ter plaatse gestorte kolommen met een ronde doorsnede. De kolommen zijn uitgevoerd met verschillende diameters. De kolommen zijn geplaatst langs de gevel op circa 1,5 vanaf de vloerrand en, zover dat met betrekking tot de routing in de garage toepasbaar was, op de assen B, C en D. De grootte van de diverse overspanningen tussen de kolommen varieert per locatie in de garage. In het algemeen worden de grootste overspanningen gevonden tussen de gevelkolommen bij as A en de kolommen bij as B, tussen as B en as C en tussen as C en as D, namelijk circa 15 meter in de richting haaks op de letterassen. Om het water op de vloeren van de parkeergarage te kunnen afvoeren naar het hemelwaterafvoersysteem is in de grote overspanningsrichting, dus haaks op de letterassen, een hoogteverschil in de vloer aangebracht waarbij de vloer midden tussen de steunpunten het hoogst gelegen is en ter plaatse van de kolommen, nabij de hemelwaterafvoeren, het laagst. De verdiepingvloer heeft een constante dikte van 450 mm, zodat ook de onderzijde van de vloer dit hoogteverschil volgt. De vloeroverspanning in de richting evenwijdig aan de letterassen zijn in het algemeen kleiner en variëren dan tussen 5 en 6 meter. Echter, ook overspanningen van circa 8 meter komen voor.

De hellingbanen tussen de verschillende bouwlagen zijn vervaardigd met kanaalplaten met een dikte van 320 mm, voorzien van een betonnen druklaag. Deze dragen veelal op stalen liggers. De

hellingbanen zijn zodanig voorzien van dilatatievoegen dat zij verplaatsingsverschillen tussen de boven elkaar geplaatste vloeren niet verhinderen. Ook de hellingbanen die ter plaatse van de dilatatievoegen zijn geplaatst, zijn zo gedilateerd dat zij een bewegingsverschil tussen de bouwdelen A en B niet zullen verhinderen.

Over een beperkt oppervlak is op de begane grond een vrijdragende vloer aanwezig. De kolommen van de constructie zijn gefundeerd op poeren die worden gedragen door in de grond gevormde palen. Opgemerkt wordt dat de poeren onderling alleen gekoppeld zijn daar waar een begane grondvloer of een wand moet worden ondersteund.

2.2 Beschrijving van de uitvoeringswijze

2.2.1 Inleiding

In deze paragraaf wordt ingegaan op de wijze waarop de BubbleDeck vloeren zijn vervaardigd. Daarnaast wordt aan de hand van een aantal foto's een aantal mogelijk voor het analyseren van de oorzaak van de schade relevante zaken beschreven. Meer gedetailleerde informatie over deze zaken is opgenomen in bijlage II.

2.2.2 Uitvoeringswijze

Bij het vervaardigen van een breedplaatvloersysteem, zoals het BubbleDeck systeem, moet de geprefabriceerde breedplaat tijdens het plaatsen van de breedplaten op relatief korte afstand ondersteemd worden. Vervolgens worden de resterende wapening en andere in te storten voorzieningen aangebracht, waarna de ter plaatse gestorte druklaag kan worden aangebracht. Na het storten van de druklaag moet de onderstepping ook nog blijven staan om het beton van de druklaag de tijd te geven om op sterkte te komen. In het ontwerp is er van uitgegaan dat het beton van de druklaag (C35/45) een karakteristieke cilinderdruksterkte heeft van 35 N/mm². Dit komt overeen met een karakteristieke kubusdruksterkte van 45 N/mm².

De onderstepping onder de 1^e verdiepingsvloer blijft staan als de tweede verdiepingsvloer wordt vervaardigd. Echter, om te voorkomen dat het gewicht van alle vloeren tijdens de uitvoering zijn belasting afdraagt op de onderste stempels, worden de stempels onder een vloer, na voldoende uitharding van het beton tijdelijk ontlast zodat de betreffende vloer zijn eigen belasting gaat dragen en afvoeren naar de kolommen en de stabiliteitskern. Dit proces wordt schrikken genoemd. De ontlaste stempels worden vervolgens weer handvast aangedraaid. Na voldoende verharding van het beton worden de tijdelijke stempels doorgaans vanaf de onderste bouwlaag naar boven toe verwijderd¹.

Feitelijk is het laten schrikken van de vloer bij de bovenste verdiepingsvloer niet meer nodig. In het onderhavige project heeft men ook de bovenste vloer laten schrikken na het bereiken van de voorgeschreven druksterkte van het beton van de druklaag.

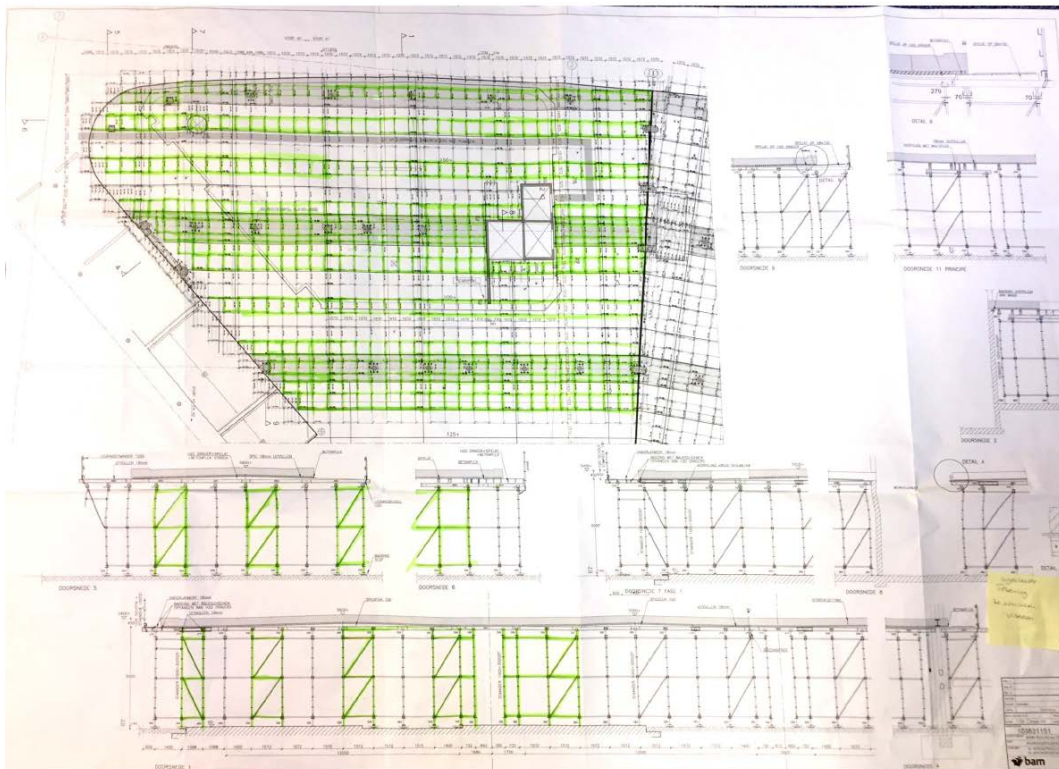
Bij het bepalen van de benodigde druksterkte op het moment van schrikken is door BAM onduidelijk gecommuniceerd. Begrippen als cilinder- en kubusdruksterkte en gemiddelde en karakteristieke

¹ Uit een notitie van BAM met referentie BBT-17-M-00006-JDr blijkt dat “na het handvast zetten van de ondersteuning op de 3^e verdiepingsvloer werd ondersteuning vanaf de onderzijde van de 3^e verdiepingsvloer tot op maaiveld verwijderd” [67].

druksterkte worden op een verwarrende wijze door elkaar gebruikt. Het bepalen of tijdens de uitvoering een voldoende druksterkte is gehaald, is gebaseerd op rijpheidsmetingen die na het storten van de druklaag zijn uitgevoerd. Het doel van deze metingen is om aan te kunnen tonen dat de gemiddelde kubusdruksterkte van 18 N/mm² is bereikt.

De resultaten van deze rijpheidsmetingen worden via een ijklijn vertaald naar een druksterkte van het beton. In dit geval een gemiddelde kubusdruksterkte. Deze ijklijn is verkregen door op basis van 5 proefkubussen, die zijn beproefd bij verschillende rijpheid, een (logaritmische) regressielijn te maken, die het verband tussen rijpheid en druksterkte beschrijft. Deze regressielijn is vervolgens getransleerd zodat hij door de minst positieve waarde van de 5 proefresultaten snijdt. Vanwege deze verschuiving kan worden gesteld dat de feitelijke gemiddelde kubusdruksterkte van het beton hoger zal zijn dan 18 N/mm². In bijlage X is beargumenteerd dat de gemiddelde kubusdruksterkte voor de 4^e verdiepingvloer op het moment van het schrikken circa 21 N/mm² zal zijn geweest.

Een uitgewerkt stempelplan (bestaande uit berekeningen en tekeningen) voor het vervaardigen van de verdiepingvloeren en een planning cq. werkschrijving voor het aanbrengen, het laten 'schrikken' en tenslotte het verwijderen van de tijdelijke ondersteuning zijn in de op SharePoint beschikbaar gestelde gegevens niet aangetroffen. Er is alleen een tekening beschikbaar (ongedaateerd) van de onderstempeling van de 1^e verdiepingvloer van bouwdeel A, zie figuur 4. Tevens is er een intern e-mailbericht beschikbaar waarin wordt aangegeven: "na 28 kalenderdagen na het storten van de bovenste betonvloer, mag de gehele ondersteuning onder het gebouw weg worden gehaald" [65].

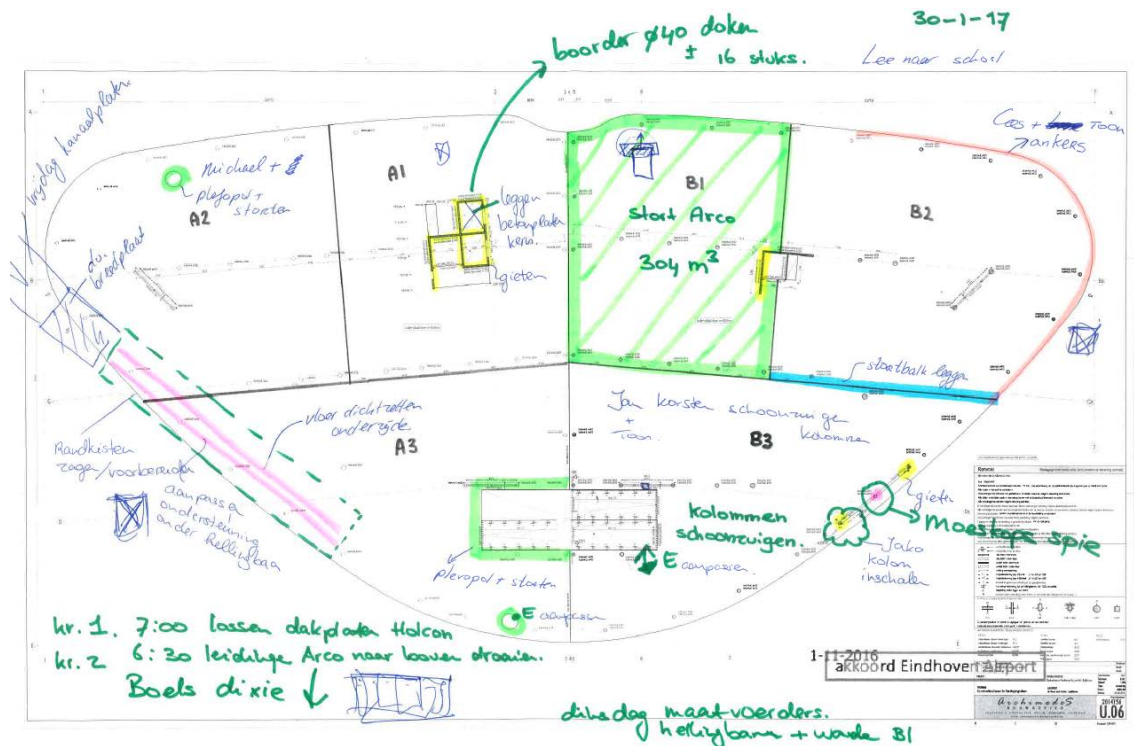


figuur 4 Stempelplan 1^e verdiepingvloer bouwdeel A [61]

Daarnaast zijn de zogenaamde 'dagplanningen' van de uitvoerder [60] beschikbaar waarbij de werkzaamheden van de betreffende dag op de plattegronden van de parkeergarage schematisch zijn

ingetekend. In figuur 5 is als voorbeeld de dagplanning van de uitvoering van 31 januari 2017 opgenomen. Op deze dag is vloerdeel B1 van de 4^e verdieping gestort. De meeste dagplanningen tussen 4 november 2016 en 1 maart 2017 zijn beschikbaar. Uit de dagplanningen zijn met betrekking tot het vervaardigen en onderstempelen van de verdiepingsvloeren de volgende relevante gegevens gehaald:

- Stortdatum vloerdeel;
- ‘Schrikken’ vloerdeel;
- Verwijderen stempels.



figuur 5 Dagplanning uitvoering van 31 januari 2017 [60]

De gegevens voor de dakvloer van bouwdeel B, verdeeld in stortfase B1/B2 en B3, zijn opgenomen in onderstaande tabel. Voor het verifiëren van gegevens is gebruik gemaakt van de leveringsbonnen van de Mebin [57], de gegevens van de rijpheidsmetingen [59] en de timelapse beelden [84].

tabel 1 Uitvoeringsfasen 4^e verdiepingsvloer bouwdeel B

	B1 / 4e	B2 / 4e	B3 / 4e
Stortdatum (Mebin)	30-1-2017	1-2-2017	31-1-2017
Betonmengsel (Mebin)	S49-T1 (50% CEM I)	S49-T1 (50% CEM I)	S49-T1 (50% CEM I)
18 N/mm ² (rijpheidmeting) ²	4-2-2017 (13:10 uur)	6-2-2017 (20:20 uur)	5-2-2017 (22:40 uur)
Schrikken stempels (dagplanning)	6-2-2017	8-2-2017	7-2-2017

² Opgemerkt wordt dat de rijpheidsmetingen zijn uitgevoerd met een verkeerd ingestelde cq. verouderde grenswaarde. De betondruksterkte van 18 N/mm² wordt namelijk volgens de ijklijn van het betonmengsel met 50% CEM I bereikt bij 1410 °Ch, terwijl het ConcreMote systeem nog stond ingesteld op een grenswaarde van 1685 °Ch. Het gestorte beton had op het moment van de ‘melding’ al een druksterkte groter dan 18 N/mm².

Met het verwijderen van de tijdelijke stempels onder de 3^e verdiepingvloer van bouwdeel B is volgens de dagplanning van de uitvoering na 8 februari 2017 gestart. Echter, op de timelapse beelden is geconstateerd, dat de stempels onder de 3^e verdiepingvloer op 13 februari 2017 om 17:18 uur nog aanwezig waren foto 2. De stempels zijn vermoedelijk pas vanaf 14 februari verwijderd. Dit is ruim eerder dan de intern door BAM ‘geadviseerde’ 28 kalenderdagen na het storten van de betonnen dakvloer.

Echter, doordat de onderstempeling van de betonnen dakvloer van bouwdeel B op 6, 7 en 8 februari 2017 in delen tijdelijk is ontlast en de dakvloer daardoor zijn eigen belasting is gaan dragen en afvoeren naar de kolommen en de stabiliteitskern, is dit constructief geen probleem.

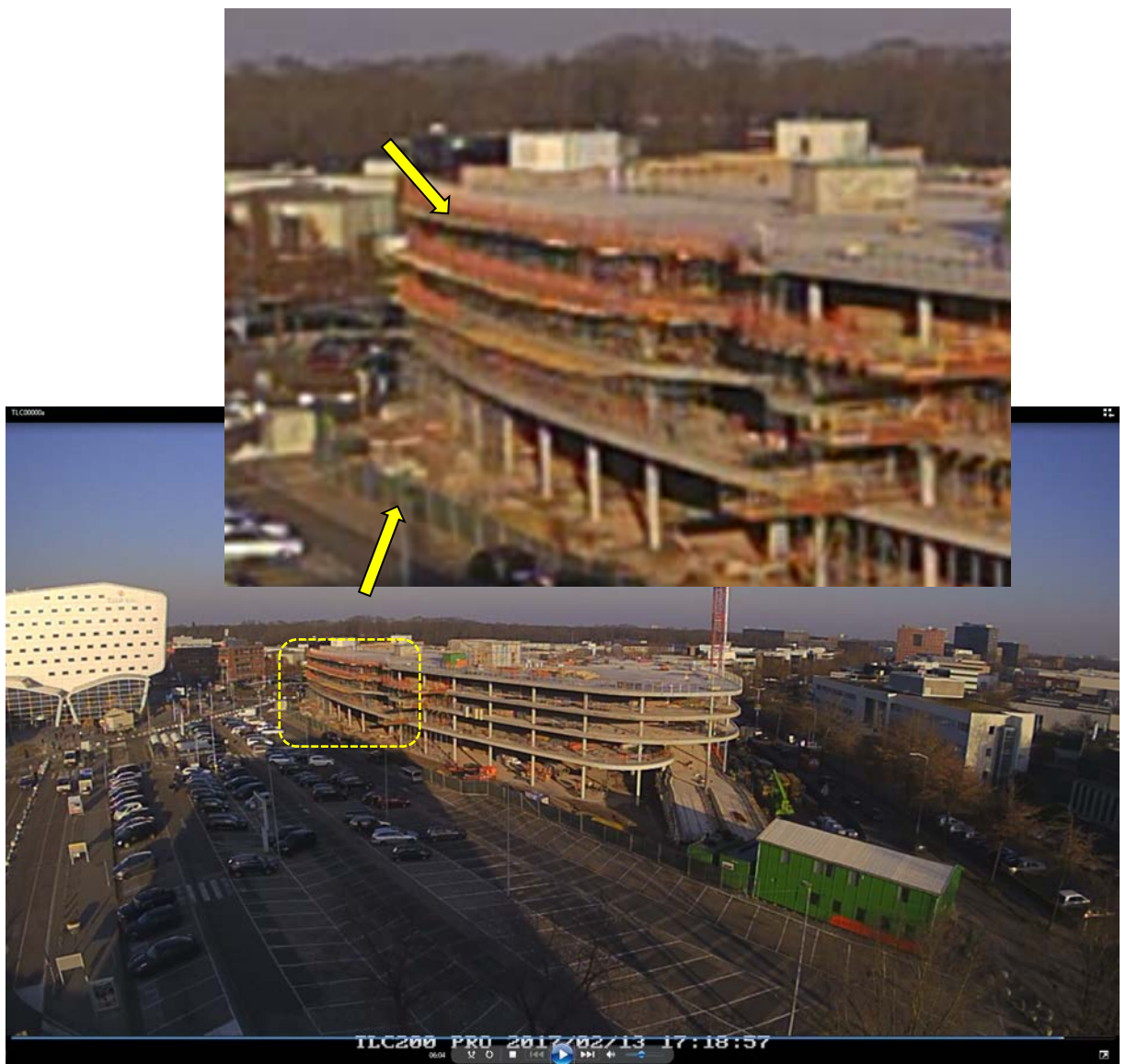


foto 2 Snapshot timelapse beeld d.d. 13-02-2017: onderstempeling onder 3^e verdiepingvloer bouwdeel B is nog aanwezig [84][81]

2.2.3 Waarnemingen voorafgaand aan het bezwijken van de constructie

Na het bezwijken van een deel van de constructie is van BAM beeldmateriaal ontvangen van de uitvoering. Uit dit beeldmateriaal zijn een aantal zaken naar voren gekomen die mogelijk gerelateerd zijn aan het bezwijken van de constructie en daarom hier vermeld worden. Het betreffen drie zaken:

- de aanwezigheid van plassen op de dakvloer;
- mogelijke hoogteverschillen aan de onderzijde van de dakvloer van bouwdeel B;
- scheurvorming aan de bovenzijde van de verdiepingsvloeren.

Zoals in paragraaf 2.1 is beschreven, zijn alle vloeren, dus ook de dakvloer, met een afschot gemaakt om te zorgen dat het water niet op de vloeren blijft staan. Hiervoor zijn tijdens de uitvoering de breedplaten met een toog aangebracht en is de bovenzijde overeenkomstig met een verlopende hoogte afgewerkt. De grootte van de toog zal na het verwijderen van de stempels worden vermindert ten gevolge van het doorbuigen van de constructie. Dit is in het ontwerp beschouwd en de combinatie van toog en doorbuiging zou zo moeten zijn dat ook na het optreden van de doorbuiging (en de bijkomende doorbuiging ten gevolge van kruipgedrag) een voldoende afschot zal resteren. Uit de foto's in bijlage II blijkt dat dit niet het geval is. Op foto 3 is zichtbaar dat op de dakvloer van bouwdeel B in het deel tussen de kern en de gevel bij as A na een regenbui water blijft staan.



foto 3 Plas aanwezig op dakvloer bouwdeel B tussen kern en gevel op as A [72]

Op enkele ontvangen foto's is te zien dat de middelste langsnaad (naad 3, zie figuur 6) tussen de breedplaten van de dakvloer wijder is dan gebruikelijk. Eén breedplaat ligt lager dan de aansluitende platen. Door het hoogteverschil is de zijkant van de breedplaat gedeeltelijk zichtbaar.

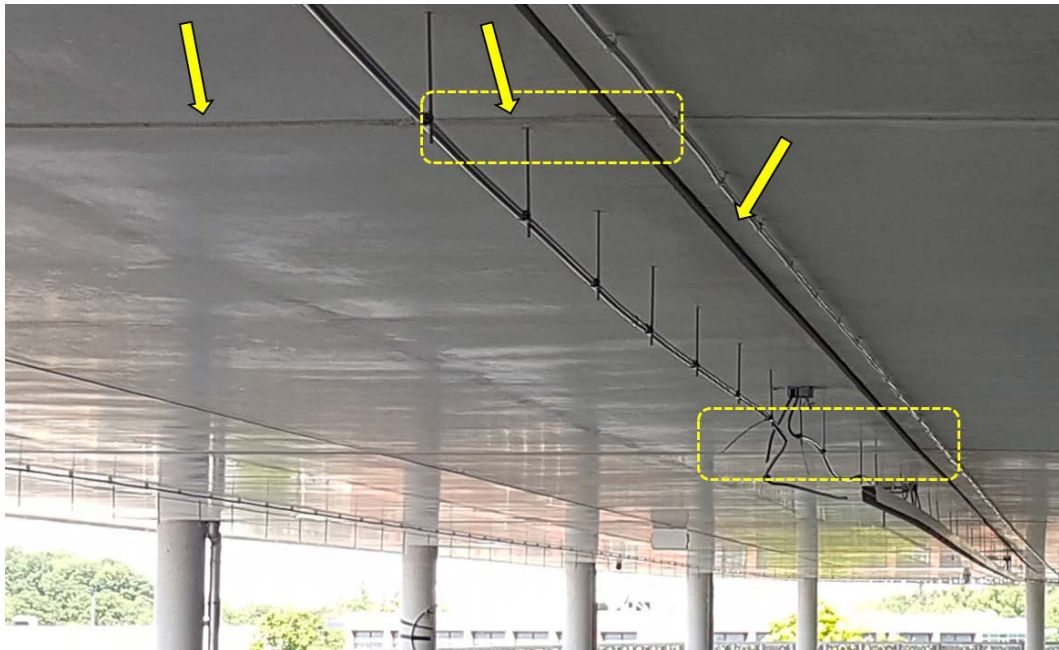


foto 4 Onderzijde dakvloer met wijde langsnaad 3 en een beperkt hoogte verschil tussen twee aansluitende breedplaten [72]

Tot slot wordt gewezen op de scheurvorming die bij verschillende verdiepingvloeren aanwezig is. Dit is een beeld dat overeenkomt met de scheurvorming die na het bezwijken van een deel van de constructie ook is waargenomen in de dakvloer van bouwdeel A, zie hiervoor paragraaf 3.2.3.

3 Gegevens afgeleid uit observaties en beschikbare analyses

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden waarnemingen die gerelateerd zijn aan het bezwijken van de constructie samengevat. Als eerste wordt verslag gedaan van een observatie ter plaatse die, omdat de constructie niet toegankelijk is, vanuit een hangbak is uitgevoerd. Verder wordt hierbij gebruik gemaakt van dronebeelden die door BAM beschikbaar zijn gesteld. Voor de volledigheid wordt opgemerkt dat omdat de bezweken delen van de constructie niet van zeer nabij geobserveerd konden worden, nog een beperkt voorbehoud moet worden gemaakt ten aanzien van de vraag of de constructie vervaardigd is zoals hij is ontworpen.

Vervolgens wordt een samenvatting gegeven van het weersbeeld op de dag van de instorting.

Ten tijde van het bezwijken van de constructie waren een aantal mensen in de directe nabijheid van het bouwcomplex. Deze mensen zijn gehoord en hun verklaringen zijn hierna samengevat. Tot slot zijn er tijdens de uitvoering van het onderzoek een aantal video-opnamen beschikbaar gekomen waarop het bezwijken van de constructie deels zichtbaar is. In paragraaf 3.4 zijn deze beelden beschreven.

3.2 Verslag van de observaties en waarneming dronebeelden

3.2.1 Inleiding

Op 1 juni en 11 juli jongstleden zijn door ir. De Vos van Hageman observaties uitgevoerd bij de bezweken constructie. Deze observaties zijn uitgevoerd vanuit een hangbak die door een kraan boven de constructie is gehouden. Er is tot op het moment van het opstellen van dit rapport nog geen toegang op en in de constructie en bij de restanten. Op 2 en 8 juni zijn in opdracht van BAM dronebeelden van de restanten en de resterende constructie gemaakt. Een uitgebreid verslag van de observaties is opgenomen in bijlage III en van de dronebeelden in bijlage IV. Een overzicht van de parkeergarage en het ingestorte deel is getoond in foto 5.

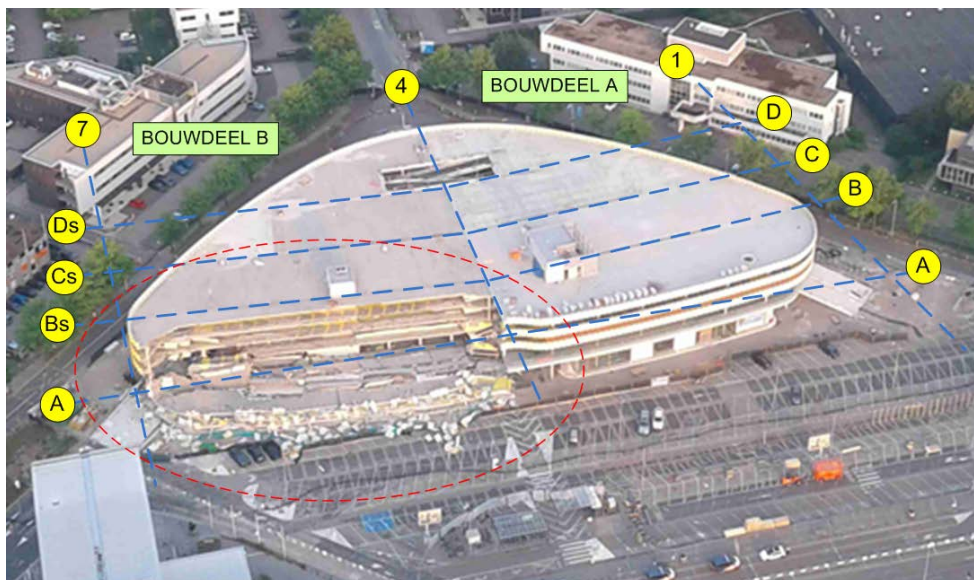
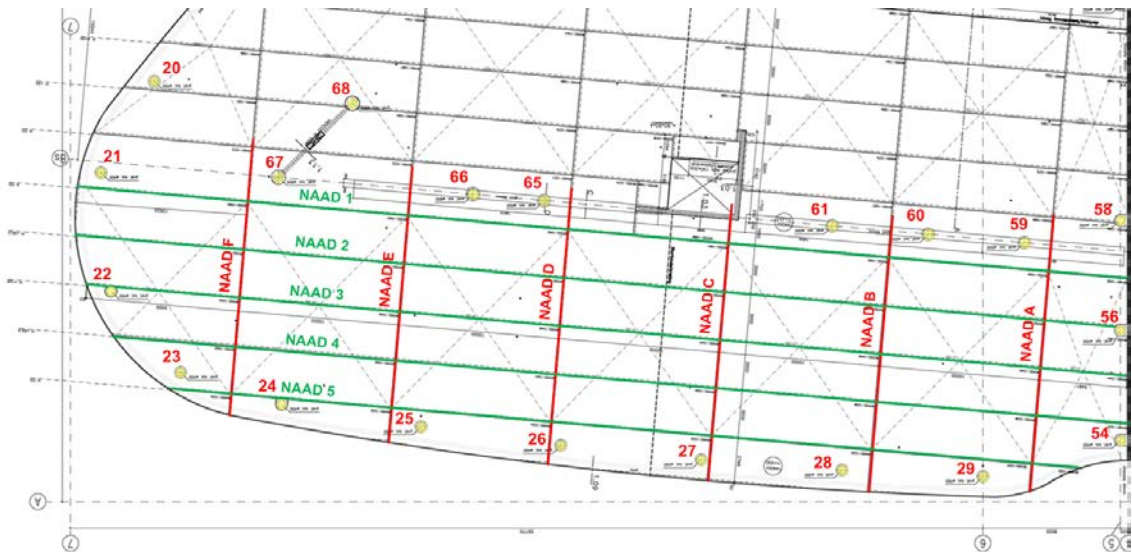


foto 5 Overzichtsfoto van de parkeergarage – gemaakt kort na de instorting (bron: Flash Ballonvaarten – Eindhoven) [76]

3.2.2 Bouwdeel B

Ter toelichting is een gedeelte van de plattegrond van de vierde verdiepingvloer met een aanduiding van de naden tussen de verschillende breedplaten en de kolomnummers zoals die door Archimedes is aangehouden, van bouwdeel B in figuur 6 getoond.

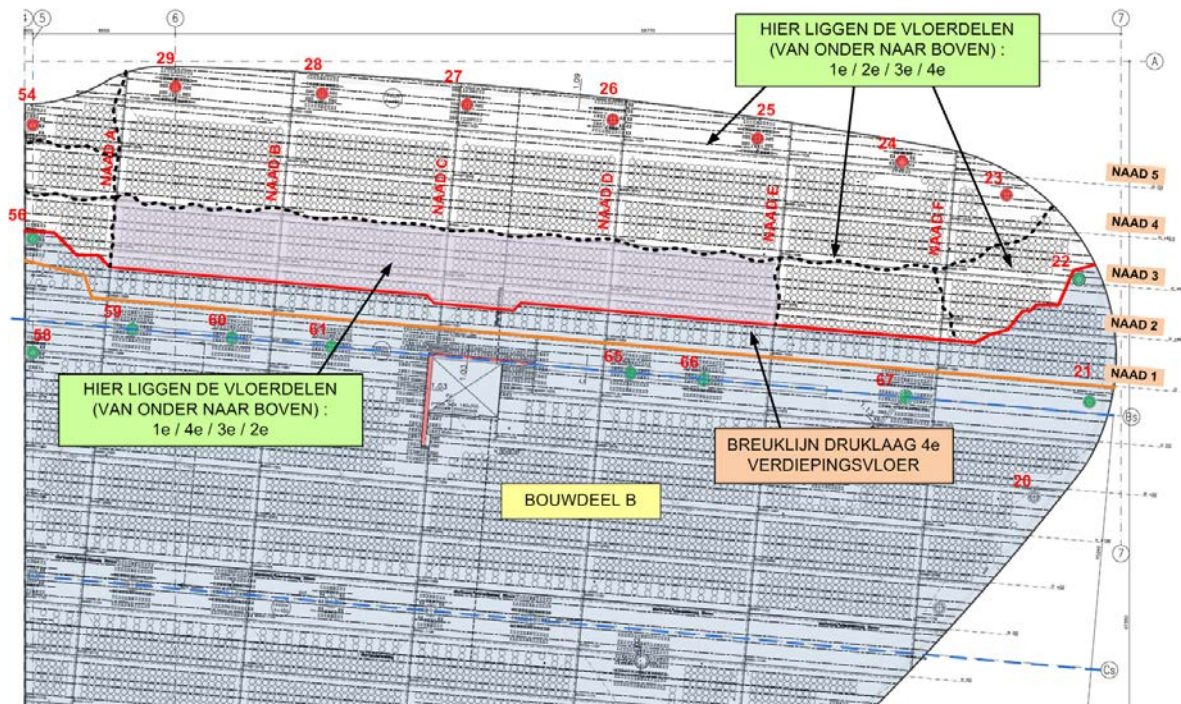


figuur 6 Plattegrond 4^e verdiepingvloer – bouwdeel B: aanduiding naden tussen breedplaten en kolomnummers

Tijdens de observatie is geconstateerd, dat de ingestorte verdiepingvloeren in twee verschillende configuraties c.q. volgorde op elkaar liggen:

- de vloerdelen nabij de gevellijn op as A, de delen tussen de dilatatievoeg op as 4 en naad A en de delen tussen de naden E en F liggen in de volgorde zoals gebouwd op elkaar, namelijk: van onder naar boven: 1^e / 2^e / 3^e / 4^e verdieping. Deze delen zijn niet ingekleurd op figuur 7;
- de volgorde van de vloerdelen nabij de breuklijn (op circa 3,0 tot 3,5 meter van as Bs) tussen de assen A en E liggen in een afwijkende volgorde op elkaar, namelijk: van onder naar boven: 1^e / 4^e / 3^e / 2^e verdieping. Deze delen zijn paars ingekleurd in figuur 7. Tevens wordt opgemerkt, dat daar de vloerdelen van de 4^e, 3^e en 2^e verdiepingvloer op zijn kop liggen, zie ook foto 6. De vloerdelen zijn geroteerd om een as evenwijdig aan naad 1.

Tussen de gebouwdilatatie op as 4 en naad A ligt eveneens een klein gedeelte van de 4^e verdiepingvloer ‘op zijn kop’.



figuur 7 Overzicht van schade in bouwdeel B en positie van bezweken vloerdeelen.

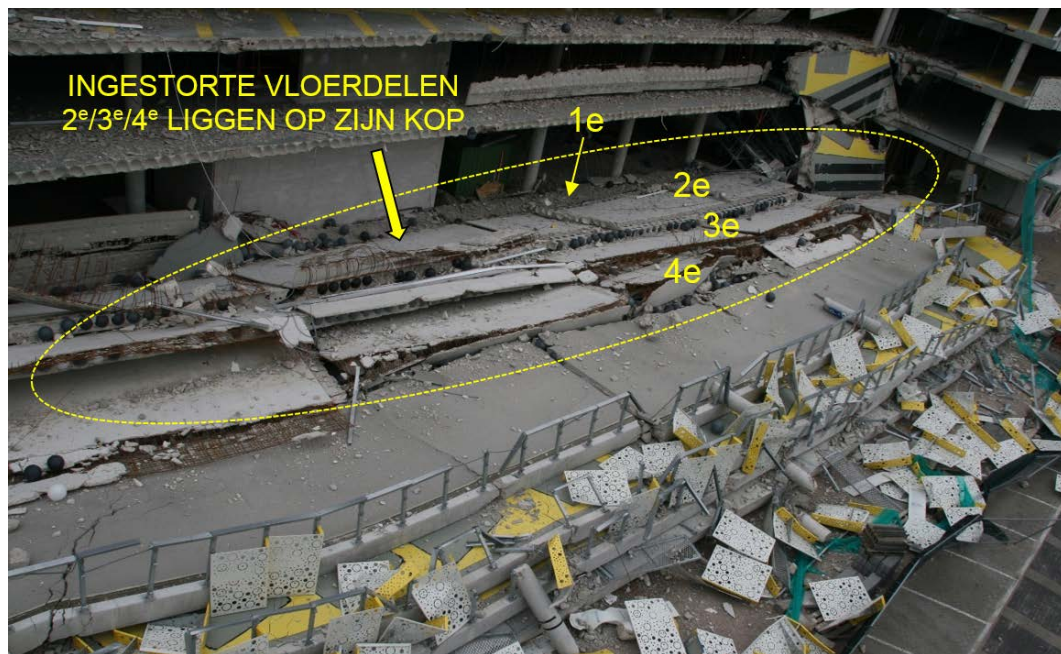
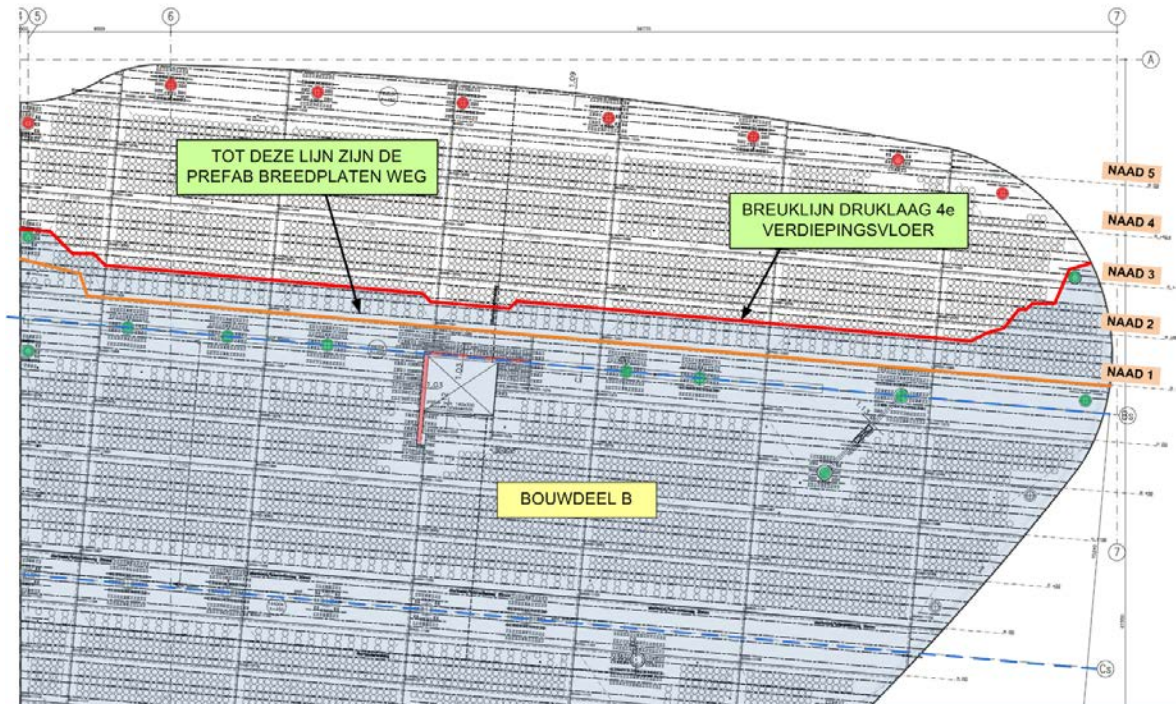


foto 6 Positie bezweken vloerdeelen bouwdeel B nabij de kern

De plaats van de breuklijn in de druklaag van de 4^e verdiepingsvloer is met een rode lijn weergegeven op de plattegrond, zie figuur 8. Tijdens de observatie is geconstateerd, dat de breedplaten over een groter oppervlak los zijn gekomen en naar beneden zijn gevallen. In figuur 8 is met een oranje lijn schematisch weergegeven tot waar dit zich doorzet onder de nog aanwezige druklaag. Tot aan naad 1 is er geen breedplaat meer aanwezig. De 'breuklijn' bevindt zich op alle verdiepingen op circa 3,0 tot 3,5 meter van de kolommenrij op as B.



figuur 8 Fragment plattegrond 4^e verdiepingvloer met schematisch aangegeven:

- breuklijn betonnen verdiepingvloer (rode lijn);
- breuklijn tot waarde breedplaten los zijn gekomen (oranje lijn).

De breuklijn in de 4^e verdiepingvloer bevindt zich ter plaatse van:

- o de eerste volledige bollenrij vanaf de kolommenrij op as Bs, zie foto 7;
- o het einde van de steunpuntswapening in de vloer nabij as Bs.

Ter plaatse van de stabiliteitskern ligt de breuklijn iets (circa één bol) terug. De positie komt ook hier overeen met de eerste volledige bollenrij, die ter plaatse van de kern namelijk ook één bol terug ligt. De steunpuntswapening loopt hier eveneens 'minder ver door'.

Nabij de dilatatievoeg tussen beide bouwdelen is geconstateerd, dat de breuklijn door de posities van de kolommen iets verspringt. Schematisch is dit aangegeven op de plattegrond van de 4^e verdiepingvloer in figuur 8. Ook aan de andere zijde van het ingestorte deel – nabij as 7 boven de hellingbaan – loopt de breuklijn schuin weg naar kolom 22. Nabij kolom 21 en 22 ligt het losgekomen deel van de breedplaat van de dakvloer op de 3^e verdiepingvloer.

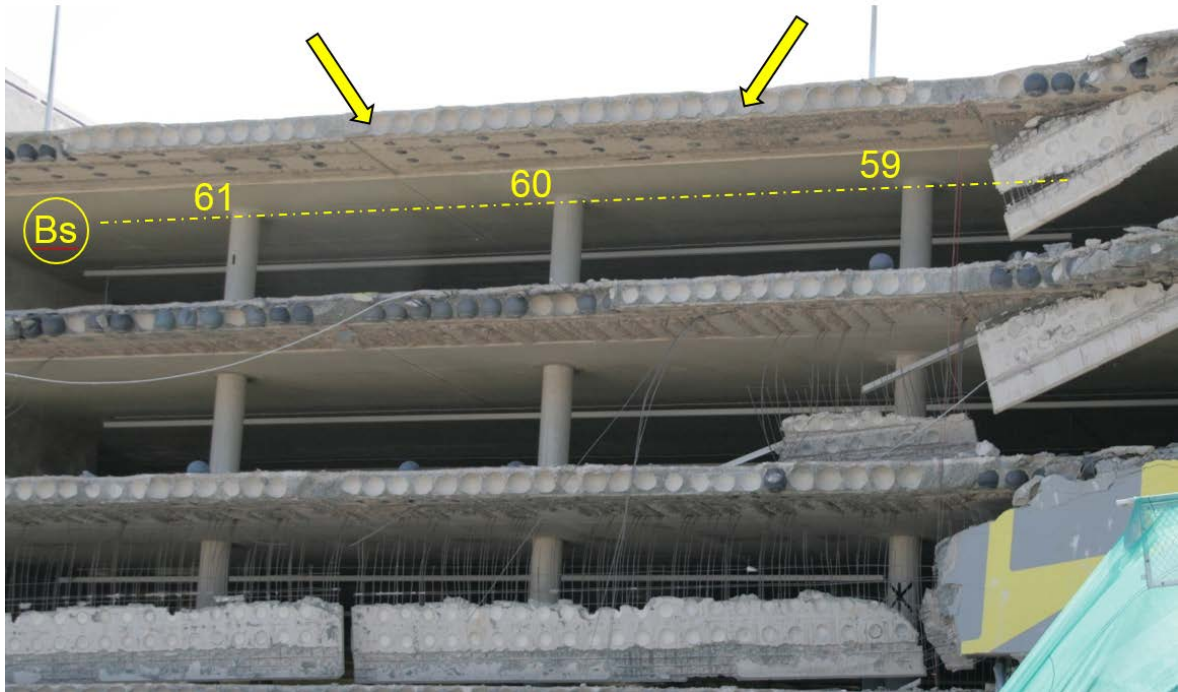


foto 7 Breuklijn bij de 4^e, 3^e en 2^e verdiepingvloer

En zijn in de verschillende delen van de bezweken dakvloer geen scheuren en of schades aangetroffen die zouden kunnen duiden op ponsgedrag. De scheuren in de vloer lopen in het algemeen haaks op en evenwijdige aan de vloerrand. Op de posities waar scheuren in de bovenzijde van de betonnen dakvloer zijn geconstateerd, bevindt zich:

- een gedeelte van een bezweken kolom (onder de vloer);
- een plaatnaad tussen de breedplaten;
- een stortnaad tussen de verschillende stortfasen.

Verder is geconstateerd dat:

- o bij veel breuklijnen de BubbleDeck vloeren op het aansluitvlak tussen de breedplaat en de betonnen druklaag zijn bezweken, zie foto 8;
- o het breukvlak in de druklaag onder een kleine hoek naar binnen loopt;
- o de kunststof bollen en de (kapot getrokken) wapening van de tralieliggers aan de onderzijde van de druklaag nog duidelijk zichtbaar zijn;
- o de bovenzijde van de breedplaten een glad oppervlak hebben;
- o afdrucken van koppelstaven op de bovenzijde van de breedplaten zichtbaar zijn;
- o in de betonnen druklaag van de verdiepingvloeren diverse leidingen en mantelbuizen zijn opgenomen;
- o een aantal delen van breedplaten nog aan de verdiepingvloeren hangt;
- o onder de verdiepingvloeren nabij kolom 22 (boven de hellingbaan) grote delen en soms hele breedplaten ontbreken.



foto 8 Onderzijde bezwiken vloerdeel met aan de rechterzijde de uitstekende koppelwepening en een deel van de druklaag

In totaal zijn tijdens de instorting acht gevelkolommen $\text{Ø}450$ mm bezwiken. Meerdere kolommen zijn beschadigd geraakt. De restanten van de gevelkolommen vertonen vaak een bezwijkvlak haaks op de lengte as. Op foto 9 is een deel van een bezwiken kolom tussen de 3^e en 4^e verdiepingvloer te zien. De bovenste kop van de kolom met daarin een bezwiken centraal geplaatste stek is zichtbaar. Op foto 10 is een aantal restanten van de kolommen zichtbaar.



foto 9 Kolom tussen 3^e en 4^e verdiepingvloer



foto 10 Afgevoerde en opgeslagen kolomdelen

3.2.3 Bouwdeel A

Uit de dronebeelden is afgeleid dat de in de dakvloer van het nog intact zijnde bouwdeel A sprake is van ernstige scheurvorming. Deze scheurvorming is aanwezig in de vorm van stervormige (radiale) scheuren boven aansluitingen met kolommen, zie foto 11, en scheuren evenwijdig aan en nabij as B, waar de eerste rij met middenkolommen aanwezig is, zie foto 12.

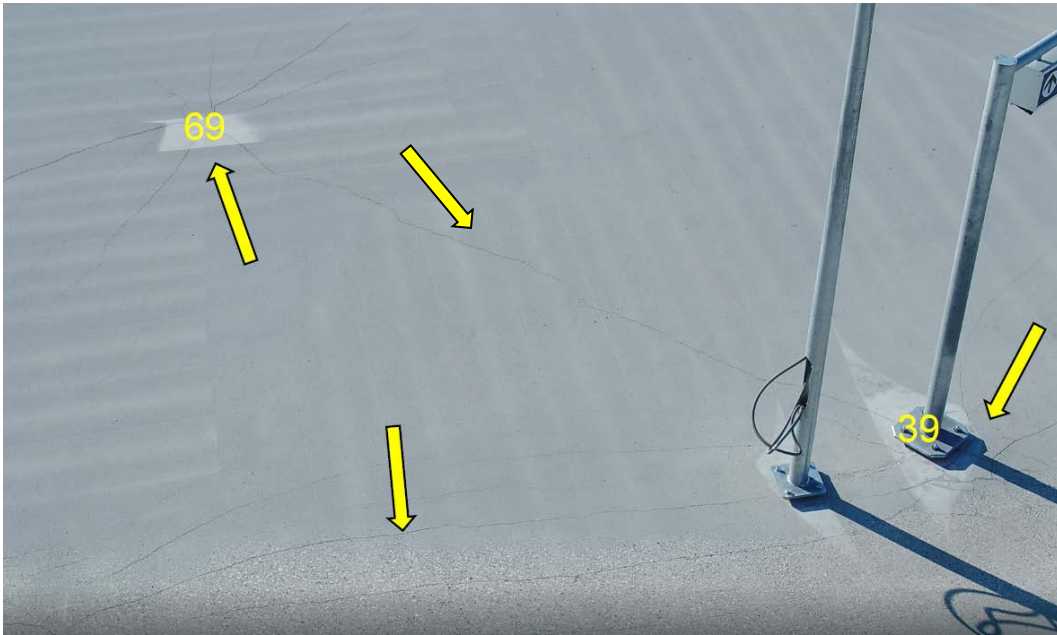


foto 11 Scheurvorming in dakvloer nabij kolommen 69 en 39 [90]

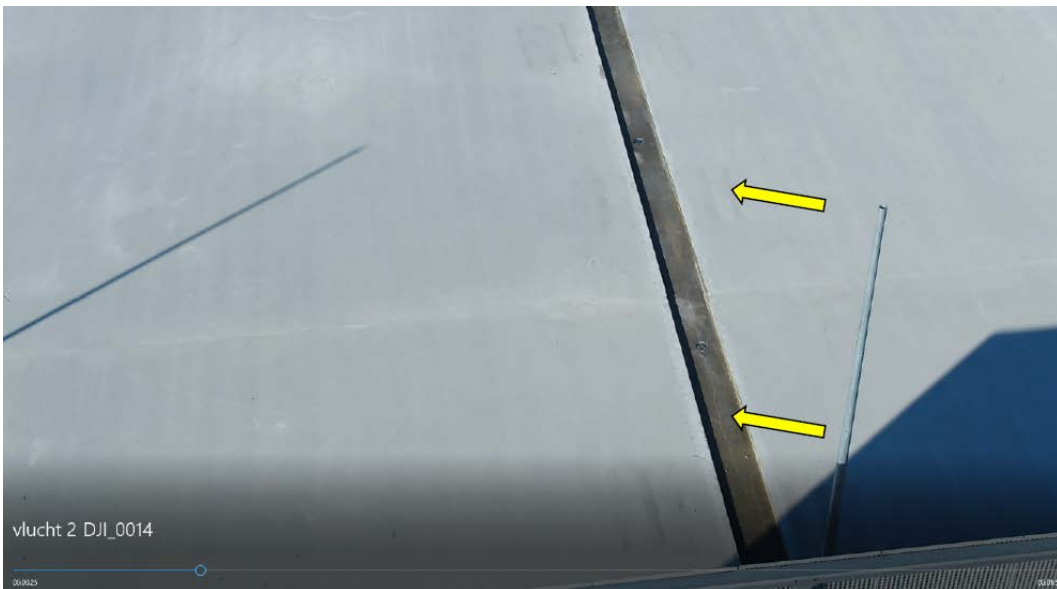


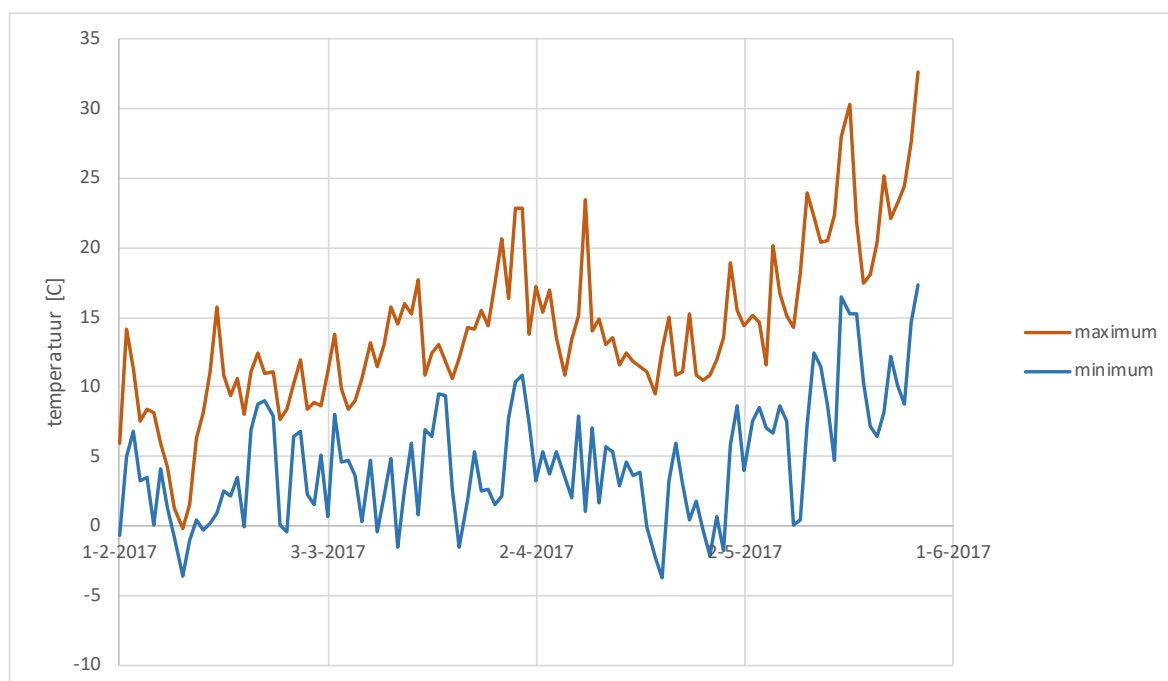
foto 12 Scheurvorming in dakvloer in en evenwijdig aan goot bij as B [91]

3.3 Het weer tijdens het bezwijken

Op 27 mei jl. was sprake van een relatief warme dag met een gemiddelde temperatuur van 24,3°. De maximale temperatuur van 33,4° werd gemeten tussen 17:00 en 18:00 uur, zie figuur 9. Om 19:00 uur, het tijdstip van het bezwijken van de constructie, was het circa 32,3°. Er is geen neerslag gevallen en de hoogst gemeten uurgemiddelde windsnelheid is 5 m/s bij een richting ZZO.

Het weer kenmerkte zich door veel zonschijn-uren: 14,3. Dit is 89% van de mogelijke zonschijn-uren die dag.

Verder kan worden opgemerkt dat de temperatuur op 27 mei, de hoogste temperatuur was sinds het storten van de 4^e verdiepingvloer in begin februari, zie figuur 9.

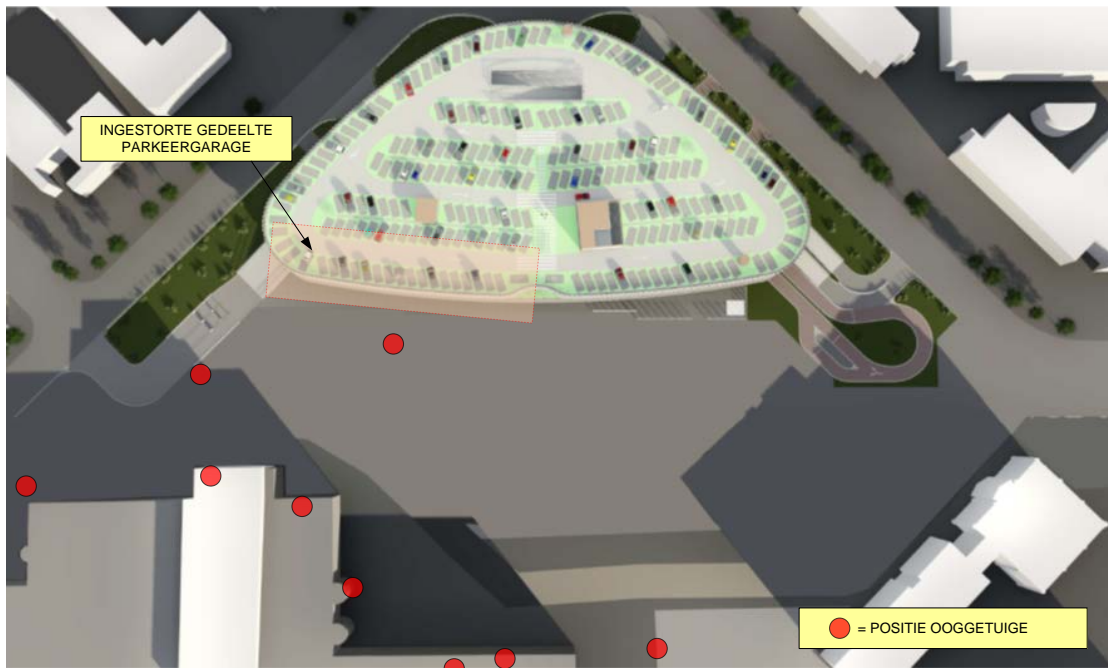


figuur 9 Temperatuursverloop weerstation Eindhoven in de periode 1-2-2107 tot en met 27-5-2017 bij weerstation Eindhoven

Een meer uitgebreide beschrijving van het weer op 27 mei 2017 is opgenomen in bijlage V.

3.4 Getuigenverklaringen

Door advocaten- en notariskantoor AKD te Eindhoven zijn van negen ooggetuigen verklaringen opgenomen. Acht getuigen hadden vanaf hun positie zicht op de parkeergarage op het moment dat deze gedeeltelijk instortte, zie figuur 10. Drie van de acht getuigen moesten zich gedeeltelijk om-draaien om het instorten daadwerkelijk te kunnen zien. Meerdere getuigen geven in hun verklaring expliciet aan dat ze de bovenste bouwlaag als eerste hebben zien instorten. Geen van de getuigen heeft voorafgaand aan de instorting ongewone trillingen gevoeld. Een meer uitgebreide samenvatting van de getuigenverklaring is opgenomen in bijlage VI.



figuur 10 Locatie van de negen ooggetuigen tijdens de instorting

3.5 Beelden van het bezwijken van de constructie

3.5.1 Zichtbare delen van de constructie

Tijdens het onderzoek zijn er van diverse camera's beelden beschikbaar gekomen waarop het bezwijken deels zichtbaar is. Beelden zijn beschikbaar van Eindhoven Airport en de Koninklijke Marechaussee (KMAR). Op de beelden van Eindhoven Airport is met name het onderste deel van bouwdeel B zichtbaar, rood raster in figuur 11. Van de KMAR zijn beelden beschikbaar waarop de bezweken constructie van de parkeergarage over de gehele hoogte en een beperkte deel van de breedte zichtbaar is, groene raster.



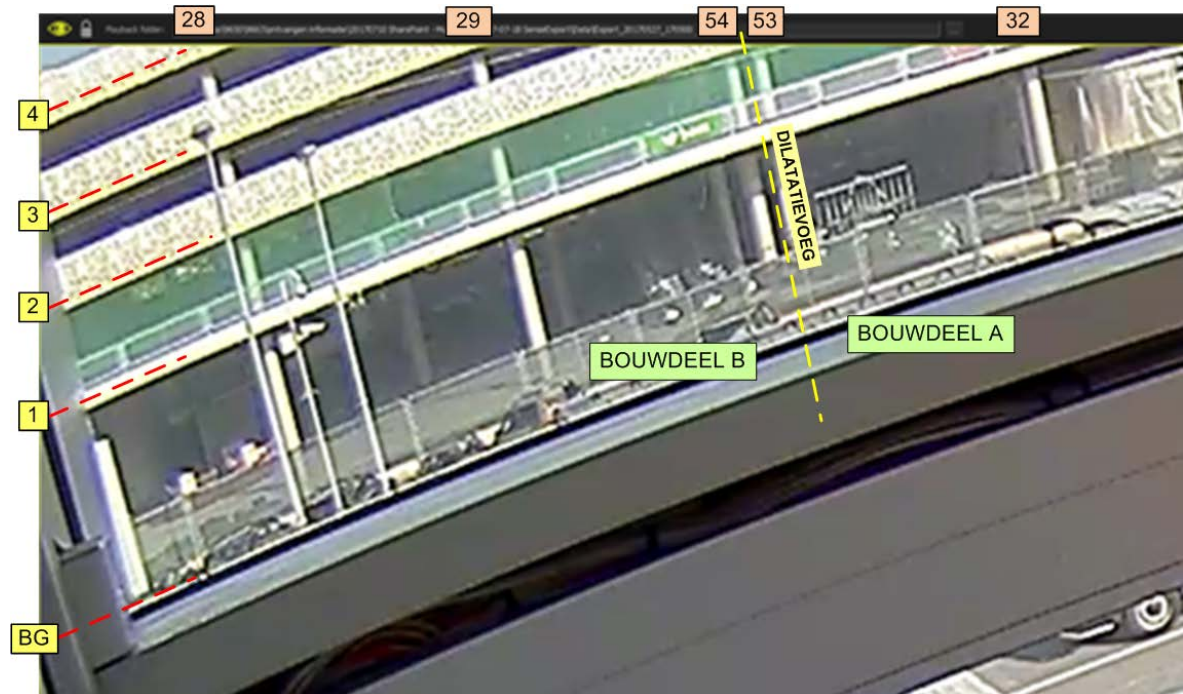
figuur 11 Zichtbare delen van de parkeergarage ten tijde van de instorting

In figuur 11 zijn naast de zichtbare delen van de constructie, ter oriëntatie ook de vloerniveaus en de kolomnummers weergegeven. Deze kolomnummers komen overeen met de nummers zoals door Archimedes zijn gehanteerd in zijn gewichtsberekening, zie ook figuur 6.

Een meer uitgebreide beschrijving van alle beschikbare beelden is opgenomen in bijlage VII.

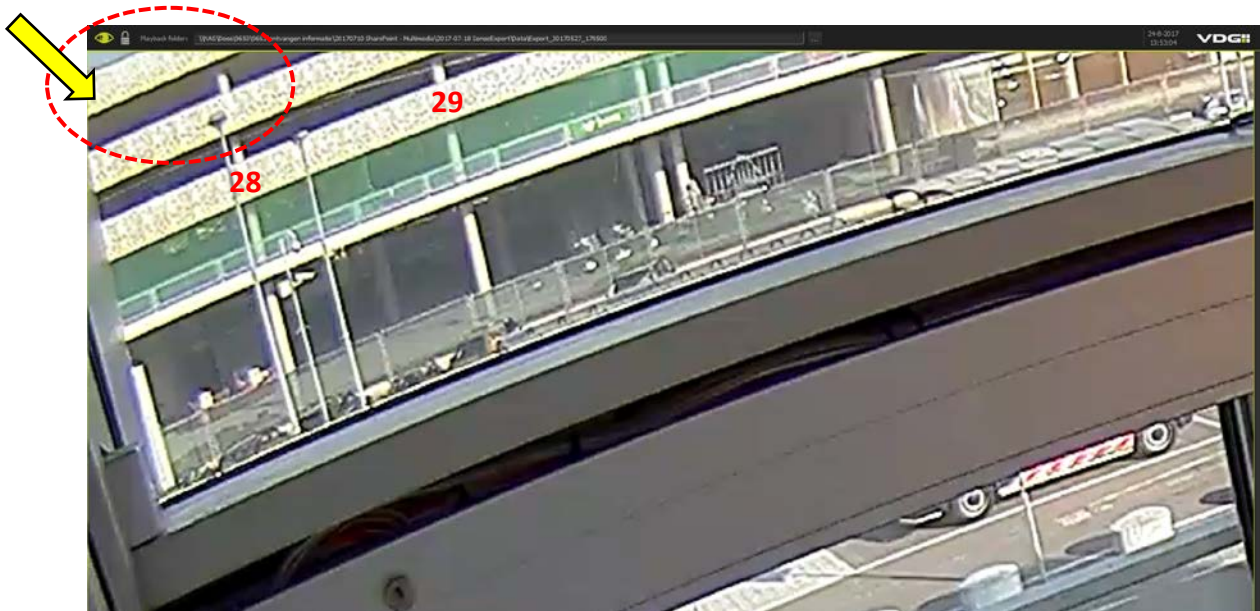
3.5.2 Beelden van de instorting

Met name de beelden van beveiligingscamera 114 van de KMAR [109] zijn het meest duidelijk in de beschrijving van het bezwijken van de constructie. Hierna zijn diverse screenshots van de beveiligingsbeelden opgenomen.



[19:00 uur 45,738 sec]

- Normale situatie



[19:00 uur 45,738 sec]

- Vloerrand 4^e verdieping (dakvloer) draait naar 'achteren'
- De lijn waar de verlichting onder 4^e verdieping hangt, is niet meer zichtbaar
- Aan de kolommen 28 en 29 en de overige verdiepingvloeren is nog niks te zien



[19:00 uur 46,418 sec]

- Vloerrand 4^e verdieping (dakvloer) draait in halve seconde verder naar 'achteren'
- Tussen onderzijde betonnen dakvloer en de kolom 28 ontstaat ruimte (zie schaduw)
- Aan kolommen en andere verdiepingvloeren is niets te zien
- Lijn met verlichting onder de 3^e verdiepingvloer is nog op dezelfde plek



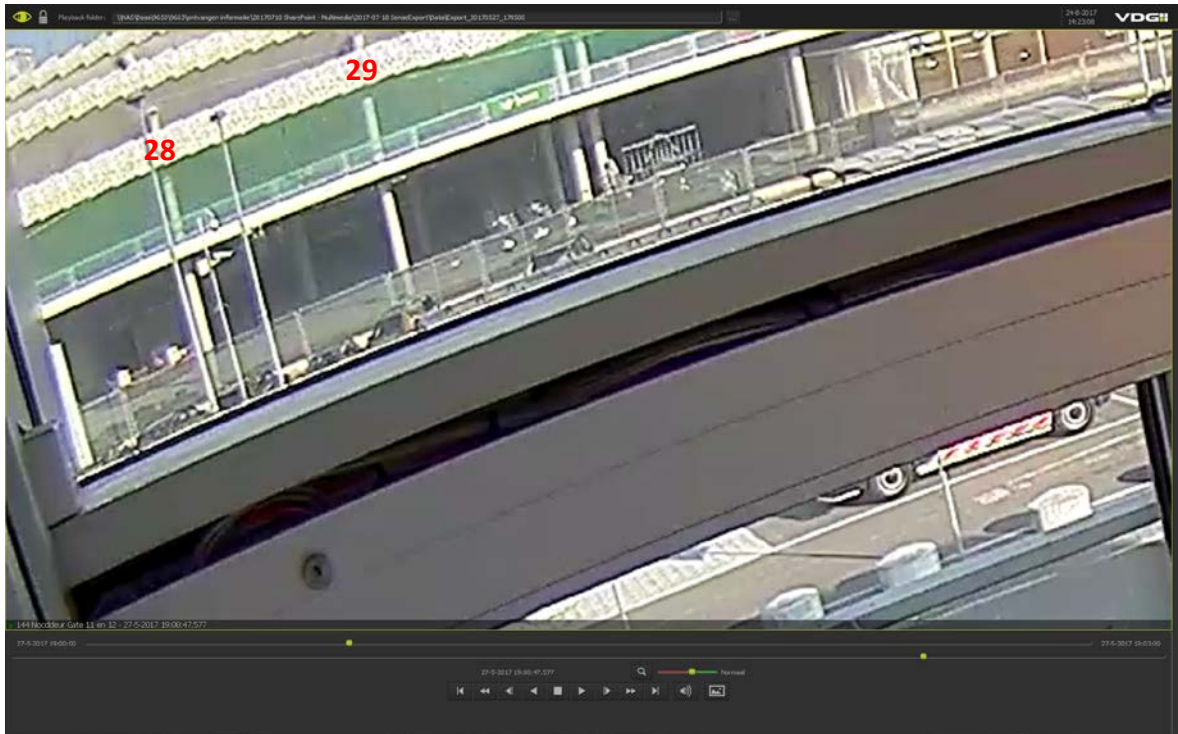
[19:00 uur 46,577 sec]

- De 3^e verdiepingvloer zakt
- De lijn waar de verlichting onder 3^e verdieping hangt, zakt – rechterdeel tussen kolom 29 en 54 blijft hierbij enigszins achter
- Kolommen onder de 3^e verdiepingvloer nog intact



[19:00 uur 47,177 sec]

- Vloerrand 3^e verdieping draait ook weg
- De verlichting die onder de 3^e verdiepingvloer hangt, is niet meer zichtbaar
- Kolom onder de 3^e verdiepingvloer scheurt
- Kolommen op BG, 1^e en 2^e verdieping nog intact



[19:00 uur 47,978 sec]

- Vloerrand 2^e verdieping draait weg
- Kolommen op BG en 1^e verdieping zijn nog intact



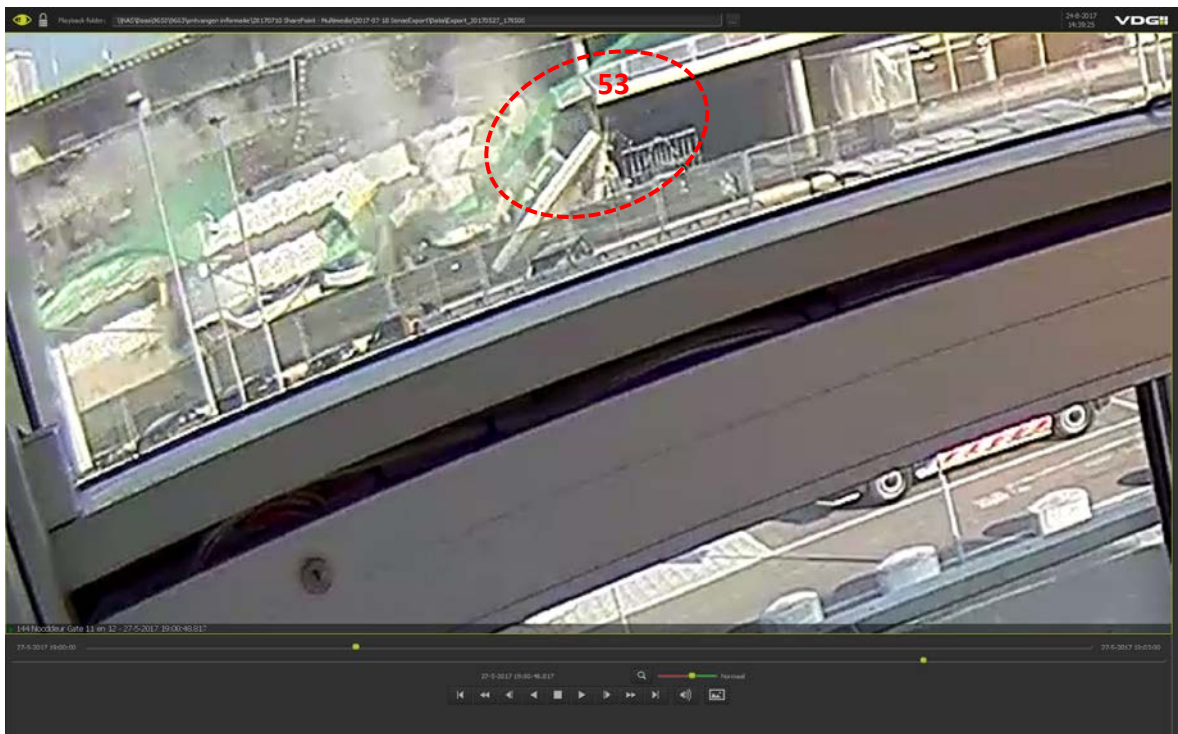
[19:00 uur 48,017 sec]

- Vloerrand 1^e verdieping draait weg
- Rechterdeel van de 1^e verdiepingvloer van bouwdeel B blijft achter
- Naad A (tussen kolommen 29 en 54) ter hoogte van de 1^e verdieping scheurt open
- Kolommen BG nog intact



[19:00 uur 48,017 sec]

- Het zichtbare deel van de 1^e verdiepingvloer is volledig weggedraaid en bereikt het maai-
veld
- Kolommen op BG blijven lang staan (scheuren, cq. bezwijken wel)
- Aansluitingen kolommen / 1^e verdiepingvloer bezwijken (kolom 28 en 29)
- Naad A in 1^e verdiepingvloer is volledig door



[19:00 uur 48,817 sec]

- Deel van de 1^e verdiepingvloer valt opzij tegen kolom 53 van bouwdeel A



[19:01 uur 10,057 sec]

- Stofwolken zijn opgetrokken
- Constructie parkeergarage gedeeltelijk ingestort
- Bij as A liggen de verdiepingvloeren op elkaar
- Kolom 53 van Bouwdeel A onder de 1^e verdiepingvloer is bezweken

Uit de hierna getoonde beelden van beveiligingscamera 117 van Eindhoven Airport [106] kan iets worden afgeleid over de volgorde van bezwijken over de breedte van Bouwdeel B. Hierbij moet worden opgemerkt dat de tijdstippen die bij de beelden van de verschillende camera's worden getoond en beschreven niet synchroon zijn.



[19:00 uur 47,735 sec]

- 2^e verdiepingvloer bezwijkt in het veld (voor de 1^e verdiepingvloer)
- Kolommen op de BG en de 1^e verdiepingvloer zijn nog intact
- Linkerdeel constructie is nog intact



[19:00 uur 47,975 sec]

- 1^e verdiepingvloer bezwijkt in het veld
- Kolommen op de BG zijn nog intact
- Linkerdeel constructie is nog deels intact

3.5.3 Samenvatting van bevindingen

Uit de beschikbare beelden kan worden afgeleid dat het bezwijken van de constructie bij de dakvloer is begonnen. Tevens kan worden gezien dat de voortgang van het bezwijken over de breedte van het bouwdeel zo is dat de delen van de tweede en eerste verdiepingvloer bij de kolommen 26 en 27 eerder bezwijken dan het deel bij de kolommen 25 en 24.

4 Beoordeling constructief ontwerp

Het gehele constructief ontwerp van de parkeergarage is uitgevoerd door Archimedes Bouwadvies uit Eindhoven (Archimedes). De berekeningen en tekeningen van de BubbleDeck vloeren zijn vervaardigd door Adviesburo Opzeeland uit Vlijmen (Opzeeland).

De door deze partijen vervaardigde berekeningen en tekeningen zijn beoordeeld. Een meer uitgebreid verslag daarvan is opgenomen in bijlage VIII. Bij de beoordeling zijn diverse zaken opgemerkt zonder dat daarbij de consequenties van een en ander verder zijn nagegaan. Het is zeer wel mogelijk dat bij een aantal van de hierna aangehaalde punten de gevolgen beperkt kunnen worden door een meer uitgebreide of op een andere theorie gebaseerde analyse.

Met betrekking tot de berekeningen van Archimedes zijn in de bijlage onder andere de volgende opmerkingen gemaakt:

- Er is op de begane grond bij het bepalen van de stootbelastingen ten gevolge van een zwaar voertuig, zoals bijvoorbeeld een bus, onvoldoende rekening gehouden met de snelheid van de bussen in het busstation dat onder de parkeergarage gelegen is;
- Bij de beoordeling van de stabiliteit zijn diverse deel opmerkingen te maken. Een aantal belangrijke opmerkingen worden hierna gegeven:
 - Er is geen rekening gehouden met de excentriciteit van de normaalkracht in de stabiliteitswand A;
 - De gehanteerde schematisering als ligger op twee steunpunten is een te eenvoudige weergave van de situatie, ten gevolge waarvan de effecten van bijvoorbeeld excentriciteiten en verschillen in stijfheid tussen de stabiliteitswanden onvoldoende worden beschouwd;
 - Initiële scheefstanden en 2^e orde effecten zijn niet beschouwd;
 - De fundering is niet getoetst op de effecten van de horizontale belastingen.
- Bij de berekening van de kolommen is de interactie tussen de vloeren en de kolommen niet beschouwd. Hierdoor is bij het toetsen van pons en de kolommen mogelijk uitgegaan van een te klein moment;
- Bij de toets van de stalen windbokken wordt uitgegaan van doorgaande diagonalen. In de praktijk zijn deze gedeeld. Het is niet duidelijk in welke mate deze deling in het ontwerp is beschouwd;
- In de berekening van de staalconstructie is geen beschouwing van de brandsituatie aangetroffen. Deze situatie is onder andere voor het vakwerk boven de inrit van de HOV terminal van essentieel belang;
- De schematisering van poeren met meer dan 4 palen is niet correct.

Met betrekking tot de berekeningen van Opzeeland zijn in de bijlage onder andere de volgende opmerkingen gemaakt:

- Bij de berekening worden Eurocode 2 (NEN-EN 1992-1-1) en CUR Aanbeveling 86 Bollenplaatvloeren gecombineerd gebruikt. De CUR Aanbeveling is bedoeld voor gebruik met de vorige generatie betonnormen VBC1995 (NEN 6720). Vanwege deze combinatie is het niet altijd duidelijk of een voldoende veiligheidsniveau wordt gehaald. Een voorbeeld hiervan is de beschouwing van de brandwerendheid;
- Er is bij schematisering geen rekening gehouden met de interactie tussen kolommen en de vloeren. Hierdoor kan bij het beoordelen van de ponsweerstand van een te gunstige situatie worden uitgegaan;
- De verankeringslengte van de diverse staven zijn niet berekend. Daarbij is bijvoorbeeld onduidelijk op welke wijze rekening wordt gehouden met een eventuele bundeling, plaatsing direct

op de plaat etc. en ook hoe met het voorgeschreven van het verschuiven van momentenlijnen is omgegaan;

- Een toets van de scheurvorming ontbreekt. In een parkeergarage moet, mede ten gevolge van de invloed van dooizouten aan de bovenzijde van de vloeren, de scheurwijdte beperkt blijven. Bij het toetsen van de scheurvorming kan ook niet voorbij worden gegaan aan de effecten van verhinderde opgelegde vervormingen, bijvoorbeeld ten gevolge van temperatuursveranderingen. Deze effecten zijn door Opzeeland niet beschouwd;
- Voor het beoordelen van de weerstand van de vloeren (een toets van de uiterste grenstoestand) is het beoordelen van de effecten van de temperatuur niet noodzakelijk omdat de slanke vloerconstructie in aanleg voldoende vervormingscapaciteit bezit. Een uitzondering hierop ontstaat indien pons bepalend wordt. Pons bezwijken kan namelijk bros zijn;
- In bijlage IX bij dit rapport is nader ingegaan op de ponsweerstand van de 4^e verdiepingvloer. Hieruit blijkt dat de in het ontwerp door Opzeeland aangehouden excentriciteitsfactor β , op basis van vereenvoudigde rekenregels in NEN-EN 1992-1-1, zowel bij de midden- als de gevelkolommen met circa 15% wordt overschreden als rekening wordt gehouden met een krachtsverdeling die volgt uit een stijve aansluiting tussen kolommen bepaald volgens de lineaire elasticiteitstheorie. Omdat ook de momentweerstand van de kolommen echter beperkt is, zal deze overschrijding bij het uitvoeren van een berekening volgens de niet-lineaire elasticiteitstheorie kleiner zijn;
- Hoewel de detaillering van de dwarskracht- en ponsbeugels niet ideaal is, is dit in de onderhavige situatie, mede gelet op de aangehouden reductie van de spanning in de ponsbeugels acceptabel;
- Een nadere beschouwing van pons, langsafschuiving en dwarskracht is later in dit rapport bij het beschouwen van mogelijke oorzaken opgenomen.

5 Eerste verkenning naar oorzaken van de schade

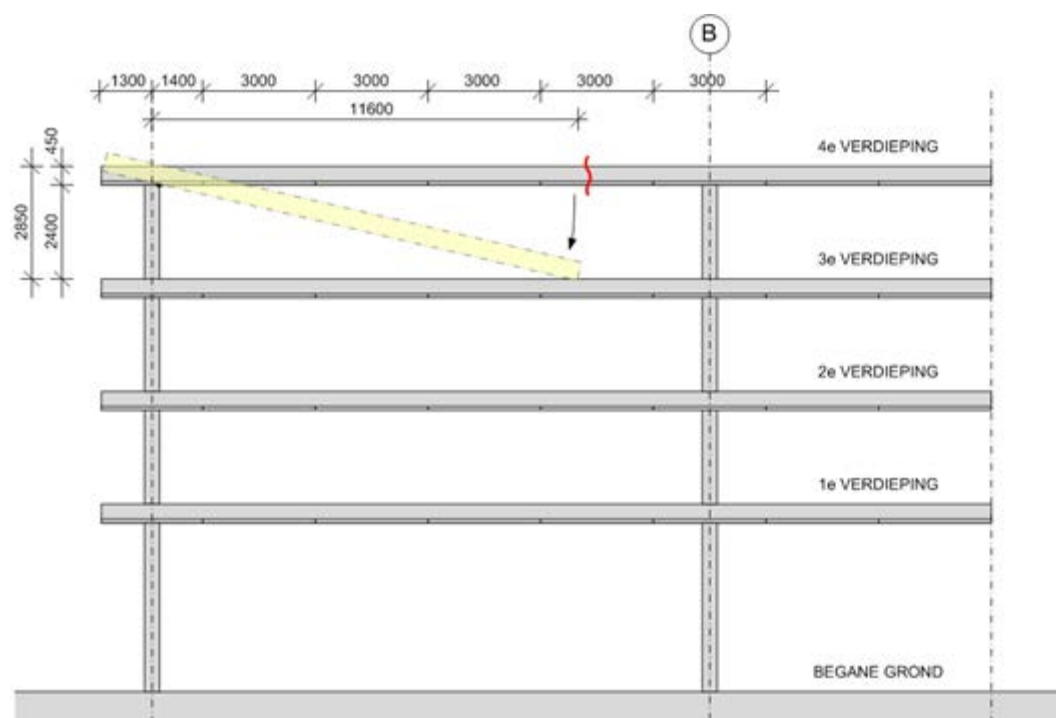
5.1 Inleiding

In het uitgevoerde onderzoek zijn diverse zaken naar voren gekomen waaruit blijkt dat het bezwijken van de constructie begonnen is bij de 4^e verdieping. Hierna wordt dit toegelicht middels een analyse van de videobeelden van de instorting en aan de hand van de analyse die door TNO is uitgevoerd op basis van de positie van de verschillende bezweken vloerdelen na het gedeeltelijk bezwijken van de constructie.

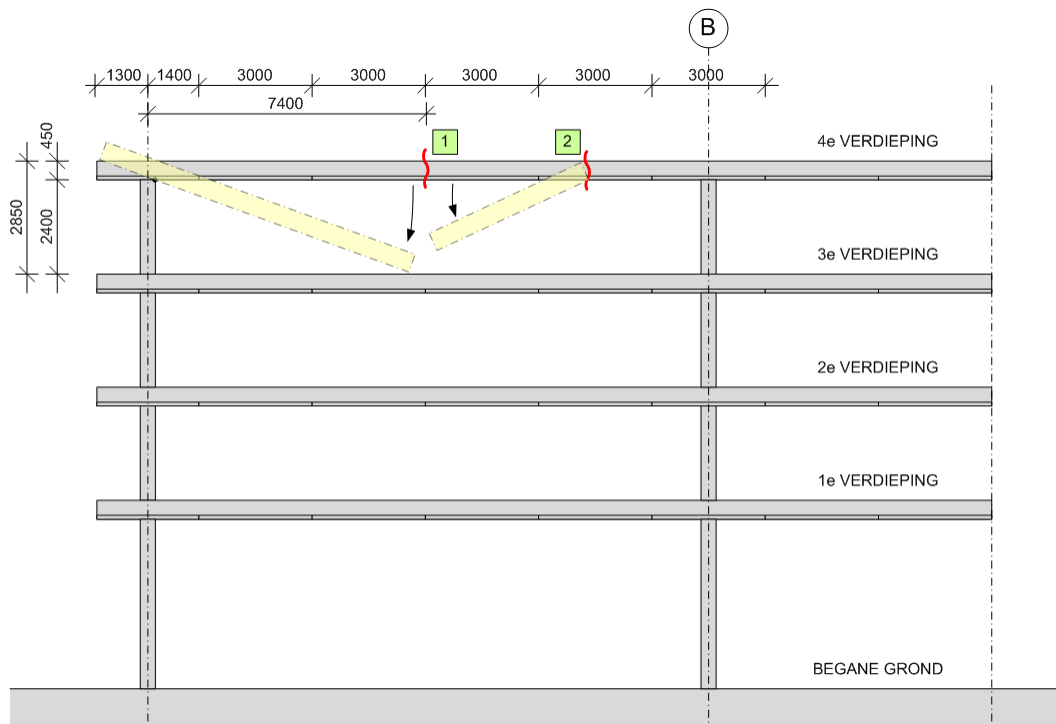
5.2 Analyse videobeelden van de instorting

In bijlage VII is beschreven dat uit de beelden van beveiligingscamera 117 van Eindhoven Airport blijkt dat de delen van de tweede en eerste verdiepingsvloer bij de kolommen 26 en 27 eerder bezwijken dan het deel bij de kolommen 25 en 24. Op basis van deze constatering is het aannemelijk dat het bezwijkbeeld van de kolommen 28 en 29 dat op beveiligingscamera 114 van de Koninklijke Marechaussee te zien is, gelijk of ten minste niet veel later optreedt dan het bezwijken bij kolommen 27.

In bijlage VII is op basis van de videobeelden van beveiligingscamera 114 beoordeeld of het bezwijken is begonnen nabij naad 1, zie figuur 6, of bij naad 3. Nagegaan is wat bij beide bezwijkvormen de hoekverdraaiing van het bezweken vloerdeel ter plaatse van de kolom zal zijn op het moment dat het bezweken vloerdeel de 3^e verdiepingsvloer raakt en deze vervolgens ook zal bezwijken. Vanwege de grotere lengte van het bezweken vloerdeel in geval bezwijken bij naad 1, zal de hoekverdraaiing die optreedt kleiner zijn dan in het geval bezwijken optreedt bij naad 3. Zie hiervoor figuur 12 en figuur 13.



figuur 12 Rotatie in geval bezwijken bij naad 1: 13,2°



figuur 13 Rotatie in geval bezwijken bij naad 3: 20,5°

Op basis van deze hoekverdraaiing kan nagegaan worden hoeveel de rand van het uitkragende deel van de vloer omhoog zal bewegen en hoeveel, in percentage, de verdiepingshoogte van de 3^e verdieping ter plaatse van de vloerrand zal toenemen. De toename is respectievelijk 11% en 18%.

Uit de beelden van de beveiligingscamera is afgeleid dat de toename van de verdiepingshoogte tot het moment dat ook de 3^e verdiepingvloer bezwijkt, ongeveer gelijk is aan 19%

Het is, gebaseerd op de rotatie van de dakvloer en de mate waarin uitkragende gedeelte (rand vloer tot de eerste kolom) omhoog komt, aannemelijk dat de naad 3 tussen de BubbleDeck breedplaten (in het midden van de overspanning van de dakvloer, naad 3) als eerste is bezwiken.

5.3 Analyse van TNO

TNO heeft in opdracht van Eindhoven Airport ook een onderzoek uitgevoerd naar het optreden van de instorting. Op 14 augustus is er op het kantoor van Eindhoven Airport een overleg geweest waarbij vertegenwoordigers van de luchthaven, BAM, TNO, Onderzoekraad voor de Veiligheid en Hageman aanwezig waren. TNO en Hageman hebben hierbij hun tussentijdse onderzoeksresultaten gepresenteerd.

In de presentatie van TNO [114] is mede op basis van een analyse van de positie van de verschillende bezwiken vloerdelen en een analyse hoe deze vloerdelen wat betreft positie bij verschillende bezwijkscenario's zouden zijn aangetroffen, geconcludeerd dat de dakvloer van bouwdeel B als eerste is bezwiken bij naad 3, tussen de naden A en F. Het is waarschijnlijk dat naad 3 als eerste is bezwiken tussen naad C en naad D.

De door TNO gepresenteerde analyse en conclusies worden door Hageman onderschreven.

5.4 Samenvatting en voorlopige conclusie

Op basis van de bevindingen uit de analyse van de restanten van het ingestorte deel van de constructie zoals mede door TNO is uitgevoerd en de analyse van de beschikbare camerabeelden staat het vast dat het bezwijken van een deel van bouwdeel B van de parkeergarage is begonnen bij de dakvloer of te wel de 4^e verdiepingsvloer. Er zijn geen aanwijzingen dat het bezwijken van deze vloer is veroorzaakt door zaken als vervormingen in de fundering, het bezwijken van kolommen en/of lager gelegen verdiepingsvloeren.

In beide genoemde analyses wordt vervolgens geconcludeerd dat de schade is ontstaan door het bezwijken van de vloer bij naad 3.

In het vervolg van het rapport zal voor drie mogelijke bezwijkmechanismen van de 4^e verdiepingsvloer van bouwdeel B worden nagegaan of dit een potentiële oorzaak is voor het bezwijken van de constructie. Dit onverlet dat bij twee van deze drie mechanismen het bezwijken niet bij naad 3 zal beginnen. De drie beschouwde mechanismen zijn:

1. Het bezwijken ten gevolge van het overschrijden van de ponsweerstand van de dakvloer bij de gevelkolommen op as A;
2. Het bezwijken ten gevolge van het overschrijden van de dwarskrachtweerstand van de Bubble-Deckvloer op de breuklijn tussen naad 2 en naad 1;
3. Het bezwijken ten gevolge van het overschrijden van de positieve momentweerstand ter plaatse van de langsnaad tussen twee breedplaten.

Aanvullend wordt opgemerkt dat er bij de observaties in de bezwiken vloerdelen en kolommen geen aanwijzingen zijn aangetroffen dat er bij de gevelkolommen sprake is geweest van pons van de verdiepingsvloer.

De gekozen werkwijze is mede gekozen omdat na de instorting en gedurende het onderzoek signalen en opmerkingen zijn ontvangen waarbij in de richting van de eerste twee genoemde mechanismen wordt gewezen.

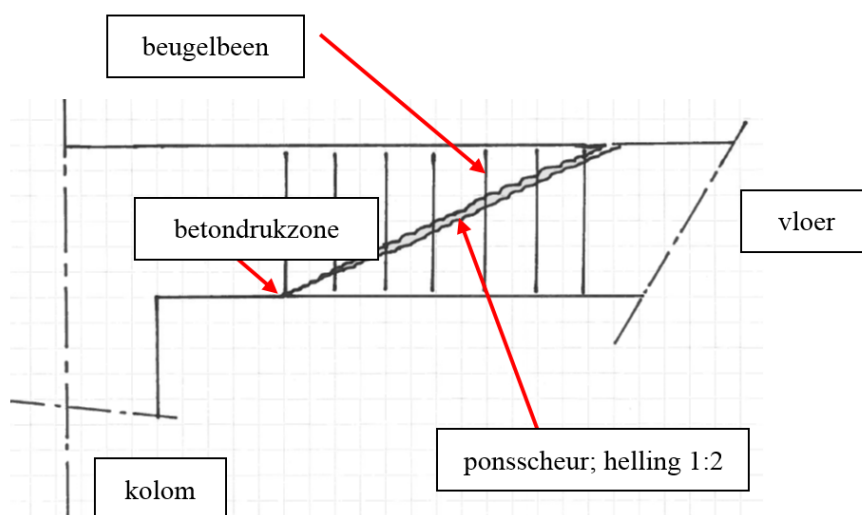
6 Pons van de dakvloer

Bij het verzamelen van gegevens zijn diverse zaken naar voren gekomen waaruit blijkt dat de ponsweerstand van de vloeren een kritisch aspect kan zijn. Deze zaken zijn:

1. aangetroffen stervormig (radiaal) scheurpatroon aan de bovenzijde van verdiepingsvloeren ter plaatse van de kolommen;
2. het verwaarlozen van de constructieve kwaliteit van de aansluiting tussen verdiepingsvloeren en kolommen bij het bepalen van de krachtsverdeling;
3. het gebruik van de excentriciteitsfactor β op basis van een vereenvoudigde rekenregel waarbij de vloer niet voldoet aan het toepassingsgebied voor de rekenregel;
4. de wijze van detailleren van de ponswapening;
5. het feit dat tijdens de uitvoering de ondersteuning van de verdiepingsvloeren bij een relatief lage druksterkte van het beton van de druklaag gedurende korte tijd is verwijderd zodat de constructie zijn eigen gewicht moest dragen.

In bijlage IX is de ponsweerstand van de vloer, zoals die in het ontwerp is beschouwd, beoordeeld. Hierbij is vooral aandacht besteed aan de punten 2 t/m 4 hiervoor. Daarbij is gebruik gemaakt van een 3D eindig elementen model van de constructie, dat door BAM is vervaardigd [70] en door Hageman is beoordeeld. Uit de analyse blijkt dat de bij het ontwerp aangehouden standaardwaarden voor de excentriciteitsfactor β maximaal circa 15% kleiner zijn dan de waarden die zouden volgen uit een ontwerp waarbij rekening is gehouden met een constructieve interactie tussen de kolommen en de vloeren en de excentriciteitsfactor is afgeleid vanuit de aanwezige excentriciteit tussen het zwaartepunt van de toets-perimeter en het aangrijpingspunt van de dwarskracht in die perimeter.

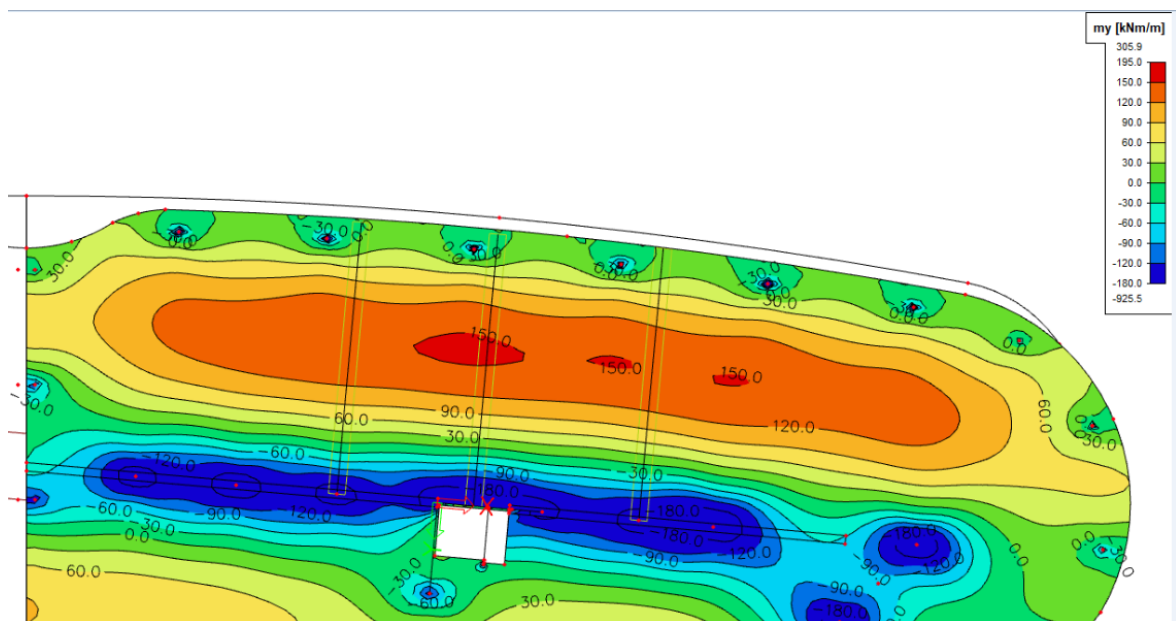
De toegepaste detaillering van de ponsbeugels is zo dat beugels die in een ponsscheur, dicht bij de boven- of onderkant van de vloer gelegen zijn, onvoldoende zijn verankerd aan de korte zijde van de beugel, zie figuur 14. Dit komt omdat de beugels in de drukzone zijn toegepast met een relatief grote dekking ten opzichte van de drukzonehoogte en aan de getrokken zijde niet in alle gevallen de buigtrekwapening omsluiten. In beide situaties is er wel een langsstaf in de hoek van de beugels aanwezig die de verankering verbetert. Deze mindere detaillering wordt voor een groot deel gecompenseerd door de overeenkomstig NEN-EN 1992-1-1 toegepaste reductiefactor van 0,75 op de staalsterkte van de beugels.



figuur 14 Diagonale ponsscheur met ponswapening

Gelet op de beperkte geconstateerde verschillen op de weerstand die voldoende zou zijn om het effect van de voorgeschreven rekenwaarde van de belasting te weerstaan, zullen deze aspecten niet de reden zijn geweest voor het bezwijken van de 4^e verdiepingsvloer ten gevolge van een overschrijding van de ponsweerstand.

Uit de observatie bij de brokstukken en de videobeelden van de instorting blijkt dat pons van de verdiepingsvloeren bij de gevelkolommen geen rol heeft gespeeld bij het bezwijken. Wel is het zo dat door het tijdelijk ontlasten van de stempels bij een beton met een relatief lage gemiddelde kubusdruksterkte van 21 N/mm² de ponsweerstand, die ondanks de toepassing van wapening, deels afhankelijk is van de betonbijdrage, gereduceerd zal worden. Dit heeft niet geleid tot het bezwijken van de vloer. Wel zijn in deze fase de radiale scheuren in de vloeren ontstaan. In figuur 15 zijn de momenten gegeven die volgens het BAM 3D model in de 4^e verdiepingsvloer van bouwdeel B ontstaan ten gevolge van de permanente belastingen. Boven de kolommen op as B zijn de momenten hier gelijk aan -180 kNm/m. Bij een massieve vloer met een hoogte van 450 mm resulteert dit moment in buigtrekspanningen van ruim 5 N/mm². Bij deze spanningen zullen in het beton met een gemiddelde druksterkte van 21 N/mm² scheuren ontstaan. De radiale scheuren zijn niet het gevolg van een ponsmechanisme. In die situatie zullen namelijk naast de radiale scheuren (stervormig) ook tangentiële scheuren (cirkelvormig) ontstaan.



figuur 15 Momenten met momentvector evenwijdig aan de letterassen bij belastinggeval permanente belasting als resultaat van het BAM 3D model [70]

Samenvattend wordt geconcludeerd dat het overschrijden van de ponsweerstand niet de oorzaak van het bezwijken van een deel van de 4^e verdiepingsvloer van bouwdeel B is geweest. Wel is vastgesteld dat de rekenwaarde van de ponsweerstand bij een aantal kolommen van de vervaardigde constructie onvoldoende is om de effecten van de rekenwaarde van de belastingen te kunnen weerstaan. Omdat ook de momentweerstand van de kolommen echter beperkt is, zal deze overschrijding bij het uitvoeren van een berekening volgens de niet-lineaire elasticiteitstheorie kleiner zijn.

7 Dwarskrachtweerstand tijdens de uitvoering

In figuur 12 is het mechanisme geschetst dat ontstaat als de dwarskrachtweerstand tijdens de uitvoering wordt overschreden. Dit overschrijden is eventueel mogelijk omdat op het moment van het schrikken van de constructie de druksterkte van de druklaag van de vloeren nog beperkt is. In bijlage X wordt meer gedetailleerd op het mogelijk optreden van dit mechanisme ingegaan.

De dwarskrachtweerstand van de vloerconstructies is in het ontwerp getoetst voor de blijvende situatie. Dat is rekenkundig de toestand waarin, onder andere, voor het toegepaste beton C35/45 (breedplaat en druklaag) een karakteristieke cilinderdruksterkte $f_{ck} = 35 \text{ N/mm}^2$ is gehanteerd. Tijdens de bouwfase, op het moment van het laten ‘schrikken’ van de vloerconstructie, was de karakteristieke ondergrenswaarde van de beton cilinderdruksterkte lager dan deze waarden en gebaseerd op een vereiste ontkistingssterkte. Op basis van gegevens over de bepalingsmethode van de ontkistingssterkte is vastgesteld dat de gemiddelde kubusdruksterkte ten tijde van het schrikken circa 21 N/mm^2 bedraagt. Hieruit is afgeleid dat de karakteristieke cilinderdruksterkte op dat moment gelijk is aan $13,6 \text{ N/mm}^2$ en de gemiddelde cilinderdruksterkte gelijk zal zijn aan $16,8 \text{ N/mm}^2$.

Uitgaande van de gemiddelde eigenschappen is de dwarskrachtsterkte van een massieve vloer bepaald. Uitgaande van de minimale schuifsterkte v_{\min} is deze gelijk aan 184 kN/m . Volgens CUR-Aanbeveling 86 ‘Bollenplaatvloeren’ mag als dwarskrachtweerstand van de BubbleDeck vloer 30% van deze waarde worden aangehouden. Dit komt overeen met 55 kN/m .

Met behulp van het BAM 3D model [70] is de grootte van de dwarskracht ten gevolge van de permanente belasting op de breuklijn bepaald. Hieruit volgt dat de weerstand van 55 kN/m over de beschouwde lijn (totale lengte ca. 60 m) bij twee stroken met een breedte van ruim 5 m en ruim 2 m wordt overschreden.

Opgemerkt moet worden dat de hiervoor gehanteerde methode voor het bepalen van de dwarskrachtweerstand gebaseerd is op een mechanisme waarbij een buigscheur zich verder gaat ontwikkelen tot een afschuifscheur (flexural shear failure). Uit figuur 15 blijkt dat juist in het gebied van de breuklijn de momenten relatief klein zijn. Het is daarom onwaarschijnlijk dat daar een buigscheur zal ontstaan die zich tot een afschuifscheur ontwikkelt. Dwarskrachtbezuigen zal in dat geval optreden doordat de hoofdtrekspanning in het midden van de doorsnede, in belangrijke mate bepaald door de schuifspanning, gelijk wordt aan de betontreksterkte, waarna scheurvorming optreedt en de doorsnede bezwijkt. Dit mechanisme wordt “diagonal tension failure” genoemd.

Bij een maximale dwarskracht ter plaatse van de breuklijn van 70 kN/m is uitgaande van de ongescheurde doorsnede in de doorsnede met de minimale breedte van 40 mm midden tussen twee bollen de hoofdtrekspanning gelijk aan $2,0 \text{ N/mm}^2$. De treksterkte van het beton zal beperkt zijn tot $1,6 \text{ N/mm}^2$. Het is dus mogelijk dat in het midden van de doorsnede een scheur ontstaat. Omdat de breedte van 40 mm slechts op één punt in de doorsnede aanwezig is en toeneemt als enige afstand tot dit punt aanwezig is, is het mogelijk dat na het ontstaan van de scheur een spanningsverdeling ontstaat waarbij in het over beperkte hoogte gescheurde beton geen spanning aanwezig is, en in het ongescheurde beton de hoofdtrekspanning kleiner is dan $1,6 \text{ N/mm}^2$.

Op verzoek van Opzeeland zijn door BAM op 3 augustus 2017 vier boorkernen geboord door Opzeeland opgegeven locaties. De locaties zijn gekozen op plaatsen waar de dwarskrachten het grootste zijn. Twee van de vier boorkernen zijn volledig intact. Bij een derde boorkern is tijdens het boren de breedplaat losgekomen van de druklaag en naar beneden gevallen in het niet toegankelijke

deel van de constructie. Bij één van de boorkernen, boorkern 1, is een scheur aanwezig ter plaatse van de kleinste breedte, zie foto 13. Op basis van de kleur van de scheur is vastgesteld dat de scheur voor een groot deel van het oppervlak nieuw was en voor een beperkt deel van het oppervlak mogelijk een oude scheur. De boorkernen geven geen aanwijzing dat er sprake is geweest van bezwijken door het overschrijden van de dwarskracht weerstand.



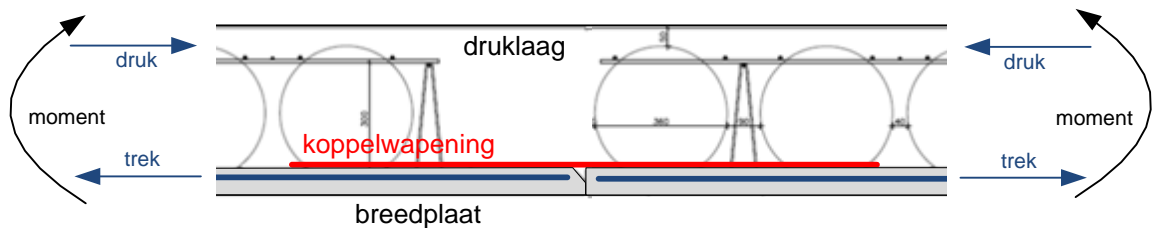
foto 13 Boorkern 1

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat uit een berekening met de betondruksterkte op het moment van 'schrikken' als uitgangspunt blijkt, dat de dwarskracht door de permanente belasting van de dakvloerconstructie, met belastingsfactor 1,0, in de betreffende doorsnede door het beton kan worden opgenomen. Echter, het ontstaan van een beperkte scheur in het deel van de doorsnede met de minimale breedte is daarbij niet uit te sluiten. De aanwezigheid van een oude scheur over een beperkt deel van de doorsnede van boorkern 1 is hier mogelijk aan toe te schrijven.

8 Momentweerstand van de langsvoegverbinding in de BubbleDeck vloer

8.1 Inleiding

Op basis van de beschikbare informatie waren er twijfels of de BubbleDeck vloer zoals ontworpen en uitgevoerd, ter plaatse van de langsnaden tussen de breedplaten voldoende capaciteit heeft om de veldmomenten met een momentvector evenwijdig aan de langsnaden, de naden 1 t/m 5 in figuur 6, te kunnen weerstaan.



figuur 16 Detail over de aansluiting ter plaatse van de langsnaden van de BubbleDeckvloer (getoonde configuratie van bollen is onder andere aanwezig bij naad 4)

De twijfels betreffen met name de kwaliteit van de overlappingslas die wordt gemaakt door het aanbrengen van de koppelwapening die over de voeg tussen twee breedplaten wordt aangebracht en direct op de breedplaten wordt geplaatst, met de wapening in de breedplaat, zie figuur 16. Dit vanwege een aantal factoren:

- o het verschil in de wapeningsconfiguratie van de wapening in de breedplaat en de koppelwapening;
- o de aanwezige verankeringslengte;
- o de overdracht van de trekkracht in de koppelwapening op de breedplaat naar de wapening in de breedplaat die moet worden overgebracht als schuifkracht door het aansluitvlak tussen de breedplaat en de druklaag;
- o de mogelijke slechte omhulling van de koppelwapening door het ter plaatse gestorte beton in verband met de directe plaatsing op de breedplaat, eventueel aanwezige bollen en eventuele geringe hart-op-hart-afstand tussen de staven;
- o de ondersteuning van de vloer is tijdelijk verwijderd bij een gemiddelde kubusdruksterkte van het beton van de druklaag gelijk aan circa 21 N/mm² terwijl BubbleDeck/Opzeeland hiervoor 34,5 N/mm² heeft aangegeven.

Om dit nader te onderzoeken is experimenteel onderzoek uitgevoerd naar de momentcapaciteit van de breedplaten ter plaatse van een langsvoeg tussen de platen. Hierbij zijn proefstukken beschouwd die overeenkomen met de BubbleDeck vloer ter plaatse van naad 3 en naad 4 (zie figuur 6).

Naast de momentweerstand van de constructie is ook de vervormingscapaciteit van het detail beschouwd.

8.2 Experimenteel onderzoek

8.2.1 Algemeen

Het experimentele onderzoek is uitgevoerd in het Structures Laboratory Eindhoven van de faculteit Bouwkunde van de TU/e. Ten behoeve van het onderzoek zijn in het laboratorium twee vloervelden van de bezweten dakvloer van bouwdeel B nagemaakt, ieder met een afmeting van $5 \times 6 \text{ m}^2$, zie figuur 17.



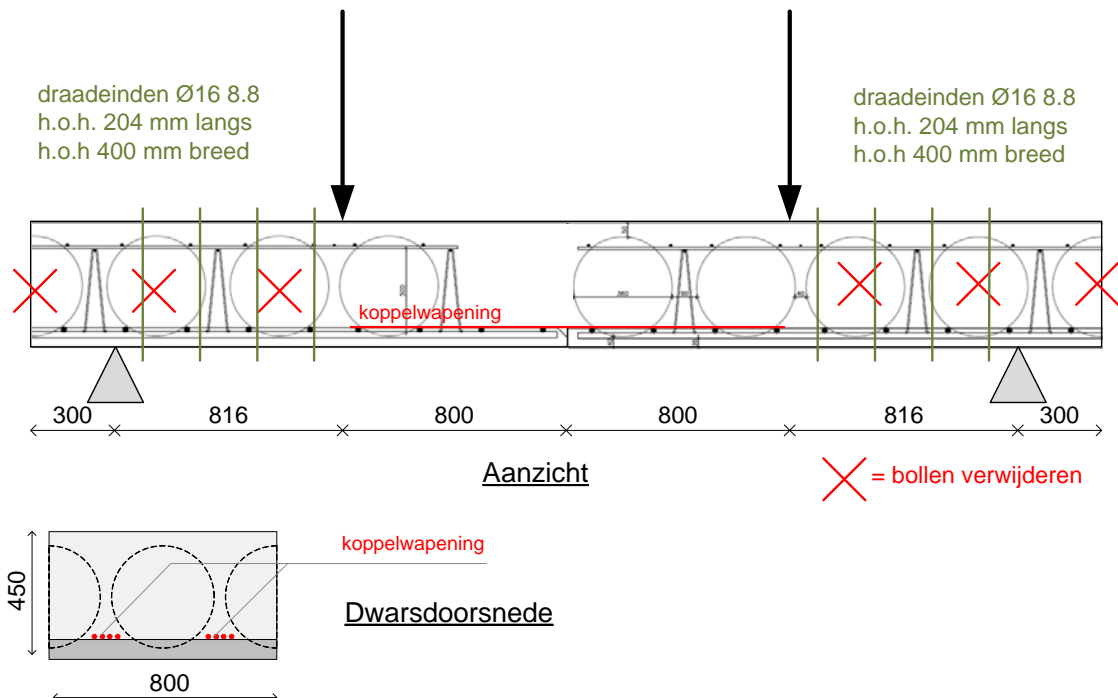
figuur 17 Positie proefstukken en vloervelden ten opzichte van de werkelijke constructie met daarin aangegeven de nummers van de breedplaatelmente

Uit de vloervelden zijn ieder 5 proefstukken gezaagd. Van de 10 proefstukken zijn er voor het onderhavige onderzoek 7 beproefd. Bij deze 7 proefstukken zijn de variaties aangehouden zoals aangegeven in tabel 2.

tabel 2 Overzicht van proefstukken en daarbij aangehouden variaties

Proefstuk	naad	koppelwapening per 400 mm	configuratie koppelwapening	bolconfiguratie	beproevingdatum	gemiddelde kubusdruksterkte beton druklaag [N/mm ²]
VL18	4	3Ø16+1Ø10	los	1 bol nabij de rand	1/8/17	22,7
VA18	4	3Ø16+1Ø10	bundel	1 bol nabij de rand	2/8/17	24,6
KL18	3	4Ø16	los	geen bol bij de rand	2/8/17	22,6
KA18	3	4Ø16	bundel	geen bol bij de rand	3/8/17	24,7
KL34a	3	4Ø16	los	geen bol bij de rand	11/8/17	33,3
VL34a	4	3Ø16+1Ø10	los	1 bol nabij de rand	28/8/17	36,3
KL34b	3	4Ø16	los	geen bol bij de rand	30/8/17	37,8

De proefstukken hebben een lengte van 3,8 meter en een breedte van 0,8 meter. Over de breedte van het proefstuk zijn één hele bol en twee halve bollen aanwezig en is de koppelwapening op twee plaatsen met een hart-op-hart afstand van 400 mm aangebracht, figuur 18. De proefstukken worden beproefd middels een vierpuntsbuigproef waarbij de kracht wordt opgelegd voor twee vijzels. In het proefstuk is ter plaatse van de verbinding sprake van een nagenoeg constant moment en is slechts een geringe dwarskracht aanwezig. In het deel van het proefstuk tussen de actie- en reactiekracht kunnen tijdens de proef relatief grote dwarskrachten optreden. Daarom zijn daar geen bollen toegepast en is de dwarskrachtweerstand vergroot door verankerde draadeinden toe te passen.

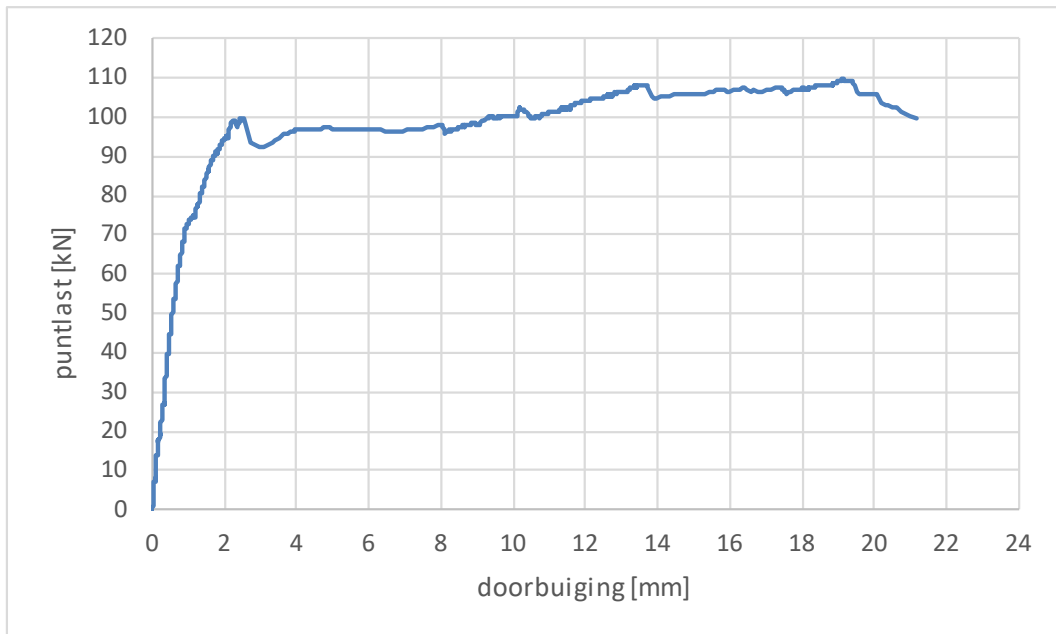


figuur 18 Overzicht van proefstuk en proefopstelling

8.2.2 Gedrag van de proefstukken

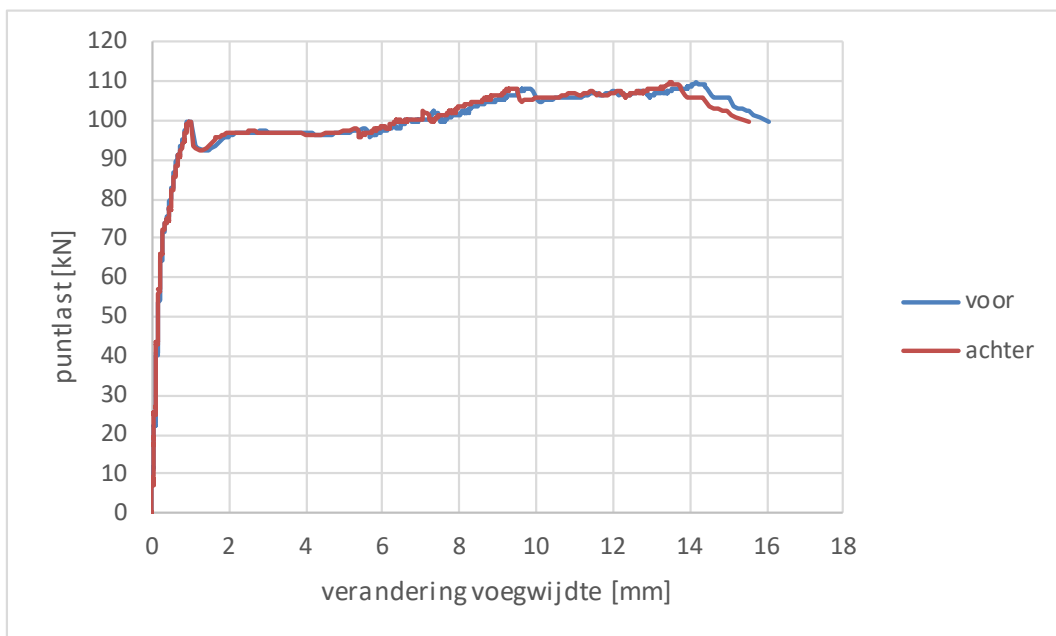
Het gedrag van de proefstukken tijdens de proeven is redelijk gelijk. Hierna wordt het gedrag aan de hand van proefstuk KL18 nader beschreven. Hierbij moet worden opgemerkt dat de maximale doorbuiging varieert van 6 tot 22 mm.

Het last-verplaatsingsgedrag van het proefstuk is gegeven in figuur 19. De aangegeven kracht is de grootte van de puntlast in één van de twee vijzels. De totale kracht op het proefstuk is dus gelijk aan tweemaal deze waarde. De maximale grootte van de puntlast is gelijk aan 109,5 kN en treedt op bij een doorbuiging van 19 mm. Het last-ervormingsgedrag vertoonde eerder al een piek van 99,8 kN bij een doorbuiging van 2,5 mm.

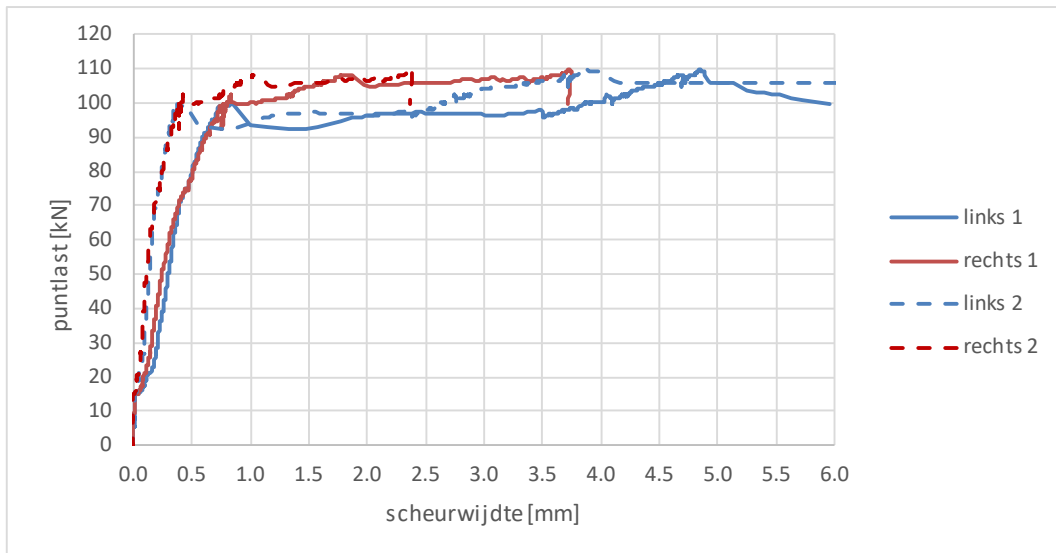


figuur 19 Last-ervormingsgedrag van proefstuk KL18

De vervorming van de naad tussen de breedplaten is beschreven middels de toename van de breedte van de naad tussen de twee breedplaten, zie figuur 20, en de scheurwijdte van de voeg in de verticale richting. In figuur 21 is de scheurwijdte beschreven op 50 mm vanaf de voeg (links 1 en rechts 1) en op 250 mm (links 2 en rechts 2) vanaf de voeg.



figuur 20 Toename van de breedte van de voeg bij proefstuk KL18



figuur 21 Scheurwijdte over voeg tussen breedplaat en druklaag op 50 mm (links 1 en rechts 1) en op 250 mm (links 2 en rechts 2) vanaf de naad

Op foto 14 is op het moment van een belasting van 105,6 kN de scheurvorming tussen de breedplaat en de druklaag zichtbaar.

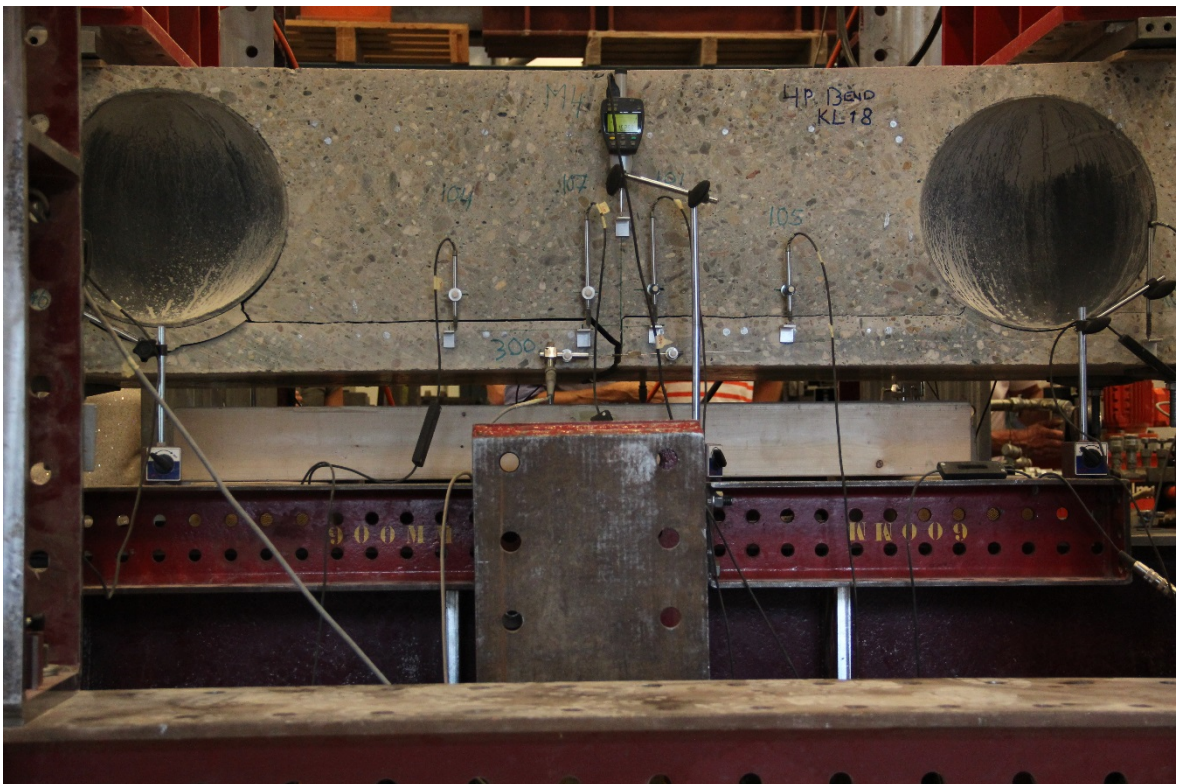


foto 14 Scheurvorming tussen breedplaten en druklaag van KL18 bij een belasting van 105,6 kN (2221 s) (breedplaten: rechts is 1047 – links is 1054)

Op foto 15 is het bezwaken proefstuk getoond. Het bezwijken treedt uiteindelijk op als de tralieligger op circa 400 mm vanaf de voeg tussen de breedplaten uit breedplaat 1054 wordt getrokken.

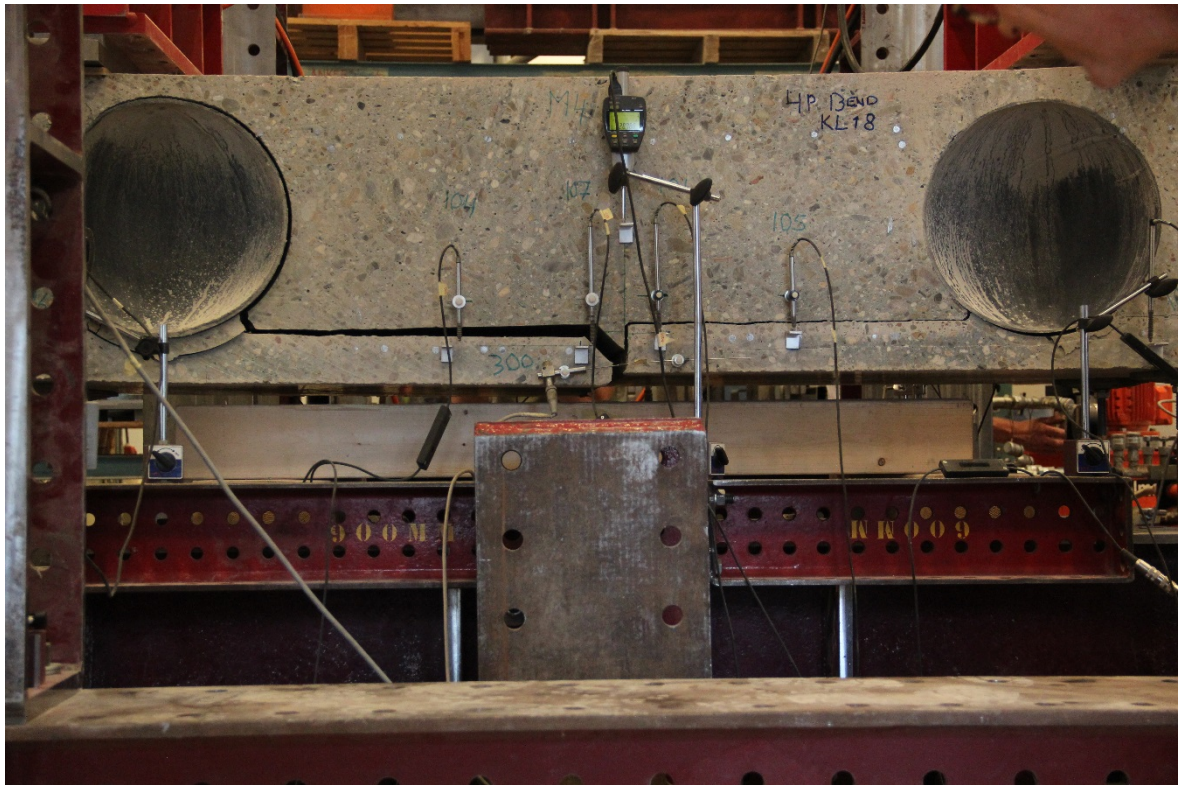


foto 15 Bezweken proefstuk KL18 bij een resterende belasting van 76,5 kN (2483 s)

Alle proefstukken bezwijken door het ontstaan van een scheur in het aansluitvlak tussen de breedplaat en de druklaag. De in deze scheur aanwezige tralieligger wordt vervolgens uit de breedplaat getrokken waarna het proefstuk bezwijkt. Bij alle proeven is een ductiel gedrag waargenomen waarbij bij een ongeveer gelijk blijvende weerstand een toename van de vervorming van het proefstuk optreedt. In tabel 3 is een samenvatting gegeven van de proefresultaten. De maximale belasting is hierbij omgewerkt naar een maximaal moment (per 0,8 m breedte).

tabel 3 Samenvatting van proefresultaten

proefstuk	datum	$f_{cm,cube}$ [MPa]	maximale last [kN]	maximaal moment [kNm]
VL18	1/8/17	22,7	110	100
VA18	2/8/17	24,6	118	106
KL18	2/8/17	22,6	110	100
KA18	3/8/17	24,7	113	102
KL34a	11/8/17	33,3	107	97
VL34a	28/8/17	36,3	120	108
KL34b	30/8/17	37,8	94	87

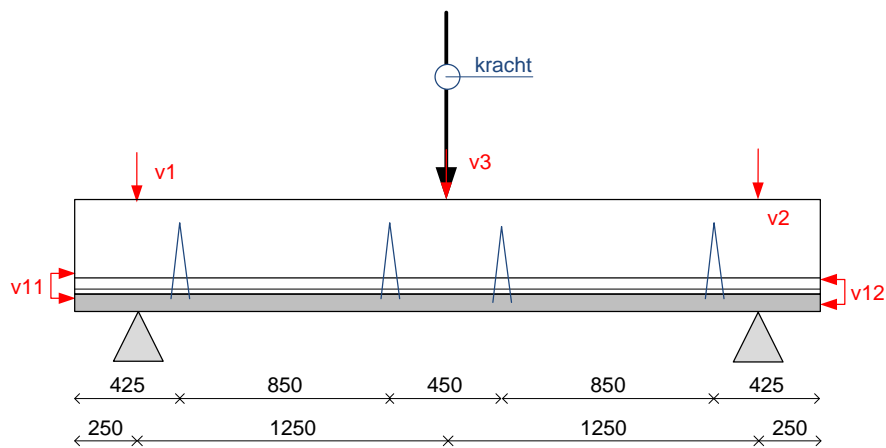
Tijdens het transport van de breedplaten is enkele schade opgetreden. In bijlage XI is informatie gegeven over de schade aan de breedplaten op basis waarvan een kanttekening wordt gemaakt bij het lage resultaat van proefstuk KL34b.

Op basis van de uitgevoerde proeven en de analyse hiervoor en beschreven in bijlage XI worden de volgende conclusies getrokken:

- Bezwijken vindt bij alle proefstukken op een zelfde wijze plaats, de capaciteit van het aansluitvlak is maatgevend;
- Bezwijken vindt plaats in het aansluitvlak met de meest vlakke breedplaat;
- De maximale last van de proefstukken varieert tussen 94 kN en 120 kN;
- Het lijkt alsof de variaties zoals:
 - de aanwezige knik bij naad 3 (1047 – 1054);
 - de hoeveelheid en detaillering van de koppelwapening;
 - de aanwezigheid van bollen nabij de voeg;
 - de druksterkte van het beton;
 geen significante invloed hebben op de grootte van de bezwijklast;
- De momentcapaciteit is gelijk aan circa 125 kNm/m.

8.2.3 Langsafschuifproeven

Naast de hiervoor beschreven proeven zijn ook langsafschuifproeven uitgevoerd op proefstukken waarbij een druklaag is gestort op een breedplaat met een lengte van 3 m, zie figuur 22. Er zijn daarbij twee variaties aangehouden: de betondruksterkte (22,7 of 37,5 N/mm²) en de aanwezigheid van 4 tralieliggers die in dwarsrichting in de breedplaat zijn opgenomen.



figuur 22 Proefopstelling voor langsafschuifproeven

Uit de proefstukken zonder tralieliggers is afgeleid dat de hechting tussen de druklaag en de breedplaat beperkt is. Na het vervaardigen van de proefstukken in de vloervelden van 5×6 m² en het uitzagen van de proefstukken, bleef bij het ophijzen van het proefstuk de breedplaat op de grond liggen.



foto 16 Bezweken proefstuk met een lage betonsterkte

Bij de proefstukken met tralieliggers en verschillende betonsterkte is een verschillende schuifsterkte gevonden: 0,46 N/mm² en 0,64 N/mm² bij respectievelijk 22,7 N/mm² (zie foto 16) en 37,5 N/mm² gemiddelde kubusdruksterkte. Ook is echter vastgesteld dat de ruwheid van de bovenzijde van de breedplaten bij beide proefstukken significant anders was. Bij het proefstuk met de hoge schuifsterkte was de onvlakheid 5,5 mm en werd deze gevormd door grindkorrels die beperkt boven het oppervlak uitsteken, zie foto 18. Bij het proefstuk met de lage schuifsterkte was de onvlakheid 2,6 mm waarbij deze onvlakheid wordt veroorzaakt door een golvend oppervlak, zie foto 17.



foto 17 Onvlakheid 2,6 mm



foto 18 Onvlakheid 5,5 mm

8.3 Analyse

8.3.1 Beoordeling van momentweerstand

Het moment dat als maximum weerstand gehaald wordt, is vergeleken met het bezwijkmoment dat bereikt zou worden als de koppelwapening tot vloeï zou zijn gekomen. Dit laatste moment, M_y , kan worden benaderd met de volgende vergelijking:

$$M_y = A_s f_s \left(d - 0,52 \frac{A_s f_s}{b \cdot 0,8 f_{cm,cube}} \right)$$

waarin:

A_s is het oppervlak van doorsnede van de koppelwapening;

f_s is de gemiddelde vloeïgrens van het wapeningsstaal, hier aangenomen als 550 N/mm²;

d is de effectieve hoogte van de koppelwapening, 372 mm;

b is de breedte van het proefstuk, 800 mm;

$f_{cm,cube}$ is de gemiddelde beton kubusdruksterkte.

In tabel 4 is de waarde van M_y en de waarde van de momentweerstand van het proefstuk M_R beschreven.

tabel 4 Samenvatting van proefresultaten

proefstuk	koppelwapening/ 400 mm	A_s [mm ²]	$f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	M_y [kNm]	M_R [kNm]
VL18	3Ø16 1Ø10	1362	22,7	259	100
VA18	3Ø16 1Ø1	1362	24,6	260	106
KL18	4Ø16	1608	22,6	301	100
KA18	4Ø16	1608	24,7	303	102
KL34a	4Ø16	1608	33,3	310	97
VL34a	3Ø16 1Ø1	1362	36,3	266	108
KL34b	4Ø16	1608	37,8	314	87

Uit tabel 4 blijkt dat de weerstand van de proefstuk fors kleiner is dan die bereikt zou worden als de koppelwapening tot vloeien zou komen. Bij de proefstukken met 4Ø16 als koppelwapening is de weerstand 33% van die verwacht wordt bij het vloeien van de wapening. Het bezwijken van de proefstukken in het aansluitvlak tussen de breedplaten heeft een fors lagere weerstand dan bij het bezwijken van de wapening zou worden gehaald.

8.3.2 Spanningen in het aansluitvlak

Hierna wordt voor de bezweken proefstukken een gemiddelde schuifspanning v in het aansluitvlak berekend op basis van een trekkracht in de koppelwapening F_k , die bij het bezwijken optreedt en die als afschuifkracht overgedragen moet worden via het bruto oppervlak van het afschuifvlak in de aansluiting tussen breedplaat en druklaag, A_a . Bij de bepaling van dit bruto oppervlak wordt de invloed van de bollen op het afschuifvlak niet beschouwd. Het oppervlak wordt gelijk aangenomen aan de breedte van het proefstuk maal de lengte van de verankering van de koppelwapening boven de breedplaat: $0,8 \cdot 0,775 = 0,62 \text{ m}^2$

$$F_v = A_s f_s M_R / M_y$$

$$v = F_v / A_a$$

tabel 5 Samenvatting van proefresultaten

proefstuk	$f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	koppelwapening/ 400 mm	A_s [mm ²]	M_y [kNm]	M_R [kNm]	F_v [kN]	v [N/mm ²]
VL18	22,7	3Ø16 1Ø10	1362	259	100	290	0,47
VA18	24,6	3Ø16 1Ø1	1362	260	106	305	0,49
KL18	22,6	4Ø16	1608	301	100	294	0,47
KA18	24,7	4Ø16	1608	303	102	297	0,48
KL34a	33,3	4Ø16	1608	310	97	277	0,45
VL34a	36,3	3Ø16 1Ø1	1362	266	108	304	0,49
KL34b	37,8	4Ø16	1608	314	87	245	0,40

Als deze proef KL34b buiten beschouwing wordt gelaten, zie 8.2.2, varieert de grootte van de gemiddelde schuifspanning v tussen 0,45 N/mm² en 0,49 N/mm².

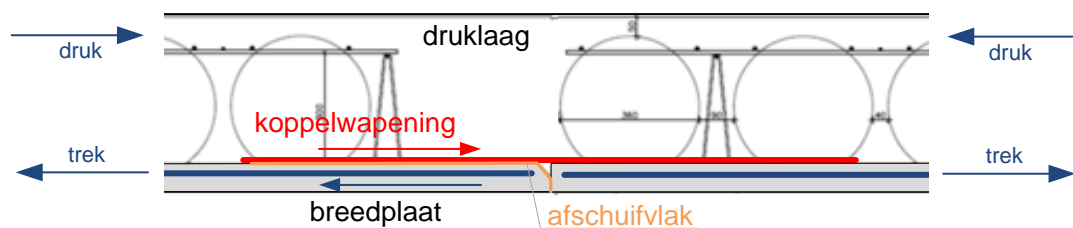
Het blijkt dat de grootte van de druksterkte van de druklaag, de laagste druksterkte van het aanwezige beton, geen invloed heeft op de grootte van de gemiddelde schuifspanning op het moment van bezwijken.

Verder kan geconcludeerd worden dat, bij de gevonden bezwijkvorm waarbij het aansluitvlak afschuift, verder onderzochte variaties, zoals de knik, het aantal aanwezige bollen en de verdeling van de koppelwapening, geen invloed hebben op de gevonden weerstand van de proefstukken.

8.3.3 Beantwoording van het doel van het onderzoek

Op basis van de beschikbare informatie waren er twijfels of de BubbleDeck vloer, zoals ontworpen en uitgevoerd, ter plaatse van de langsnaden tussen de breedplaten voldoende weerstand heeft om de veldmomenten met een momentvector evenwijdig aan de langsnaden te kunnen weerstaan. Deze twijfels betroffen met name de kwaliteit van de verbinding in de breedplaatvloer waarbij een overlappingslas wordt gemaakt door het aanbrengen van de koppelwapening, die over de voeg tussen twee breedplaten wordt aangebracht en direct op de breedplaten wordt geplaatst, met de wapening in de breedplaat.

Uit de proefresultaten is gebleken dat de verbinding niet de constructieve kwaliteit heeft om de koppelwapening op de breedplaten of de wapening in de breedplaten tot bezwijken te krijgen. Het bezwijken treedt op omdat de kracht in de koppelwapening en de wapening in de breedplaat als afschuifkracht door het aansluitvlak van de breedplaat en de druklaag moet en dat dit aansluitvlak onvoldoende weerstand heeft om deze kracht te weerstaan, zie figuur 23.

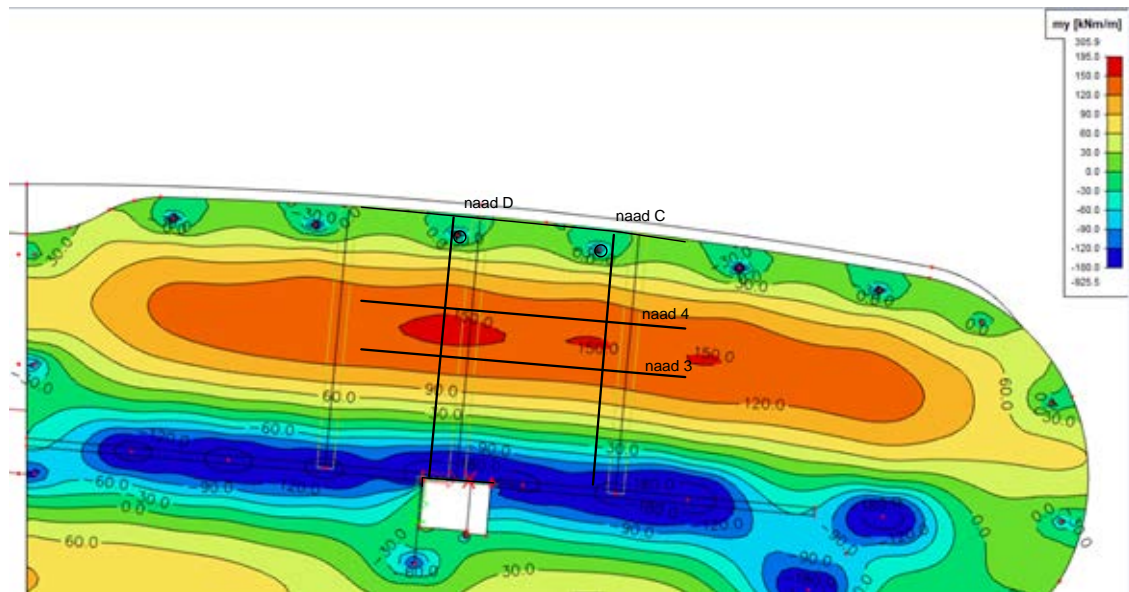


figuur 23 Afschuifvlak in aansluitvlak tussen breedplaat en druklaag en in overlappingslas tussen koppelwapening en breedplaatwapening

Tijdens de uitgevoerde experimenten op de verbinding is geconstateerd dat er weliswaar een te beperkte weerstand beschikbaar is, maar dat de verbinding wel enige vervormingscapaciteit bezit.

8.4 Relatie met het ontstaan van de schade

Uit de uitgevoerde proeven blijkt dat de gemiddelde momentweerstand bij de eerste zes uitgevoerde proeven gelijk is aan 102 kNm. Dit komt overeen met 128 kNm/m. Uit figuur 24 blijkt dat in het gebied van naad 3 tussen de assen C en D het positieve moment varieert tussen 120 en 150 kNm/m ten gevolge van uitsluitend permanente belasting.



figuur 24 Momenten met momentvector evenwijdig aan de langsvoegen ten gevolge van de permanente belasting volgens het BAM 3D model [70]

Hieruit volgt dat de weerstand van de verbinding ter plaatse van de langsnaad op veel plaatsen zal worden bereikt. De constructie kan dan alleen nog evenwicht vinden als er sprake is van een herverdeling van krachten. Dit is mogelijk als bij een toenemende doorbuiging van de overspanning tussen as A en B het moment in het veld gelijk blijft aan de weerstand en het steunpuntsmoment boven de middenkolommen op as B verder toeneemt. Er zijn in de constructie diverse aanwijzingen aangetroffen dat dit gedrag ook daadwerkelijk in zowel bouwdeel B als bouwdeel A is opgetreden:

- de plasvorming op de dakvloer van bouwdeel B duidt op een overmatige doorbuiging van het betreffende deel van het dak;
- de wijde naad 3 onder de dakvloer van bouwdeel B is een aanwijzing dat in de verbinding ter plaatse overmatige vervormingen zouden kunnen zijn optreden;
- de hoeveelheid scheuren in de dakvloer boven de middenkolommen op as B van bouwdeel A is een aanwijzing dat de negatieve momenten in de dakvloer daar ter plaatse relatief groot zijn.

8.5 Verschil tussen beoogde weerstand en aangetroffen weerstand

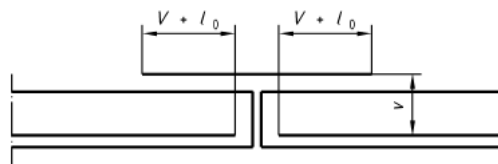
In het constructief ontwerp is aangenomen dat de momentweerstand van de verbinding wordt bepaald door het bezwijken van de koppelwapening of de wapening die in de breedplaat aanwezig is. Uit tabel 5 blijkt dat er een groot verschil is tussen de weerstand beoogd in het ontwerp, die uitgaande van gemiddelde materiaaleigenschappen gelijk is aan 260 tot 300 kNm, en de weerstand die gevonden wordt in de proeven: circa 100 kNm.

Gerelateerd aan dit grote verschil kunnen een aantal punten worden opgemerkt:

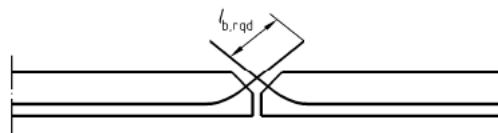
- Het bezwijkmechanisme dat tijdens de proeven is gevonden, wordt bij het ontwerp van breedplaatvloeren in het algemeen niet getoetst. Ook in de onderhavige situatie is geen toets van het aansluitvlak uitgevoerd.
- Het bezwijkmechanisme dat tijdens de proeven is gevonden, is in de literatuur voor een Bubble-Deck toepassing wel beschreven. In 'Gudmand-Høyer, T: 'Note on the moment capacity in a

Bubble deck joint', Volume 3, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, 2003 [115], wordt het afschuiven van de voeg tussen de druklaag en de breedplaat en een verankeringsbreuk van de koppelwapening als mechanisme beschouwd. In deze publicatie is afschuiven tussen de breedplaat en de druklaag niet maatgevend. In de beschreven situatie is de koppelwapening gelijk aan $\text{Ø}8\text{-}125$, wat beduidend minder is dan de in de onderhavige situatie toegepaste $\text{Ø}16\text{-}100$. Verder is geen informatie beschikbaar over de soort beton die voor de breedplaten is toegepast en de ruwheid van het oppervlak van de breedplaat.

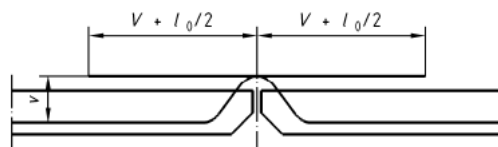
- o In de productnorm voor breedplaten, NEN-EN 13747 zijn in de informatieve annex F 'Ontwerp en berekening van breedplaatvoeren' een aantal details gegeven voor de detaillering van onderwapening bij de naad tussen de breedplaten, zie figuur 25. Hierbij is in de norm opgemerkt dat het detail dat wordt gebruikt mede afhankelijk is van het feit of er sprake is van een partiële of een volledige constructieve verbinding. Geconcludeerd wordt dat de in de onderhavige situatie toegepaste detaillering, die in Nederland gebruikelijk is, detail a) betreft, volgens de informatieve bijlage bedoeld voor een partiële verbinding terwijl op basis van de constructieve opzet van de vloer een volledige constructieve verbinding is vereist.



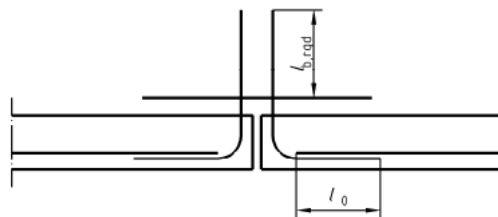
a) with additional bars placed in cast-in-situ concrete



b) with protruding floor-plate reinforcement



c) with protruding bent floor plate reinforcement



d) by additional reinforcement anchored in the floor plate

figuur 25 Verschillende wijzen van detailleren van de verbinding in een breedplaatvloer ter plaatse van de naad tussen twee breedplaten (figuur F.1 NEN-EN 13747)

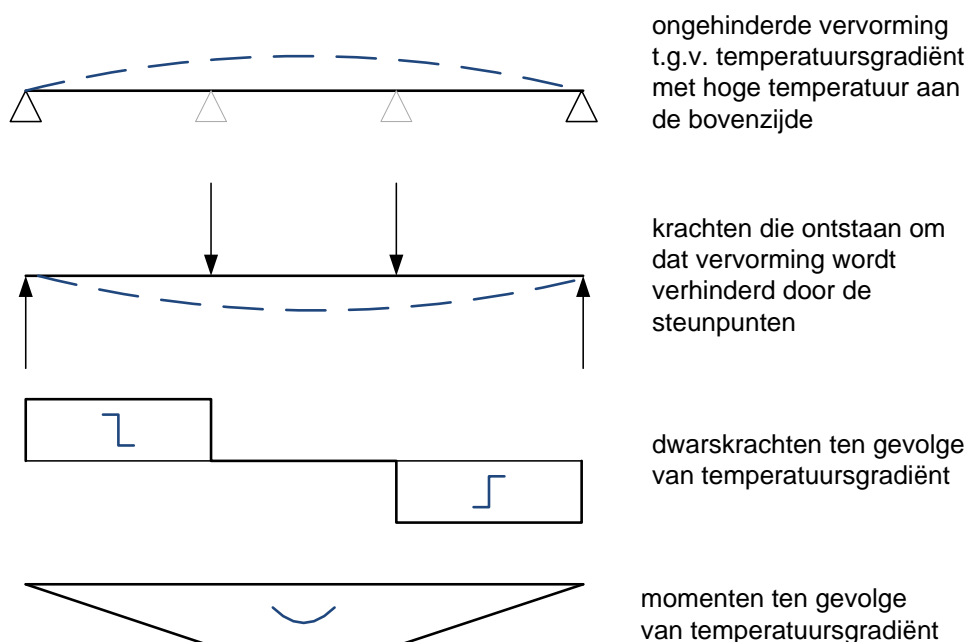
- De momentweerstand van langsvoegen van breedplaatvloeren is beschreven in Stehle, J., Kanellopoulos and B. Lai Karhaloo: 'Performance of joints in reinforced concrete slabs for two-way spanning action', Structures and Buildings, Volume 164, June 2011 [116]. Hierin is beschreven dat een proefstuk met een voeg, waarbij de tralieliggers op de rand van de breedplaat zijn geplaatst, iets minder presteert dan een monoliet proefstuk zonder voeg. Het beschouwde proefstuk bezwijkt wel ductiel. Bij een toepassing van breedplaatvloeren zonder tralieliggers wordt een significant lagere bezwijklast gevonden en ontbreekt ductiel bezwijkgedrag.
- Als de schuifsterkte van de aansluiting tussen de breedplaten en de druklaag die gevonden is in het uitgevoerde onderzoek wordt vergeleken met de waarden bij soortgelijke proeven moet worden geconcludeerd dat een afschuifsterkte van $0,46 \text{ N/mm}^2$ een erg lage waarde is. Publicaties van Patnaik uit 1999 [117] en Kovach and Naito uit 2008 [118] beschrijven schuifsterkten van $1,6 \text{ N/mm}^2$ en hoger. Dat lagere waarden worden gevonden is mogelijk te wijten aan de betreffende combinatie waarbij grindbeton wordt gestort op zelfverdichtend beton met een glad, niet nabewerkt oppervlak dat reeds ongeveer drie weken oud is.

9 Analyse naar de oorzaak van de schade

Op basis van de wijze waarop de verschillende vloerdelen na het gedeeltelijk bezwijken van de constructie van de parkeergarage zijn aangetroffen en de tijdens het onderzoek beschikbaar gekomen beelden van het bezwijken van de constructie wordt geconcludeerd dat het bezwijken is begonnen bij de dakvloer of te wel de 4^e verdiepingsvloer. Er zijn geen aanwijzingen dat het bezwijken van deze vloer is veroorzaakt door zaken als vervormingen in de fundering, het bezwijken van kolommen en/of lager gelegen verdiepingsvloeren.

Vervolgens is geconcludeerd dat de schade is ontstaan door het bezwijken van de vloer bij langsaanad 3 en dat het bezwijken zeer waarschijnlijk is begonnen tussen dwarsnaad C en D.

Opgemerkt wordt dat het op de dag van het bezwijken van de constructie relatief warm was en dat er sprake was van veel zonneschijn en een relatief hoge stand van de zon. Hierdoor zal met name in de dakvloer van de constructie een temperatuurgradiënt zijn ontstaan. Een vrije constructie zal hierdoor willen opbollen. De dakvloer wordt door de aansluiting met de kolommen echter verhinderd in zijn vervorming. Hierdoor ontstaat in de constructie een extra positief moment dat de veldmomenten zal vergroten en de steunpuntsmomenten zal verkleinen. Mede ten gevolge daarvan zal er extra belasting worden afgedragen op de gevelkolommen en worden de middenkolommen iets ontlast. Ook zal de dwarskracht op de locatie van de breuklijn in de vloer iets afnemen. Dit is in figuur 26 geschetst.



figuur 26 Constructief gedrag bij een temperatuurgradiënt in de dakvloer

Aanvullend op de analyse van de restanten en de videobeelden zijn drie bezwijkmechanismen beschouwd, namelijk:

- pons;
- dwarskracht;
- moment.

Uit deze beschouwing blijkt dat de ponsweerstand van de vloer niet zo beperkt is dat deze in de beschouwde situatie kritisch zal worden. Ook zijn er bij de bezwiken vloerdelen en kolommen geen aanwijzingen aangetroffen dat bezwijken door pons is opgetreden.

Bij de beschouwing van de dwarskrachtcapaciteit blijkt dat deze ten gevolge van het tijdelijk verwijderen van de onderstempeling bij een beperkte druksterkte van het beton, kritisch wordt. Het verschil tussen de grootste dwarskracht bij de aanwezige belasting en de gemiddelde weerstand van de constructie is beperkt. Toch zijn er een aantal argumenten op basis waarvan gesteld kan worden dat het bezwijken op dwarskracht niet het bepalende bezwijkmechanisme is geweest. Deze argumenten zijn:

- de onderstempeling is in februari van 2017 verwijderd en omdat de sterkte van de vloer gedurende de tijd zal toenemen, is het niet aannemelijk dat de vloer in een latere fase bij gelijkblijvende belasting alsnog zal bezwijken;
- het bezwijken is opgetreden op het einde van een warme dag waarbij ten gevolge van het temperatuurverschil tussen de bovenzijde van de dakvloer en de onderzijde van de dakvloer de dwarskracht in de beschouwde kritische snede juist ontlast wordt.

Uit het uitgevoerde experimentele onderzoek blijkt dat de momentweerstand van de BubbleDeckvloer ter plaatse van de langsnaden beperkt is. In de vloer treedt een bezwijkmechanisme op waarbij een scheur ontstaat in de aansluiting tussen de breedplaatvloer en de druklaag die tussen de koppelwapening in de druklaag en de wapening in de breedplaat doorloopt. De momentweerstand die in het experimentele onderzoek is gevonden, is kleiner dan de momenten die in de vloer aanwezig zijn ten gevolge van de aanwezige permanente belasting. Hierdoor zal een herverdeling van inwendige krachten zijn opgetreden en is het uiteindelijke bezwijken ontstaan. Het bezwijken volgens dit mechanisme zal optreden op de plaats die op basis van de analyse van de locatie van de bezwiken vloerdelen en de videobeelden ook als plaats is aangeduid waar het bezwijken is begonnen.

Dat een herverdeling van krachten in de beschouwde constructie is opgetreden, blijkt uit de plassen op de dakvloer op de plaats waar de constructie uiteindelijk is bezwiken. Deze plassen zijn een aanwijzing dat de dakvloer daar ter plaatse meer dan normaal is doorgebogen. Dat gebeurt als daar ter plaatse bij naad 3 de momentweerstand is bereikt. Een tweede aanwijzing is de scheurvorming in de dakvloer boven de middenkolommen op as B. Dit zal het gevolg zijn van de grote negatieve momenten die bij een herverdeling ontstaan. Gelet op de waarnemingen tijdens de uitvoering is het aannemelijk dat de situatie met de herverdeling van inwendige krachten reeds enige tijd aanwezig is geweest. Op 27 mei is de constructie uiteindelijk bezwiken bij de toename van de positieve momenten veroorzaakt door de temperatuurgradiënt in de vloer ten gevolge van het mooie weer die dag. De toename van de positieve momenten zal beperkt zijn en wordt bij het ontwerp van gewapende betonvloeren in het algemeen niet beschouwd omdat door scheurvorming de vermindering van de opgelegde vervorming voldoende beperkt kan worden. Dit is hier, door de te beperkte weerstand van de verbinding niet mogelijk.

10 Samenvatting en conclusie

In opdracht van BAM Bouw en Techniek is door Adviesbureau Hageman een onafhankelijk onderzoek uitgevoerd naar de oorzaak van het bezwijken van een deel van de betonconstructie van de in aanbouw zijnde parkeergarage bij Eindhoven Airport. Op zaterdag 27 mei 2017 omstreeks 19:00 uur is een gedeelte van de betreffende constructie bezweken.

Ten behoeve van het onderzoek zijn gegevens van het ontwerp en de uitvoering verzameld. Bij de bezweken constructie zijn observaties uitgevoerd. Ook zijn videobeelden van het bezwijken van de constructie en video-opnamen van de constructie na het bezwijken bestudeerd. Op basis van een analyse van al deze gegevens is geconcludeerd dat het bezwijken van de constructie is ontstaan bij een langснаad tussen twee breedplaten van de BubbleDeckvloer op de 4^e verdieping (dakvloer).

Aanvullend aan deze analyse is tevens een analyse uitgevoerd naar drie mogelijke bezwijkmechanismen van de 4^e verdiepingsvloer. Hierbij zijn de weerstand bij pons bij de gevelkolommen, dwarskracht ter plaatse van de breuklijn nabij as B en moment ter plaatse van de langsnaden van de BubbleDeck vloer beschouwd.

Uit de analyse naar het ponsgedrag blijkt dat er geen aanwijzingen zijn dat pons de oorzaak van het bezwijken is. Uit de observaties bij de bezweken constructie zijn geen aanwijzingen gevonden dat pons is opgetreden.

Uit de analyse van de dwarskrachtweerstand blijkt dat de dwarskrachtweerstand kritisch is. Het verschil tussen de grootste dwarskracht ten gevolge van de aanwezige belasting en de gemiddelde weerstand van de constructie is vanwege de beperkte druksterkte op het moment van het verwijderen van de stempels, beperkt. Het is echter aannemelijk dat als dit mechanisme kritisch zou zijn, de constructie in februari, gelijk na het verwijderen van de stempels, zou zijn bezweken.

Op basis van de resultaten van het experimentele onderzoek dat in het Structures Laboratory Eindhoven van de TU/e is uitgevoerd, moet worden geconcludeerd dat de momentweerstand ter plaatse van de BubbleDeckvloer beperkt is. De momentweerstand is kleiner dan de momenten die ontstaan ten gevolge van de permanente belasting op de vloer. Hierdoor is het bezwijken van de vloer ingezet en zijn gedurende de bouw effecten opgetreden zoals een onverwacht grote doorbuiging en relatief veel scheurvorming. Ten gevolge van de extra inwendige krachten veroorzaakt door een temperatuurverschil over de hoogte van de vloer ten gevolge van het mooie weer op zaterdag 27 mei, is een omstandigheid ontstaan waarbij de constructie uiteindelijk bezweken.

Bijlage A Beschikbare gegevens en referenties

Ten behoeve van het onderzoek naar de oorzaak van het gedeeltelijk instorten van de in aanbouw zijnde parkeergarage van Eindhoven Airport zijn door de opdrachtgever en de betrokken partijen veel documenten ter beschikking gesteld.

Van De Bever Architecten BV BNA uit Eindhoven (werknr. 1468f)

- [1] Tekening WT151: “*Situatie + stramien : peil*”, d.d. 16-02-2017 (revisie D);
- [2] Tekening WT152: “*Plattegrond begane grond : peil*”, d.d. 23-03-2017 (revisie E);
- [3] Tekening WT157: “*Plattegrond 1^e verdieping : 5450+ peil*”, d.d. 16-02-2017 (revisie D);
- [4] Tekening WT159: “*Plattegrond 2^e verdieping : 8700+ peil*”, d.d. 16-02-2017 (revisie D);
- [5] Tekening WT161: “*Plattegrond 3^e verdieping : 11550+ peil*”, d.d. 16-02-2017 (revisie D);
- [6] Tekening WT163: “*Plattegrond 4^e verdieping : 14400+ peil*”, d.d. 19-12-2016 (revisie C);
- [7] Tekening WT171: “*Principe Details*”, d.d. 29-07-2016 (revisie A);
- [8] Diverse artist impressions.

Van Archimedes Bouwadvies uit Eindhoven (projectnummer 2014156)

- [9] Revit Model d.d. 30-01-2017;
- [10] Rapport MPB Eindhoven Airport: “*Gewichts- en stabiliteitsberekening*”, d.d. 27-06-2016;
- [11] Berekening: “*Wapeningsberekening paalwapening*”, d.d. 20-06-2016;
- [12] Berekening: “*Wapeningsberekening kolommen MPB*”, d.d. 23-09-2016;
- [13] Berekening: “*Hoofdberekening staalconstructie*”, d.d. 27-06-2016;
- [14] Berekening: “*Statische berekening wapening poeren MPB*”, d.d. 30-06-2016;
- [15] Berekening: “*Statische berekening wapening balken en begane grondvloer MPB*”, d.d. 07-07-2016;
- [16] Tekening U.01: “*Constructieschema Palen*”, d.d. 17-01-2017 (revisie E);
- [17] Tekening U.02: “*Constructieschema Fundering / Begane Grondvloer*”, d.d. 27-07-2016 (revisie D);
- [18] Tekening U.03: “*Constructieschema dak paviljoen*”, d.d. 05-07-2016 (revisie A);
- [19] Tekening U.04: “*Constructieschema 1^e Verdiepingsvloer*”, d.d. 05-07-2016 (revisie A);
- [20] Tekening U.05: “*Constructieschema 2^e Verdiepingsvloer*”, d.d. 27-09-2016 (revisie B);
- [21] Tekening U.06: “*Constructieschema 3^e Verdiepingsvloer*”, d.d. 27-09-2016 (revisie B);
- [22] Tekening U.07: “*Constructieschema 4^e Verdiepingsvloer*”, d.d. 27-09-2016 (revisie B);
- [23] Tekening U.08: “*Constructieschema dakopbouw*”, d.d. 05-07-2016 (revisie A);
- [24] Tekening U.09: “*Windbokken en vooraanzicht hellingbanen*”, d.d. 12-07-2016 (revisie A);
- [25] Tekening U.10: “*3D impressie*”, d.d. 10-06-2016;
- [26] Tekening U.11: “*Details fundering, begane grondvloer*”, d.d. 06-07-2016 (revisie A);
- [27] Tekening U.12: “*Details bovenbouw 1.01 t/m 1.13*”, d.d. 04-07-2016 (revisie A);
- [28] Tekening U.13: “*Details bovenbouw 2.01 t/m 4.02*”, d.d. 04-07-2016 (revisie A);
- [29] Tekening U.14: “*Aanvullende principe details*”, d.d. 10-06-2016 (revisie A);
- [30] Tekening U.15: “*Poeren: 2-paalspoer t/m acht-paalspoer*”, d.d. 06-07-2016 (revisie B);
- [31] Tekening U.16: “*Poeren: 9-paalspoer t/m achttien-paalspoer*”, d.d. 06-07-2016 (revisie B);
- [32] Tekening U.17: “*Funderingsdetails/liftput/put roltrap*”, d.d. 27-07-2016 (revisie D);
- [33] Tekening U.18: “*Begane grondvloer mc Donalds*”, d.d. 27-07-2016 (revisie A);
- [34] Tekening U.19: “*Zespaalpoer h=1600 + 1 paalspoer*”, d.d. 06-07-2016 (revisie B);
- [35] Tekening U.20: “*Kolomstekken fundering*”, d.d. 12-07-2016;
- [36] Tekening U.21: “*Kolomaanzicht 01 t/m 07*”, d.d. 27-07-2016 (revisie B);
- [37] Tekening U.22: “*Kolomaanzicht 08 t/m 13*”, d.d. 14-07-2016 (revisie A);

- [38] Tekening U.23: “Kolomaanzicht 14 t/m 23”, d.d. 27-07-2016 (revisie A);
- [39] Tekening U.24: “Overzicht betonkolommen”, d.d. 27-07-2016 (revisie A);
- [40] Tekening U.25: “Funderingsbalk inrit rechts naast as 7”, d.d. 17-01-2017.

Van Opzeeland uit Vlijmen (werknummer 2015.1591)

- [41] Berekening 2015.1591 4A1/4A7: “4^e verdiepingsvloer – bouwdeel A”, d.d. 11-11-2016;
- [42] Berekening 2015.1591 4B1/4B4: “4^e verdiepingsvloer – bouwdeel B”, d.d. 23-11-2016;
- [43] Emailbericht: “Re: MPB P1 – vloerberekening”, d.d. 30-09-2016;
- [44] Emailbericht: “2015.1591 Eindhoven Airport- 4e Verdiepingsvloer Geconstateerde scheuren”, d.d. 28-03-2017;
- [45] Tekening 4^e verdiepingsvloer bouwdeel A met voorstel posities te boren kernen uit de dakvloer, d.d. 20-07-2017.

Van BubbleDeck uit Leiden (werknummer 2015.1591)

- [46] Tekening 2015.1591 4.B.1: “Elementindeling”, d.d. 23-11-2016 (revisie B);
- [47] Tekening 2015.1591 4.B.2: “Bijleg onderwapening”, d.d. 23-11-2016 (revisie B);
- [48] Tekening 2015.1591 4.B.3A: “Bijleg bovenwapening”, d.d. 23-11-2016 (revisie B);
- [49] Tekening 2015.1591 4.B.3B: “Bijleg bovenwapening”, d.d. 23-11-2016 (revisie B);
- [50] Tekening 2015.1591 4.B.3C: “Bijleg bovenwapening”, d.d. 23-11-2016 (revisie B);
- [51] Tekening 2015.1591 4.B.4: “Bollenpatroon”, d.d. 23-11-2016 (revisie B);
- [52] Tekening 2015.1591 4.B.5: “Elementwapening”, d.d. 23-11-2016 (revisie B);
- [53] Tekening 2015.1591 4.B.7: “Ponswapening”, d.d. 23-11-2016 (revisie B);
- [54] Tekening 2015.1591 Elementtekeningen / bovennet / ondernet, diverse data;
- [55] Specificatie zelfverdichtend beton (Betonmortel Nederland BV – Zeefanalyse Mengsel), d.d. 13-07-2017.

Van aannemer BAM:

- [56] Rapport KWA16-046_rB: “Kwaliteitsadvisering – Betonadvies voor het werk 311513 – Parkeergarage P1 Eindhoven Airport”, d.d. 29-09-2016;
- [57] Stortschema’s beton K311513 van Mebin – per week, diverse data;
- [58] Overzicht mengselsamenstellingen – Mebin, ongedateerd;
- [59] Documenten met data rijpheidsmetingen, diverse data;
- [60] Dagplanningen uitvoering van 4 november 2016 t/m 1 maart 2017;
- [61] Tekening: “Stempelplan van de 1^e verdiepingsvloer – bouwdeel A”, ongedateerd;
- [62] E-mailbericht: “Betonmengsel en ontlasting”, 05-10-2016;
- [63] E-mailbericht: “MPB P1 Eindhoven – IJklijn 2 (S49-T1F4 met 15% CEM I)”, d.d. 18-10-2016;
- [64] E-mailbericht: “MPB P1 Eindhoven – IJklijn 3 (S49-T1F4 met 50% CEM I)”, d.d. 22-11-2016;
- [65] E-mailbericht: “MPB P1 Eindhoven – weghalen ondersteuning”, d.d. 14-12-2016;
- [66] E-mailbericht: “MPB P1 Eindhoven – Scheurvorming”, 29-03-2017;
- [67] Notitie BBT-17-M-00006-JDr: “MPB P1 te Eindhoven, welkvolgorde, schrikken en ondersteuning”, d.d. 02-06-2017 (aangevuld d.d. 15-06-2017);
- [68] Notitie BBT-17-M-00016-JDr: “Plan van aanpak voor maken boorkernen in de 4^e verdiepingsvloer bouwdeel A”, d.d. 28-07-2017;
- [69] Notitie BBT-17-M-00017-JDr: “Boorkernen”, d.d. 03-08-2017;
- [70] SCIA-model, d.d. 18-08-2017.

Foto's

- [71] Documenten/BAM Uitvoering/Foto's/scheurvorming/
- [72] Documenten/BAM Uitvoering/Foto's/verdiepingsvloer/
- [73] Documenten/BAM Uitvoering/Foto's/wapening/
- [74] Documenten/Bubbledeck – vloeren/Foto's/07-10-2016/
- [75] Documenten/Bubbledeck – vloeren/Foto's/27-03-2017/
- [76] Multimedia/Foto uit ballon alleen tbv onderzoeksteam/
- [77] Multimedia/Foto's BAS/
- [78] Multimedia/Foto's voortgang/
- [79] Multimedia/Professionele voortgang foto's/
- [80] 20170719 Foto's BAM - schade breedplaten/

Timelapse beelden

- [81] Multipurpose Building deel 1.AVI
- [82] Multipurpose Building deel 2.AVI
- [83] TLC00000a.AVI
- [84] TLC00001.AVI

Dronebeelden

In bijlage IV zijn de dronebeelden beschreven en geanalyseerd. De beelden zijn gemaakt in opdracht van BAM en op 2 en 8 juni jongstleden ontvangen. Het betreffen de volgende dronebeelden:

- [85] DJI_0001.MOV
- [86] DJI_0002.MOV
- [87] DJI_0003.MOV
- [88] DJI_0004.MOV
- [89] DJI_0005.MOV
- [90] vlucht 1 DJI_0013.MOV
- [91] vlucht 2 DJI_0014.MOV
- [92] vlucht 3 DJI_0001 - kopie.MOV
- [93] vlucht 4 DJI_0002.MOV
- [94] vlucht 5 DJI_0003.MOV
- [95] vlucht 6 DJI_0004.MOV
- [96] vlucht 7 DJI_0005.MOV
- [97] vlucht 8 DJI_0006.MOV
- [98] vlucht 9 DJI_0007.MOV
- [99] vlucht 10 DJI_0008 - kopie.MOV
- [100] vlucht 11 DJI_0009 - kopie.MOV
- [101] vlucht 12 DJI_0010 - kopie.MOV
- [102] vlucht 13 DJI_0011 - kopie.MOV
- [103] vlucht 14 DJI_0012 - kopie.MOV
- [104] vlucht 15 DJI_0013 - kopie.MOV
- [105] vlucht 16 DJI_0014 - kopie.MOV

Beelden beveiligingscamera's:

In bijlage VII zijn de beelden van de beveiligingscamera's van Eindhoven Airport en de Koninklijke Marechaussee (verder KMAR) beschreven en geanalyseerd. De beelden zijn ontvangen op 30 mei 2017 en 18 juli 2017. Het betreffen de volgende camerabeelden:

Eindhoven Airport:

naam bestand	nummer camera incl. omschrijving
[106] 160500 beelden	- 117 Milieustraat links - 082 Uitgang links - 003 Dome terminal landside 1 - 138 Gate 11 en 12

Van de KMAR:

naam bestand	nummer camera incl. omschrijving
[107] 160500 beelden	- 093 Dome terminal landside 2
[108] 160520 beelden	- 094 Dome terminal landside 3
[109] 170500 beelden	- 114 Nooddeur gate 11 en 12
[110] 180500 beelden	- 064 Dome dak hoofdkantoor
[111] 190500 beelden	- 037 Dome P1
[112] 190540 beelden	- 093 Dome terminal landside 2
[113] 200500 beelden	- 029 Dome platform midden

Van TNO uit Delft:

[114] Presentatie: "*Onderzoek instorting MPB Eindhoven Airport – Deskundigenoverleg*", d.d. 14 augustus 2017.

Literatuur / Publicaties:

- [115] Gudmand-Høyer, T: 'Note on the moment capacity in a Bubble deck joint', Volume 3, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, 2003;
- [116] Stehle, J., Kanellopoulos A. and B. Lal Karihaloo: 'Performance of joins in reinforced concrete slabs for two-way spanning action', Structures and Buildings, Volume 164, June 2011;
- [117] Patnaik, A.K: 'Longitudinal Shear Strength of Composite Concrete Beams with a Rough Interface and no Ties', Barton, Australia: Institute of engineering Australia, 1999;
- [118] Kovach, J.D., Naito, C., 'Horizontal Shear Capacity of Composite Concrete Beams without Interface Ties', Bethlehem: ATLSS, 2008;
- [119] Erläuterungen zu DIN-EN 1992-1-1 und DIN-EN 1992-1-1/NA (Eurocode 2). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 600, 2012;
- [120] 'Steel quality and structural analysis'. R. Eligehausen & E. Fabritius. In: Selected justification notes – based on papers originally presented to the Colloquium on the final draft CEB-FIP Model Code 90 in Rio de Janeiro, August 1991. CEB bulletin d'information 217, Lausanne, 1993, p. 69-107;
- [121] 'Punching shear in reinforced concrete'. CEB, Bulletin d'Information 168. Lausanne, januari 1985;
- [122] 'Punching of structural concrete slabs'. fib, Technical Report 12, Lausanne, 2001.