

Delaminatie gedetecteerd

Potentie van infrarood thermografie voor detectie van delaminatie in hybride betonnen constructies

Koetsier, Maria ; Lukovic, Mladena; van den Ham, Eric

Publication date

2024

Document Version

Final published version

Published in

Cement: vakblad voor de betonwereld

Citation (APA)

Koetsier, M., Lukovic, M., & van den Ham, E. (2024). Delaminatie gedetecteerd: Potentie van infrarood thermografie voor detectie van delaminatie in hybride betonnen constructies. *Cement: vakblad voor de betonwereld*, 2024(3), 58-67. <https://www.cementonline.nl/artikelen/delaminatie-gedetecteerd>

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Green Open Access added to TU Delft Institutional Repository

'You share, we take care!' - Taverne project

<https://www.openaccess.nl/en/you-share-we-take-care>

Otherwise as indicated in the copyright section: the publisher is the copyright holder of this work and the author uses the Dutch legislation to make this work public.

Delaminatie gedetecteerd

Potentie van infrarood thermografie voor detectie van delaminatie in hybride betonnen constructies

Betonnen bruggen kunnen worden versterkt door het storten of plakken van een laag ultra-hogesterkte vezelversterkt beton (UHPFRC) aan één of beide kanten van de liggers. Hiermee kan de dwarskrachtcapaciteit worden vergroot. Bij deze toepassing is de hechting tussen het oude en het nieuwe beton van groot belang. In een bachelor eindproject aan de TU Delft is gekeken of de delaminatie tussen normaal beton en UHPFRC met infrarood thermografie kan worden beoordeeld.

Met infrarood thermografie (IRT) is het mogelijk om met behulp van een infraroodcamera de temperatuur van het (beton)oppervlak te meten vanaf een bepaalde afstand. De vraag in dit onderzoek was of het met deze techniek mogelijk is om delaminatie te detecteren tussen een laag UHPFRC en normaal beton, door de manier waarop warmte zich verplaatst door de verschillende materialen. Zo ja, dan was de vraag wat de optimale testprocedure is en welke factoren van invloed zijn.

Warmteoverdracht gebeurt op drie manieren: conductie, convectie en radiatie. Conductie is het voortbewegen van warmte door moleculen. De snelheid waarmee dat gebeurt is materiaalafhankelijk en wordt uitgedrukt in thermische geleidbaarheid.

Convectie is het voortbewegen van warmte door een stromend medium. Doordat mogelijke delaminatie ter plaatse van de hechting dusdanig smal is, namelijk kleiner dan 5 mm, is de convectie bij delaminatie te verwaarlozen omdat lucht hierbij niet kan stromen. Radiatie ten slotte is de mate waarin een oppervlakte warmte uitstraalt. Dit is materiaalafhankelijk en uitgedrukt in de emissiviteit. Ook de rol van radiatie (in droge lucht) is te verwaarlozen [5], dus met name conductie is relevant voor het detecteren van delaminatie.

Doordat de thermische geleidbaarheid van stilstaande lucht rond de 0,025 W/mK ligt, en die van beton rond de 1,8 W/mK, verplaatst warmte zich sneller door beton dan door stilstaande lucht. Hierdoor zal bij het

opwarmen van een laag UHPFRC meer warmte accumuleren boven een gedelamineerd deel van de hechting, dan boven een goed gehecht deel. De stilstaande lucht in de delaminatie houdt de warmte als het ware tegen (fig. 1), waardoor een gedelamineerd oppervlak dus warmer wordt dan een goed gehecht deel.

Methodes detectie delaminatie

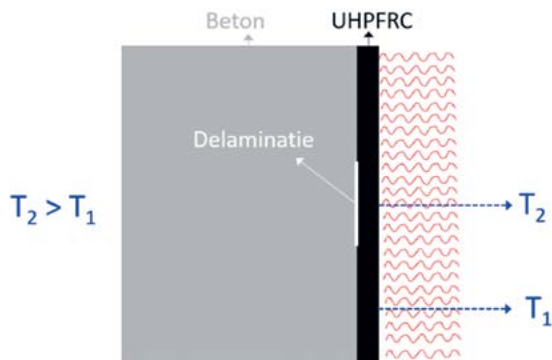
Uit literatuuronderzoek kwamen twee methodes voor het detecteren van delaminatie naar voren. De eerste methode [1] is gebaseerd op de theorie van inflectiepunten (buigpunten) in het temperatuurverloop over het oppervlak van een verwarmd proefstuk (fig. 2). De tweede methode maakt gebruik van het verschil in temperatuur boven een goed gehecht gedeelte van het proefstuk, en boven een gedelamineerd gedeelte van het proefstuk [2]. De zogenoemde *Signal to Noise Ratio* (SNR) is een waarde om het verschil in temperatuur van het betonoppervlak van het proefstuk te relateren

aan de standaarddeviatie van de temperatuur boven een goed gehecht gedeelte. Als de SNR boven nul ligt, wordt dit gebied geclassificeerd als gedelamineerd.

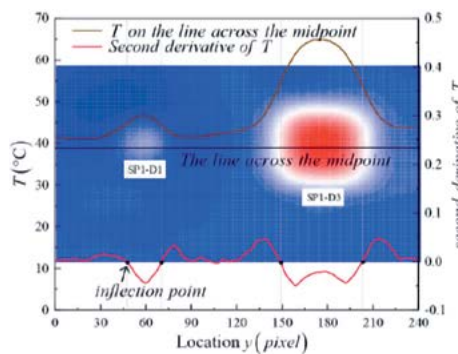
In de initiële testfase (zie hierna) zijn beide methoden gebruikt in een proefstuk op kleine schaal. Met de beste methode is verder gewerkt voor detectie op grotere schaal.

Initiële experimenten

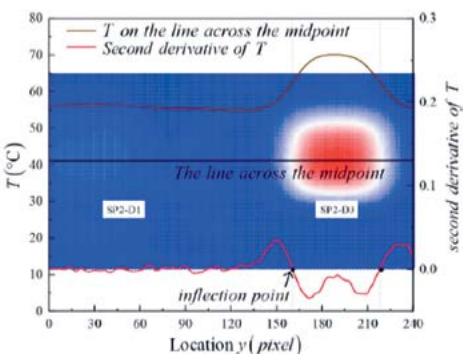
Voor dit onderzoek zijn verschillende experimenten uitgevoerd in het laboratorium van de TU Delft. Er is begonnen met kleine, eenvoudige experimenten (initiële testfase), met twee proefstukken van 100 x 100 x 100 mm³ met aan één zijde een 10 mm dikke laag UHPFRC. Om verschillende soorten delaminatie te simuleren (vorm, dikte en plaats) is in het midden een vierkant plaatje PIR-isolatie geplakt (fig. 3). Voor de proefstukken zijn twee verschillende maten PIR-plaatjes gebruikt, namelijk 20 x 20 x 1,05 mm³ en 30 x 30 x 1,3 mm³. PIR-isolatie heeft een thermische geleidbaarheid van 0,022 W/mK. →



1 $|T_1 - T_2| \uparrow$, de detecteerbaarheid is beter



2 (a) Ability to detect boundaries of defects with small size



(b) Ability to detect boundaries of defects with small depth

auteurs



MARIA KOETSIER

TU Delft,
fac. CiTG, Sectie
Betonconstructies



DR. IR. MLADENA
LUKOVIC

TU Delft, fac. CiTG,
Sectie
Betonconstructies

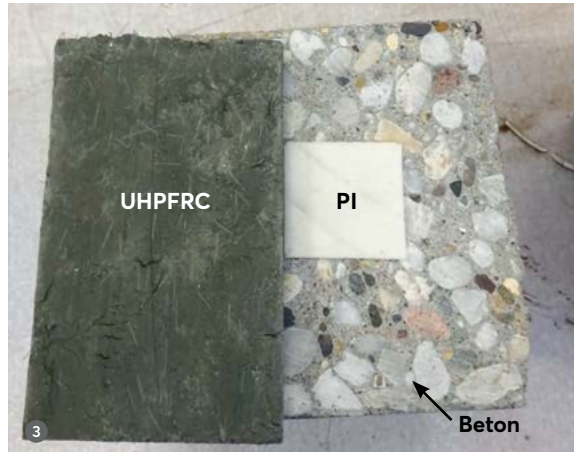


IR. ERIC VAN DEN
HAM

TU Delft,
fac. Bouwkunde,
Afdeling Architectural
Engineering and
Technology

1 Het effect van de delaminatie op de verspreiding van warmte in de constructie

2 Gebruik van het temperatuurverloop en inflectiepunten voor detectie van delaminatie [1]



Dit is vergelijkbaar met de thermische geleidbaarheid van lucht (0,025 W/mK).

In deze initiële fase is onderzocht welke parameters belangrijk zijn met betrekking tot het uitvoeren van de experimenten. In volgende fasen (fase 1 en 2) werden de experimenten complexer en realistischer. Uiteindelijk is ook een ligger van normaal beton met daar tegen een laag UHPFRC getest (fase 3).

Optimalisatie

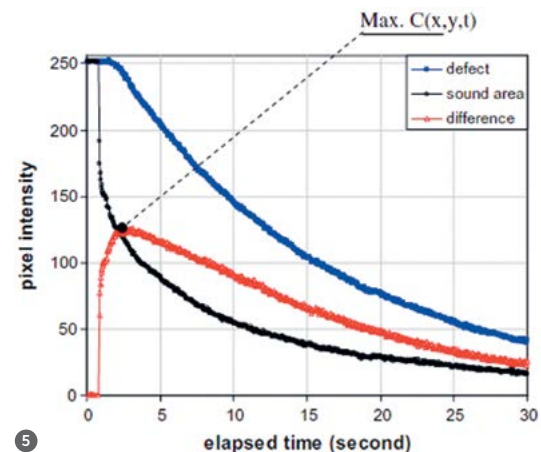
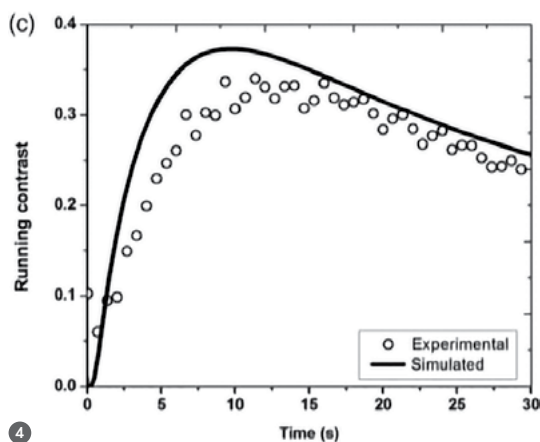
Tijdens de initiële experimenten kwam naar voren dat om delaminaties goed zichtbaar te maken, verschillende zaken van belang zijn:

1 Een gelijkmatig verdeelde hittebron. Een standaard manier van opwarmen is ontwikkeld, waarbij het proefstuk wordt opgewarmd met een halogeenlamp van een bepaalde afstand, zodat de warmtestroom een waarde heeft van 1750 W/m².

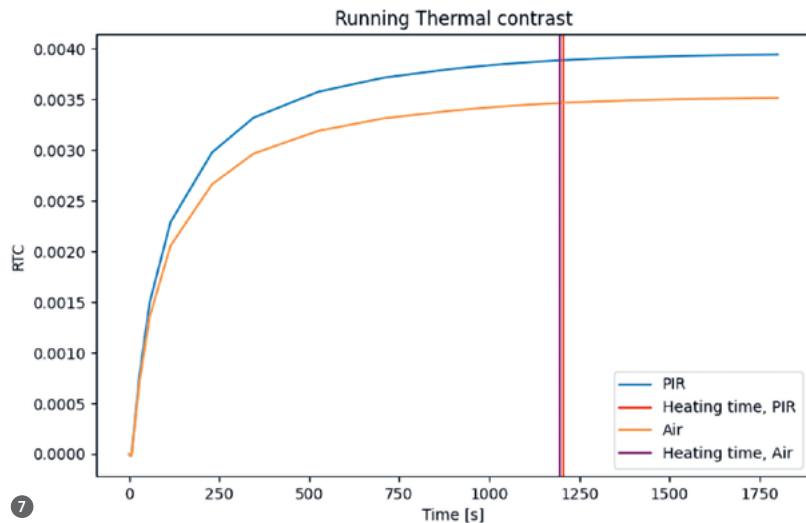
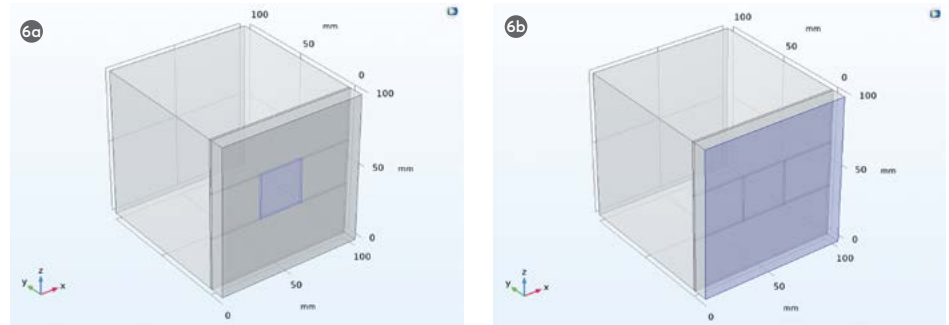
2 De juiste opwarmingstijd, waarbij het relatieve temperatuurverschil (thermische contrast, berekend volgens formule 1) tussen een gedelamineerd gebied en een goed gehecht gebied hoog is. In figuur 4 is een voorbeeld van het verloop van het relatieve temperatuurverschil tegenover de opwarmingstijd weergegeven (in de studie in dit figuur is een constante temperatuur als hittebron gebruikt, terwijl in de huidige studie een constante warmtestroom is gebruikt).

3 De optimale afkoelingstijd, waarin het temperatuurverschil tussen een goed gehecht gedeelte en een gedelamineerd gedeelte maximaal is: in de initiële afkoelingsperiode neemt het verschil toe, waarna het weer afneemt (fig. 5).

$$\Delta T_r = \frac{(T_{def} - T_{non-def})}{T_{non-def}} \quad (\text{formule 1})$$



Verschillende zaken zijn van belang: hittebron, opwarmingstijd en afkoelingstijd



Bepalen van de optimale opwarmingstijd met behulp van numerieke studie Om een gestandaardiseerde manier van opwarmen en afkoelen te ontwikkelen is het van belang het temperatuurverloop boven een delaminatie en goed gehecht gebied te onderzoeken. Mede omdat het tijdens het opwarmen niet mogelijk was het temperatuurverloop in het proefstuk te meten, is dit gedaan met een eindige-elementenanalyse. Hiervoor is de eindige-elementensoftware COMSOL Multiphysics 5.6 gebruikt. In COMSOL is een delaminatie tussen het normaal beton en de laag van UHPFRC gesimuleerd (fig. 6). Voor het analytische model moet een minimale grootte (oppervlakte en dikte) van een delaminatie worden gekozen, die het model theoretisch nog kan detecteren. Deze is ingesteld op $30 \times 30 \times 0,05 \text{ mm}^3$, hierna genoemd 'minimale delaminatie'. Deze grootte heeft een realistische dimensie en is goed te testen. Voor kleinere delaminatiediktes zal nog verder onderzoek moeten volgen.

De hittebron is gesimuleerd als een warmtestroom met een waarde van 1750 W/m^2 (fig. 7). Deze staat gelijk aan de opwarming met een halogeenlamp in de experimentele opstelling.

Vervolgens is het relatieve temperatuurverschil achter de laag UHPFRC berekend tussen het goed gehechte en het gedelamineerde gebied. Dit is gedaan voor delaminaties van zowel lucht als PIR-isolatie. De standaard opwarmingstijd is vervolgens bepaald op het punt dat dit temperatuurverschil niet meer aanzienlijk toeneemt (verticale rode lijn in fig. 7). Voor lucht is dit circa 1300 seconden. De keuze is gemaakt voor een opwarmingstijd van 25 minuten (1500 seconden), die dus boven deze 1300 seconden valt.

Vergelijking inflectiepunten en SNR Het resultaat van het initiële experiment met een PIR-delaminatie van $30 \times 30 \times 1,3 \text{ mm}$ is geanalyseerd met de eerder genoemde →

AFSTUDEERONDERZOEK

Maria Koetsier heeft haar bachelorstudie aan de TU Delft (faculteit Civele Techniek) afgerond met de thesis *Potential of InfraRed Thermography for delamination detection in hybrid concrete structures*. De co-auteurs van dit artikel, Mladena Luković en Eric van den Ham, hebben haar daarbij begeleid.

6 COMSOL-simulatie van (a) de delaminatie en (b) de hitte bron

7 Relatieve temperatuurverschil tussen de delaminatie en het goed gehechte gebied tijdens het opwarmen; de rode lijn is de minimale opwarmingstijd

twee methoden, inflectiepunten en SNR. De uitkomsten zijn te zien in figuur 8 respectievelijk figuur 9, waarbij de daadwerkelijke delaminatie is aangeduid met een rood en wit vierkant. In figuur 10 is de waarde van de SNR geplot over het (horizontale) midden van het proefstuk.

De resultaten van beide methodes zijn vergeleken, en daar zijn de volgende conclusies uit te trekken:

- De SNR-methode geeft de oppervlakte van de delaminatie accurater weer dan de methode die gebruikmaakt van inflectiepunten. Deze methode schat de oppervlakte namelijk te groot in.
- De SNR-methode is makkelijker te interpreteren dan de methode met de inflectiepunten.

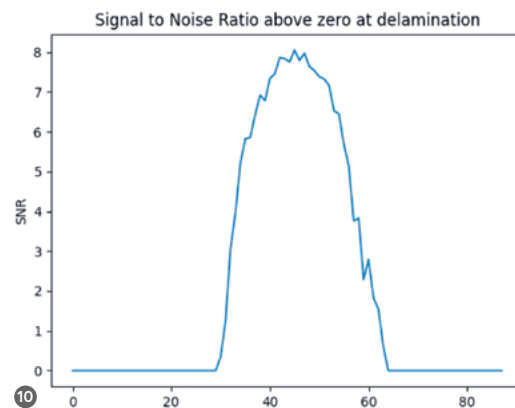
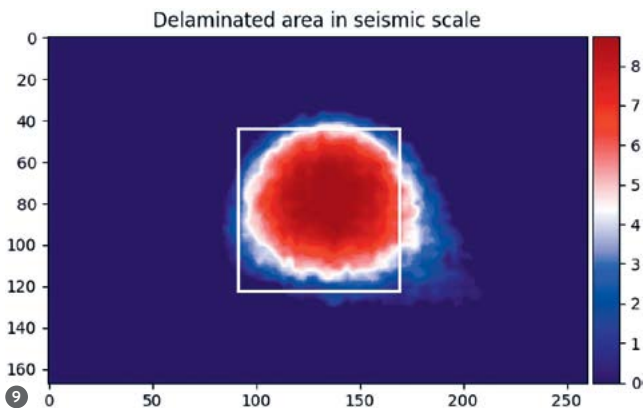
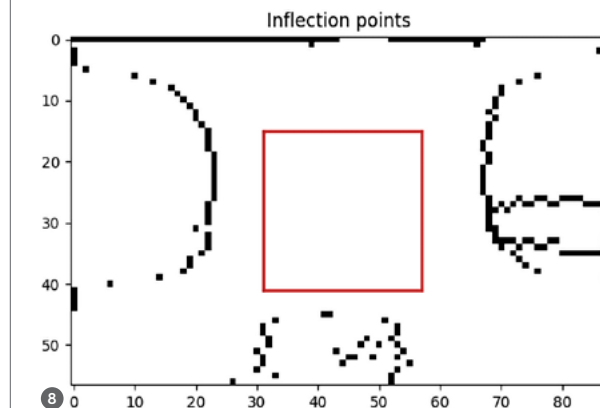
In verder onderzoek is voor de SNR-methode gekozen.

Werking van het analytische model

Tijdens de experimenten wordt het afkoelingsproces van het opgewarmde oppervlak

gefilmd met een infraroodcamera nadat de hittebron is verwijderd. De camera geeft per frame (momentopname van de film) de temperatuurwaarden aan op het oppervlak van het proefstuk. Volgens de theorie resulteert de aanwezigheid van delaminatie zoals gezegd in een temperatuurverschil aan het oppervlak.

Het temperatuurverschil tussen een goed gehecht gedeelte en de minimaal te detecteren delaminatie ($30 \times 30 \times 0,05 \text{ mm}^3$) wordt met behulp van COMSOL bepaald en onder meer gebruikt voor het bepalen van de optimale afkoelingsstijd. Deze optimale afkoelingsstijd is de tijd tot het frame waarbij de delaminatie het meest zichtbaar is (een zo hoog mogelijke SNR heeft) en de detectie dus optimaal is. Met dit frame kan vervolgens de delaminatie worden gedetecteerd. Het vinden van de optimale afkoelingsstijd kan op twee manieren, afhankelijk van de situatie. Situatie 1 geldt wanneer de onderzoeker kennis heeft van een goed gehecht gedeelte in het proefstuk. Situatie 2 geldt wanneer de onderzoeker geen kennis heeft



van een goed gehecht gedeelte. Hieronder wordt uitgelegd hoe in beide situaties het optimale frame wordt bepaald en hoe delaminatie wordt gedetecteerd.

Afkoelingstijd en aanduiden delaminaties situatie 1 Om de optimale afkoelingstijd voor situatie 1 (de onderzoeker heeft kennis van een goed gehecht gebied) te bepalen, is de standaarddeviatie van de temperatuurwaarden van het goed gehechte gebied in het proefstuk nodig. Voor situatie 1 wordt deze standaarddeviatie berekend met de temperatuurwaarden die zijn gemeten met de infrarood camera.

Het temperatuurverschil tussen het goed gehechte gedeelte en de minimale delaminatie is (zoals eerder uitgelegd) berekend met behulp van COMSOL. De SNR wordt bepaald door de standaarddeviatie van de gemeten waarden te relateren aan de COMSOL-waarden. Deze waarden zijn tijdsafhankelijk, de SNR wordt dus berekend per seconde. Het tijdstip wordt gezocht waar deze SNR maximaal is. Dit is de optimale afkoelingstijd en het bijbehorende frame wordt geëxtraheerd.

Voor dit optimale frame kan de delaminatie worden bepaald. Nadat het frame is geëxtraheerd, worden de gemiddelde temperatuur en de standaarddeviatie van het goed gehechte gebied berekend op basis van de gemeten waarden. Vervolgens wordt voor elke pixel van het gehele proefstuk de SNR berekend, door het temperatuurverschil tussen deze pixel en het goed gehechte gebied te relateren aan de standaarddeviatie van het goed gehechte gebied. Wanneer deze SNR boven nul ligt, is het volgens de theorie aannemelijk dat er een delaminatie aanwezig is. Daarom worden alle negatieve waarden op nul gesteld. Vervolgens worden alle waarden met een kleurenschaal weergegeven per pixel en ontstaat er een visuele weergave van de delaminaties in het proefstuk (fig. 9).

Afkoelingstijd en aanduiden delaminaties situatie 2 Wanneer de onderzoeker geen kennis heeft van een goed gehecht gebied in het proefstuk (situatie 2), wordt de standaarddeviatie bepaald van de temperatuur-

data van het gehele proefstuk. Vervolgens wordt het optimale frame (de optimale afkoelingstijd) op dezelfde manier bepaald als hiervoor beschreven voor situatie 1. Dit is een voorgestelde methode die nog verder moet worden onderzocht en geïnterpreteerd.

Nadat het optimale frame is geëxtraheerd, wordt het temperatuurverschil tussen het goed gehechte en het gedelamineerde gebied (minimale delaminatie) uit de simulatie van COMSOL gehaald. Bovendien wordt de gemiddelde temperatuur van het gehele proefstuk berekend op basis van de gemeten waarden. Vervolgens wordt van elke pixel het temperatuurverschil tussen de gemiddelde temperatuur en de temperatuur van de pixel berekend. Daarna wordt dit temperatuurverschil vergeleken met het berekende temperatuurverschil in COMSOL. Wanneer het temperatuurverschil van de pixel kleiner is dan 50% van het temperatuurverschil berekend in COMSOL, wordt de pixel gezien als onderdeel van een goed gehecht gebied.

Deze 50% is aangehouden omdat als er werkelijk een delaminatie aanwezig is van hetzelfde formaat als uit de COMSOL simulatie, dit berekende temperatuurverschil kleiner zal zijn dan het temperatuurverschil bepaald in COMSOL. Dit komt doordat, als er delaminaties aanwezig zijn, de gemiddelde temperatuur van het gehele proefstuk hoger ligt dan de gemiddelde temperatuur van een goed gehecht gebied.

Dit wordt gedaan voor elke pixel van het proefstuk, wat in totaal een gebied geeft wat goed gehecht is. Wanneer vervolgens dit goed gehechte gebied is gedefinieerd, wordt de bepaling van de gedelamineerde gebieden in het proefstuk op de zelfde manier gedaan als hiervoor beschreven bij situatie 1.

Experimenten en resultaten

Na de eerste simpele experimenten, die zijn gebruikt om de maatgevende testfactoren (zoals hittebron, opwarmingstijd, detectie methode etc.) te bepalen en om het model te kunnen creëren, zijn er drie testfasen uitgevoerd.

Testfase 1 Drie nieuwe proefstukken zijn gemaakt met een grootte van

Tijdens de experimenten wordt het afkoelingsproces van het opgewarmde oppervlak gefilmd met een infraroodcamera

→

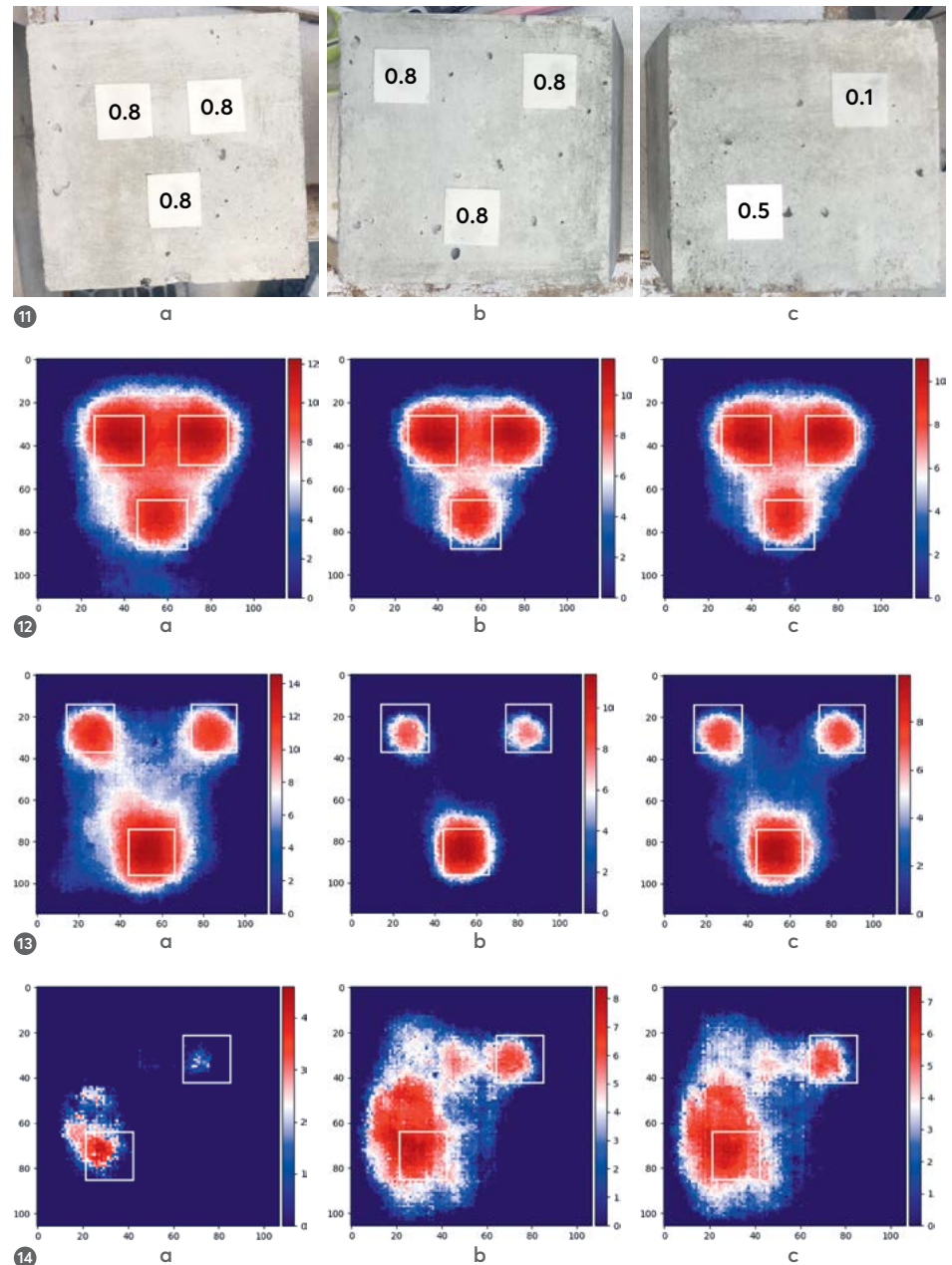
Op het optimale moment wordt de delaminatie bepaald op basis van de SNR-waarden

150 x 150 x 150 mm³ en met vierkante plaatjes PIR van 30 x 30 mm² en verschillende diktes (fig. 14), op vooraf bekende locaties.

Vervolgens zijn deze proefstukken getest met behulp van de standaard opwarmingsmethode en opwarmingstijd, en is het ontwikkelde analytische model gebruikt om te kijken of het mogelijk was deze delaminaties te detecteren. Hierbij is zowel situatie 1 als situatie 2 gebruikt (fig. 12 t/m 14).

In situatie 1 zijn er twee verschillende (willekeurig gekozen) gedeelten van het goed

gehechte gebied aangewezen en gebruikt (goed gehecht gebied 1 en 2). De locatie van de gedelamineerde oppervlaktes is redelijk goed aangeduid. Wel is het resultaat afhankelijk van waar het goed gehechte gebied wordt gekozen. In situatie 2 is geen goed gehecht gebied aangewezen en is de analyse uitgevoerd zoals eerder beschreven. In proefstuk 1 is te zien dat er nog veel randeffecten aanwezig zijn. Ook is het duidelijk dat dunnere delaminaties moeilijker zijn te identificeren (fig. 14).



11 (a) Proefstuk 1, (b) proefstuk 2 en (c) proefstuk 3, testfase 1, dikte aangegeven in mm
 12 Proefstuk 1, testfase 1: resultaat model (a) situatie 1, goed gehecht gebied 1, en (b) situatie 1, goed gehecht gebied 2, en (c) situatie 2
 13 Proefstuk 2, testfase 1: resultaat model (a) situatie 1, goed gehecht gebied 1, en (b) situatie 1, goed gehecht gebied 2, en (c) situatie 2
 14 Proefstuk 3, testfase 1: resultaat model (a) situatie 1, goed gehecht gebied 1, en (b) situatie 1, goed gehecht gebied 2, en (c) situatie 2

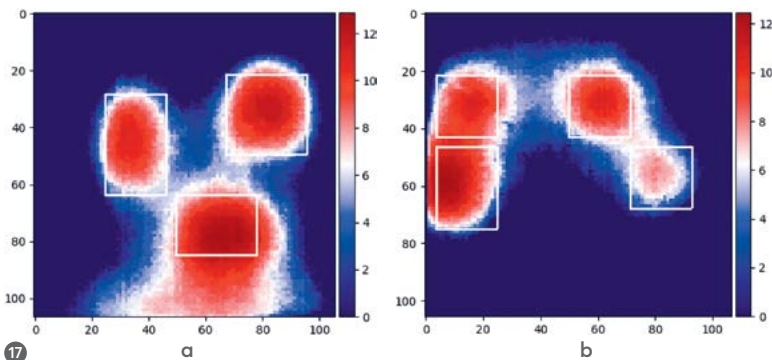
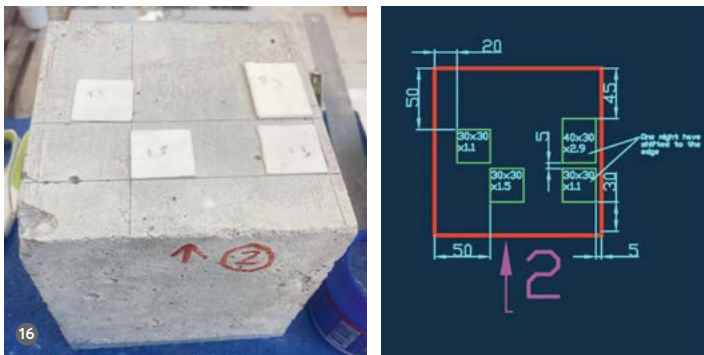
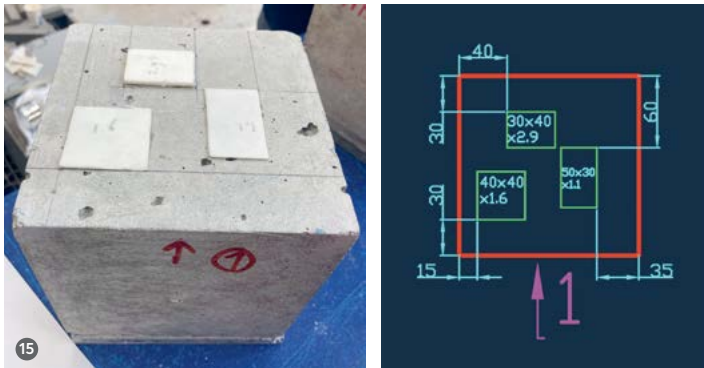
Testfase 2 Vervolgens was het van belang om de werkelijkheid, waarin de gedelamineerde oppervlaktes nog onbekend zijn, te simuleren. Hiertoe zijn twee proefstukken door iemand anders dan de onderzoeker gemaakt. Daardoor waren de specificaties van de gedelamineerde oppervlaktes, plaats, oppervlakte, dikte en aantal, onbekend. Deze proefstukken zijn te zien figuur 15 en 16.

Voor deze proefstukken is van het analytische model alleen situatie 2 gebruikt, omdat het doel van dit experiment was om de werkelijkheid te simuleren.

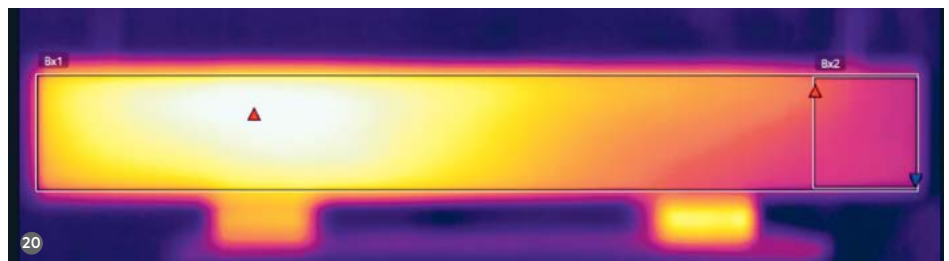
De resultaten van deze testfase is te zien in figuur 17. De locatie van de gedelami-

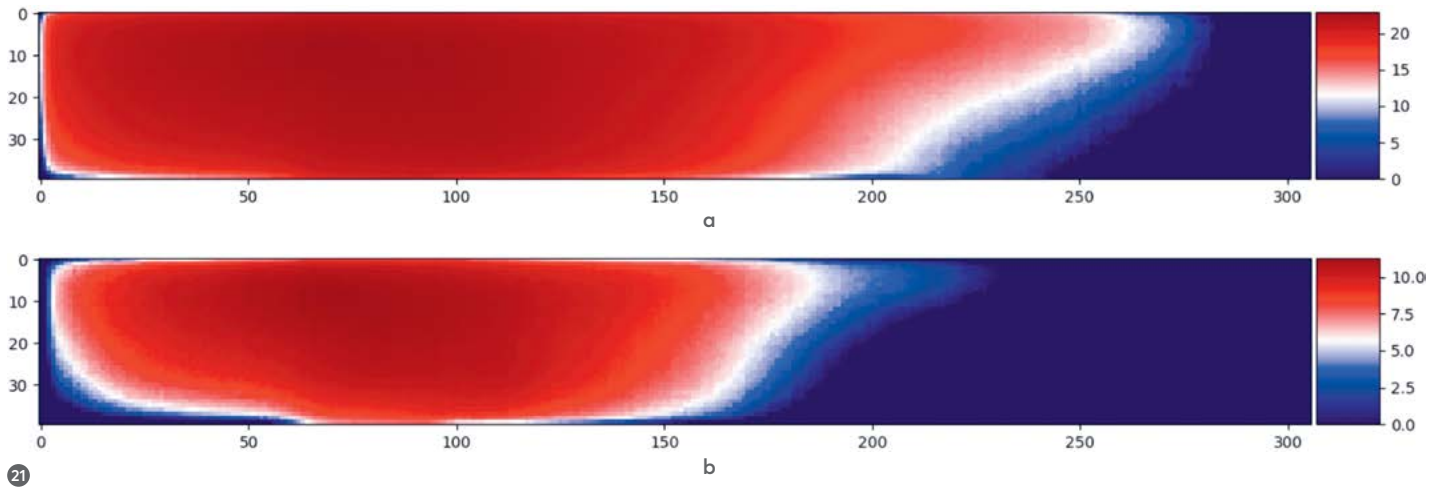
neerde oppervlaktes wordt accuraat weergegeven. Het is weer te zien dat de grootte van de aangeduide gedelamineerde oppervlaktes afhankelijk is van de dikte en van de grootte van de delaminatie door de randeffecten.

Testfase 3 Testfase 3 gaat over een proefstuk op grotere schaal (foto 18). In dit experiment is een balk met daarop een laag UHPFRC getest. De locatie van de delaminatie, ontstaan door verhinderde krimp, was onbekend. Het is belangrijk om te vermelden dat een groot deel van de delaminatie van deze balk visueel wel te beoordelen viel (foto 19). →



15 Testfase 2, proefstuk 1 met configuratie
 16 Testfase 2, proefstuk 2 met configuratie
 17 Testfase 2, resultaat model situatie 2; (a) proefstuk 1 en (b) proefstuk 2





Dit proefstuk leent zich er goed voor om na te gaan of er door de grote temperatuurstijging van het oppervlakte nog altijd een goed gehecht gebied wordt gedetecteerd en zo ja, hoe groot deze is en of dit reëel is. Om na te gaan of dit gebied reëel is, zijn in deze testfase van het analytische model zowel situatie 1 als situatie 2 gebruikt om het gedelamineerde oppervlak te vinden.

In situatie 1 is een goed gehecht gebied aangewezen op basis van visuele waarnemingen. Het aangewezen goed gehechte gebied is te zien in figuur 20 en de resultaten gebaseerd op de SNR methode in situatie 1 en situatie 2 zijn te zien in figuur 21.

Het analytische model kan zonder aangeduid goed gehecht gebied zelfs bij een zeer grote oppervlakte nog steeds het gedelamineerde gebied van het proefstuk vinden. Wel is het gedelamineerde gebied dat door het analytische model in situatie 2 wordt aangeduid kleiner dan in werkelijkheid. Het resultaat van het analytische model met aanduiding van een goed gehecht gedeelte (situatie 1) is in deze situatie meer natuurgetrouw.

Conclusie en aanbevelingen

Onderzocht is of het mogelijk is gedelamineerde oppervlaktes tussen normaal beton en een laag UHPFRC kwantitatief en objectief te detecteren met behulp van infrarood thermografie. Er is een standaard aanpak gecreëerd en er is een analytisch model beschreven om gedelamineerde oppervlaktes tussen de twee betonsoorten te kunnen aanduiden. Twee situaties zijn gedefinieerd, beide opgenomen in het analytische model.

De resultaten van de verschillende testfasen tonen aan dat het mogelijk is om kwantitatief en objectief gedelamineerde gebieden te detecteren. Ook tonen de resultaten aan dat de werking van en de theorie achter het gecreëerde analytische model veelbelovend zijn.

Naar aanleiding van de theorie en de resultaten is het wel duidelijk dat er meer onderzoek nodig is. Extra onderzoek moet gedaan worden in de nauwkeurigheid van het model in situatie 2 (die vooral onzeker is wanneer er een groot gedeelte van het proefstuk is gedelamineerd) en hoe deze nauwkeurigheid kan worden vergroot. Bovendien beperkte dit onderzoek zich tot het detecteren van delaminaties groter dan $30 \times 30 \times 0,05 \text{ mm}^3$. Het is van groot belang om ook onderzoek te doen naar delaminaties met een kleinere opening dan $0,05 \text{ mm}$. ●

LITERATUUR

- 1 Gu, J., Unjoh, S., & Naito, H., Detectability of delamination regions using infrared thermography in concrete members strengthened by CFRP jacketing. *Composite Structures* Volume 245, 1 August 2020.
- 2 Lai, W., Kou, S., Poon, C., Tsang, W., & Lai, C., Characterization of the deterioration of externally bonded CFRP-concrete composites using quantitative infrared thermography. *Cement & Concrete Composites* Volume 32, Issue 9, October 2010, pp. 740-746.
- 3 Sinha, A., Sastry, O., & Gupta, R., Detection and characterisation of delamination in PV modules. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2015, pp. 1-16.
- 4 Wang, Q., Hu, Q., Qiu, J., Li, X., & Zhou, H., Using differential spread laser infrared thermography to detect delamination and impact damage in CFRP. *Infrared Physics Technology* Volume 106, May 2020.
- 5 Vortmeyer, D. & Kabelac, S., K3 Gas Radiation: *Radiation from Gas Mixtures*. VDI Heat Atlas, 2016, pp. 979-988.