

Voegdetail en versterkingsmethoden geanalyseerd met niet-lineair FEM-model (1)

Niet-lineaire analyse breedplaatvloeren

Uit experimenteel onderzoek na de instorting van de parkeergarage bij Eindhoven Airport bleek dat de capaciteit van het voegdetail van de breedplaatvloeren veel lager was dan oorspronkelijk voorzien. Het gedrag van de vloeren is in een fysisch niet-lineair volumemodel nagebootst. Hiermee werd een vergelijkbaar beeld gevonden.

Beproeving

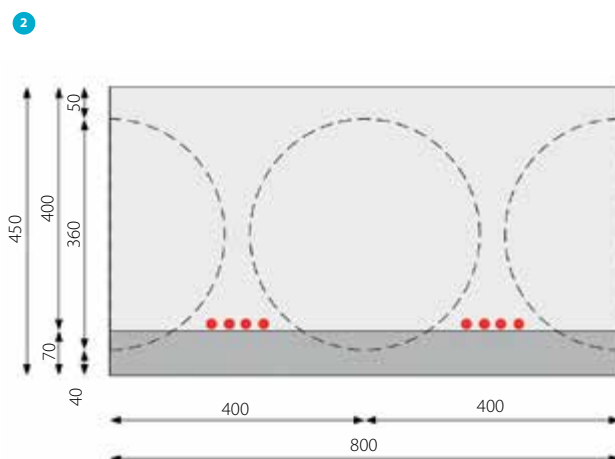
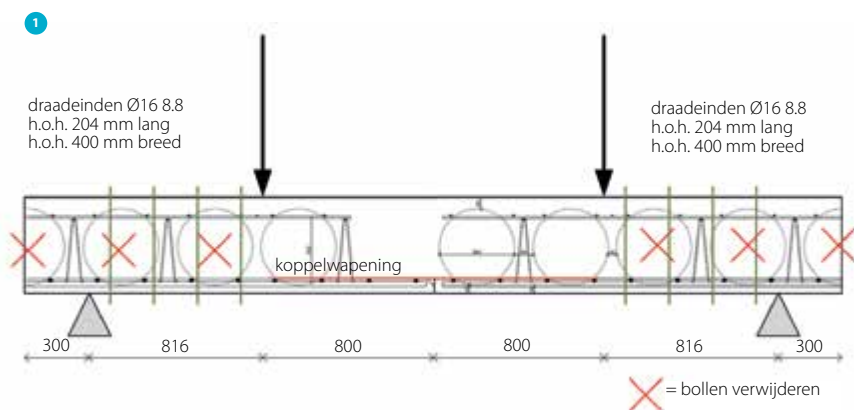
Een van de onderzoeken naar de instorting is gedaan door Adviesbureau Hageman. Dit onderzoek is onder andere uitgevoerd door middel van vierpuntsbuigproeven op de TU Eindhoven. In figuur 1 en 2 is de proefopstelling weergegeven.

Voor het fysisch niet-lineair volumemodel is een van de zeven proefstukken als basis aangehouden (VL34A). Dit proefstuk had een totale dikte van 450 mm. De lengte was 3,8 m en de breedte 0,8 m. Over de breedte van het proefstuk zijn één hele bol en

twee halve bollen aanwezig en is koppelwapening op twee plaatsen met een hart-op-hartafstand van 400 mm aangebracht.

De druksterkte van de druklaag is voorafgaand aan de proef getest en bedroeg $36,6 \text{ N/mm}^2$. De koppelwapening bestond uit 3 $\text{Ø}16$ en 1 $\text{Ø}10$ per bol.

Het proefstuk is bezweken bij een belasting van circa 120 kN en een doorbuiging van 4,4 mm. Dit is slechts ongeveer 1/3 van de capaciteit die kon worden verwacht op basis van de aanwezige koppelwapening.



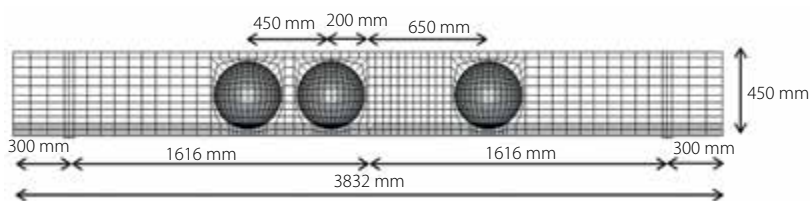
¹⁾ Han Schijffelen heeft het artikel gereviewd namens VNconstructeurs.

- 1 Opstelling vierpuntsbuigproef proefstuk [2]
bron: Adviesbureau Hageman
- 2 Doorsnede vierpuntsbuigproef proefstuk [2]
bron: Adviesbureau Hageman
- 3 Vooraanzicht FEM-basismodel
- 4 Dwarsdoorsnede massief deel en dwarsdoorsnede t.p.v. bol
- 5 Overzicht FEM-model in 3D
- 6 Hordijk-curve voor beton onder trek (a) en parabolisch diagram (b)

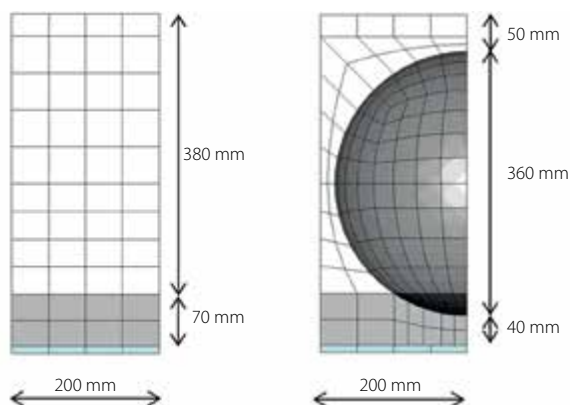
Bezwijken trad op omdat de kracht in de wapening van de breedplaat als afschuifkracht door het aansluitvlak van breedplaat en druklaag moest worden geleid en hierbij bleek dat dit aansluitvlak onvoldoende weerstand had om deze kracht te weerstaan.

FEM-model

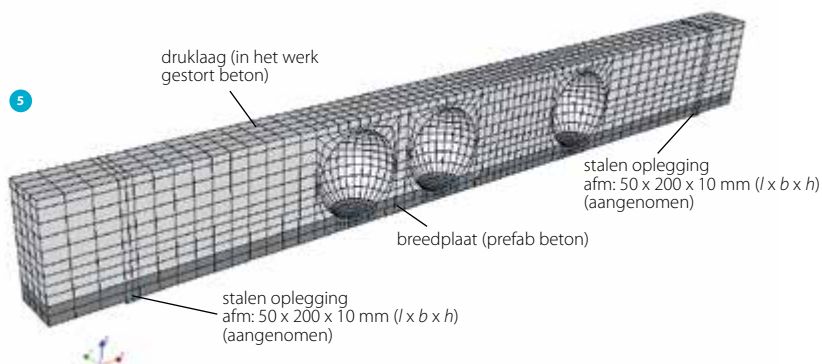
Proefstuk VL34A is met een fysisch niet-lineair volumemodel in het eindige-elementenprogramma DIANA nagebootst. De geometrie van het model is gebaseerd op de beschikbare gegevens van de proefopstelling. In verband met kortere rekentijd is



3



4



5

Niet-lineair-model versterkingsmethoden

Voor de niet-lineaire analyse van het voegdetail is een basismodel gebruikt dat is opgezet om een eerder uitgevoerd experimenteel onderzoek op de TU Eindhoven na te bootsen. Dat model wordt in dit artikel beschreven. Twee mogelijke versterkingsmethoden, te weten gelijkde CFRP-lamellen en bolankers, zijn ook geanalyseerd met dit model. Hierover zijn elders in dit nummer twee andere artikelen gepubliceerd:

- artikel 2: 'Versterken met CFRP-lamellen'.

- artikel 3: 'Versterken met bolankers'.

Samen vormen deze artikelen een drieluik.

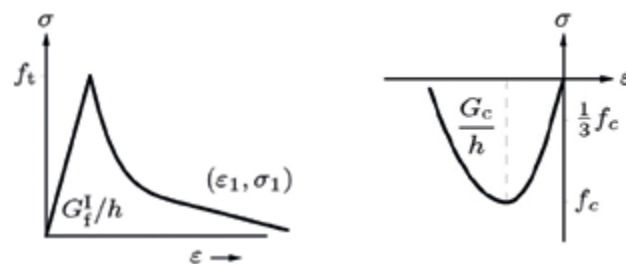
slechts een kwart van de constructie in langsricting gemodelleerd. Zodoende bevinden zich in het model drie halve bollen. In figuur 3 t/m 5 is de geometrie van het FEM-model weergegeven.

Beton

Normaliter wordt er in constructieve berekeningen gerekend met sterk gereduceerde materiaalparameters volgens de methode van de partiële factoren. Dit zou echter voor dit soort niet-lineaire berekeningen kunnen leiden tot sterke afwijkingen in de respons van de constructie. Aangezien het FEM-model gevalideerd moet worden aan de 'echte' proeven moeten de materiaalparameters zo veel mogelijk overeenkomen met de werkelijke materiaaleigenschappen.

Voor het beton worden zodoende niet-lineaire materiaaleigenschappen toegekend op basis van gemiddelde waarden. Voor de druklaag is gerekend met $f_{cm} = 31,6 \text{ N/mm}^2$ afgeleid uit $f_{cm,cube} = 36,6 \text{ N/mm}^2$ op basis van uitgevoerde drukproeven. Voor de prefab schil is gerekend met $f_{cm} = 53 \text{ N/mm}^2$ gebaseerd op C45/55. Het beton kan daarbij scheuren volgens het uitgesmeerde scheurconcept (*smearred cracking*).

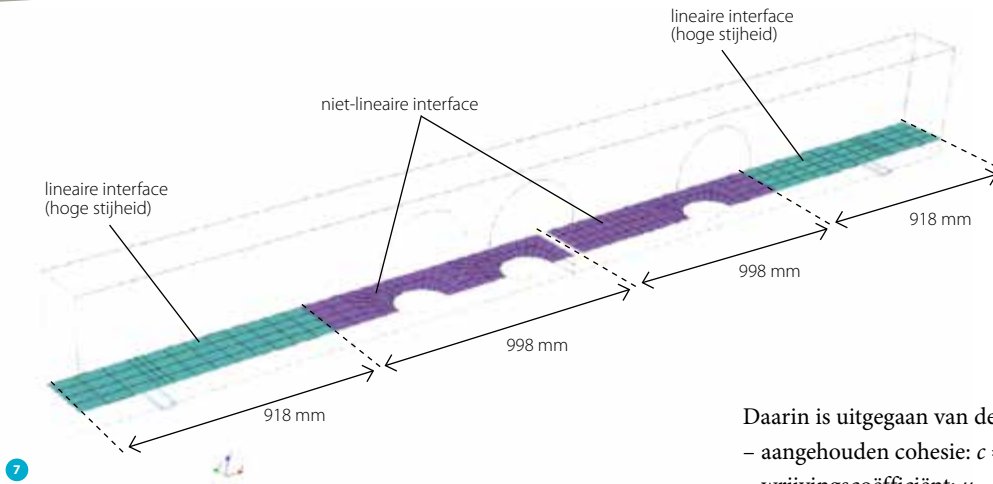
Er wordt een zogenaamd 'total strain rotating crack'-model toegepast met de Hordijk-curve voor het nascheurgedrag. Zodra optredende spanningen de treksterkte bereiken, ontstaat een scheur waarbij de spanning niet direct terugvalt naar nul maar wel snel afneemt. Voor het gedrag onder druk is een parabolisch spanning-rekdiagram toegepast. Dit alles is conform de aanbeveling uit de RTD:1016-1:2017 [1]. Deze diagrammen zijn weergegeven in figuur 6.



6a

6b

- 7 Interface-elementen
- 8 Coulomb-frictiemodel
- 9 Wapening in het model
- 10 Toegepast spanning-rekdiagram voor niet-lineair wapeningsstaal



Interface

Tussen het prefab beton en de druklaag worden zogeheten interface-elementen toegepast om de interactie hiertussen te modelleren (fig. 7). Daar waar in de proefopstelling voorgespannen draadeinden door de druklaag en prefab laag zijn toegepast, zijn voor de interface-elementen lineair-elastische eigenschappen toegekend met een hoge stijfheid. Daardoor kan hier plaatselijk geen onthechting optreden. Voor het overige deel nabij de naad zijn niet-lineaire eigenschappen toegekend voor de interface waarbij onthechting wel kan optreden.

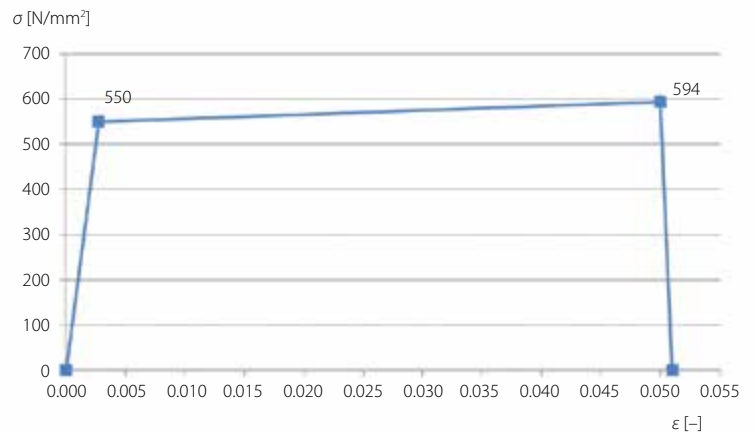
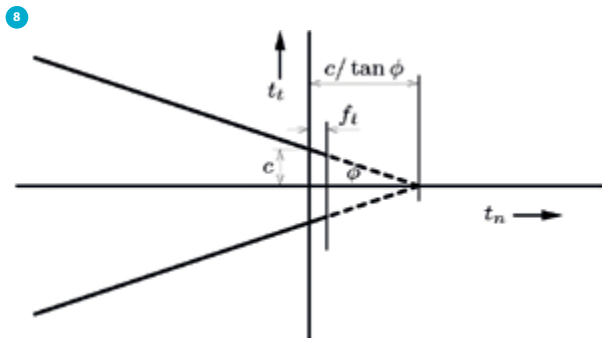
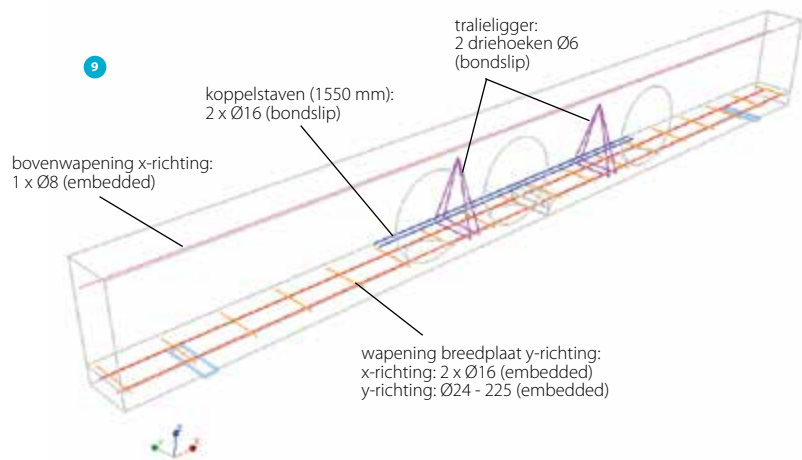
Voor de niet-lineaire interface-elementen van het basismodel zijn zogenaamde Coulomb-frictie-eigenschappen toegepast. Dit houdt in dat de maximaal opneembare schuifspanning afhankelijk is van de optredende normaalspanning. Deze afhankelijkheid wordt onder andere bepaald door de cohesie en de wrijvingshoek. Tevens wordt de maximaal opneembare normaaltrekspanning afgetopt op een treksterkte f_t die gelijk gekozen is als de cohesie (aanname). Als de optredende normaalspanning deze waarde bereikt, zal er een *gap* (opening) ontstaan en kunnen er geen trekspanningen meer worden overgedragen. In figuur 8 is het Coulomb-frictiediagram weergegeven, dat de relatie legt tussen optredende normaalspanning en maximaal opneembare schuifspanning.

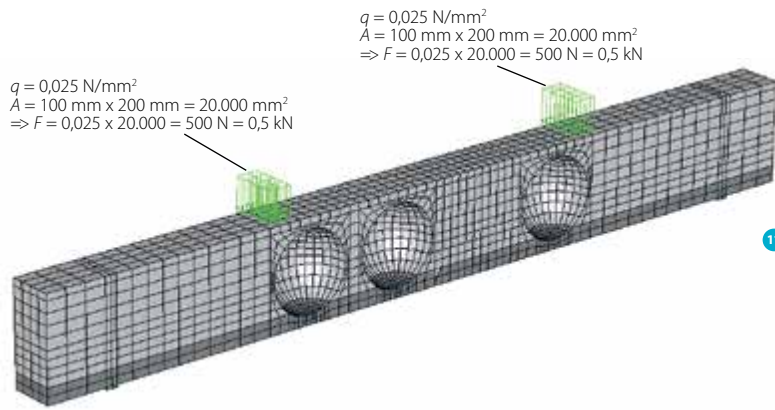
Daarin is uitgegaan van de volgende waarden:

- aangehouden cohesie: $c = 0,5 \text{ N/mm}^2$
- wrijvingscoëfficiënt: $\mu = 0,6$ (EC2 art. 6.2.5) => wrijvingshoek: $\phi = 31^\circ$
- maximaal opneembare normaaltrekspanning: $f_t = 0,5 \text{ N/mm}^2$
- $k_{\text{normaal}} = 60.000 \text{ N/mm}^3$
- $k_{\text{schuif}} = 6000 \text{ N/mm}^3$

Wapening

In DIANA worden wapeningsstaven standaard gemodelleerd als embedded reinforcement. Hierbij moet slechts een equivalente oppervlakte van de doorsnede worden opgegeven. Deze





- 11 Puntlasten
 12 De resultaten bij 108 kN ten aanzien van zakking (a), opening interface (b), staalspanning (b) en scheurvorming (d)

'embedded reinforcement'-staven geven stijfheid in hun eigen richting aan de 'moederelementen' waarin ze zich bevinden. Ze hebben verder geen vrijheidsgraden en er is sprake van volledige aanhechting. De tralieliggers en koppelstaven zijn echter met zogeheten 'bondslip reinforcement'-elementen gemodelleerd waarbij slip kan optreden. Voor de tralieliggers zijn daarbij ook nog buigstijfheidseigenschappen toegekend om deuwelwerking mee te nemen. In figuur 9 is de wapening in het model weergegeven.

Wapeningsstaal is eveneens met niet-lineaire materiaaleigenschappen gemodelleerd gebaseerd op gemiddelde waarden:

- $E_s = 200.000 \text{ N/mm}^2$
- $f_{ym} = f_{yk} \cdot 1,1 = 500 \cdot 1,1 = 550 \text{ N/mm}^2$ bij een rek $\epsilon = 0,00275$
- $f_{tm} = f_{ym} \cdot k = 550 \cdot 1,08 = 594 \text{ N/mm}^2$ bij een rek van $\epsilon = 0,050$

Belastingen

Eigen gewicht wordt automatisch meegenomen door het programma door het invoeren van de dichtheid van de toegepaste materialen. De puntlasten worden elk aangebracht als een gelijkmatig verdeelde belasting van $0,025 \text{ N/mm}^2$ op een oppervlakte van $100 \times 200 \text{ mm}^2$ (fig. 11). Een loadfactor van 1,0 correspondeert dan met een puntlast van $0,5 \text{ kN}$ in het model en een puntlast van 2 kN uit de proef. De positie van de puntlasten is conform de proefopstelling. De belasting wordt in stappen aangebracht en opgevoerd tot bezwijken optreedt.

Resultaten

De resultaten ten aanzien van zakking, opening interface, staalspanning en scheurvorming zijn weergegeven in figuur 12a t/m 12d.

Uit de resultaten blijkt dat onthechting van de prefab schil aan beide kanten van de naad al in een vroeg stadium optreedt, wat gepaard gaat met een reductie in stijfheid. Door de optredende normaaltrekspanningen en schuifspanningen in de interface wordt het 'gap-criterium' bereikt. Het aanhechtvlak gaat als het ware als een ritssluiting open tot aan de tralieligger die prefab schil en druklaag bij elkaar houdt.

15684_basismodel
 load-step 105, load-factor 54.000, LC2_load
 displacements TD+Z
 min: -6.2 mm max: 0.9 mm



12a

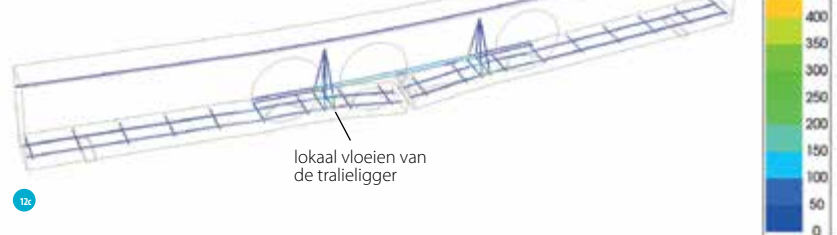
15684_basismodel
 load-step 105, load-factor 54.000, LC2_load
 interface relative displacements DUNz
 min: -0.0 mm max: 3.0 mm



verticale vervorming van de schil t.o.v. druklaag

12b

15684_basismodel
 load-step 105, load-factor 54.000, LC2_load
 reinforcement cauchy total stresses Sxx maximum of 8 layers
 min: -41 N/mm² max: 541 N/mm²



lokaal vloeien van de tralieligger

12c

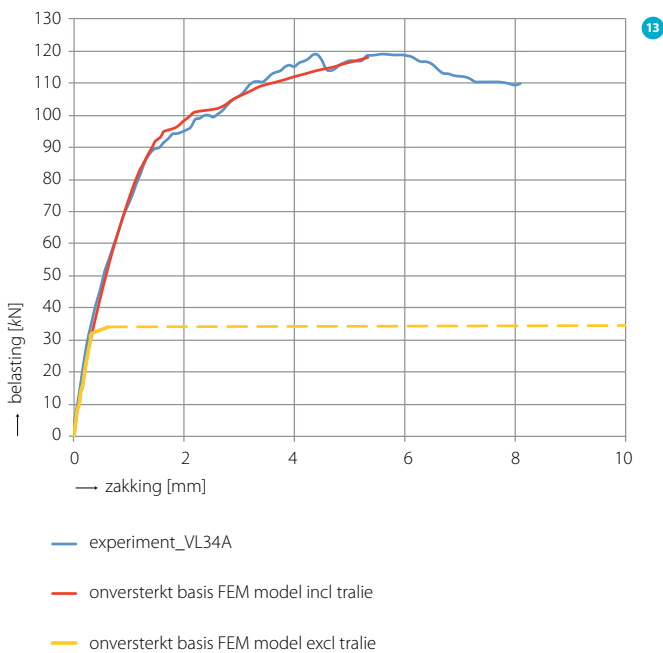
15684_basismodel
 load-step 105, load-factor 54.000, LC2_load
 crack-widths Ecw1
 min: -0.00 mm max: 0.91 mm



scheurvorming achter de koppelbewapening

scheurvorming in beton rond tralieligger

12d



Uit het last-zakkingsdiagram (fig. 13) is te zien dat de grafiek op basis van het FEM-model tot een belasting van circa 90 kN vrijwel gelijkloopt met de grafiek van de proef. Er is dan al enige scheurvorming opgetreden in de druklaag. De wapening vloeit dan echter nog niet. Vanaf een belasting van circa 105 kN treedt er tevens onthechting op van de prefab schil, achter de tralieligger. De scheurvorming neemt hierbij significant toe tot zelfs bij de bol achter de tralieligger. Dit gaat gepaard met een grote vermindering in stijfheid. Bij een belasting van circa 108 kN beginnen de tralieliggers in het model te vloeien en ontstaat er scheurvorming in het beton rond de tralieliggers terwijl de koppelwapening nog niet vloeit. De belasting kan vervolgens nog beperkt toenemen tot circa 120 kN waarbij de breuksterkte van de tralieliggers wordt bereikt. Vervolgens treedt bezwijken op achter de koppelwapening. Het last-zakkingsdiagram laat een goede match zien tussen het FEM-model en de experimentele proefresultaten.

Van het basismodel is tevens een variant doorgerekend waarbij de tralieliggers zijn verwijderd. Uit de resultaten van die bere-

kening (fig. 14) en uit het last-zakkingsdiagram is te zien dat in het model zonder tralieliggers er sprake is van een nog veel lagere capaciteit van de constructie. Bij een belasting van 34 kN (loadfactor 17) treedt bros bezwijken op waarbij de prefab schil onthecht aan één kant tot achter de koppelstaaf, waarna de ongewapende doorsnede van de druklaag verticaal doorscheurt. De tralieligger heeft dus een significante invloed op het draagvermogen.

Conclusie

De niet-lineaire analyse van het basismodel laat een goede match zien met de proefresultaten uit Eindhoven. Dit geeft vertrouwen in de gekozen manier van modelleren en toegepaste materiaalparameters.

De tralieliggers spelen een significante rol in het constructieve gedrag en leveren een grote bijdrage aan de capaciteit van de onversterkte vloer. Bij het basismodel zijn het de tralieliggers die gaan vloeien (tot breuk) waarna bezwijken plaatsvindt. In de proeven aan de TU Eindhoven werden de tralies eruit getrokken. Dit gedrag zien we in de FEM-modellen ook ontstaan in de vorm van fikse scheurvorming rond het beton van de tralies (eerst in gestorte deel en daarna in schil). Het wegnemen van de tralieliggers in het basismodel leidt tot een sterke reductie in capaciteit en bros bezwijken.

Vanwege de positieve resultaten met het model is het ook toegepast voor het analyseren van twee versterkingsmethoden: CFRP-modellen en bolankers. Over deze toepassingen zijn twee andere artikelen gepubliceerd, respectievelijk ‘Versterken met CFRP-lamellen’ en ‘Versterken met bolankers’.

BRONNEN

- 1 RTD:1016-1:2017 - Guidelines for Nonlinear Finite Element Analysis of Concrete Structures. Rijkswaterstaat, 15 juni 2017.
- 2 Rapport 9663-1-0, Bezwijken parkeergarage Eindhoven Airport – Analyse naar de oorzaak. Rijswijk: Adviesbureau ir. J.G. Hageman, 25 september 2017.

14

15654_basismodel_excl_tralie
load-step 20, load-factor 18.000, LC2_load
crack-widths Ecw1
min: -0.03 mm max: 118.94 mm



Voegdetail en versterkingsmethode geanalyseerd
met niet-lineair FEM-model (2)

Versterken met CFRP-lamellen



In vervolg op de instorting van de parkeergarage bij Eindhoven Airport moeten diverse andere gebouwen constructief worden versterkt. Een van de oplossingen is het toepassen van uitwendig gelijmde koolstoflamellen (CFRP). Deze oplossing is geanalyseerd aan de hand van een niet-lineair FEM-model.

CFRP-wapening (CFRP staat voor carbon fibre reinforced polymer) wordt gevormd door CFRP-vezels met hoge treksterkte – via een pultrusieproces – in voorgevormde strippen te produceren. Deze strippen worden op het voorbereide betonoppervlak gelijmd met een pasteuze epoxylijm. De capaciteit van deze uitwendige wapening wordt niet bepaald door de sterkte van de CFRP, maar door de hechting op het beton die kan worden gerealiseerd.

Door korte CFRP-lamellen uitwendig te verlijmen over de kritische voeg, kan de breedplaatvloer worden versterkt (foto 1). Uitgangspunt hierbij is dat de functioneel oorspronkelijke koppelwapening, die in de druklaag aanwezig is, geheel of gedeeltelijk wordt vervangen door de CFRP-lamellen. Door het aanbrengen van de alternatieve koppelwapening wijzigt de krachtswerking in het voegdetail. Hiermee wordt vermeden dat de trekkracht uit de wapening in de prefab breedplaat, via het relatief gladde stortvlak, naar de koppelwapening moet worden overgebracht.

Niet-lineair-model CFRP-lamellen

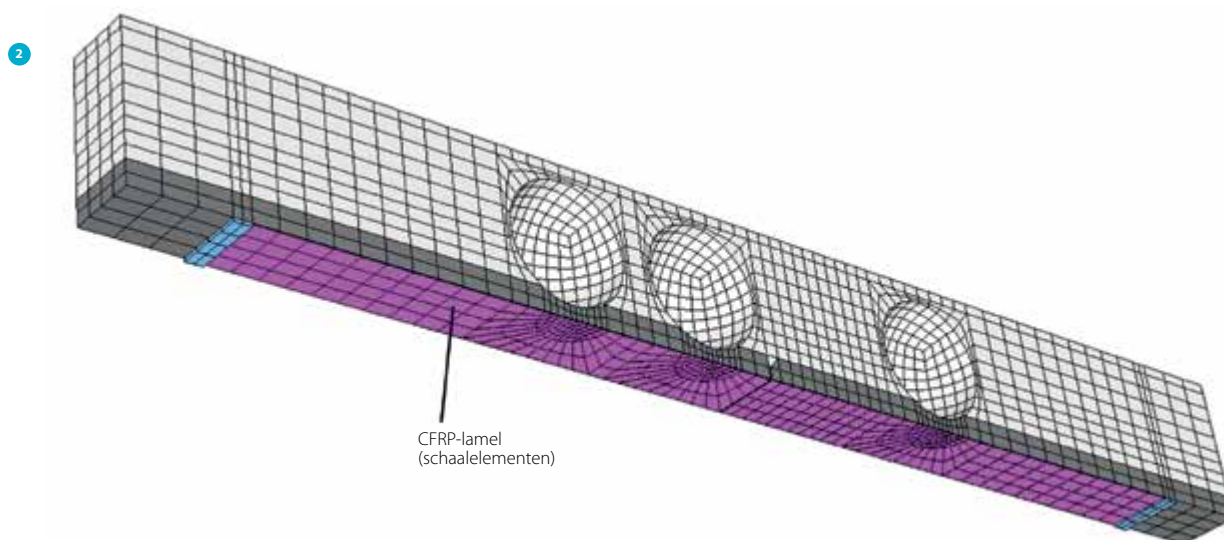
Voor de niet-lineaire analyse van de versterking met CFRP-lamellen is een basismodel gebruikt dat is opgezet om eerder uitgevoerd experimenteel onderzoek op de TU Eindhoven na te bootsen. Over dit basismodel is het artikel 'Niet-lineaire analyse breedplaatvloeren' verschenen.

Samen met het artikel 'Versterken met bolankers', elders in dit nummer, vormen deze artikelen een drieluik.

Voordeel van deze methode is dat er niet in de vloer geboord hoeft te worden. Dit is met name een voordeel bij vloerconstructies waarbij veel leidingen of kanalen in de vloer zijn aangebracht. Bij bollenplaatvloeren ontbreken de bollen veelal bij de naad. Hierdoor worden er juist in het invloedsgebied van de voegen relatief veel leidingen en kanalen geplaatst. Ook de toepassing van thermische betonactivering in de vloer kan ervoor zorgen dat het boren in de vloer ongewenst is. In deze situaties is de toepassing van CFRP goed mogelijk. Voor het verlijmen van de strippen wordt het betonoppervlak geschuurd om een goede aanhechting te verkrijgen. Het schuren wordt uitgevoerd met een haakse slijper voorzien van komschijf en stofafzuiging.

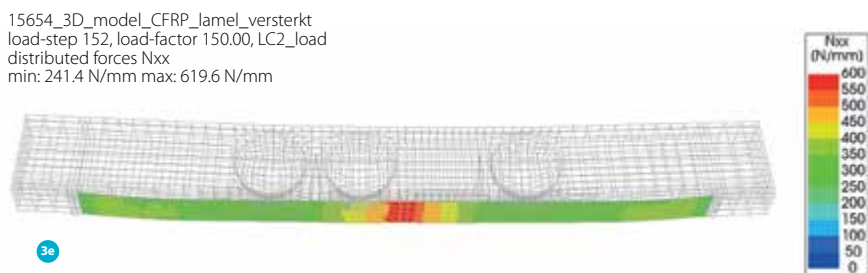
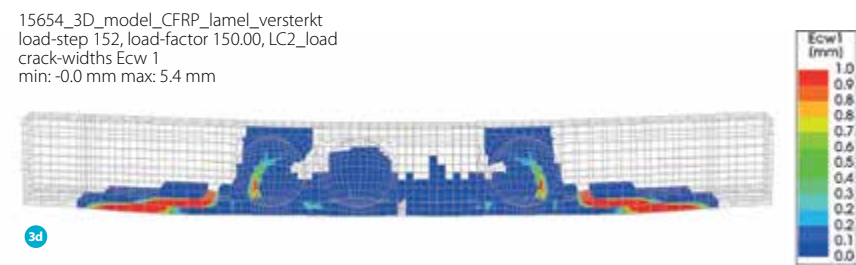
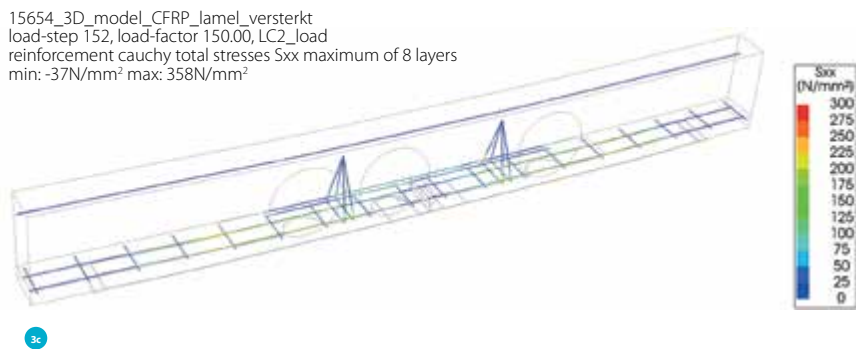
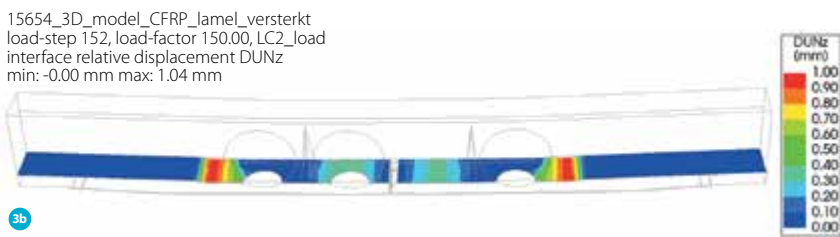
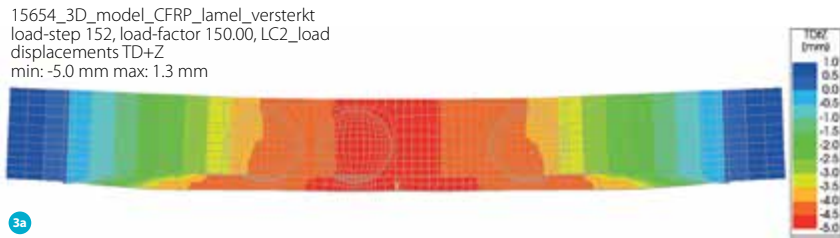
FEM-model

Voor het testen van de versterkingsoplossing met CFRP-lamellen is een eerder opgezet FEM-model uitgebreid (fig. 2). Dat



¹⁾ Han Schijffelen heeft het artikel gereviewd namens VNconstructeurs.

- 3a Zakking bij 300 kN
- 3b Opening interface tussen prefab schil en druklaag bij 300 kN
- 3c Staalspanning bij 300 kN
- 3d Scheurvorming bij 300 kN
- 3e Kracht in CFRP bij 300 kN



basismodel is opgezet om een oorspronkelijke proefopstelling aan de TU Eindhoven na te bootsen (zie kader 'Niet-lineair-model CFRP-lamellen'). Uitgegaan is van het toepassen van een CFRP-lamel aan de onderzijde van het proefstuk over de gehele lengte tussen de steunpunten. De CFRP-lamel is met zogenoemde schaalelementen gemodelleerd met lineair-elastische eigenschappen en een E-modulus van 170.000 N/mm². De ingevoerde dikte van de CFRP-lamel is 2,4 mm en is gebaseerd op het uitgangspunt van een equivalente stijfheid van het wapeningsstaal in de prefab schil zodat $EA_{\text{wap_staal}} = EA_{\text{CFRP_lamel}}$.

Tussen de schaalelementen van de CFRP-lamel en onderzijde prefab schil zijn interface-elementen aangebracht om de lijm te modelleren. Hierbij is ingevoerd een normaalstijfheid van $k_{\text{normaal}} = 1666 \text{ N/mm}^3$ en een schuifstijfheid van $k_{\text{schuif}} = 695 \text{ N/mm}^3$ op basis van $E = 5000 \text{ N/mm}^2$, $G = 2083 \text{ N/mm}^2$ en een dikte van 3 mm. Overige eigenschappen en belastingen zijn gelijk aan die van het basismodel.

Resultaten

De resultaten van de analyse ten aanzien van zakking, opening interface, staalspanning, scheurvorming en kracht in de lamel, zijn weergegeven in figuur 3a t/m 3e.

Onthechting

Een belangrijke reden om de FEM-analyse uit te voeren, was de vrees voor vroegtijdige onthechting van de CFRP-lamellen door ongelijkmatige verticale vervorming van de prefab schil nabij de voeg. Dit zou kunnen leiden tot hoge trekspanningen haaks op het hechtvlak. De lijmverbinding is hiertegen niet goed bestand en hierdoor zou onthechting kunnen plaatsvinden. Op basis van de FEM-modellen blijkt echter dat de excentrische plaatsing van de CFRP, ten opzichte van de zwaartelijns van de prefab schil, voor een tegengestelde kromming van de schil zorgt (fig. 4). De prefab schil onthecht plaatselijk nog wel maar wordt door de CFRP weer tegen de druklaag aan gedrukt.

Ontwikkeling belasting

Uit de resultaten van de FEM-berekening en uit het last-zakkingdiagram (fig. 5) is te zien dat de CFRP-lamelversterking significant bijdraagt aan de capaciteit van de constructie. Bij een belasting van 84 kN treedt voor het eerst onthechting op in de interface links van de naad tot aan de tralieligger.

Bij een belasting van 136 kN (loadfactor 68) treedt ook onthechting op in de interface rechts van de naad tot aan de tralieligger. Er is dan sprake van een beperkte reductie in stijfheid van de constructie.

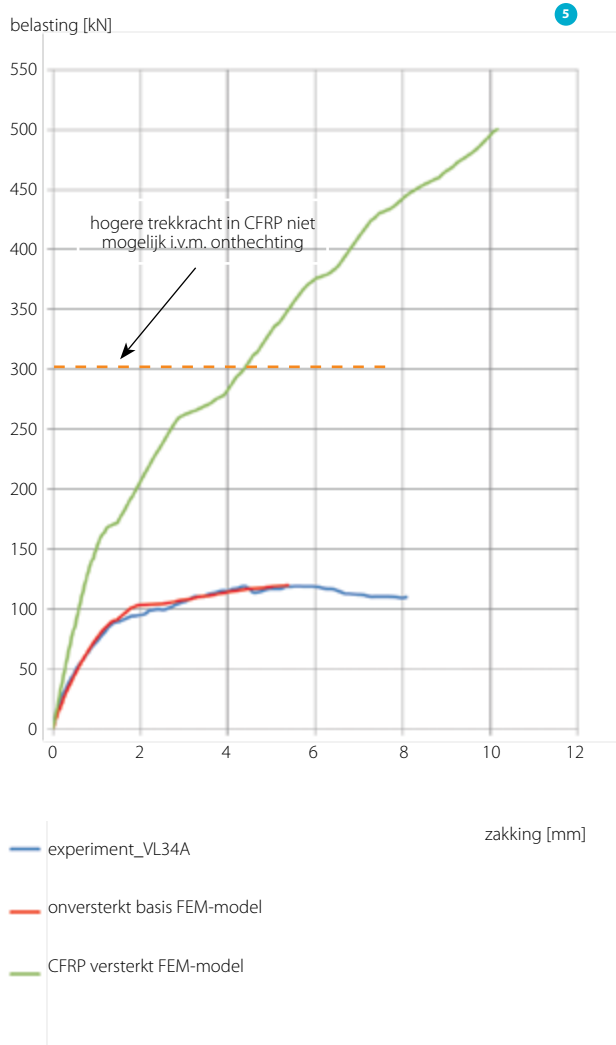
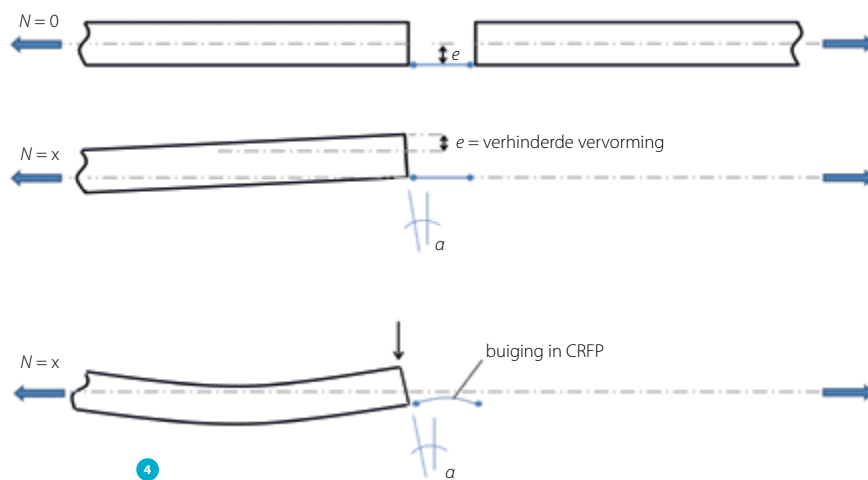
Vervolgens treedt bij een belasting van 172 kN (loadfactor 86) ook onthechting op in de interface tussen opstort beton en

- 4 Verklaring opkrommend effect
- 5 Last-zakingsdiagram proefstuk, onversterkt FEM-model en met CFRP versterkt model

schil achter de tralieliggers, waarna de stijfheid verder reduceert.

Bij een belasting van circa 270 kN treden er in de prefab schil diagonale scheuren op bij de overgang van niet-lineaire interface naar lineaire interface. Gesteld kan worden dat aangezien de onthechting in het model zich niet verder kan ontwikkelen in de stijve lineaire interface, de onthechting zich als het ware verder voortzet in de prefab schil.

Dit laatste fenomeen wordt zodoende gezien als een gevolg van de wijze van modellering. Bij toepassing van doorgaande ankers die prefab schil en druklaag tegen elkaar drukken, zoals in de oorspronkelijke proefopstelling het geval was, zal het gedrag naar verwachting gunstiger zijn. Desalniettemin wordt in het model een belasting van 300 kN gehaald zonder dat de wapening vloeit. Hogere belastingen worden niet opneembaar geacht door onthechting van de lijm tussen CFRP en beton.



Onthechtingsmechanismen

De toegepaste FEM-modellen zijn niet geschikt om de mogelijke onthechtingsmechanismen tussen betonoppervlak en CFRP nauwkeurig te voorspellen. De controle op onthechting is uitgevoerd op basis van de krachten in de CFRP zoals deze in het FEM-model optreden en een berekening op basis van 'fib Bulletin 14'. De grenswaarde waarbij onthechting nog net niet optreedt is in figuur 5 weergegeven als gele stippellijn.

Toepassing

Het toepassen van de versterkingsmaatregel met gelijkde CFRP-lamellen aan de onderzijde met een equivalente stijfheid gelijk aan die van de breedplaatwapening, levert een significante bijdrage aan de capaciteit. Op basis van de resultaten komt deze maatregel als een geschikte principeoplossing naar voren.

De versterkingsoplossing met CFRP-lamellen is bij een aantal projecten toegepast. Voor specifieke projecten moeten altijd projectspecifieke modellen worden gebruikt, gebaseerd op de werkelijke afmetingen en voorgestelde detaillering van de versterking. Daarbij kan er ook voor worden gekozen de berekening gefaseerd uit te voeren. Daardoor wordt de versterking pas aangebracht in het model nadat eerst de permanente belasting is aangebracht in de onversterkte situatie, zoals dat in een bestaande situatie het geval zal zijn.

Hoewel de FEM-studie veel inzicht heeft gegeven in de werking van de versterkingsoplossingen, zijn wij van mening dat de effectiviteit van deze oplossingen alsnog moet worden geverifieerd met proeven. ☒

Voegdetail en versterkingsmethode geanalyseerd met niet-lineair FEM-model (3)

Versterken met bolankers



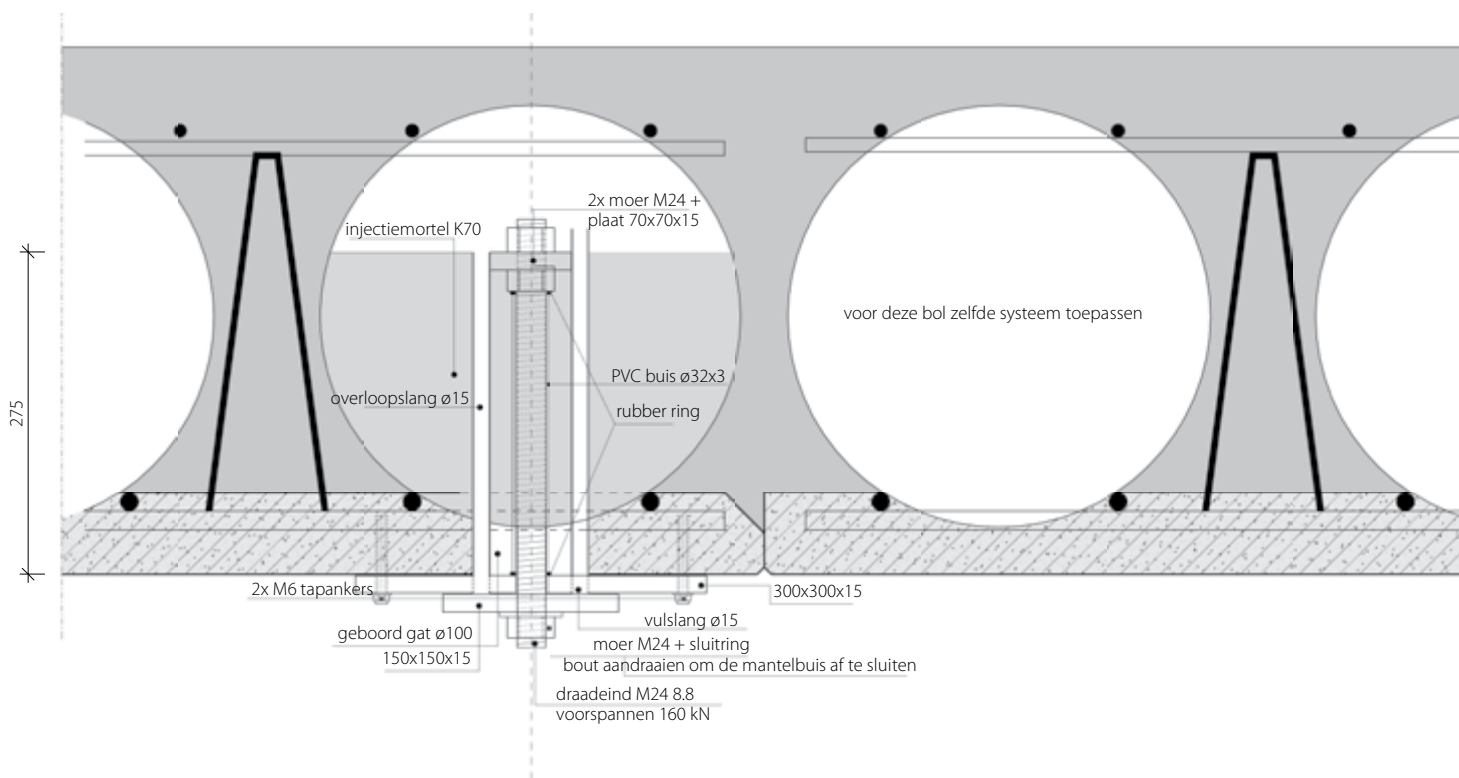
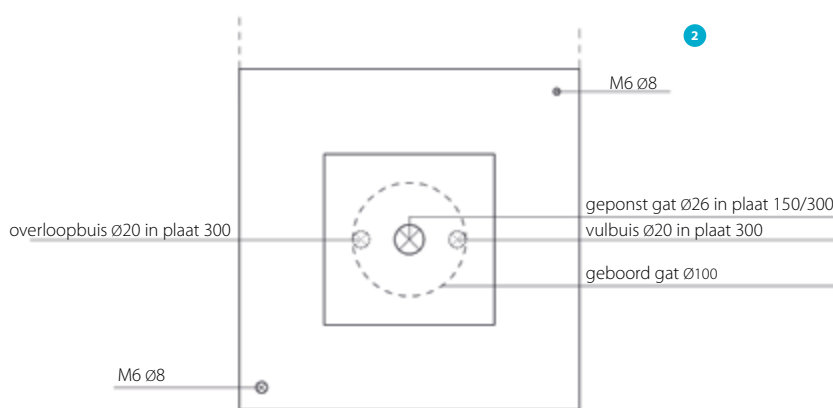
Een mogelijke versterkingsoplossing van breedplaatvloeren is het toepassen van voorgespannen ankers in de bollen. Deze zogenoemde bolankers worden van onderuit in de met mortel gevulde bollen bevestigd (foto 1, fig. 2). Hiermee wordt de prefab schil tegen de druklaag aangeduwd. Een niet-lineaire eindige-elementenberekening laat een grote toename in capaciteit zien ten opzichte van beproevingen aan niet-versterkte proefstukken.

Bij de versterkingsmethode met bolankers wordt onder in de bol een gat geboord. Daarin wordt een anker opgehangen met aan de bovenzijde een kopplaat. Nadat het anker tijdelijk is gefixeerd (bijvoorbeeld door lijm of een lichte schroefverbinding), wordt de bol door middel van injectie gedeeltelijk gevuld met mortel. Na verharding van de mortel wordt het anker voorgespannen, waardoor de betonnen druklaag op de prefab schil wordt geklemd. Hierdoor neemt de opneembare afschuifkracht van het stortvlak toe en kan de originele koppelwapening alsnog worden geactiveerd.

Niet-lineair-model bollenplaatvloer

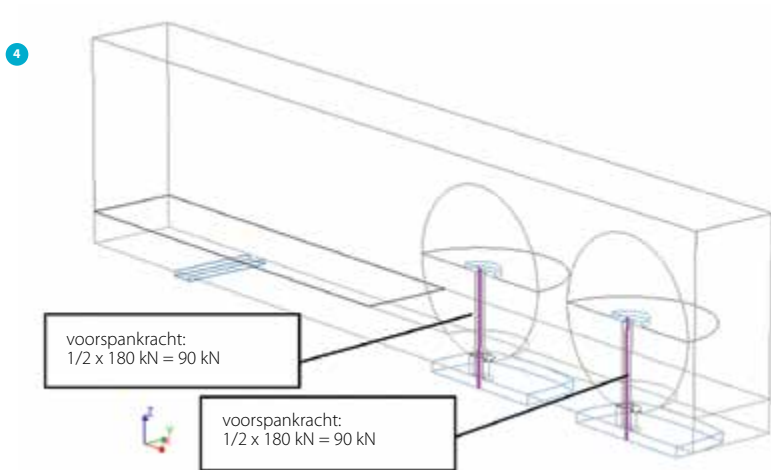
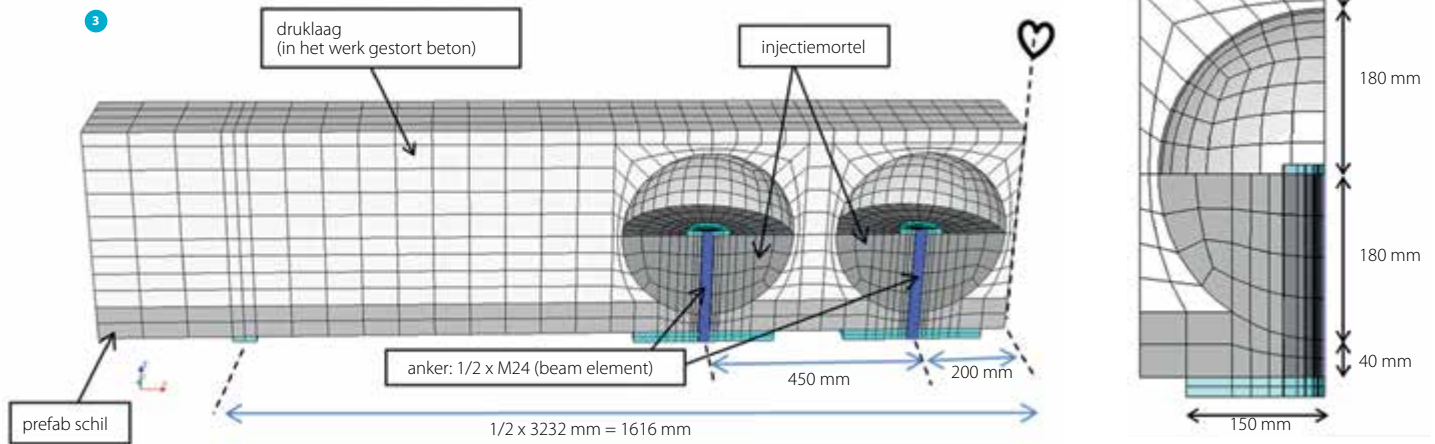
Voor de niet-lineaire analyse van de versterking met bolankers is een basismodel gebruikt dat is opgezet om een eerder uitgevoerd experimenteel onderzoek op de TU Eindhoven na te bootsen. Over dit basismodel is het artikel 'Niet-lineaire analyse breedplaatvloeren' verschenen.

Samen met het artikel 'Versterken met CFRP-lamellen', elders in dit nummer, vormen deze artikelen een drieluik.



¹⁾ Han Schijffelen heeft het artikel gereviewd namens VNconstructeurs.

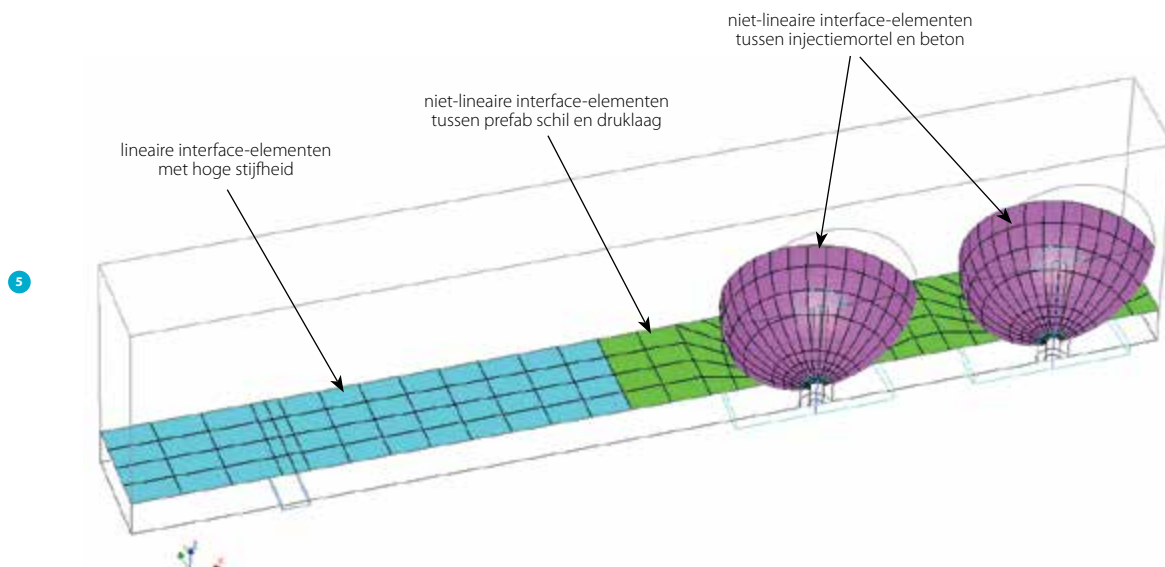
- 3 Opzet FEM-model bolankers
- 4 Voorspanning ankers
- 5 Modellerings interface-elementen



Er is voor het plaatsen van reguliere ankers in een bollenplaatvloer erg weinig ruimte beschikbaar. De koppelwapening is in de ruimte tussen de bollen geplaatst en mag niet worden doorboord. Hierdoor is het boren van ankerputten lastig uitvoerbaar. Met de bolankeroplossing worden de gaten ter plaatse van de bollen geboord. Op deze locatie is de prefab schil het dunst en is met relatief weinig inspanning de inwendige holle ruimte bereikbaar.

FEM-model

Voor het testen van de versterkingsmaatregel met bolankers is een eerder opgezet FEM-model toegepast. Dat basismodel is opgezet om een oorspronkelijke proefopstelling aan de



- 6a Zakking bij 300 kN
- 6b Opening interface tussen prefab schil en druklaag bij 300 kN
- 6c Staalspanningen bij 300 kN
- 6d Scheurvorming bij 300 kN
- 6e Voorspankracht ankers bij 300 kN

TU Eindhoven na te bootsen (zie kader 'Niet-lineair-model bollenplaatvloer'). In dit model zijn de twee bollen naast de naad voor de helft gevuld met mortel en zijn ankers M24 met stalen kopplaten aangebracht (fig. 3). Tevens is er in verband met een kortere rekentijd een extra symmetrieas toegepast zodat slechts een halve overspanning wordt gemodelleerd. Daarbij moet worden opgemerkt dat er in het werkelijke proefstuk een asymmetrie zit door het feit dat er zich in het werkelijke proefstuk links van de naad twee bollen achter elkaar bevinden, en rechts van de naad slechts één. Deze asymmetrie bleek echter weinig invloed te hebben op het gedrag en bezwijkmechanisme.

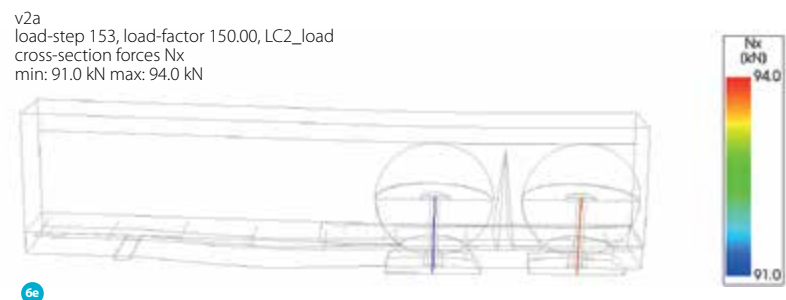
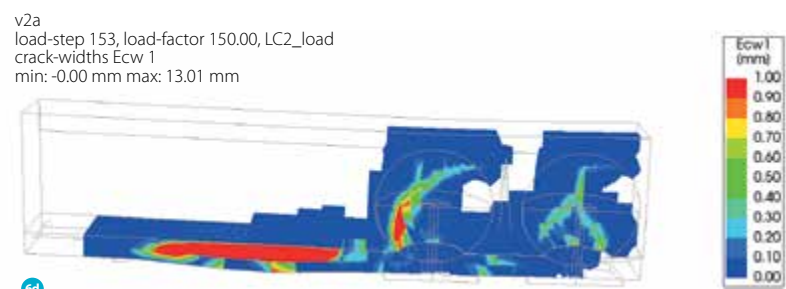
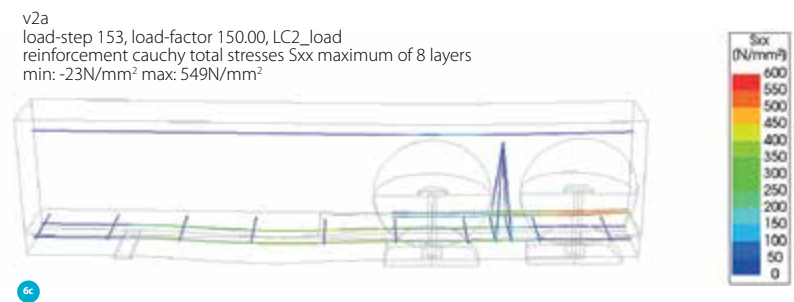
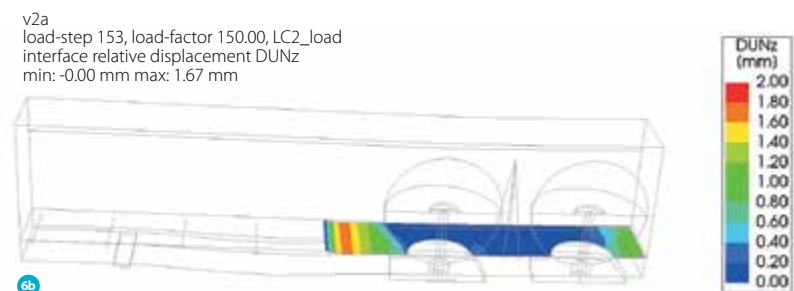
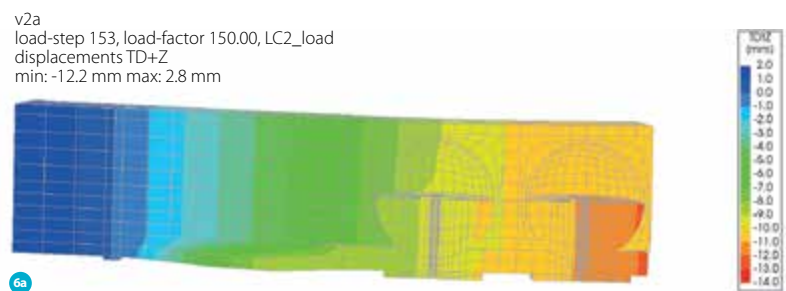
De materiaaleigenschappen van het beton zijn gelijk aan die van het basismodel. Toegevoegd is nu de injectiemortel, waarbij ook hier niet-lineaire materiaaleigenschappen zijn toegekend. Uitgegaan is van een K70-mortel met $f_{cm} = 78 \text{ N/mm}^2$. Voor het staal van de kopplaten is uitgegaan van lineair-elastische eigenschappen.

Met betrekking tot de belastingen wordt uitgegaan van eigen gewicht en puntlasten, conform het basismodel. Toegevoegd is een voorspankracht op de ankers van 180 kN. In het model vertaalt zich dit naar $0,5 \cdot 180 \text{ kN} = 90 \text{ kN}$, aangezien de ankers zich op het symmetrievlak bevinden en er slechts een half anker is gemodelleerd (fig. 4).

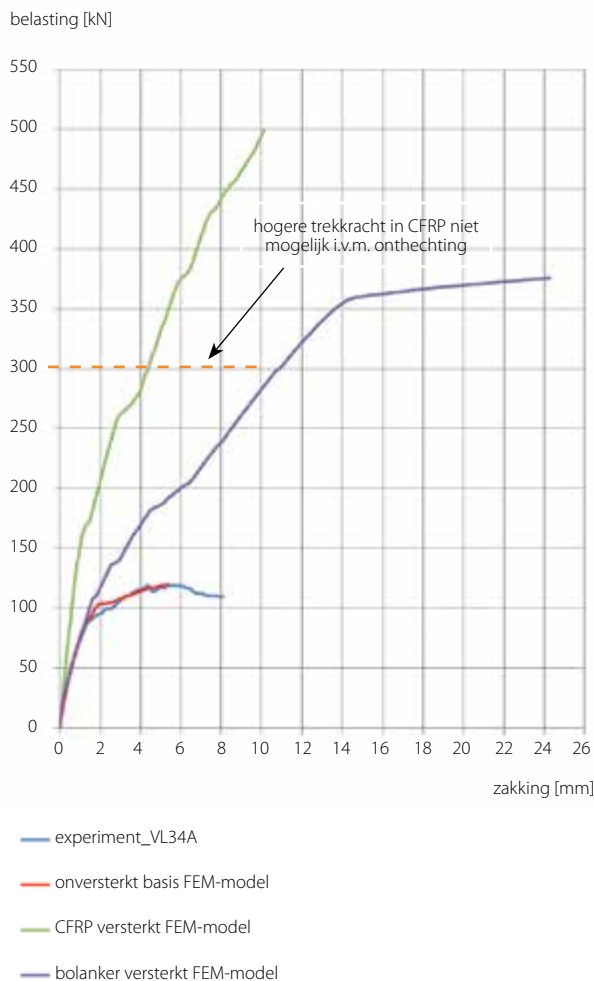
Afgezien van de interface-elementen tussen prefab beton en druklaag worden er in dit model ook interface-elementen toegepast tussen injectiemortel en het beton om de kunststoflaag van de bol te modelleren (fig. 5). Hierbij wordt net als in het basismodel gekozen voor Coulomb-fictie-eigenschappen:

- aangehouden cohesie: $c = 0,1 \text{ N/mm}^2$
(laag aangenomen)
- wrijvingscoëfficiënt: $\mu = 0,1 \Rightarrow$ wrijvingshoek:
 $\varphi = 5,7^\circ$ (laag aangenomen)
- maximale normaaltrekspanning: $f_t = 0,01 \text{ N/mm}^2$
(no-tension)
- $k_{\text{normaal}} = 60.000 \text{ N/mm}^3$
- $k_{\text{schuif}} = 6000 \text{ N/mm}^3$

Opgemerkt moet worden dat in verband met gebrek aan specifiekere gegevens over de wrijvingscoëfficiënt (en daarmee de wrijvingshoek) voor beton-kunststof,



7 Last-zakkingsdiagram proefstuk, onversterkt FEM-model, met CFRP versterkt model en met bolankers versterkt model



7

de waarden hiervoor zijn geschat. Er zijn hierbij lage waarden aangehouden. Hieruit blijkt dat een geringe wrijving tussen kunststof en bolanker genoeg is om het verdraaien van het bolanker te voorkomen.

Resultaten

De resultaten van de analyse ten aanzien van zakking, opening interface, staalspanning, scheurvorming en voorspankracht zijn weergegeven in figuur 6a t/m 6e.

Uit het last-zakkingsdiagram (fig. 7) is te zien dat het model met versterking tot een belasting van ongeveer 85 kN vrijwel gelijkloopt met de grafiek van de eerder uitgevoerde proef. Er is dan in een vroeg stadium wel al onthechting opgetreden bij de naad. Er vindt dan tevens een kleine rotatie plaats van de eerste halve bol injectiemortel ten opzichte van de druklaag.

De grafiek van het model met versterking blijft langer met dezelfde stijfheid doorlopen tot een belasting van ongeveer 110 kN. Dan treedt er tevens onthechting op achter de koppelwapening waarbij ook sprake is van verticale scheurvorming. Dit gaat gepaard met een reductie in stijfheid.

Bij een belasting van circa 180 kN treden er in de prefab schil diagonale scheuren op bij de overgang van niet-lineaire interface naar lineaire interface. Gesteld kan worden dat aangezien de onthechting in het model zich niet verder kan ontwikkelen in de stijve lineaire interface, de onthechting zich als het ware verder voortzet in de prefab schil. Dit laatste fenomeen wordt zodoende gezien als een gevolg van de wijze van modellering. Bij toepassing van doorgaande ankers die prefab schil en druklaag tegen elkaar drukken, zoals in de oorspronkelijke proefopstelling het geval was, zal het gedrag naar verwachting gunstiger zijn.

De tralieligger wordt in dit model veel minder aangesproken en worden juist de koppelstaven meer geactiveerd. De belasting kan nu worden opgevoerd tot circa 360 kN, waarbij de koppelstaven vloeien en bezwijken snel volgt.

Conclusie

Het toepassen van de versterkingsmaatregel met bolankers levert net als bij de CFRP-lamellen een grote toename in capaciteit. In plaats van dat de tralieligger vroegtijdig bezwijkt, zijn het nu de koppelstaven die worden geactiveerd. De belasting kan nu zodanig worden opgevoerd dat vloeien optreedt in de koppelstaven.

De versterkingsoplossing is al bij een project toegepast. Voor specifieke projecten moeten altijd projectspecifieke modellen worden gebruikt, gebaseerd op de werkelijke afmetingen en voorgestelde detaillering van de versterking. Daarbij kan er ook voor worden gekozen de berekening gefaseerd uit te voeren, zodat de versterking pas wordt aangebracht in het model nadat eerst de permanente belasting is aangebracht in de onversterkte situatie.

Hoewel de FEM-studie veel inzicht heeft gegeven in de werking van de versterkingsoplossingen, zijn wij van mening dat de effectiviteit van deze oplossingen alsnog moet worden geverifieerd met proeven. ☒