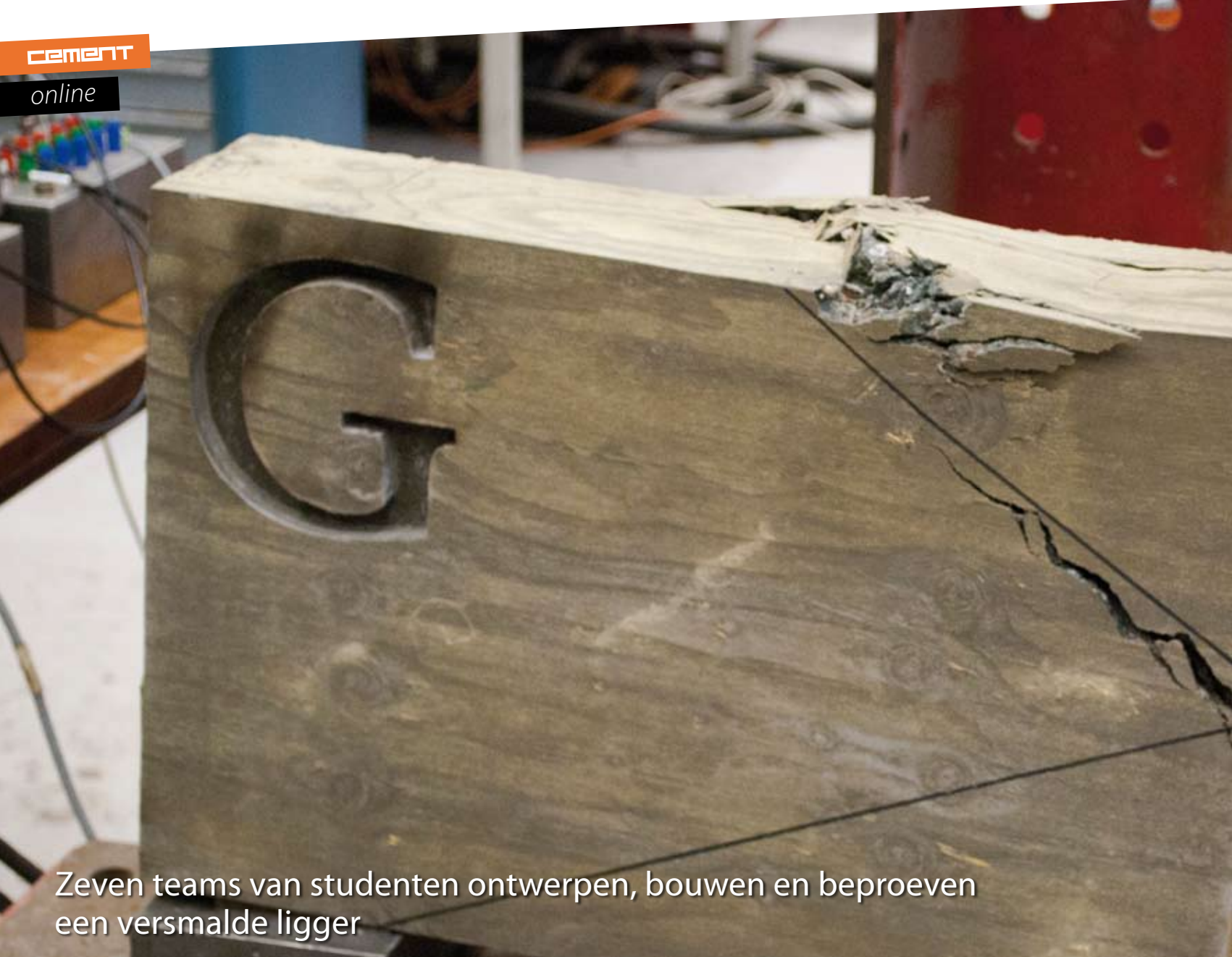




Zeven teams van studenten ontwerpen, bouwen en beproeven een versmalde ligger

Staafterk- modellen getoetst

Liggers met openingen, versmallingen of verbredingen worden vaak ontworpen met staafterkmodellen. Er is inmiddels veel ervaring opgedaan met deze methode. Echter, de keuze van het juiste staafterkmodel blijft moeilijk. Het juiste model moet de spannings-trajectoriën volgen, nergens de rekenwaarden van de materiaalspanningen overschrijden en gebruikmaken van zo min mogelijk wapening.



Inge Kalsbeek, Marco van Arragon, Rutger de Vries, Amin Ghossein et al. ¹⁾
TU Delft, fac. CiTG

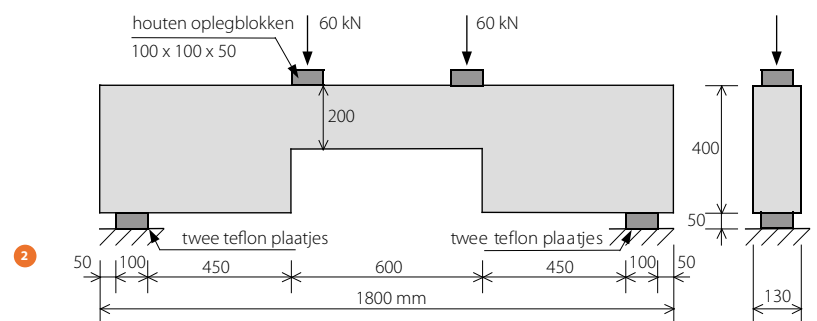
- 1 De liggers zijn belast door een vijzel, op de foto de bezwijkvorm van ligger G
- 2 Ligger met afmetingen, opleggingen en belasting
- 3 Optimale liggervorm bepaald met het BESO algoritme. De kleur komt overeen met de grootte van de spanning

Minor constructief ontwerpen

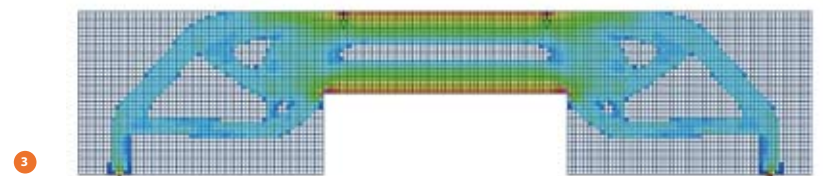
Sinds twee jaar wordt in de bachelorprogramma's aan Nederlandse universiteiten ruimte gemaakt voor een minor naar Angelsaksisch voorbeeld. Dit is een half jaar waarin studenten een andere inleidende studie volgen. Een student Bouwkunde in Eindhoven kan bijvoorbeeld een minor Psychologie doen in Leiden. Ook de faculteit Civiele Techniek in Delft biedt een aantal minor-studies aan; één daarvan is een minor constructief ontwerpen met de naam Bend & Break. Deze minor is toegankelijk voor techniekstudenten uit Eindhoven, Delft en Twente. Ook wordt hij gevolgd door studenten Civiele Techniek Delft die de gelegenheid gebruiken zich verder te bekwamen in hun eigen vakgebied. De minor bestaat uit acht vakken; één van deze vakken betreft een gewapend betonnen ligger met een versmald middendeel.

vooral moeten letten op de bruikbaarheidsgrenstoestand. De rekenbelasting was $2 \times 60 \text{ kN}$ en het doel was zo min mogelijk wapening toe te passen. In andere woorden: de verhouding draagkracht:wapeningsgewicht moest zo groot mogelijk zijn. Beschikbaar waren geribde wapeningsstaven $\varnothing 6$ en $\varnothing 12 \text{ mm}$. De treksterkte van deze staven is experimenteel bepaald op respectievelijk 18 en 73 kN. Veiligheidsfactoren zijn niet gebruikt. Geen eisen werden gesteld aan scheurwijdten, dekking, duurzaamheid of aan praktische uitvoerbaarheid.

Zeven teams van studenten kregen in het kader van de minor constructief ontwerpen de opdracht een versmalde ligger te ontwerpen, bouwen en beproeven (fig. 2). Ze hebben de wapening ontworpen en daarbij heel verschillende staafwerkmodellen gebruikt, variërend van traditioneel tot bijzonder innovatief. Vervolgens zijn de liggers gemaakt en beproefd. Als extra innovatie zijn de betonmengsels samengesteld met betongranulaat (kringloopbeton). Uit de proefresultaten blijkt dat alle liggers de ontwerpbelasting ruim kunnen dragen. De verschillen in de ontwerpen kwamen vooral tot uiting in de scheurvorming. Dit laat zien dat we bij de keuze van staafwerkmodellen



¹⁾ De bovengenoemde auteurs hebben ligger F ontworpen en gemaakt. Medeauteurs zijn Kenny Lourens (ligger A), Alexander van der Plas (A), Abel Heinsbroek (A), Christine Yip (B), Amir Semiari (B), Kaichen Tian (B), Matti Kabos (C), Andre Griemink (C), Lucas van Oortmerssen (C), Navin Autar (D), Johan Kraus (D), Klaas van Reenen (D), Henno Smaling (E), Wouter van Gemeren (E), Roeland van Straten (E), Bram Teeuwen (G), Stijn Joosten (G), Noud Altinga (G), Sevan Markerink (G), Walter de Vries, Eva Lantsoght, Pierre Hoogenboom.





Elk team heeft ook een betonmengsel bepaald, beton gemaakt en gestort. Hiervoor was cement CEM III/B 42,5 N beschikbaar. De hoeveelheid cement was niet begrensd. Er is gebruikgemaakt van betongranulaat. Zandfracties zijn naar keuze bijgemengd; grindfracties zijn heel beperkt bijgemengd. Superplastificeerder of staalvezels zijn gebruikt in sommige van de liggers. Van elk mengsel zijn drie proefkubussen gemaakt. Deze zijn opgeslagen in het lab, wekelijks nat gemaakt en na 28 dagen beproefd.

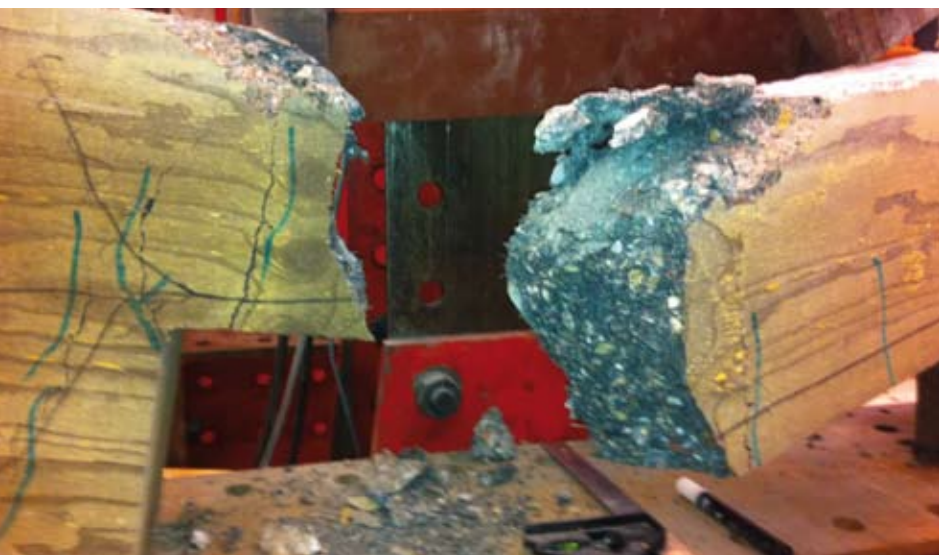
Betongranulaat

Binnen de minor is aandacht gegeven aan de recycling van beton en is gebruikgemaakt van betongranulaat in de productie van de betonmengsels. Het granulaat is geschikt gemaakt door de hoeveelheid fijn materiaal en de vervuilingen te reduceren. De bestaande methode hiervoor is wassen, waarbij een dure slibfractie wordt geproduceerd. Hierdoor is gewassen betongra-

nulaat niet concurrerend met grind gewonnen uit rivieren. Recentelijk is er een nieuwe technologie ontwikkeld in het recyclinglab van de TU Delft, die het mogelijk maakt betongranulaat op een economische manier op kwaliteit te brengen. Met deze technologie, genaamd ADR (Advanced Dry Recovery), wordt vochtig granulaat van 0-16 mm ontdaan van de 0-1 mm fractie. Tegelijkertijd worden ook de lichte vervuilingen sterk gereduceerd. Deze twee verbeteringen zorgen er in de meeste gevallen voor dat het granulaat direct toepasbaar is. Indien dit niet het geval is, kan het materiaal alsnog met natte methodes worden behandeld. Omdat de 0-1 mm fractie is verwijderd, kan dit zonder dat een kostbaar slib wordt geproduceerd.

Elk team heeft met een labopstelling van de ADR ongeveer 200 liter sterk vervuilde betongranulaat opgeschoond. Het geproduceerde materiaal is geanalyseerd volgens de vernieuwde NEN 12620. Hoewel een labset-up van de ADR is gebruikt, waren de resultaten consistent en zeer positief: Het aandeel 0-1 mm werd gereduceerd van 13% naar 4%. Door deze reductie is het materiaal niet langer kleverig en kan het goed worden gebruikt voor de productie van beton. De hoeveelheid drijvende vervuiling van het onbehandelde betongranulaat was 5,9 cm³/kg, waardoor dit materiaal niet binnen de norm zou vallen (max. 5 cm³/kg). Het met de ADR bewerkte materiaal had een drijvende vervuiling van 2,7 cm³/kg, waardoor het materiaal binnen categorie FL₅ valt.

5



Beschrijving van de ontwerpen en proeven

De liggers van de zeven teams zijn genummerd A t/m E. De wapening voor deze zeven liggers is op een verschillende manier bepaald.

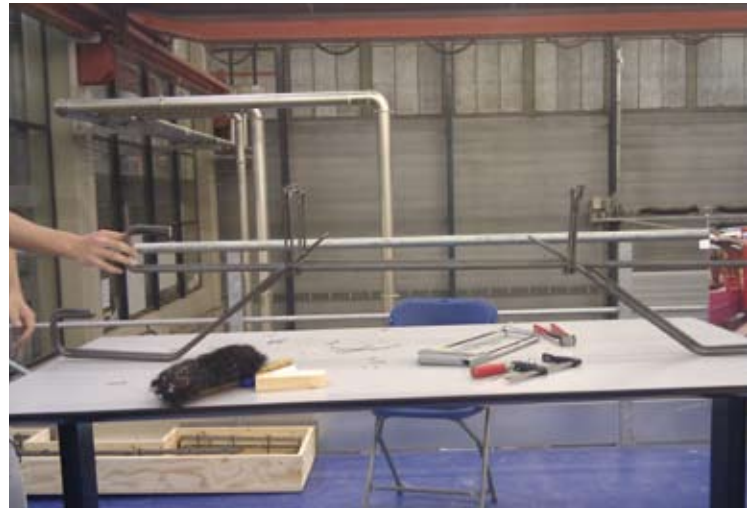
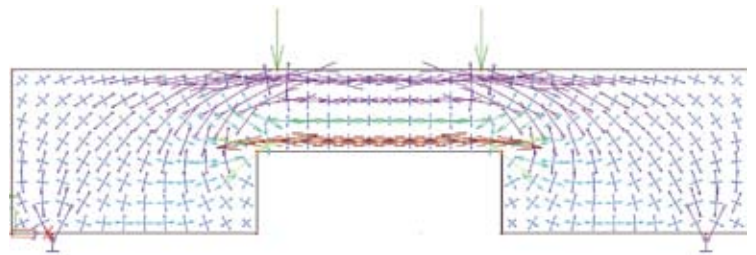
- 4 Wapeningskorf afgeleid van de optimale liggervorm
- 5 Bezweken ligger A
- 6 Hoofdspanningsrichtingen door de puntlasten
- 7 Wapening van ligger B
- 8 Scheurvorming in ligger B na beproeven

Ligger A

De ligging van de wapeningsstaven in ligger A is bepaald met een optimalisatie algoritme (BESO). Dit algoritme bepaalt eerst de spanning in de ligger met een eindige-elementenberekening. Vervolgens verwijdert het materiaal en voegt het materiaal toe in een aantal iteraties, totdat de optimale vorm is verkregen (fig. 3). Hieruit is een staafwerk afgeleid waarmee de wapening is bepaald (foto 4).

Het betonmengsel van 100 liter bestond uit 98 kg betongranulaat, 58 kg zand en 45 kg cement. Verder is 1 volumeprocent korte staalvezels aan het mengsel toegevoegd om de treksterkte en ductiliteit te verbeteren. De water-cementfactor was 0,42 en er is gebruikgemaakt van een superplastificeerder.

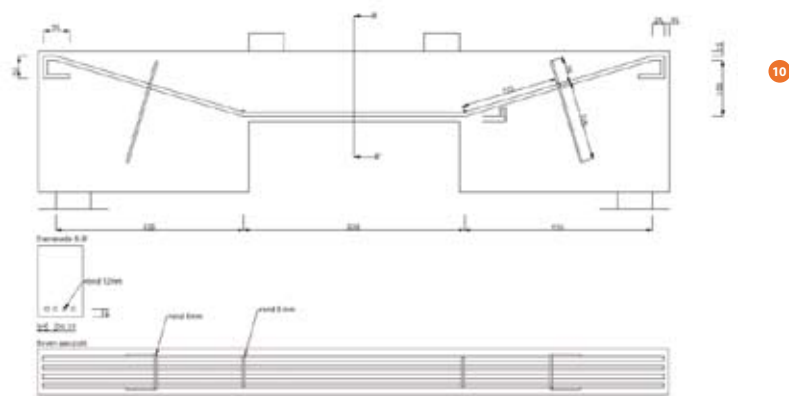
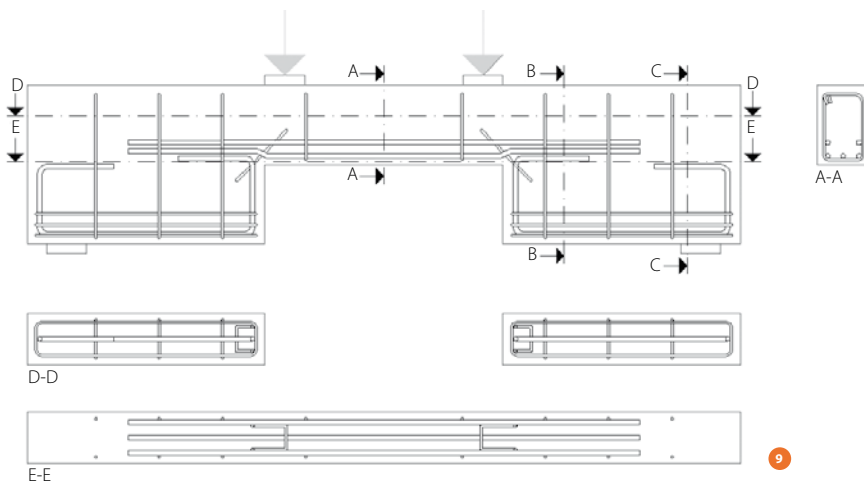
Bij het beproeven van de ligger was de werking van de staalvezels goed te zien; er ontstonden pas bij zeer hoge belastingen kleine scheuren in het middendeel van de ligger. Bij 179 kN begon de drukzone onder de puntlasten te bezwijken. Opvallend is dat de ligger, door de werking van de korte staalvezels, pas bij een zeer grote vervorming van 58 mm bezweek door het breken van de wapeningsstaven in het midden van de ligger (foto 5).



8



- 9 Wapening van ligger C
 10 Wapeningsconfiguratie van ligger D
 11 Bezwijkpatroon van ligger C
 12 Afbuiging van een scheur (zwarte lijnen) in relatie tot de wapening (rode lijnen)
 13 Krachtsafdracht in ligger E



Ligger B

De wapening van ligger B volgt zo goed mogelijk de hoofdspanningsrichtingen (fig. 6). Daarnaast wordt scheurvorming in de inwendige hoek beperkt door vier schuine staven (foto 7). Tijdens de proef ontstonden de eerste zichtbare scheuren bij een belasting van ongeveer 40 kN. In het linker- en rechterdeel van de ligger was de scheurwijdte zichtbaar groter dan in het middendeel. Bij verder opvoeren van de belasting nam de scheurwijdte toe en groeide een van de scheuren langs de wapening naar beneden (foto 8). Ook groeide deze scheur naar boven in de richting van de drukzone van het middendeel. De ligger bezweek op druk bij een belasting van 155 kN toen deze scheur de drukzone bereikte.

Ligger C

Voor het ontwerpen van de wapening is ligger C opgedeeld in drie delen: linkerdeel (grote doorsnede) middendeel (kleine doorsnede) en rechterdeel (grote doorsnede). Voor elk van deze delen is de benodigde hoeveelheid wapening bepaald volgens de liggertheorie. Om de trekkrachten onderin de middendoorsnede op te nemen zijn vijf staven Ø12 mm nodig (fig. 9). Het staal is verankerd met de voorgeschreven verankeringslengte van 40 keer de diameter. Voor de trekkrachten onderin het linker- en rechterdeel zijn 6 staven Ø6 mm en 1 Ø12 mm nodig. Er is voor dit grote aantal staven gekozen om de Ø6 staven in lussen boven elkaar te kunnen leggen, wat zorgt voor een gunstige spanningsverdeling nabij de oplegging. De staaf Ø12 ligt in het midden onderin en wordt naar boven omgebogen om voldoende verankeringslengte te hebben. Verder zijn er beugels geplaatst met een tussenafstand van ongeveer 160 mm.

Het betonmengsel van 100 liter bestond uit 77 kg betongranulaat aangevuld met verschillende fracties zand, om tot een goede korrelverdeling te komen, met een gewicht van 14,5 kg. Vervolgens is 44,3 kg cement en 18,2 l water (inclusief absorptiewater) toegevoegd om een goed verwerkbaar mengsel te krijgen. Dit resulteerde in een water-cementfactor van 0,41. De voorspelde sterkte van dit mengsel na 28 dagen was 67,5 N/mm². Dat zou voldoende zijn voor betonsterkteklasse C30/37. De beproefde kubusdruksterkte bleek 65 N/mm² te zijn. Bij een belasting van ongeveer 100 kN ontstonden in het middendeel kleine scheurtjes. Bij 115 kN ontstonden vele scheuren in de betondrukdiagonaal van de grote doorsnede.





12

Deze scheuren breidden zich snel uit en de ligger werd zichtbaar dikker ter plaatse van de drukdiagonaal, totdat deze bezweek bij een belasting van 153 kN (foto 11). Het maatgevende bezwijkmechanisme was de druksterkte van het beton in de drukdiagonaal. Niettemin was er geen sprake van bros bezwijken. Tevens wordt vermoed dat de langswapening uit de drukdiagonaal is getrokken (slip), waardoor deze is gespleten.

Ligger D

Voor het ontwerp van ligger D is een aantal staafwerkmodellen onderzocht met MatrixFrame. Hieruit is het model gekozen met het minste aantal kilogram staal. Dit staafwerkmodel kan worden omschreven als een hangwerk dat tot een onconventioneel en gewaagd wapeningsontwerp leidt (fig. 10). Een mogelijke bezwijkvorm is het ontstaan van een scheur in de inwendige hoek die zich voortplant langs de wapening. Om deze scheur te begrenzen is besloten 'angstwapening' toe te passen in de vorm van twee beugels.

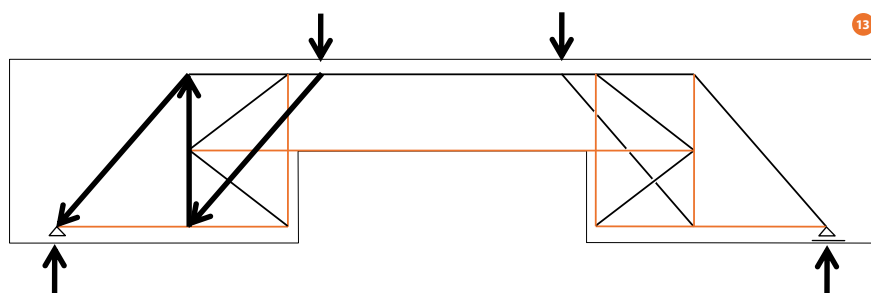
Bij het beproeven ontstonden in de gebruikstoestand duidelijk zichtbare grote scheuren die inderdaad langs de wapening liepen. De constructie heeft uiteindelijk een belasting van 177 kN gehaald, wat ver boven de verwachtingen was. De constructie is bezweken doordat een van de scheuren de betondrukzone in groeide (foto 12).

Ligger E

Het ontwerp van ligger E is gebaseerd op twee drukdiagonalen onder een hoek van ongeveer 45° (fig. 13). Hieruit volgt een vrij traditioneel wapeningsontwerp (foto 14).

De relatief lage kubusdruksterkte van ligger E is ontstaan door een tekort aan fijn materiaal in het betonmengsel. Dit tekort leidde tot onvoldoende verwerkbaarheid, wat is gecompenseerd door extra water toe te voegen. Hierdoor is de water-cement-factor toegenomen en de betonsterkte afgenomen.

Bij belasten van de ligger ontstond een aantal kleine scheuren in de trekzone van het middendeel. De scheurvorming bij een belasting van 70 kN was heel beperkt en nauwelijks zichtbaar. Bij 150 kN waren deze scheuren duidelijk geopend en vloeide de wapening in het middendeel. Even later bezweek het beton in de drukzone (foto 15).



13

- 14 Gevlochten wapening van ligger E
- 15 Scheurvorming van ligger E in de uiterste grenstoestand
- 16 Definitief staafwerkmodel van ligger F
- 17 Wapening en scheurvorming van ligger F

Ligger F

Bij het ontwerpen van ligger F is een aantal staafwerkmodellen opgesteld die vervolgens zijn geoptimaliseerd. In het geselecteerde model wordt de drukboog sterk benaderd (fig. 16). In aanvulling op het staafwerkmodel is een schuine beugel (bruin) geplaatst die scheurvorming vanuit de inwendige hoek (groen) tegengaat, waar een spanningsconcentratie optreedt.

In figuur 17 zijn de wapening weergegeven en tevens de belangrijkste scheuren die zijn ontstaan tijdens het beproeven. De eerste scheuren (A) ontstonden bij een belasting van ongeveer 115 kN. Deze scheuren openden zich verder toen de wapening ging vloeien. De hoofdscheur (B) bereikte als eerst de betondrukzone en de ligger bezweek uiteindelijk hierdoor. De schuine beugel heeft ervoor gezorgd dat de scheur zich niet vanuit de hoek verder kon ontwikkelen. Scheur C bestaat uit een aantal scheuren die bij elkaar komen in een centraal punt. De schuine scheuren zijn ontstaan omdat hier de maximale dwarskracht werkt in combinatie met een buigend moment. Scheur D is aan de onderzijde van de grote doorsnede ontstaan, doordat de wapening aldaar is gaan vloeien.

Ligger G

Ligger G heeft een niet-traditioneel, enigszins experimenteel wapeningsontwerp (fig. 18). Toegepast zijn drie hoofdwapeningsstaven, twee beugels en twee 'wokkels' (bedoeld om het beton op te sluiten). De dunne rode lijnen in de ontwerptekeningen geven de drukstaven volgens de staafwerkanalogie weer. Voor het betonmengsel is betongranulaat als basis gebruikt en zand toegevoegd met name in de fracties tot 1 mm. Hierdoor werd de verhouding granulaat:toevoeging ongeveer 60:40. De water-cementfactor is vastgelegd op 0,40. Door een hoge aanname van de hoeveelheid los water in het betongranulaat moest er op de stortdag echter extra water worden toegevoegd, evenals superplastificeerder. Dit in acht genomen, werd de werkelijke water-cementfactor 0,34 en daarmee de theoretische 14-daagse sterkte 52,9 N/mm².

Bij ongeveer de helft van de maximale belasting begon de ligger vanuit het hoekpunt in de richting van de diagonale beugels kleine scheurtjes te vertonen. Vervolgens is de middelste wapeningsstaaf rond de knik gaan vloeien, zonder dat de parallelstaven deze kracht overnamen. Aangezien deze middelste staaf de



14

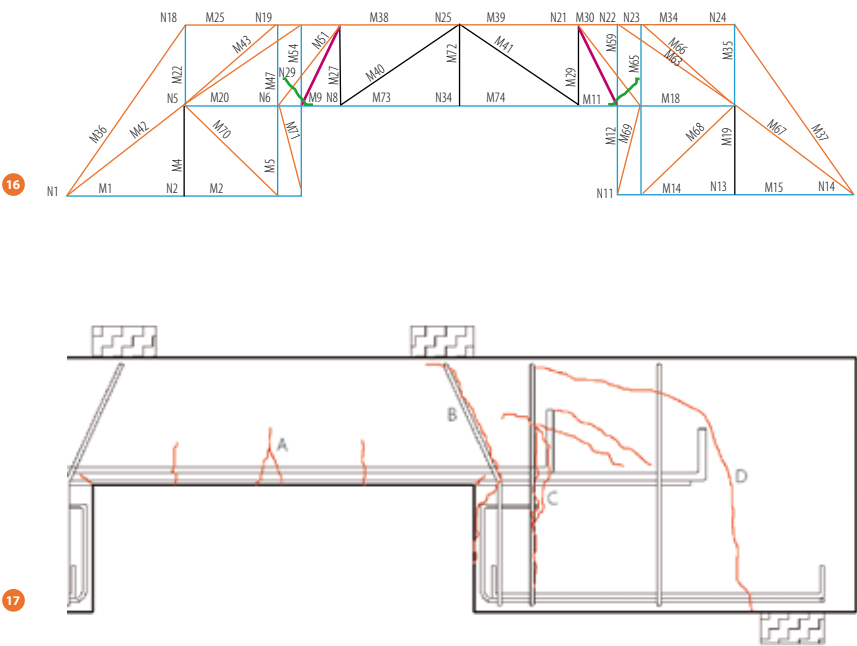


15

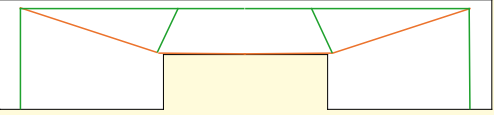
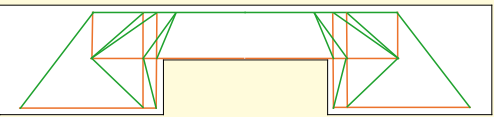
enige staaf was die scheurvorming langs de diagonale beugels verhinderde, kon de scheur zich in rap tempo verder ontwikkelen nadat de vloeigrens van de staaf was bereikt.

Overzicht van de liggers en proefresultaten

Tabel 1 geeft een overzicht van de ontworpen liggers samen met kentallen en proefresultaten. Het valt op dat de ontwerpen variëren van traditioneel (ligger C, E) tot bijzonder innovatief (ligger D, G). Sommige teams hebben de nadruk gelegd op het voorkomen van voortijdig bezwijken door onverwachte scheurvorming, waarbij een beetje meer wapening voor lief is genomen. Andere teams hebben de nadruk gelegd op het gebruiken van weinig wapening – wat het doel van het project was – en hebben het gevaar van voortijdig bezwijken geaccepteerd. Bij het ontwerpen is ook gelet op de parameter, $\sum N_i l_i$, waarin N_i de kracht is in staaf i , l_i de lengte is van staaf i en i de nummers doorloopt van alle getrokken staven. Vaak wordt gesteld dat het beste staafwerk degene is waarvoor deze parameter het kleinst is [1].



Tabel 1 Staafwerkmodellen en kentallen van de liggers

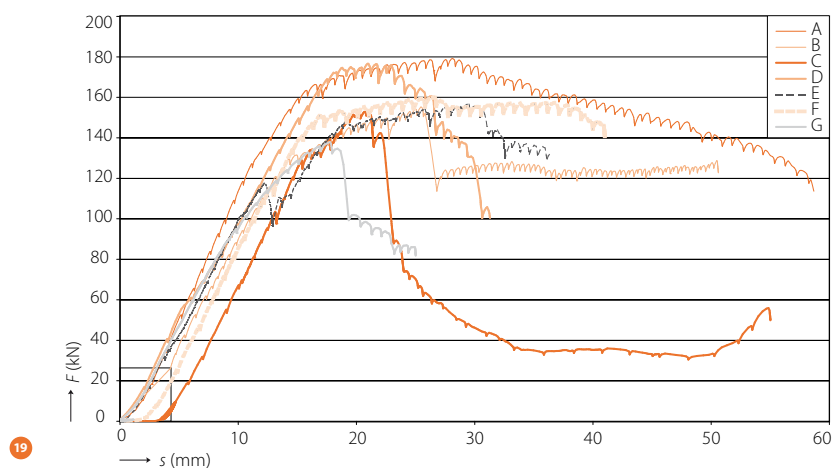
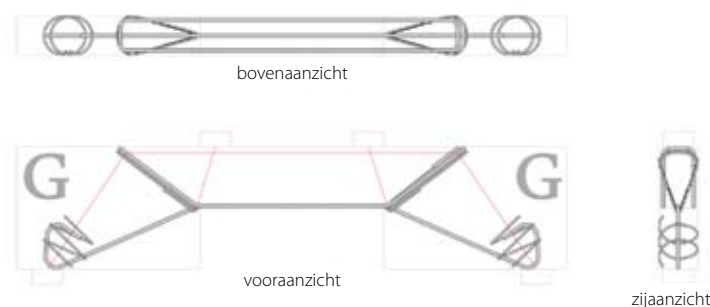
staafwerkmodel	$\sum N_i l_i$	massa wapening	kubusdruksterkte	draagkracht ligger
A 	294 kNm	10,1 kg	87 N/mm ²	179 kN
B 	324	7,95	75	155
C geen		12,0	65	153
D 	350	7,91	83	177
E 	397	8,88	61	157
F 	332	6,33	77	160
G 	300	5,78	71	138

Alle ontwerpen zijn zorgvuldig gedetailleerd, waarbij de realistische krachtsafdracht in de knopen van het staafwerk is bestudeerd. Hierbij is vaak afgeweken van de betreffende normregels, zodat zo min mogelijk wapening werd gebruikt.

De liggers zijn beproefd na 16 dagen, met uitzondering van liggers A en G; deze zijn een dag later gestort en na 15 dagen beproefd. De twee puntlasten zijn aangebracht via een stalen I-profiel dat in het midden werd belast door een vijzel (fig. 8). De verplaatsing is gemeten aan de voet van de vijzel (fig. 19). Deze verplaatsing is dus inclusief doorbuigen van de opstelling en indrukken van de oplegplaten (fig. 19). De vijzel werd pneumatisch aangedreven met een handpomp. De golfjes in de grafieken ontstaan door de slagen met deze pomp. Bij een aantal van de liggers is het belasten enkele minuten onderbroken om de scheurvorming te bestuderen. De gemiddelde kubusdruksterkten na 28 dagen variëren van 61 tot 87 N/mm² (tabel 1).

Conclusies

De belangrijkste conclusie van dit project is dat elk staafwerkmodel heeft geleid tot een veilig ontwerp voor de uiterste grenstoestand. Dit is een bevestiging van onderzoek uitgevoerd in de VS [2, 3, 4]. Er traden grote verschillen op in de scheurvorming in de gebruikstoestand (ongeveer de helft van de bezwijkbelasting). Hieruit blijkt dat in discussies over welk staafwerkmodel te gebruiken, vooral moet worden gelet op de bruikbaarheidsgrenstoestand. Tevens bleek het betongranulaat, ondanks enige vervuiling met stukjes hout en stukjes plastic, heel geschikt voor de vervaardiging van nieuw beton. ☒



Dankwoord

Graag bedanken we Peter Berkhout voor zijn begeleiding bij het produceren van het betongranulaat, Edwin Scharp en Ton Blom voor hun begeleiding bij het maken en storten van het beton, Arnold van de Marel voor het leggen van de theoretische basis en het voorbereiden van de proefopstelling en Fred Schilperoort voor het bouwen van de proefopstelling.

LITERATUUR

- Schlaich, J., Schäfer, K. & Jennewein, M., Toward a Consistent Design of Structural Concrete. Prestressed Concrete Institute, *PCI Journal*, Vol. 32, No. 3, 1987.
- Chen, B.S., Hagenberger, M.J., & Breen, J.E., Evaluation of strut-and-tie modeling applied to dapped beam with opening. *ACI Structural Journal*, Volume 99, Issue 4, July 2002.
- Ley, M.T., Riding, K.A., Bae, W.S. & Breen, J.E., Experimental Verification of Strut-and-Tie Model Design Method. *ACI Structural Journal*, Nov.-Dec. 2007.
- Kuchma, D., Yindeesuk, S., Nagle, T., Hart, J. & Lee, H.H., Experimental validation of strut-and-tie method for complex regions. *ACI Structural Journal*, Volume 105, Issue 5, Sept. 2008.