

Invloed op ware grootte beproefd

ir. Pieter Houwen <sup>1)</sup>

Adviesbureau Tielemans

prof. ir. C.S. Kleinman

TU Eindhoven, fac. Bouwkunde,  
Constructief Ontwerpen

# Buigtrekwapening en beugels

*Aan de TU Eindhoven is onderzoek verricht naar de invloed van de grootte van de buigtrekwapening en het aantal en de plaatsing van de beugels bij tandconstructies. Dit door een simulatie met een eindig-elementenprogramma én met beproeving op ware grootte in het Van Musschenbroek Laboratorium. Hoewel de correlatie tussen proeven en simulatie goed was, heeft een definitieve afstemming nog tijd nodig. In dit artikel worden daarom alleen de resultaten besproken van het beproevingsonderzoek op ware grootte.*

## Proefstukken en krachtleiding

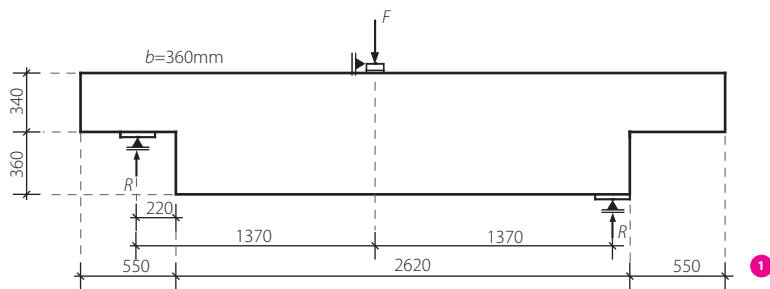
Figuur 1 geeft de balkafmeting van de proefstukken die voor deze proevenserie zijn vervaardigd. De balkbreedte is 360 mm. De lengte van de tand is 550 mm. Deze is lang gekozen zodat de verankeringslengte van de buigtrekwapening kan worden toegepast zoals NEN 6720 voorschrijft.

De krachtleiding is in het midden tussen de oplegging geplaatst. Om het systeem statisch bepaald te maken zijn de opleggingen *R* uitgevoerd als rolopleggingen. De wrijving onder de vijzel *F*, zorgt voor de horizontale fixatie en wordt daarom beschouwd als een verticale roloplegging. De kracht (*F*) wordt met een 1000-kN-vijzel ingevoerd op het proefstuk. De snelheid van de krachtleiding is bij alle proeven aangehouden op 0,25 mm / 60 sec.

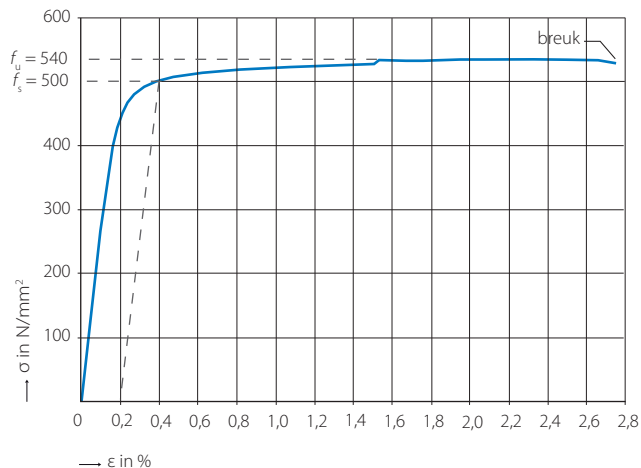
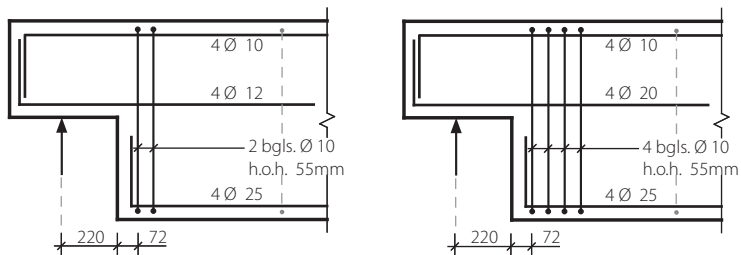
## Uitvoering en codering van de proeven

In deze proevenserie worden modellen 4-12-1-10 t.m. 4-12-4-10 en 4-20-2-10 t.m. 4-20-5-10 op ware grootte beproefd. De codering van de proeven is als volgt: aantal staven buigtrekwapening -

<sup>1)</sup> ir. Pieter Houwen is in oktober 2008 afgestudeerd op het onderzoek naar de krachtwerving in balken met tandopleggingen aan de Technische Universiteit Eindhoven. Dit onder begeleiding van prof.ir. Cees Kleinman, prof.dr.ir. Dick Hordijk en ir. Frans Luijten.



Oplegplaten t.p.v. R: 200x360x30  
Oplegplaten t.p.v. F: 100x360x50



diameter staven buigtrekwapening - aantal beugels kort achter de tand - diameter beugels kort achter de tand (tabel 1). Eerst beugel is op 72 mm achter de tand, overige beugels h.o.h. 55 mm achter de eerste beugel.

De proeven zijn aangevuld met twee tanden die gewapend zijn volgens het principe van 4-12-4-10 en 4-20-5-10. Het verschil is dat de eerste beugel kort achter de tand dubbel is uitgevoerd (4 in plaats van 2 doorsneden Ø10). De codering is respectievelijk: 4-12-5-10 en 4-20-6-10.

### Beton en staal

Op elke proefdatum zijn de betondruksterkte en -treksterkte bepaald. Deze zijn gemeten door middel van druk- en slijtproeven. Voor deze proeven zijn, op de zelfde datum als de balken, kubussen met afmetingen 150 x 150 x 150 mm gestort. De gevraagde betonsterkteklasse is C20/25, met een maximale

- 1 Balk en krachtleiding
- 2 Schematische weergave proefstukken  
4-12-2-10 – 4-20-4-10
- 3 Spanning-rekdiagram van het toegepaste wapeningsstaal
- 4 Resultaten modellen 4-12-1-10 t/m 4-12-4-10
- 5 Resultaten modellen 4-20-2-10 t/m 4-20-5-10

korreldiameter van 31,5 mm. De resultaten van de metingen staan vermeld in tabel 2. Voor het meten van de E-modulus zijn er in totaal vijf betonprisma's gestort met de afmetingen 100 x 100 x 400 mm.

De beoogde staalkwaliteit voor dit onderzoek is de standaard in de Nederlandse bouw toegepaste FeB500. Door de fabrikant van de wapening zijn monsters van de Ø10 meegeleverd voor het bepalen van de vloei- en breukspanning. Hierop zijn trekproeven uitgevoerd waarvan het resultaat is weergegeven in figuur 3.

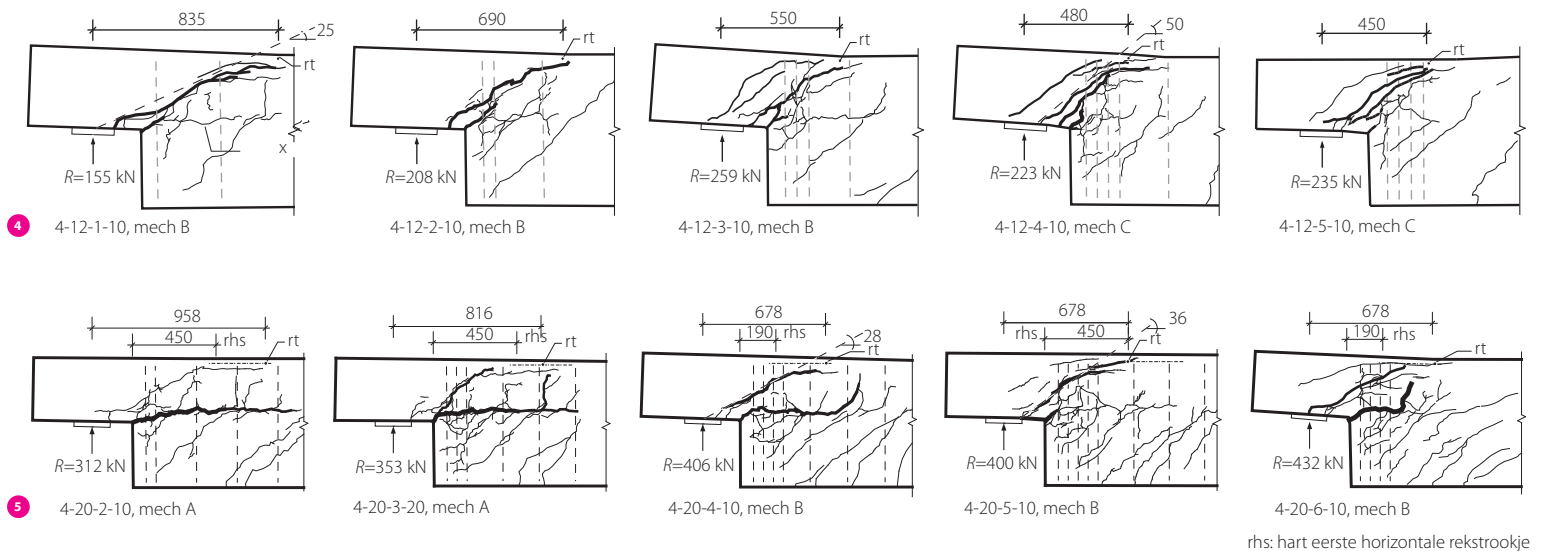
### Resultaten

In deze proevenserie werden rekmetingen in het vlak van de ophangwapening verricht, rozetten in de baan van de drukdiagonaal en horizontaal in de drukzone met behulp van vijf rekstroken. Deze zijn geplaatst in het gebied waarin, op basis van resultaten uit de EEM-modellen, het rotatiepunt verwacht werd. Wanneer in de chronologische volgorde van de rekstroken een toe- en afname in de rek werd gevonden, werd er aangenomen dat het rotatiepunt lag op de plaats waar de grootste rek gemeten is. Daarnaast werd de scheurvorming nauwkeurig gemonitord.

In figuur 4 en 5 is de scheurvorming in de balken (bij bezwijken) weergegeven. Hierbij staan ook de bezwijklast en het vermoedelijk opgetreden bezwijkmechanisme vermeld. De dikker getekende scheuren zijn de bezwijkscheuren. Deze vertonen grote gelijkenis met de bezwijkscheuren in de EEM-analyses. Over de betekenis van dit bezwijkmechanisme A, B of C zal te zijner tijd na volledige correlatie EEM en de proeven worden bericht. Hier wordt volstaan met:

- mechanisme A: een dominerende horizontale scheur met een rotatiepunt dat ver in de balk ligt;
- mechanisme B: een horizontale scheur gecombineerd met een schuine scheur uit de keel;
- mechanisme C: een dominerende schuine scheur vanuit de keel, rotatiepunt relatief dichtbij.

Het rotatiepunt (rt) is het punt waarom de tand bij bezwijken roteert. Dit is het punt achter de tand en aan de bovenzijde van de balk, waar de grootste horizontaal gerichte spanning optreedt. In de proefstukken waarin de locatie van het rotatiepunt niet aan de hand van deze metingen was vast te stellen, is deze aangenomen boven het einde van de bezwijkscheur(en). Dit was ook de plaats waar in de resultaten van de EEM-modellen, de grootste horizontaal gerichte spanning gevonden is. Ter vergelijking tussen tekening en werkelijkheid staat in foto 9 de beproeving van model 4-12-4-10 (mechanisme C).



### Analyse van de resultaten

Bij het opvoeren van de kracht ontstonden er diagonale scheuren vanuit de tandhoek en/of horizontale scheuren evenwijdig aan de buigtrekwapening. Als de tand kan worden gemodelleerd als een eenzijdig ingeklemde ligger (tand-balk, fig. 7) verplaatst de inklemming zich verder de balk in met het voortschrijden van de diagonale en/of horizontale scheuren. De lengte van de tand-balk wordt hiermee groter en daardoor het moment aan de inklemming hoger. De tand-balk bezwijkt als het optredend moment de momentcapaciteit bereikt en/of de ophangwapening breekt.

De proefstukken 4-20-2-10 t.m. 4-20-4-10 zijn bezweken nadat er breuk optrad in de ophangwapening. In deze proeven is bij bezwijken vermoedelijk mechanisme A of B opgetreden (fig. 5). In de proeven 4-12-1-10 t.m. 4-12-5-10, 4-20-5-10 en 4-20-6-10 is geen breuk in de ophang- of buigtrekwapening opgetreden. Deze proeven zijn afgebroken nadat er bij langdurig opvoeren van de verplaatsing, geen krachtsverhoging meer gemeten werd.

Als de momentcapaciteit wordt overschreden, op de plaats waar ook een grotere dwarskracht aanwezig is (ter plaatse van de ophangwapening) treedt er een diagonale bezwijkingscheur op. Dit duidt op het optreden van bezwijkmechanisme B of C. De stijfheid van de dwarskrachtwapening bepaalt de helling van de druk- en trektrajectoriën, en daarmee de helling van de scheurvorming. Vergelijk hierbij de resultaten van proeven 4-12-1-10 (lage dwarskracht, lage helling) t.m. 4-12-4-10 (hoge dwarskracht, hoge helling).

De krachtinleiding uit de ophangwapening bepaalt de toename van het moment en de dwarskracht in de tand-balk (fig. 7). Bij het verhogen van de hoeveelheid beugels kort achter de tand, nemen het moment en de dwarskracht sneller toe en nemen daarbij ook een hogere waarde aan dan in balken met minder ophangwapening. Door het toevoegen van ophangwapening zonder daarbij de hoeveelheid buigtrekwapening te verhogen,

zal de momentcapaciteit op een kortere afstand achter de oplegging onder de tand ( $R$ ) worden bereikt. Hierom verschuift het rotatiepunt richting tand, bij het verhogen van het aantal beugels achter de tand.

In mechanisme A, wordt de momentcapaciteit niet overschreden op de plaats waar de grootste dwarskracht optreedt. Hierdoor gaat de horizontale scheur verder de balk in (zie de scheurvorming van de proeven 4-20-2-10 en 4-20-3-10 in figuur 5). De balklengte en daarbij het maximaal optredende moment in de tand-balk neemt toe. De rotatie om het punt  $rt$  wordt groter door de toenemende rek in de ophangwapening. De tand bezwijkt nadat de breuk-rek in de eerste beugel wordt behaald. De overige beugels bezwijken direct hierna.

Tabel 1 Codering proeven

buigtrekwapening	aantal beugels $\varnothing 10$ (FeB 500) h.o.h. 55 mm achter de tand					
	1	2	3	4	5	6
2 $\varnothing 12$	4-12-1-10	4-12-2-10	4-12-3-10	4-12-4-10	bgl. 1 2x 1-12-5-10	
2 $\varnothing 20$		4-20-2-10	4-20-3-10	4-20-4-10	4-20-5-10	bgl. 1 2x 1-12-6-10

Tabel 2 Resultaten proefkubussen en prisma's

model	proefdatum	druksterkte (N/mm <sup>2</sup> )	treksterkte (N/mm <sup>2</sup> )	E-modulus (N/mm <sup>2</sup> )	uithardingstijd (dagen)
4-20-4-10	26-6-2008	30,9	3,04		31
4-12-3-10	1-7-2008	31,2	3,02	34 156	36
4-20-5-10 4-12-2-10	3-7-2008	26,8	2,44	33 815	38
4-20-3-10 4-12-4-10	8-7-2008	32,0	2,93	30 724	41
4-20-2-10 4-12-5-10	10-7-2008	32,8	3,42	28 856	43
4-20-6-10 4-12-1-10	15-7-2008	33,8	2,81	32 165	48
Gemiddeld		31,3	2,94	31 943	



6

### Percentage en concentratie buigtrek- en ophangwapening

De hoeveelheid buigtrekwapening, de hoeveelheid ophangwapening en de verdeling van de ophangwapening bepalen welk mechanisme bij bezwijken optreedt. Uit de resultaten van deze proevenserie blijkt dat door het verhogen van het percentage buigtrekwapening in de tand het bezwijkmechanisme omhoog verschuift (van C naar A). Door het verhogen van de hoeveelheid ophangwapening of deze over een grotere afstand verdelen, verschuift het bezwijkmechanisme omlaag (van A naar C).

### Verdeling van de ophangwapening

Figuur 8 geeft de gevonden capaciteit bij het aantal beugels ophangwapening. In de proeven 4-12.. wordt er bij benadering een lineaire verhoging gevonden tot drie beugels. Deze lineaire verhoging is ongeveer 52 kN per extra beugel. De proeven 4-20.. gaven bij benadering een lineaire verhoging tot 4 beugels. De verhoging per beugel is gemiddeld 47 kN en daarmee bijna gelijk aan de verhoging die gevonden is in de proeven 4-12. Gemiddeld over alle proeven werd er een verhoging van  $(47 + 52)/2 = 50$  kN per extra beugel  $\varnothing 10$  gevonden.

Op basis van de bestaande literatuur was de verwachting dat elke beugel binnen een vooraf bepaalde breedte achter de tand ( $l_{opw}$ ), de capaciteit met zijn opneembare trekbelasting zou verhogen,  $F_{\text{delta, cap}} = f_s \cdot A_s = 500 \cdot 2 \cdot 79 \cdot 10^{-3} = 79$  kN / beugel. De gevonden lineaire verhoging blijkt gemiddeld maar  $(50/79) \cdot 100 = 63\%$  van de verwachte verhoging.

Het verhogen van de beugeldoorsnede, bijvoorbeeld naar  $\varnothing 12$  in plaats van  $\varnothing 10$  geeft een steilere krachtsinleiding. Bij het gelijk houden van de buigtrekwapening zal de tand-balk korter achter de tand bezwijken. Dit staat gelijk aan het acti-

veren van minder beugels achter de tand. De breedte  $l_{opw}$  is daarom geen vooraf vaststaande waarde, maar een waarde die afhankelijk is van het percentage buigtrekwapening in de tandbalk.

Dat  $l_{opw}$  geen vooraf vastgestelde waarde kent, is in tegenspraak met uitgangspunten waarin wordt gesteld dat de ophangwapening binnen een vooraf vastgestelde breedte moet worden verdeeld. Na het beschouwen van de capaciteit van de proeven in figuur 8, met in het bijzonder proef 4-12-3-10 en 4-12-4-10, lijkt het dat de breedte waarover de ophangwapening kan worden verdeeld, moet worden begrensd. Deze begrenzing moet niet worden bepaald aan de hand van de optredende rek in de beugels, maar door de helling van de drukdiagonaal. Ondanks een extra toegepaste beugel wordt er in proefstuk 4-12-4-10 (223 kN) een lagere capaciteit gevonden dan proef 4-12-3-10 (259 kN). Dit is in mindere mate, maar in vergelijkbare wijze terug gevonden in proef 4-20-4-10 (406 kN) en proef 4-20-5-10 (400 kN).

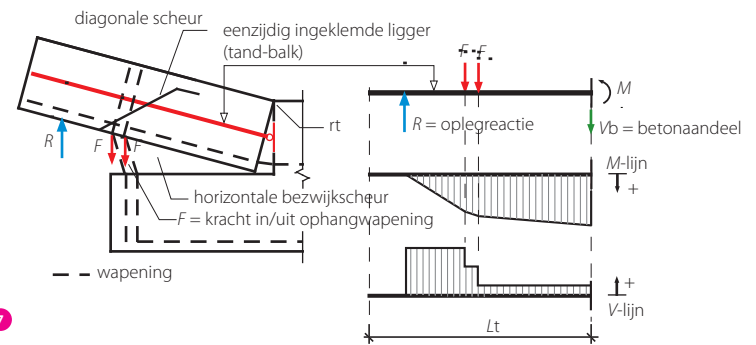
### Capaciteit van de drukzone; het betonaandeel

In de drukzone achter de tand wordt ook een deel van de dwarskracht in de balk overgedragen naar de oplegging. Dit is in bestaande literatuur beschreven onder ander in het werk 'Vorlesungen über Massivbau' van F. Leonhardt [5]. Deze dwarskracht geeft een verhoging van de capaciteit van de tand en wordt hierna het betonaandeel ( $V_b$ ) genoemd. Uit de resultaten van de hier beschreven proeven is het betonaandeel benaderd door de lineaire verhoging van de capaciteit (door het toevoegen van beugels) naar beneden (tot 0 beugels) te extrapoleren, zie  $V_b$  figuur 8.

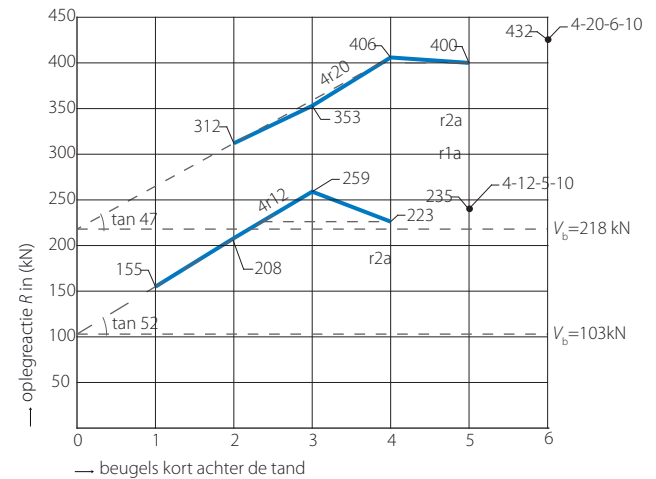
- 6 Proefstuk 4-20-4-10 in de proefopstelling
- 7 Tand gemodelleerd als een eenzijdig ingeklemde ligger
- 8 Capaciteit proefstukken
- 9 Beproeving van model 4-12-4-10
- 10 Mechanisme A, proef 4-20-2-10

● LITERATUUR

- 1 Kleinman, C.S., Nokken met die tanden! *Cement* 2006/7.
- 2 Kleinman, C.S., Nokken met die tanden! (2). *Cement* 2007/2.
- 3 Kleinman, C.S., Nokken met die tanden! (3). *Cement* 2007/3.
- 4 Middeldorp, A en Legendijk, P., Berekenen en detailleren van betonconstructies (3), Korte console en tandoplegging. *Cement* 2004/5
- 5 Mönnig E., Leonardt F, Vorlesungen über Massivbau, dritter Teil. Springer Verlag, 1977



7



8

In [5] wordt met de volgende formule een ondergrens gegeven aan het betonaandeel, afhankelijk van de beoogde ontwerpcapaciteit:

$$V_b = R \left( 1 - 0,35 \frac{h_{balk}}{h_{tand}} \right)$$

Met de afmetingen van de tanden en balken in de hier beschreven proeven, betekent dit:

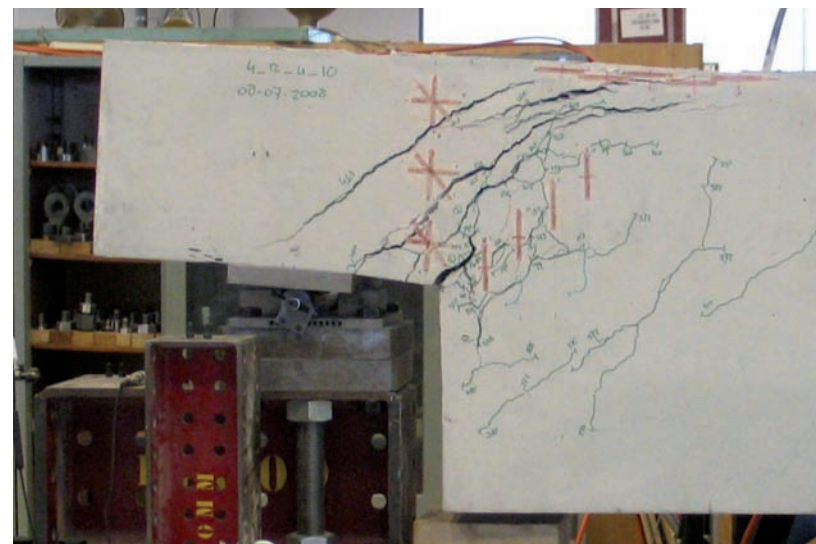
$$V_b = R \left( 1 - 0,35 \frac{700}{340} \right) = 0,28 R$$

De gevonden grootte van het betonaandeel in de korte duur proeven met buigtrekwapening 4Ø20 is

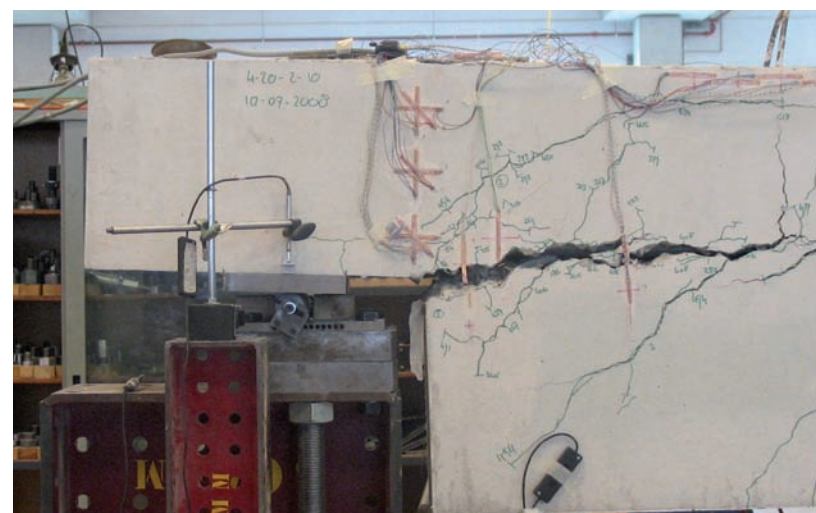
$V_b = 218 \text{ kN}$  ( $V_b/R_{max} \geq 0,40 R$ ) en in de proeven met buigtrekwapening 4Ø12 is  $V_b = 103 \text{ kN}$  ( $V_b/R_{max} \geq 0,50 R$ ). Deze zijn beide groter dan [5] hiervoor aangeeft (0,28 R).

Conclusies uit het onderzoek

- De helling van de drukdiagonaal wordt bepaald door de toegepaste hoeveelheid buigtrekwapening in de tand, de hoeveelheid van de ophangwapening en de verdeling van de toegepaste ophangwapening. De helling wordt steiler naarmate er meer ophangwapening kort achter de tand wordt geplaatst, of naarmate er minder buigtrekwapening wordt toegepast.
- Alleen de ophangwapening die wordt doorsneden door de drukdiagonaal heeft een effectieve bijdrage aan de dwarskrachtcapaciteit.
- Om de scheurvorming tot een minimum te reduceren, is het van belang de ophangwapening zo kort mogelijk achter de tand te concentreren.
- De bijdrage van de beugels is niet het resultaat van oppervlak x vloeispanning, maar moet aanzienlijk worden gereduceerd.
- Om het betonaandeel mee te nemen in de dwarskrachtcapaciteit, moet de invloed hiervan worden meegenomen in de momentcapaciteit. ☒



9



10