



Constructief gedrag lichtbeton experimenteel onderzocht

Lichtbeton voor balkons

Een manier om gewicht te besparen voor balkons, is het verlagen van de volumieke massa van het beton. In een afstudeeronderzoek aan de TU Eindhoven is een licht en toch sterk betonmengsel ontwikkeld. Het constructieve gedrag van een balkonplaat waarin dit materiaal is toegepast, is experimenteel onderzocht.

Om gewicht te besparen worden balkons tegenwoordig steeds vaker van ultra-hogesterktebeton gemaakt. Gewichtsbesparing is voornamelijk interessant voor renovatieprojecten, waarin de belasting op de bestaande constructie vaak zo veel mogelijk

moet worden beperkt. Nadeel van balkons van ultra-hogesterktebeton, die zeer dun worden uitgevoerd, is echter de gelimiteerde ruimte voor goten en randen.

Een andere manier om gewicht te besparen is de volumieke massa van het beton te verlagen. Hierdoor kan het traditionele ontwerp van de balkons worden gehandhaafd, met voldoende ruimte voor de goten en randen. In een afstudeeronderzoek aan de TU Eindhoven is een mengsel voor lichtbeton ontwikkeld, dat geschikt is voor de toepassing van prefab balkons. Met behulp van experimenteel onderzoek is aangetoond of wordt voldaan aan de eisen met betrekking op de constructieve, esthetische en duurzaamheidsaspecten (foto 1). Het onderzoek bestond dus uit een combinatie van materiaalkundige en constructieve ontwerpaspecten.

Mengsel

Om een mengsel van lichtbeton te kunnen ontwikkelen, is het belangrijk meer informatie te verkrijgen over de mogelijke grondstoffen en het ontwerpen van mengsels. Daarom is allereerst een literatuurstudie gedaan. Op basis hiervan zijn eisen aan het mengsel gesteld en zijn op basis van de ideale korrelopbouw enkele theoretisch mengsels ontworpen.

Toeslagmateriaal

Het belangrijkste verschil in samenstelling tussen traditioneel beton en lichtbeton is het toeslagmateriaal dat wordt toegepast. Waar bij traditioneel beton 'zware' toeslagmaterialen worden gebruikt zoals zand en grind, worden voor lichtbeton 'lichte' toeslagmaterialen toegepast. In dit onderzoek zijn meerdere mengsels ontwikkeld waarbij lichte korrels van natuurlijk geëxpandeerd silicaat zijn toegepast als toeslagmateriaal (Rotocell Plus korrels, foto 2). Deze korrels hebben een relatieve hoge sterkte in verhouding tot de volumieke massa, wat deze korrels geschikt maakt voor de toepassing in constructief lichtbeton. Daarnaast heeft de korrel een hydrofobe laag aan de buitenkant, waardoor de korrel geen water opzuigt en de verwerkbaarheid van het mengsel beter kan worden geregeld.

Mengselkeuze

Om te bepalen welk mengsel het meest geschikt is voor dit onderzoek, is experimenteel onderzoek gedaan om de juiste balans te vinden tussen de verhouding water, cement en superplastificeerder. Er zijn meerdere kleine proporties van testmengsels gemaakt met verschillende verhoudingen van de grondstoffen, waarbij de verwerkbaarheid en druksterkte zijn bepaald om een indicatie te krijgen van de eigenschappen van de mengsels. Ook is gekeken of de mengsels homogeen verdeeld zijn, door de doorsnede van de proefstukken te beoordelen. De twee mengsels met de beste resultaten zijn nogmaals op grotere schaal gemaakt en beproefd. Uit deze testmengsels is uiteindelijk een mengsel gekozen dat het beste voldeed aan de eisen met betrekking tot de verwerkbaarheid en sterkte. Dit gekozen mengsel is gebruikt voor de resterende proeven van dit onderzoek.

Eigenschappen mengsel

De samenstelling van het gekozen mengsel staat in tabel 1. Het is een homogeen mengsel met een gemiddelde volumieke

¹⁾ Elske van Heuveln is met het onderzoek 'Material and structural design aspects of a prefabricated balcony of lightweight concrete' afgestudeerd aan de TU Eindhoven, faculteit Bouwkunde. Zij heeft dit onderzoek uitgevoerd in samenwerking met Geelen Beton Wanssum. In haar afstudeercommissie zaten: prof.ir. S.N.M Wijte (voorzitter), prof.dr.ir. H.J.H. Brouwers, dr.ir. F.P. Bos en dr. Q.L. Yu (allen TU Eindhoven).

ENCI Studieprijs 2017



Dit is het tweede artikel in een serie met bijdragen van prijswinnaars van de ENCI Studieprijs 2017. De studie 'Material and structural design aspects of a prefabricated balcony of lightweight concrete', die in dit artikel wordt beschreven, ontving de tweede prijs in de categorie Universiteiten. De jury over deze studie: "De jury spreekt haar waardering uit voor de volledigheid van dit onderzoek, van materiaal tot product. Voorwaar een mooi voorbeeld van een goede symbiose tussen betontechnologie en constructieleer. Ondanks de veelheid aan informatie is het rapport goed leesbaar en ordelijk gestructureerd. Bewondering is er vooral ook voor de mate van zelfreflectie van de student. Dit uit zich in de vergelijking van de onderzoeksresultaten met literatuur en bestaande normering, maar ook in het besef dat het eindproduct van de studie nog nader onderzoek vergt alvorens te kunnen worden toegepast in de praktijk. Al met al een mooi voorbeeld van een slimme ontwikkeling van het materiaal beton en een gedegen onderzoek."

Meer informatie op www.cementonline.nl/encistudieprijs.

Daar staat ook een link naar het afstudeerrapport.

massa van 1760 kg/m³. Dit is dus ongeveer 1/3 lager dan dat van traditioneel beton. De verwerkbaarheid van het mengsel voldoet aan de consistentieklasse van zelfverdichtend beton (SF2/SF3). Het heeft wel nog enige verdichting nodig om het aantal luchtbellen aan het oppervlak te reduceren.

Tabel 1 Mengselsamenstelling

water-cement-factor	0,4
CEM III/A 52,5 N	456,6 kg
vliegias	57,1 kg
kalksteenmeel	99,9 kg
zand 0-4	713,4 kg
lichtgewicht toeslag 0,09-0,3	57,8 kg
lichtgewicht toeslag 1-2	71,4 kg
lichtgewicht toeslag 2-4	57,1 kg
Water	182,6 kg
Superplastificeerder	3,65 kg (0,80%)

2



- 3 Doorgesneden kubus na de uittrekproef
- 4 Relatie moment en kromming, volgend uit de vierpuntsbuigproef van de drie proefstukken inclusief voorspelling van de proef
- 5 Relatie belasting en doorbuiging, volgend uit de vierpuntsbuigproef van de drie proefstukken
- 6 Relatie belasting en doorbuiging volgend uit de vierpuntsbuigproef en vergelijking met de resultaten van de uittrekproef



3

Constructieve eigenschappen

Uit materiaalproeven volgde een gemiddelde 28-daagse druksterkte 42 N/mm^2 (kubusdruksterkte). Deze waarde is gebaseerd op totaal veertien kubussen, afkomstig uit drie verschillende batches. Op basis van deze druksterkte en de gevonden volumieke massa, kan de treksterkte en elasticiteitsmodulus goed worden voorspeld met Eurocode 2. Deze treksterkte en elasticiteitsmodulus zijn ook experimenteel bepaald. De treksterkte met een splijttreksterkte test conform NEN-EN 12390-6:2009 en de elasticiteitsmodulus aan de hand van de secant-elasticiteitsmodulus met de druktest conform NEN-EN 12390-13:2013. De afwijking tussen de experimenteel gevonden waarden en de berekende waarden bleek klein te zijn, waarbij laatst genoemde ietwat conservatief is (de berekende waarde is lager dan de experimenteel bepaalde waarde) (tabel 2).

Tabel 2 Resultaten proeven treksterkte en elasticiteitsmodulus

	gemiddelde resultaten proeven $[\text{N/mm}^2]$	aantal proefstukken	resultaten berekening volgens Eurocode 2 $[\text{N/mm}^2]$	verschil
treksterkte	2,73	5	2,63	4%
elasticiteitsmodulus	19.793	4	18.279	8%

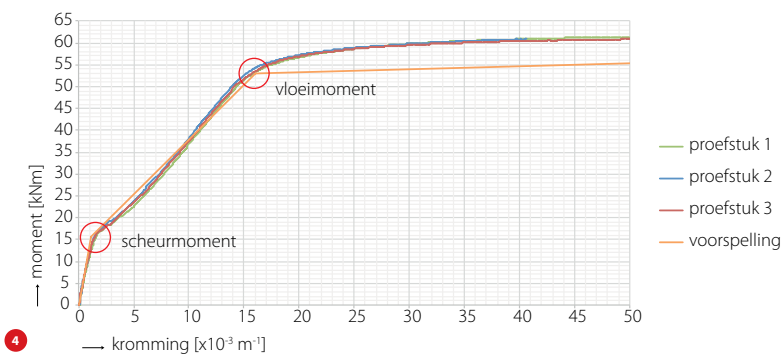
Aanhechtgedrag

Daarnaast is het aanhechtgedrag bepaald, aan de hand van uittrekproeven (fig. 3). Hierbij is een wapeningsstaaf over een bepaalde lengte in een proefkubus gestort. Tijdens de proef is een trekkracht op de wapeningsstaaf gezet en is de verplaatsing van de staaf gemeten. Uit de proeven volgde een gemiddelde maximale aanhechtsterkte van $16,7 \text{ N/mm}^2$ bij een wapeningsstaaf $\text{Ø}12 \text{ mm}$. De gevonden aanhechtsterkte van het ontworpen betonmengsel is vergelijkbaar met dat van traditioneel beton.

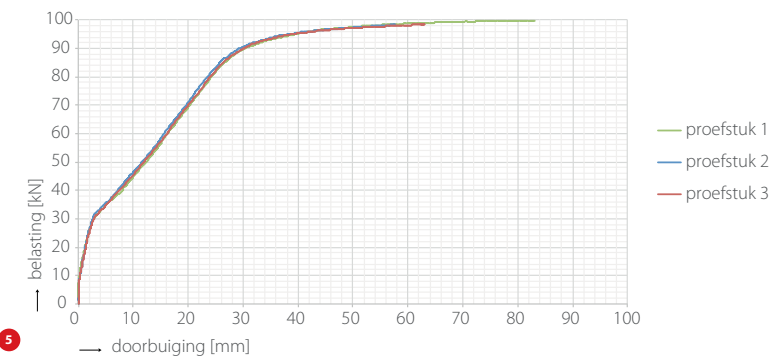
Vierpuntsbuigproef

In het laatste deel van het onderzoek is het scheurgedrag van een balkonplaat experimenteel onderzocht. Hiervoor is een vier-

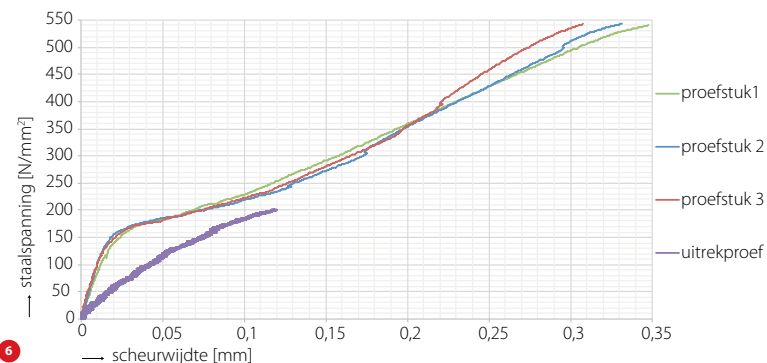
puntsbuigproef gebruikt. In deze proef zijn drie proefstukken gebruikt van $b \times h \times l = 400 \text{ mm} \times 270 \text{ mm} \times 4500 \text{ mm}$. Dit is als het ware een 'strook' van een daadwerkelijk balkon. Dit proefstuk is op twee steunpunten belast door twee lijnlasten, waarbij de belasting toeneemt tot het proefstuk bezwijkt. De proefstukken zijn ondersteboven getest, omdat de scheurwijdte dan vanaf boven kan worden geobserveerd. Tijdens de proef zijn foto's gemaakt vanaf de bovenkant van het proefstuk, die zijn gelinkt aan de resultaten. Tijdens de proef is de belasting, doorbuiging, kromming en scheurwijdte gemeten (fig. 4, 5 en 6).



4



5



6



7

Tijdens de proef is de toename van de kromming duidelijk zichtbaar en is het scheurenpatroon goed waar te nemen. In figuur 8 is een aantal foto's weergegeven die tijdens de proef van bovenaf zijn gemaakt bij verschillende hoogtes van de belasting. Hierbij is zichtbaar dat het aantal scheuren nagenoeg gelijk blijft en dat de scheurwijdte blijft toenemen.

Uit de proeven volgt dat de resultaten van de drie proefstukken nagenoeg gelijk zijn aan elkaar voor de volgende relaties: moment & kromming, belasting & doorbuiging en staalspanning & scheurwijdte.

In grafiek 4 zijn de resultaten van de drie proefstukken te zien voor de relatie tussen moment en kromming. Ook is een berekende waarde weergegeven van het korte termijn relatie tussen moment en kromming, gebaseerd op de gemiddelde materiaaleigenschappen die uit eerdergenoemde proeven volgen. De relatie tussen moment en kromming bleek overeen te komen met het berekende moment-kappadiagram. Het theoretische scheurmoment en vloei-moment komen nagenoeg overeen met de resultaten van de proefstukken.

In grafiek 5 staat de relatie tussen staalspanning en scheurwijdte. De gevonden relatie bleek goed overeen te komen met de waarden die uit de berekening van de karakteristieke scheurwijdte volgens de Eurocode 2 volgen (tabel 3).

In grafiek 6 staat de relatie tussen belasting en doorbuiging. In het onderzoek is niet ingegaan op de voorspelling van de doorbuiging.

Uittrekproef versus vierpuntsbuigproef

De relatie tussen de staalspanning en de scheurwijdte is ook gebruikt om de resultaten van de uittrekproef te kunnen vergelijken met de resultaten van de vierpuntsbuigproef. De scheurwijdte uit de uittrekproef is het resultaat van tweemaal de gemeten slip, aangezien slip aan beide kanten van een scheur optreedt. De resultaten van de staalspanning en de bijbehorende scheurwijdte van de uittrekproef zijn bruikbaar tot de wapeningsstaaf begint te verplaatsen en uit de kubus wordt getrokken. In grafiek 5 zijn de resultaten van de staalspanning en de scheurwijdte van beide proeven gegeven (gebaseerd op gemiddelde waarden).

7 Kromming van het proefstuk tijdens de vierpuntsbuigproef (lengte proefstuk 4,5 m)

Tabel 3 Berekende relatie staalspanning en karakteristieke scheurwijdte op basis van EC2

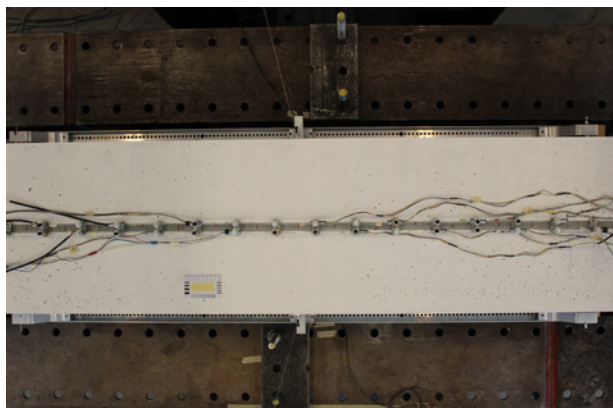
belasting [kN]	moment [kNm]	staalspanning [N/mm ²]	karakteristieke scheurwijdte [mm]
29,4	15,7	163	0,106
30	16,1	167	0,109
40	22,6	234	0,153
50	29,1	302	0,196
52,5	30,7	319	0,209
55	32,3	335	0,228
60	35,6	369	0,264
70	42,1	437	0,337
80	48,6	504	0,410
90	55,1	571	0,484

8 Scheurenpatroon tijdens de proef van bovenaf gefotografeerd

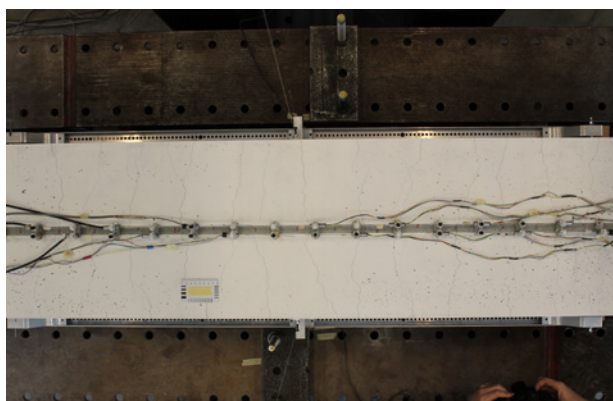
8a Belasting = 0 kN

8b Belasting = 90,1 kN

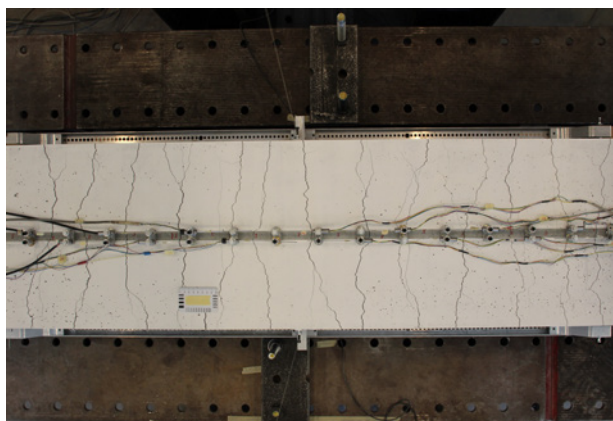
8c Belasting = 99,9 kN



8a



8b



8c

In de grafiek worden de resultaten van de uittrekproef weergegeven tot een staalspanning van slechts 200 N/mm². Dit omdat vanaf dat moment de wapeningsstaaf uit het beton wordt getrokken en de resultaten niet meer representatief zijn voor de vergelijking met de vierpuntsbuigproef. Uit de resultaten kan worden geconcludeerd dat de scheurwijdte van de vierpuntsbuigproef bij elke staalspanning kleiner is dan de scheurwijdte van de uittrekproef. De resultaten van de uittrekproef

kunnen dus (nog) niet worden gebruikt om de scheurwijdte van de vierpuntsbuigproef te voorspellen bij een bepaalde staalspanning.

Bruikbaarheid voor praktijk

Om het ontwikkelde lichtgewicht betonmengsel uiteindelijk op de markt te kunnen brengen, is vervolgonderzoek nodig. De resultaten van het mengsel zijn veelbelovend tot nu toe, maar onder andere de langetermijneffecten moeten nog worden onderzocht en het mengsel kan nog worden geoptimaliseerd. Wanneer uit deze onderzoeken volgt dat het mengsel geschikt is om op de markt te kunnen brengen, dan is het zeker een meerwaarde voor in de praktijk door het beperkte eigen gewicht.

Conclusies en aanbevelingen

Tijdens dit onderzoek is een homogeen lichtgewicht betonmengsel ontwikkeld met een gemiddelde volumieke massa van 1760 kg/m³ een gemiddelde 28-daagse druksterkte van 42 N/mm² (kubusdruksterkte). Gebaseerd op deze experimenteel gevonden waarden kunnen de treksterkte en elasticiteitsmodulus worden voorspeld volgens de Eurocode 2, aangezien de afwijking met de experimenteel gevonden waarden klein is. Het aanhechtgedrag is met uittrekproeven bepaald, wat vergelijkbaar is met dat van traditioneel beton.

Het scheurgedrag is experimenteel bepaald met vierpuntsbuigproeven. Uit deze proeven volgt dat de resultaten van drie proefstukken nagenoeg gelijk zijn aan elkaar voor de volgende relaties: belasting & doorbuiging, moment & kromming en staalspanning & scheurwijdte. De relatie tussen moment en kromming bleek overeen te komen met het berekende moment-kappadiagram. Ook de gevonden relatie tussen staalspanning en scheurwijdte bleek goed overeen te komen met de waarden die uit de berekening van de karakteristieke scheurwijdte volgens de Eurocode 2 volgen.

De belangrijkste aanbevelingen om het mengsel te optimaliseren zijn om, in verband met esthetica, het aantal luchtbellens aan het oppervlak te reduceren. Het ontworpen betonmengsel kan nog niet worden gebruikt als schoonbeton. Ook wordt aanbevolen de open tijd van het mengsel te verlengen voor een langere verwerkbaarheid. Daarnaast moeten de langetermijneffecten worden onderzocht. Een andere aanbeveling is om de uittrekproeven met een langere aanhecht lengte uit te voeren. Daardoor kunnen hogere staalspanningen worden bereikt en kan de vergelijking met de vierpuntsbuigproef voor hogere staalspanningen worden gemaakt. ☒