



Combinatie tussen mechanische en thermische eigenschappen

# Ultra-lichtbeton voor monoliete gevelconstructies

*Op de TU Eindhoven is een onderzoek verricht naar de ontwikkeling van ultra-lichtbeton voor toepassing in monoliete gevelconstructies. Het doel van de eerste projectfase was het verenigen van een bescheiden constructieve sterkte en een zeer goede thermische isolatie in één materiaal. Het ontworpen materiaal heeft – voor beton – excellente thermische capaciteiten. Vooral*

*de thermische geleidingscoëfficiënt  $\lambda$  van 0,12 W/(mK) in combinatie met een relatief bescheiden druksterkte van 10 tot 12 N/mm<sup>2</sup> (na 28 dagen). Voor zover bekend is deze combinatie nooit eerder bereikt in lichtgewicht bouwmaterialen. Bovendien toont het ontwikkelde ultra-lichtbeton uitstekende eigenschappen wat betreft de fysieke duurzaamheid.*

De geschiedenis van lichtbeton gaat terug tot circa 1000 jaar voor Christus [1]. Lichtbeton heeft een goede bekendheid en toepassing verworven als constructief en niet-constructief bouw materiaal, dankzij de gunstige eigenschappen als laag eigen gewicht, goede thermische isolatie en brandbestandheid. De literatuur toont een grote variatie in zowel mechanische als thermische eigenschappen, als gevolg van de gebruikte materialen en de mengselsamenstelling. Niettemin is er geen systematische studie bekend over optimalisatie van mengselontwerp voor lichtbeton. De meeste studies zijn gefocust op het verkrijgen van een goede sterkte voor lichtbeton als constructief bouw materiaal, dan wel op het behalen van een goede thermische isolatiecapaciteit voor lichtbeton als niet-constructief bouw materiaal. In beide gevallen zijn aanvullende materialen nodig, hetzij voor thermische isolatie hetzij voor dragende functies.

Het hier beschreven onderzoek heeft de ontwikkeling van een duurzaam ultra-lichtbeton met een goede balans van mechanische en thermische eigenschappen tot doel. Hiermee moet het mogelijk zijn monoliete gevelconstructies te maken. Het concept van monoliete gevelconstructies steunt op drie uitgangspunten: duurzaamheid, ontwerpflexibiliteit en kostenbesparing.

Van belang voor de *duurzaamheid* is het gegeven dat recyclingmaterialen de belangrijkste grondstof zijn voor de lichte toelagmaterialen en dat recycling van de ultra-lichtbetonconstructie eenvoudig is, omdat géén vermenging met andere bouw- of afwerkmaterialen voorkomt.

*Ontwerpflexibiliteit* voor architect en constructeur wordt bevorderd door de unieke combinatie van eigenschappen. Dat maakt de detaillering van constructies en aansluitingen ook helder en eenvoudig. *Kostenbesparing* tot slot wordt verkregen door het schrappen van aanvullende voorzieningen voor thermische isolatie, terwijl het thermisch comfort toch is verzekerd.

## Mengselontwerp en experimenten

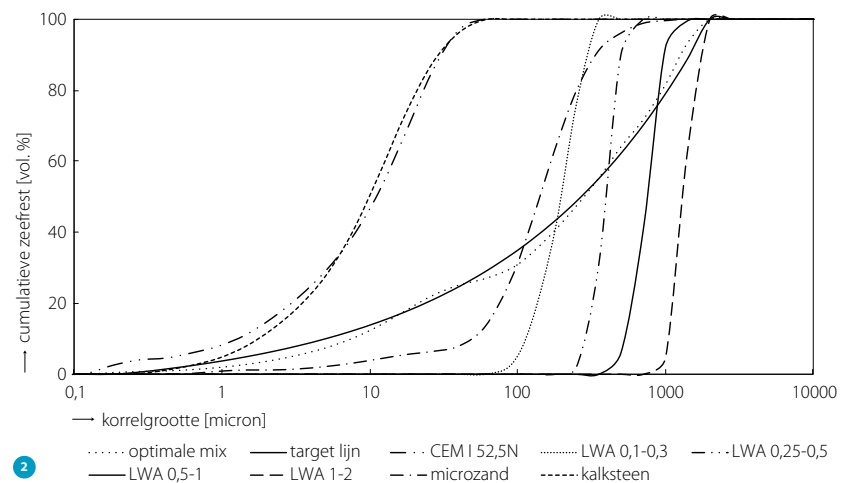
Het ultra-lichtbeton is ontwikkeld door toepassing van een innovatieve technologie voor mengselontwerp [2]. Deze technologie is gebaseerd op de ideale korrelpakking die wordt bereikt als een zogenoemde geometrische gradering wordt ontworpen. Dit staat bekend als het Andreasen en Andersen model.

Het basisprincipe van korrelpakking is vertaald in een numeriek mengselontwerp waarin alle mengselcomponenten, met elk zijn eigen specifieke volumieke massa en verdeling in

1 Haus H36 in Stuttgart toont architectonische potentie van thermisch isolerend ultra-lichtbeton

foto: MBA/S, Matthias Bauer

2 Korrelverdeling van de componenten, de theoretisch ideale lijn (target) en de werkelijke korrelverdeling van het mengsel



korrelgrootte, volumetrisch zijn gecombineerd met behulp van een mathematische optimalisatieroutine. Zo wordt de ideale curve van korrelpakking het best benaderd.

Deze technologie resulteert niet alleen in verbetering van mechanische en fysische eigenschappen van verhard beton, maar ook in verbetering van de verwerkbaarheid van de plastische betonmortel. Dit omdat meer water beschikbaar is om te dienen als glijmiddel tussen de korrels [3]. Deze ontwerp methode heeft ook een belangrijke rol gespeeld in het ontwerp van zelfverdichtend beton [3] en [4], aardvochtig beton [5] en [6] en gipsgebonden composieten [2].

In dit onderzoek is gestreefd naar een zeer lage thermische geleiding, te verkrijgen door gebruik van zeer licht toelagmateriaal. Uitgangspunt was het gebruik van geëxpandeerd glas – glasschuim gemaakt van recyclingglas – met een volumieke massa variërend van 300 tot 540 kg/m<sup>3</sup>. Dit impliceert het risico van ontbinding van het plastische betonmengsel als de volumeverhoudingen van vaste stoffen, water en superplastificeerders niet perfect zijn ontworpen. Voorts zijn verschillende cementtypen gebruikt om het effect daarvan op de betoneigenschappen vast te stellen.

Met deze grondstoffen is een compacte matrix ontworpen met een grote hoeveelheid poriën die onderling niet zijn verbonden. Theoretisch moet dat leiden tot de gewenste mechanische en thermische eigenschappen. In totaal zijn zeventien mengselsamenstellingen uitgewerkt voor dit onderzoek. Figuur 2 toont de korrelverdeling (zowel de theoretisch ideale als de werkelijke) van één van de zeventien mengsels. Talrijke experimenten zijn uitgevoerd op deze mengsels, zowel in de plastische als de verharde fase. Naast de beproevingen op sterkte en thermische geleiding zijn ook proeven gedaan naar duurzaamheid, voornamelijk de waterindringing onder druk.

<sup>1)</sup> Dit artikel is een vertaling van het Engelstalige artikel 'Design of ultra-lightweight concrete: towards monolithic concrete structures' van de genoemde auteurs. De vertaling is verzorgd door ing. Hans Köhne van het Cement&BetonCentrum.

- 3 Gezaagd oppervlak van twee mengsels ultra-lichtbeton, waarin de homogene verdeling van het lichte toeslagmateriaal goed is te zien
- 4 Druksterkte (a) en thermische geleiding (b) van het ultra-lichtbeton in relatie tot cementtype

Tabel 1 Vloei- en zetmaat van de mengsels met de beste prestaties

test	vloeimaat [mm]			zetmaat [mm]
	meting 1	meting 2	gemiddelde	
mix A	460	460	460	195
mix B	390	390	390	83

### Resultaten en analyse

Een bespreking van de resultaten wordt beperkt tot de twee mengsels die de beste prestaties toonden.

#### Verwerkbaarheid

Tabel 1 maakt duidelijk dat beide mengsels een goede verwerkbaarheid hebben. Wat betreft de zetmaat valt mengsel A in klasse S4 en mengsel B in S2. Wat betreft de vloeimaat valt mengsel A in klasse F3 en mengsel B in F2. Merk op dat deze verwerkbaarheid is bereikt zonder gebruik van superplastificerders. Dat is de verdienste van het ontwerpmodel; deze karakteristiek werd eerder ervaren bij het ontwerp van mengsels voor zelfverdichtend beton.

De volumieke massa's van deze beide mengsels is vastgesteld op respectievelijk 837 kg/m<sup>3</sup> en 778 kg/m<sup>3</sup>.

Voor beide mengsels is eenzelfde hoeveelheid luchtbelvormer toegepast. Gezien het verschil in volumieke massa is het effect van de luchtbelvormer verschillend in beide mengsels. Dit wijst erop dat het cementtype invloed heeft op de effectiviteit van de luchtbelvormer.

Zoals hiervoor al opgemerkt, is de homogene verdeling van de lichtgewicht toeslagmaterialen in het mengsel van groot belang, vooral als de volumieke massa zeer laag is (zoals in dit onderzoek). Foto 3a en b tonen oppervlakken van doormidden gezaagde proefstukken. Daaruit blijkt duidelijk dat de toeslagmateriaal-korrels mooi homogeen zijn verdeeld in de betonmatrix. Dit bevestigt dat er geen ontmenging in de mengsels is opgetreden.

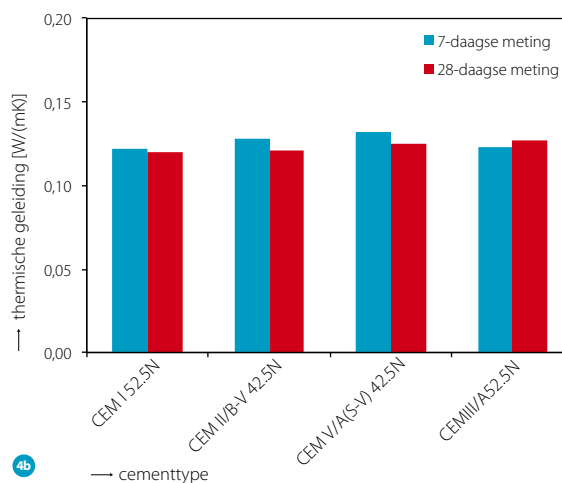
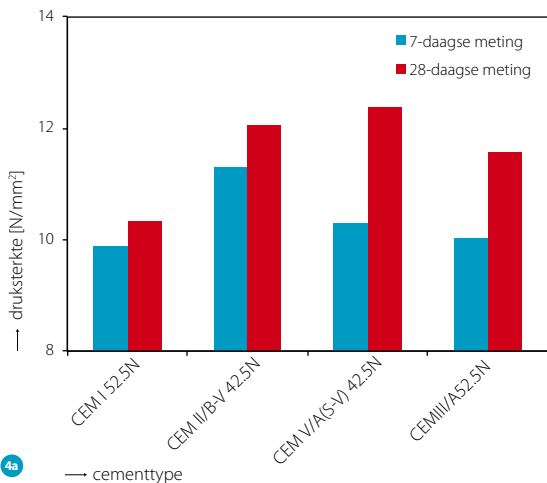


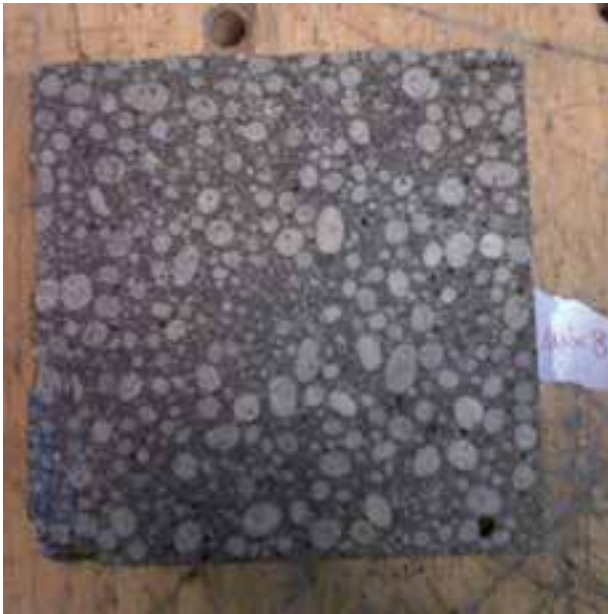
3a

En het is ook een bevestiging van de betrouwbaarheid van de toegepaste mengselontwerpmethode.

#### Sterkte

In figuur 4a zijn de eigenschappen weergegeven van het ultra-lichtbeton geproduceerd met verschillende cementsoorten, maar met eenzelfde cementgehalte (450 kg/m<sup>3</sup>). Alle proefstukken hebben een 7-daagse druksterkte hoger dan 10 N/mm<sup>2</sup>. De mengsels met CEM V/A (S-V) en CEM III/A vertonen een grote sterktoename tussen de 7-daagse en 28-daagse meting. Dat wordt toegeschreven aan de typische reactiviteit van het aandeel hoogovenslak in het cement. Voorts is in figuur 4 te zien dat de cementtypen met hoogovenslak als component tot een hogere 28-daagse sterkte leiden dan het mengsel waarin CEM I 52,5 N is gebruikt.





3b

### Thermische eigenschappen

De cementkeuze blijkt nauwelijks invloed te hebben op de thermische eigenschappen van het ultra-lichtbeton (fig. 4b). De thermische geleidingscoëfficiënt is voor alle proefstukken met de vier cementtypen vrijwel gelijk, ongeveer 0,12 tot 0,13 W/(mK). Opgemerkt wordt nog dat de waarde voor de thermische geleiding min of meer stabiel is na 7 dagen verharding. De veranderingen die na die tijd nog optreden, zijn verwaarloosbaar.

### Invloed cementgehalte

In figuur 5 zijn eigenschappen gepresenteerd van het ultra-lichtbeton gemaakt met CEM II/B-V 42,5 N in drie diverse doseringen. De 28-daagse druksterkte neemt af van 12 tot 10 N/mm<sup>2</sup> als het cementgehalte wordt verlaagd van 450 g/km<sup>3</sup> naar 350 kg/m<sup>3</sup>. Dit terwijl in de thermische geleiding nauwelijks verschil optreedt, namelijk waarden tussen 0,12 en 0,13 W/(mK). Dit duidt erop dat er geen directe relatie is tussen de thermische geleiding en het cementgehalte (bij gelijkblijvende volumieke massa van het beton).

### Toeslagmateriaal

Chandra en Berntsson [1] rapporteerden een lineaire relatie tussen de 'ovendroge' volumieke massa en de thermische geleiding van lichtbeton met gebruik van verschillende soorten lichte toeslagmaterialen. Zij bereikten een thermische geleidingscoëfficiënt van 0,20 W/(mK) bij een volumieke massa van 630 kg/m<sup>3</sup>. Eenzelfde ovendroge volumieke massa is bereikt in het hier beschreven onderzoek.

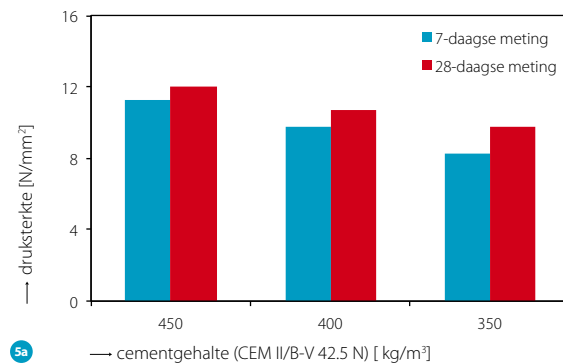
Zareef [7] berichtte over lichtbeton met een thermische geleidingscoëfficiënt van 0,18 W/(mK) met een ovendroge volumieke massa van 760 kg/m<sup>3</sup>, bij gebruik van geëxpandeerde klei

als licht toeslagmateriaal. Het moge duidelijk zijn dat het in dat onderzoek ontwikkelde ultra-lichtbeton een aanzienlijk betere thermische isolatiecapaciteit heeft bij een vergelijkbare volumieke massa.

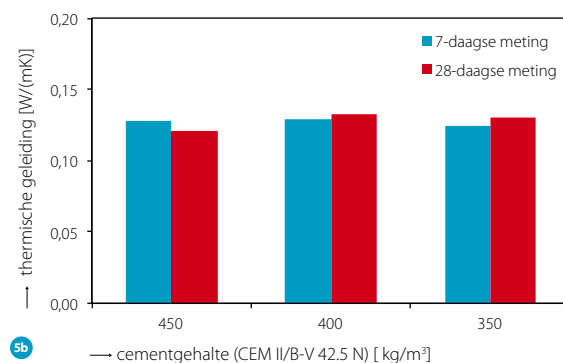
### Nanosilica

In deze studie is ook onderzoek gedaan naar het effect van nanosilica als toevoeging aan het betonmengsel. Het gebruikte nanosilica was in de vorm van een slurry, dus in colloïdale vorm, met een deeltjesgrootte van 19 tot 156 nm gemeten met SEM/STEM en 79 tot 186 nm gemeten met laserlicht diffractie (nanosizer) [8].

Er bestaat nog geen consensus omtrent de toevoeging van nanosilica aan beton. Over de invloed van nanosilica op de betonsterkteontwikkeling zijn veel tegenstrijdige bevindingen gerapporteerd [9]. Hier is voor elk onderzocht cementgehalte een deel cement vervangen door eenzelfde hoeveelheid nanosilica. Figuur 6 toont de effecten van diverse doseringen nanosilica op de betoneigenschappen, uitgaande van CEM II/B-V 42,5 N, met cementgehalten van 450 en 400 kg/m<sup>3</sup>. Uit figuur 6 blijkt dat in beide gevallen de nanosilicatoevoeging een duidelijk positief effect heeft op de druksterkte. Zo werd bij 10% cementvervanging door nanosilica, uitgaande van cementgehalten van 450 en 400 kg/m<sup>3</sup>, een toename van de 7-daagse druksterkte bereikt van 21% respectievelijk 22%. Het effect van de nanosilicatoevoeging op de thermische geleiding



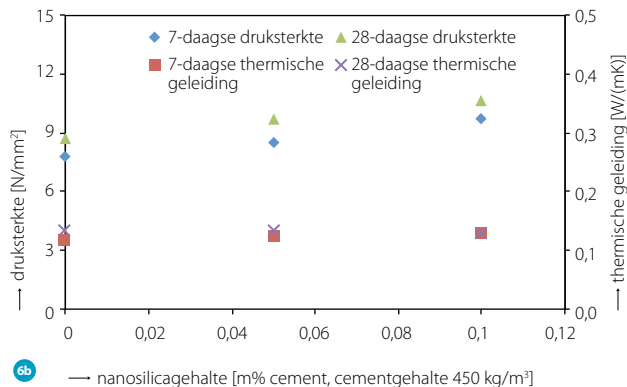
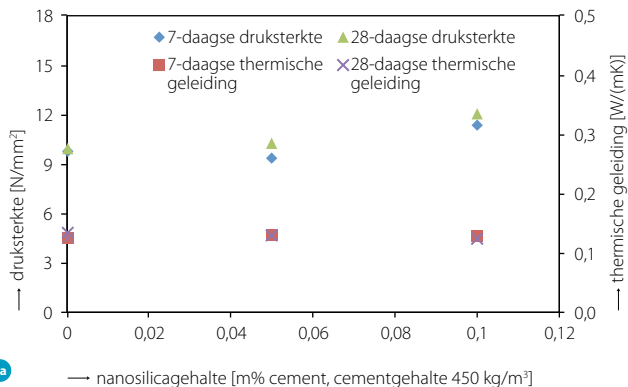
5a



5b



- 6 Eigenschappen van ultra-lichtbeton in relatie tot dosering nanosilica
- 7 Gespleten proefstukken na test op waterindringing; waterdruk uitgevoerd op het bodemoppervlak



ding blijkt verwaarloosbaar. De waarden voor de thermische geleidingscoëfficiënt blijven vrijwel constant bij verschillende doseringen nanosilica.

### Waterindringing

Foto 7 laat de oppervlakken zien van proefstukken die zijn gespleten na uitvoering van tests op waterindringing. Opmerkelijk is de geringe diepte van waterindringing in het ontwikkelde ultra-lichtbeton, dat toch een zeer hoge porositeit heeft. De waterdruk is tijdens de test 72 uur lang op 5 bar gehouden. Let vooral op de proefstukken van mengsel B, in foto 7 gemarkeerd met 2-a/b/c. Dit rechtvaardigt de verwachting dat dit ultra-lichtbeton uitstekende duurzaamheidseigenschappen heeft. Het bevestigt ook dat de toegepaste methodiek voor het mengselontwerp bruikbaar is voor ultra-lichtbeton. Deze methodiek resulteert immers in een zeer lage thermische geleidbaarheid, bescheiden maar bruikbare sterkte-eigenschappen en een goede duurzaamheid.

### Discussie

Ultra-lichtbeton met een ovdroge volumieke massa lager dan 800 kg/m<sup>3</sup> wordt in de Engelstalige literatuur ook wel aangeduid als super lightweight concrete en in de Duitse literatuur als Infra-leichtbeton. Dit type lichtbeton, dat normaal wordt gebruikt voor isolatiedoeleinden vanwege de zeer lage thermische geleiding, wordt ook gekenmerkt door een zeer lage druksterkte (1 tot 7 N/mm<sup>2</sup>) [8]. De hier gerapporteerde studie is gefocust op de ontwikkeling van ultra-lichtbeton (volumieke massa lager dan 800 kg/m<sup>3</sup>) met een bescheiden sterkte die voldoende moet zijn om dragende constructies te maken. Zoals hiervoor beschreven, is met gebruik van een innovatieve ontwerpmethodiek met succes een ultra-lichtbeton ontwikkeld met een ovdroge volumieke massa van 650 tot 700 kg/m<sup>3</sup> met een thermische geleidingscoëfficiënt van ongeveer 0,12 W/(mK) en een 28-daagse druksterkte hoger dan 10 N/mm<sup>2</sup>. Bovendien is de betonsamenstelling bijzonder 'kosteneffectief', omdat geen dure componenten als nanosilica

nodig zijn om deze eigenschappen te bereiken.

In figuur 8 zijn op basis van literatuurstudie de resultaten van diverse studies samengevat in relaties tussen volumieke massa, thermische geleidingscoëfficiënt en druksterkte. Hieruit mag worden geconcludeerd dat de resultaten van de hier gerapporteerde studie superieur zijn aan die van de overige studies [1, 2, 7, 9-16]. In een tweede projectfase wordt momenteel nader ingegaan op de constructieve eigenschappen van het materiaal. Ook zullen mengsels worden ontwikkeld voor dragende toepassingen, met een beoogde minimale druksterkte van 25 N/mm<sup>2</sup> en een geoptimaliseerde volumieke massa.

### Samenvatting

De hier beschreven studie heeft als doel de ontwikkeling van een ultra-lichtbeton. In dit beton wordt een zeer lage thermische geleiding gecombineerd met mechanische eigenschappen. Hierdoor is dit materiaal te gebruiken voor monoliete, dragende gevelconstructies die zonder aanvullende materialen voldoen aan thermische en constructieve eisen. De belangrijkste bevindingen kunnen als volgt worden samengevat:

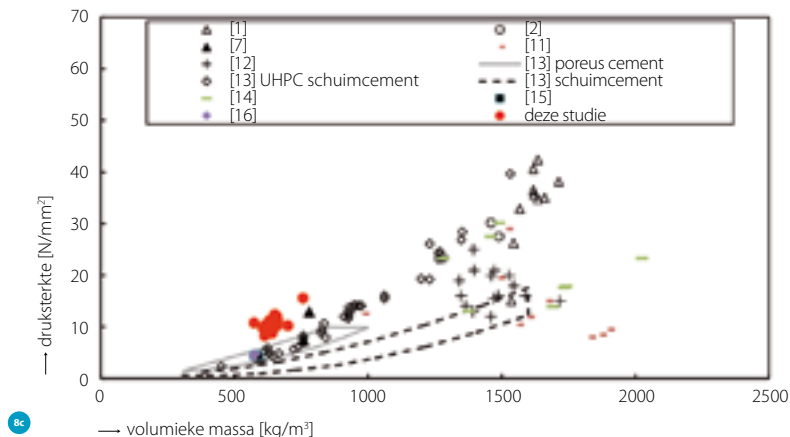
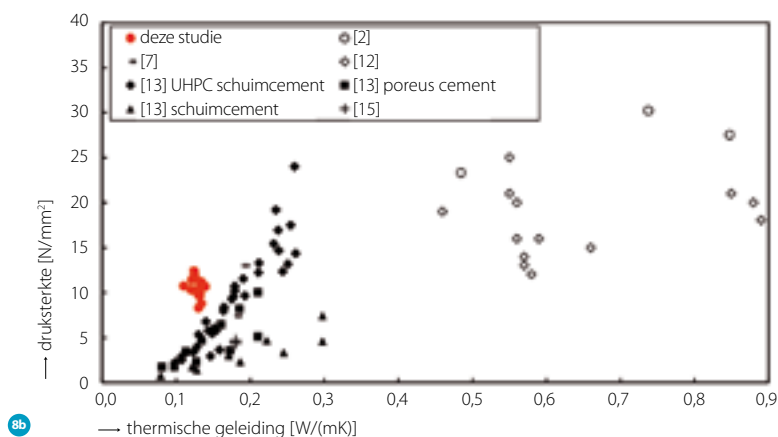
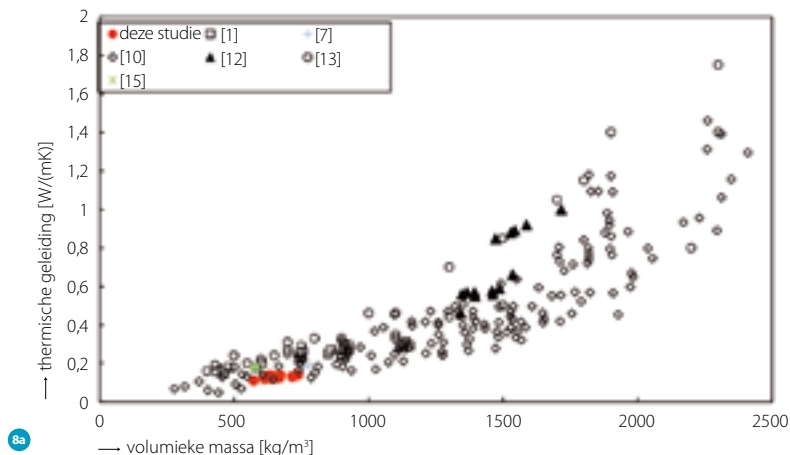


- Er is een ultra-lichtbeton ontwikkeld met een ovdroge volumieke massa van 650 tot 700 kg/m<sup>3</sup>.
- Het ontwikkelde ultra-lichtbeton is goed verwerkbaar in de plastische fase, terwijl in de verharde fase blijkt dat de lichte toeslagmaterialen homogeen zijn verdeeld in de matrix.
- De effecten op de betoneigenschappen van ontwerpparameters als cementsoort, cementgehalte en dosering nanosilica zijn onderzocht.
- Het ontwikkelde ultra-lichtbeton combineert een 28-daagse druksterkte van meer dan 10 N/mm<sup>2</sup> met een thermische geleidingscoëfficiënt van ongeveer 0,12 W/(mK).
- Het ontwikkelde ultra-lichtbeton toont een uitstekende duurzaamheid in termen van waterindringing onder druk. ☒

#### LITERATUUR

- Chandra, S., Berntsson, L., *Lightweight aggregate concrete science, technology and applications*, Standard publishers distributors, Delhi, India, 2003.
- Yu, Q.L., *Design of environmentally friendly calcium sulfate-based building materials, Towards and improved indoor air quality*, PhD thesis, Eindhoven University of Technology, Nederland, 2012.
- H.J.H. Brouwers, Radix, H.J., *Self-compacting concrete: theoretical and experimental study. Cement and Concrete Research* 35, 2005, pp. 2116-2136.
- Hunger, M., *An Integral Design Concept for Ecological Self-Compacting Concrete*, PhD thesis, Eindhoven University of Technology, Nederland, 2010.
- Hüsken, G., Brouwers, H.J.H., *A new mix design concept for earth-moist concrete: A theoretical and experimental study. Cement and Concrete Research* 38, 2008, pp. 1246-1259.
- Hüsken, G., *A Multifunctional Design Approach for Sustainable Concrete with Application to Concrete Mass Products*, PhD thesis, Eindhoven University of Technology, Nederland, 2010.
- Zareef, M.A.M.E., *Conceptual and Structural Design of Buildings made of Lightweight and Infra-Lightweight Concrete*, 2010.
- ACI Committee 213, *Guide for structural lightweight-aggregate concrete*, 2003.
- Loudon, A.G., *The thermal properties of lightweight concretes. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* 1, 1979, pp. 71-85.
- Neville, A.M., *Properties of concrete*, 4th ed., 1995.
- Alduaij, J., Alshaleh, K., Naseer Haque M, Ellaithy, K., *Lightweight concrete in hot coastal areas. Cement and Concrete Composites* 21, 1999, pp. 453-458.
- Topçu I.B., Uygunoglu T., *Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete (SCLC). Construction and Building Materials* 24, 2010, pp. 1286-1295.
- Schauerte, M. Trettin, R., *Neue Schaumbetone mit gesteigerten mechanischen und physikalischen Eigenschaften*, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, Duitsland, 2012, pp. 2-0066-2-0072.

- De relatie tussen volumieke massa en thermische geleiding (a), de relatie tussen volumieke massa en druksterkte (b), de relatie tussen thermische geleiding en druksterkte (c)



- Kan, A., Demirboga, R., *A novel material for lightweight concrete production. Cement and Concrete Composites* 31, 2009, pp. 489-495.
- Kralj, D., *Experimental study of recycling lightweight concrete with aggregates containing expanded glass. Process Safety and Environmental Protection* 87, 2009, pp. 267-273.
- Liu, X., Chia, K.S., Zhang, M.H., *Development of lightweight concrete with high resistance to water and chloride-ion penetration. Cement and Concrete Composites* 32, 2010, pp. 757-766.