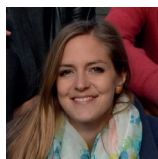


ULTRA-LICHTGEWICHT BETON: BOUWFYSISCHE ALLESKUNNER OF SIMPELWEG EEN ANDER TYPE BETON?

Goed doordacht gebruik van thermische massa speelt een belangrijke rol bij ontwerp en ontwikkeling van duurzame en energie-efficiënte gebouwen. Doordat alle gebouwen in de toekomst energieneutraal gebouwd gaan worden, zal het belang van thermisch comfort alleen nog maar toe gaan nemen. Kleine temperatuurschommelingen en een laag risico op oververhitting in gebouwen worden als positieve eigenschappen beschouwd met betrekking tot thermisch comfort. Thermische massa kan hierbij helpen, maar kan in sommige situaties ook lijden tot lage binnentemperaturen en hoger energieverbruik. Het meest geschikte type constructie voor een gebouw is afhankelijk van veel factoren. In de meeste gevallen moet er een compromis gesloten worden tussen het gedrag tijdens opwarmperiodes en het risico op oververhitting. De uitdaging om hier een oplossing voor te bedenken heeft geleid tot de ontwikkeling van een nieuw materiaal, ultra-lichtgewicht beton (ULB).



ir. F. (Franziska)
Roberz



ir. R.C.G.M. (Roel)
Loonen



dr.ir. P. (Pieter-Jan)
Hoes



prof.dr.ir. J.L.M. (Jan)
Hensen, Leerstoel
Building Performance,
Unit Building Physics
and Services, TU/e

ULTRA-LICHTGEWICHT BETON

Ultra-lichtgewicht beton (ULB) is een innovatief constructiemateriaal. Het is in de afgelopen jaren ontwikkeld onder de naam Warmbeton bij de leerstoel Building Materials, Technische Universiteit Eindhoven (TU/e) [1]. De eerste prototypes zijn beschikbaar. Er wordt nu door een consortium van partners gewerkt aan het richting de markt brengen van dit product (www.warmbeton.nl). Het unieke kenmerk van ULB is dat het thermische isolatie en draagvermogen combineert in één materiaal. De belangrijkste component voor dit ultra-lichtbeton is geëxpandeerd glas, dat de rol van zand en grind deels vervangt (figuur 1). Hierdoor bestaat het beton voor circa twee-derde deel uit opgesloten lucht. Dit leidt tot een lichtgewicht materiaal met een soortelijk gewicht van circa 800 kg/m³ en een lambda-waarde van 0,14 W/mK. De druksterke is met circa 10 N/mm² een flink stuk hoger dan cellenbeton, waardoor ULB kan worden gebruikt in dragende gevels.

Het materiaal ULB is ontworpen om in monolithische, eenlaagse, constructies toegepast te worden; voor een R_c -waarde van 5 m²K/W is een wanddikte van 70 cm noodzakelijk. Verder kan het materiaal in het werk worden gestort of prefab worden geproduceerd. Het materiaal biedt hierdoor nieuwe architectonische mogelijkheden. Doordat het om een monolithische geveloplossing gaat, zullen koudebruggen en infiltratie grotendeels geëlimineerd worden bij een goede detaillering en uitvoering.

Het gebruik van warmbeton leidt tot een paradox: het lichtgewicht materiaal heeft weinig thermische massa; echter door de toepassing als monolithische gevel vertoont het toch eigenschappen van een zwaargewicht gebouw [2]. Er is in deze fase van de ontwikkeling nog weinig inzicht in wat deze bijzondere zwaar-licht combinatie betekent voor het potentieel voor energiebesparing

en comfortverbetering op gebouwniveau. Dit potentieel wordt onderzocht in dit artikel.

MATERIAALEIGENSCHAPPEN VAN ULB

Om dit nieuwe materiaal te onderzoeken op zijn prestatie met betrekking tot energiegebruik en thermisch comfort is het niet toereikend om alleen te kijken naar materiaaleigenschappen zoals soortelijk gewicht, warmtegeleidingscoëfficiënt en warmtecapaciteit. De onderstaande materiaaleigenschappen moeten ook bij de analyse betrokken worden.

Diffusiviteit

De thermische diffusiviteit, $\alpha = \lambda / (\rho \cdot c_p)$ [m²/s], beschrijft de tijd die een materiaal nodig heeft om tot een thermisch evenwicht te komen met zijn omgeving. Een materiaal met een lage diffusiviteit zal opgeslagen warmte langzaam teruggeven aan zijn omgeving, onafhankelijk van de hoeveelheid opgeslagen energie. ULB heeft een vijf keer lagere waarde dan normaal beton (zie tabel 1), maar vergeleken met de waarden voor ijzer of koper (~ 10 - 120 mm²/s) hebben ULB alsook normaal beton een lage waarde. Dit toont aan dat beide materialen hun opgeslagen energie langzaam teruggeven aan de omgeving.

Effusiviteit

De thermische effusiviteit, $\varepsilon = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p}$ [J/(K · m² · s^{0.5})], van een materiaal geeft de mate aan waarmee een materiaal warmte kan absorberen. Een hoge waarde voor de effusiviteit geeft aan dat er een grote warmtestroomdichtheid aan de oppervlakte van het materiaal plaatsvindt tijdens het proces tot thermisch evenwicht met de omgeving. Een standaard isolatiemateriaal heeft een lage effusiviteit wat aangeeft dat het materiaal weinig warmte absorbeert. De thermische effusiviteit geeft ook een indicatie voor de

contacttemperatuur. De contacttemperatuur is het laagst voor een materiaal met een hoge effusiviteit. ULB heeft een relatief lage effusiviteit vergeleken met normaal beton. Hierdoor voelt ULB warmer aan als men het aanraakt. Dit was onder andere de aanleiding voor de naam warmbeton.

Dynamische eigenschappen

Met de internationale standaard EN ISO 13786 kunnen de dynamische thermische eigenschappen van gebouwelementen, opgebouwd uit verschillende lagen, onder variërende buitenomstandigheden worden geanalyseerd [3]. In figuur 2 zijn drie constructie-types te zien die ter vergelijking met deze standaard zijn geanalyseerd. Alle constructies hebben dezelfde warmtedoorgangscoefficiënt (U-waarde).

De resultaten tonen aan dat bij een constructie van ULB er geen meetbaar temperatuurverschil aan de binnenkant van de constructie plaatsvindt door verandering in de buitentemperatuur. De lichte constructie, daarentegen, heeft een variatie van bijna 10°C als de buitentemperatuur tussen 30°C overdag en 0°C 's nachts varieert. Verder lieten de berekeningen zien dat de zware constructie de grootste hoeveelheid warmte aan de binnenkant op kan slaan. Vergelijken met de zware constructie, is de capaciteit voor warmteopslag van ULB maar een-derde. Door deze lagere thermische capaciteit zal ULB een kleinere hoeveelheid warmte absorberen, bijvoorbeeld interne warmtelasten. Hierdoor ontstaat er een groter risico op oververhitting dan voor de zware constructie. Echter zal een gebouw met een constructie van ULB sneller opwarmen na bijvoorbeeld een weekend of vakantieperiode.

GEBOUWPRESTATIESIMULATIE MET ULB

In het navolgende worden bouwprestatiesimulaties beschreven die hebben geholpen om beter onderbouwd een uitspraak te kunnen doen over het thermische gedrag van ULB vergeleken met de andere constructies. Het voordeel van gebouwssimulaties in deze onderzoeksfase is dat al in een vroeg stadium de koppeling gemaakt wordt tussen materiaaleigenschappen, gebouwontwerp, gebruikersaspecten, weersinvloed en klimaatinstallaties. Het uitvoeren van labtests en het opzetten van tijdrovende en kostbare proefopstellingen kan deels worden vervangen door het doen van experimenten met een virtueel gebouw [4]. Deze simulaties helpen bovendien bij het effectief analyseren van meerdere varianten en maken risicoanalyses mogelijk.

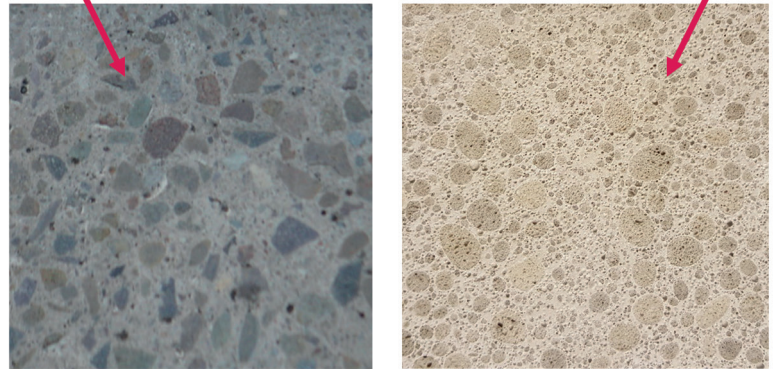
Simulatiestrategie en validatie

Simulaties zijn uitgevoerd in EnergyPlus met het CondFD algoritme voor warmtetransport. Door de onconventionele dikte van ULB zouden fouten in de berekeningen of instabiliteit in de calculatie op kunnen treden. Door eerst een analytische validatiestudie uit te voeren is aange-toond dat EnergyPlus in combinatie met CondFD resultaten met voldoende nauwkeurigheid levert, mits de simulatietijdstap klein genoeg wordt gekozen. Bovendien maakt het CondFD algoritme het mogelijk om de temperatuur niet alleen aan de oppervlakte maar ook binnenin de constructie te kunnen berekenen.

Een kantoor als referentiegebouw

Het U.S. Department of Energy (DOE) heeft een aantal referentiegebouwen ontwikkeld die als representatieve

Grind en zand vervangen door geëxpandeerd gerecycled glas

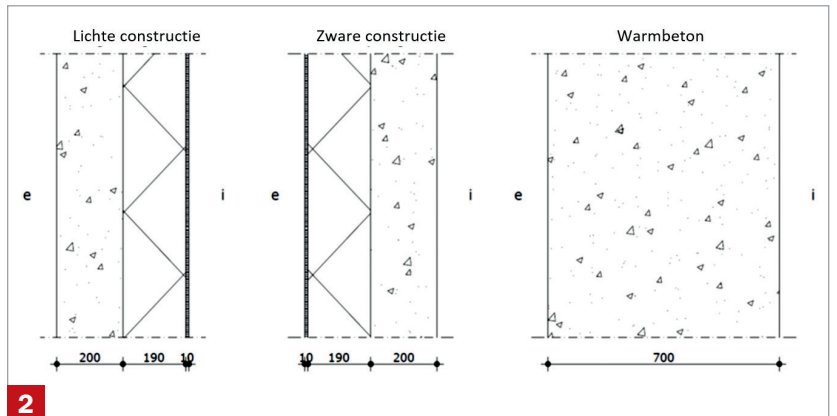


1

Warmbeton (rechts) heeft een soortelijk gewicht dat drie keer zo klein is als dat van regulier beton (links)

Tabel 1: Vergelijking van materiaaleigenschappen van ULB, isolatie materiaal (minerale wol) en normaal beton

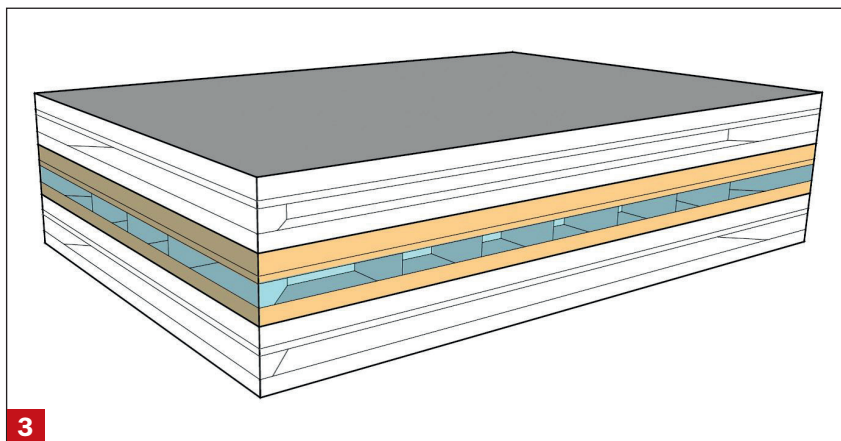
			ULB	Minerale wol	Normaal beton
Warmtegeleidingscoëfficiënt	λ	W/(mK)	0,14	0,04	2,0
Soortelijk gewicht	ρ	kg/m ³	800	20	2400
Warmtecapaciteit	C_p	J/(kgK)	870	840	850
Thermische diffusiviteit	α	mm ² /s	0,20	2,37	0,97
Thermische effusiviteit	ϵ	J/(K·m ² s ^{0.5})	312	26	2019



2

Doorsnede van drie types constructies die in deze studie zijn onderzocht. Van links naar rechts: Thermisch lichte constructie met isolatie materiaal aan de binnenkant, thermisch zware constructie met isolatiemateriaal aan de buitenkant en ULB als een monolithische constructie met een dikte van 70 cm

voorbeelden voor energieprestatieanalyses op gebouwniveau in combinatie met EnergyPlus gebruikt kunnen worden [5]. Voor dit onderzoek is een middelgroot kantoorgebouw van drie bouwlagen gekozen om de prestatie van ULB in vergelijking met andere constructietypes te onderzoeken. De verhouding van beglazing en dichte gevelelementen is voor alle vier oriëntaties gelijk. In figuur 3 is het kantoorgebouw te zien dat voor dit onderzoek is gebruikt. De gekleurde verdieping geeft aan voor



3 Het kantoorgebouw dat voor dit onderzoek gesimuleerd werd. De gekleurde verdieping werd gebruikt voor de prestatieanalyse

welk deel van het gebouw de prestatieanalyse voor energieverbruik en thermisch comfort gedaan is.

Het kantoorgebouw heeft interne warmtelasten van $21,6 \text{ W/m}^2$ (verlichting en elektrisch apparaat, elk $10,8 \text{ W/m}^2$) en een infiltratievoud van 0,3 ACH. Bovendien is zonwering aanwezig die bij 250 W/m^2 zoninstraling naar beneden gaat. Nachtventilatie is in enkele gevallen ook toegepast omdat deze een grote invloed heeft op de koellast in het gebouw in relatie tot thermische massa (doordat overtollige warmte, buiten de kantooruren, uit het gebouw verwijderd kan worden).

Voor de locatie van het gebouw is gekozen voor Amsterdam. De setpoints voor koeling en verwarming zijn zo gekozen dat deze binnen de comfortklasse B van de nieuwe adaptieve temperatuurgrenswaarden (ATG) vallen (ISSO 74) [6].

De prestaties van het gebouw zijn geanalyseerd aan hand van het primaire energieverbruik voor verwarming en koeling en de ATG. De ATG combineren statische en adaptieve comfort beoordelingsmethodes en maakt zo de evaluatie van het thermisch binnenklimaat mogelijk.

In figuur 4 is het jaarlijks primaire energieverbruik voor zes varianten van het kantoorgebouw te zien; de drie ver-

schillende constructietypes zijn gecombineerd met het kantoorgebouw, mét en zonder nachtventilatie. Het is te zien dat een lichte constructie de meeste energie gebruikt voor koeling als er geen nachtventilatie wordt toegepast. Vanuit deze resultaten kan worden geconcludeerd dat nachtventilatie heel efficiënt is voor dit gebouwtype, ongeacht het feit dat het energiegebruik voor verwarming omhoog gaat. Echter kan met deze resultaten nog geen duidelijk antwoord worden gegeven op de vraag of ULB beter of slechter presteert vergeleken met een thermisch lichte of zware constructie.

Om een volledig beeld te krijgen van het potentieel dat ULB kan bieden moet ook het thermisch comfort worden geanalyseerd. Zoals al genoemd, is hiervoor gebruikgemaakt van de adaptieve temperatuurgrenswaarden (ATG). In figuur 5 zijn de grenswaarden voor de zuidoriëntatie met nachtventilatie en zonwering voor de kantoorconstructie in ULB te zien. Getoond worden alleen de uren waarbij mensen aanwezig zijn in het gebouw. In tabel 2 is een opsomming te vinden van alle uren waarbij de operationele temperatuur boven of onder de grenswaarden van de verschillende klassen valt voor de drie constructies met en zonder nachtventilatie. De zware constructie toont de kleinste temperatuurfuctuaties. Zowel de zware constructie als ULB blijven goed binnen de temperatuurgrenswaarden voor comfortklasse C. De lichte constructie heeft een grotere neiging tot temperatuuroverschrijdingen dan de andere twee constructietypes. Naast deze twee hier omschreven gebouwvarianten zijn er in dit onderzoek ook nog andere varianten onderzocht van het kantoorgebouw. Verder is er ook nog gekeken naar een woongebouw en hoe een gebruiker met andere interne wamtelasten, een ander aanwezigheidspatroon en geen koeling de resultaten beïnvloedt. Voor een uitgebreide analyse wordt verwezen naar Roberz [7].

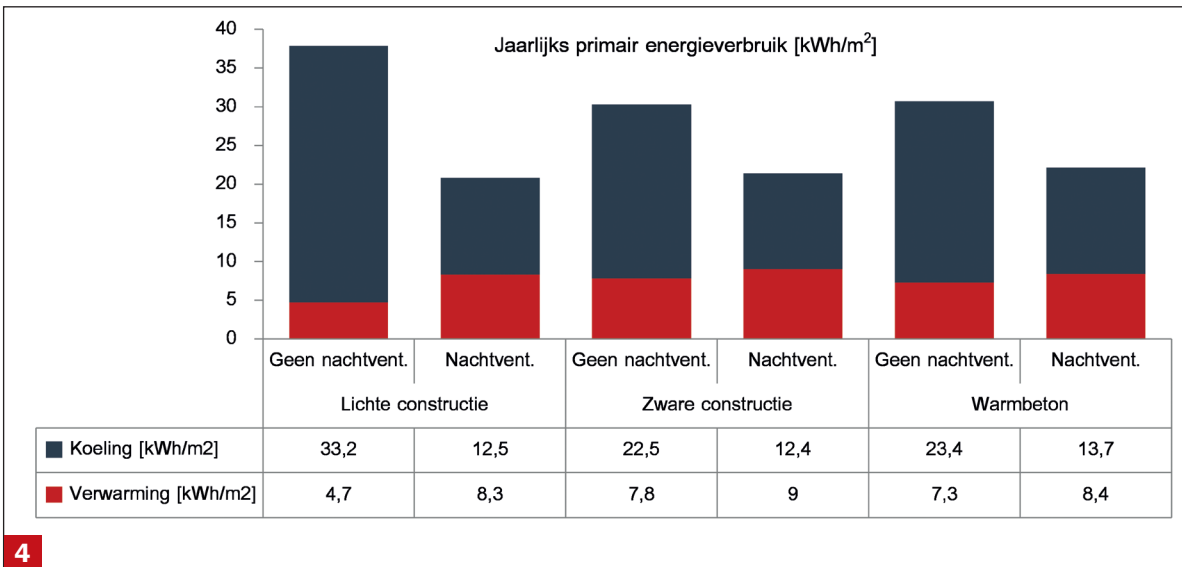
TOEPASBAARHEID

Conclusies over het huidige materiaal

In dit onderzoek is het potentieel van ULB voor energieprestatie en thermisch binnenklimaat geanalyseerd. Dit onderzoek laat zien dat het gebruik van gedetailleerde gebouwsimulaties erg waardevol kan zijn bij een studie naar een bouw materiaal met zulke onconventionele eigenschappen. Door gebouwsimulatie te gebruiken kan het gedrag van Wambeton in een dynamische omgeving met andere constructietypes vergeleken worden. Daardoor kan ook de interactie met het gebouwtype, het klimaat en het gebruikspatroon bestudeerd worden. Met de resultaten kan de invloed van het absorptievermogen van lichte en zware constructies in vergelijking met ULB aangetoond worden. Omdat gebouwsimulatieprogramma's moeite kunnen ondervinden met het simuleren van uitzonderlijk dikke constructies is een validatiestudie uitgevoerd welke liet zien dat EnergyPlus in combinatie met het CondFD algoritme het gedrag van ULB met voldoende nauwkeurigheid kan voorspellen. Hierbij willen we benadrukken dat gebruikers van gebouwsimulatieprogramma's bedachtzaam te werk moeten gaan bij het opzetten van een simulatiestudie over ULB, aangezien niet alle (veel)gebruikte algoritmes/programma's geschikt zijn voor de berekening van het dynamische warmtetransport in ULB.

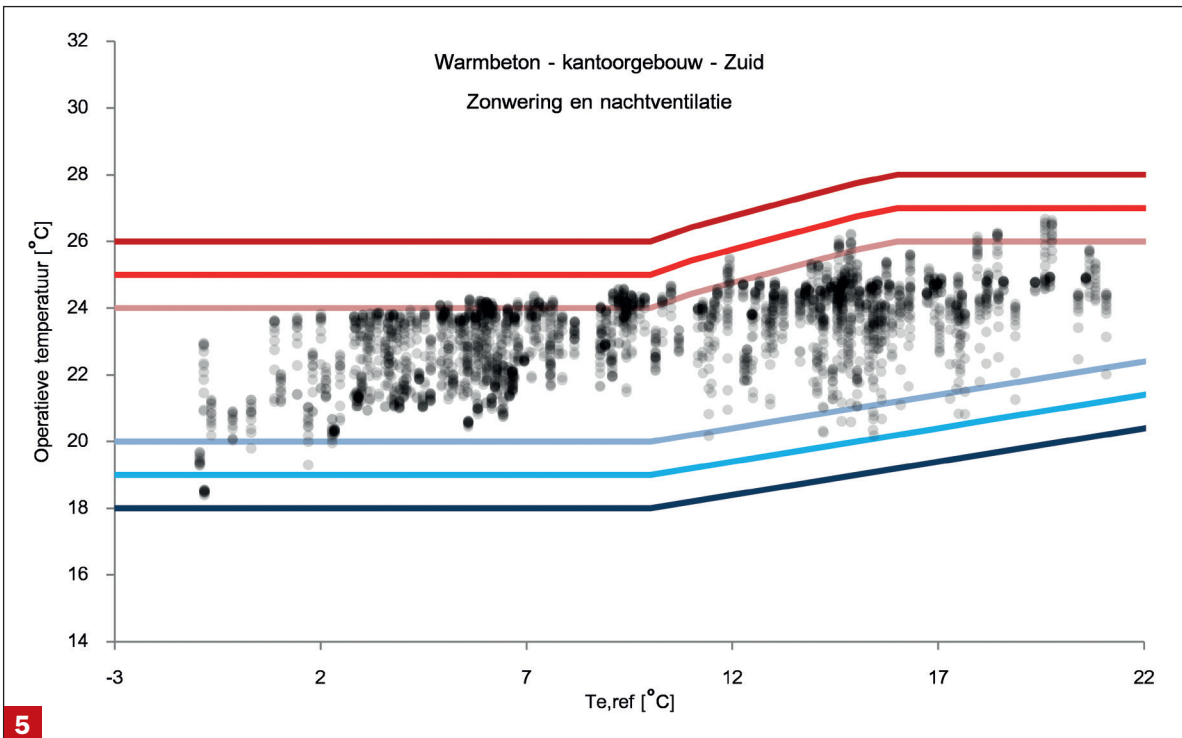
Tabel 2: Temperatuurover- en onderschrijdingsuren voor een heel jaar met alleen de uren waarin mensen aanwezig waren in het kantoorgebouw

		Lichte constructie	Zware constructie	ULB
Geen nachtventilatie	Boven klasse B	1156	318	390
	Boven klasse C	129	0	0
	Onder klasse B	43	27	28
	Onder klasse C	14	12	12
Nachtventilatie	Boven klasse B	312	232	269
	Boven klasse C	0	0	0
	Onder klasse B	65	44	46
	Onder klasse C	18	12	12



4

Het jaarlijks primaire energieverbruik [kWh/m²] voor de drie constructietypes met en zonder nachtventilatie



5

De operative temperatuur [°C] als functie van de referentietemperatuur [°C]. De grafiek toont de uren wanneer personen aanwezig waren in het kantoorgebouw

Dit onderzoek heeft zich beperkt tot één type referentiegebouw, waarbij twee gebruikspatronen, drie verschillende constructietypes en enkele variaties van andere set-points zijn gecombineerd. Uit dit onderzoek kan het volgende worden geconcludeerd (voor gedetailleerde uitwerking en achtergrondinformatie wordt nogmaals verwezen naar Roberz [7]):

- In het kantoorgebouw heeft ULB een jaarlijks primair energieverbruik voor koeling dat iets hoger ligt dan bij de zware constructie, maar de verwarmingsenergie is iets lager.
- In het kantoorgebouw heeft de constructie in ULB circa 22% meer uren boven klasse B vergeleken met de zware constructie, maar het presteert beter dan de lichte constructie. ULB gedraagt zich daarmee zoals verwacht als gekeken wordt naar oververhitting in het gebouw.

- ULB heeft een verlaagd energieverbruik en een hogere oppervlaktetemperatuur als wordt gekeken naar opwarmperiodes van een afgekoeld gebouw. Dit gedrag weerspiegelt de eigenschappen van lichtgewicht constructies.
- ULB gedraagt zich op lange termijn vergelijkbaar met een thermisch zware constructie en op korte termijn toont het meer overeenkomsten met een thermisch lichte constructie.

Samenvattend kan gezegd worden dat ULB het potentieel heeft om met andere, uitontwikkelde constructietypes te concurreren. Net als elk ander materiaal kent ULB zijn specifieke voordelen en beperkingen. Uiteindelijk is het vooral het gebruikspatroon van het gebouw, in combinatie met het buitenklimaat en de strategieën voor de temperatuurregeling welke bepalen of het gebruik van ULB



als gebouwconstructie voordelig is. Uit de simulaties blijkt dat het grootste potentieel voor de toepassing van ULB ligt in gebouwen welke onregelmatig worden gebruikt. Een voorbeeld hiervan zijn bijvoorbeeld hotelkamers of vakantiewoningen. Voor dit soort gebouwen wordt verwacht dat het gebouw bij aankomst snel opwarmt maar dat de temperatuuroverschrijdingen beperkt blijven.

In de toekomst

In de toekomst zullen alle gebouwen energieneutraal gebouwd worden. De prestaties van gebouwen laten zich dan minder goed aan hand van het energiegebruik vergelijken. Het comfort zal dan een doorslaggevende rol spelen. Hierdoor wordt voorgesteld om meer onderzoek te doen naar het potentieel dat ULB biedt met betrekking tot comfort. Het staat buiten kijf dat de toepassing van ULB kan leiden tot een legio aan interessante ontwerp mogelijkheden. Andere aspecten, zoals de luchtdichtheid van het gebouw, koudebruggen, de eenvoud van het construeren op de bouwplaats, de energie die nodig is om de materialen te vervaardigen, en de kosten over de gehele levensduur van het gebouw zullen ook een rol spelen tijdens het ontwerpproces. Uitgebreider onderzoek naar laatstgenoemde punten vormt een goede basis voor verder ontwikkelingen van ULB in de toekomst. ■

BRONNEN

- ▶ [1] Q.L. Yu, P Spiesz, and H.J.H. Brouwers, "Ultra-lightweight concrete: conceptual design and performance evaluation," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 61, pp. 18–28, 2015
- ▶ [2] P Hoes and J.L.M. Hensen, "The potential of lightweight low-energy houses with hybrid adaptable thermal storage: Comparing the performance of promising concepts," *Energy Build.*, vol. 110, pp. 79–93, 2016
- ▶ [3] ISO, "ISO 13786: Thermal performance of building components - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods," 2007
- ▶ [4] J.L.M. Hensen, R.C.G.M. Loonen, M. Archontiki, and M. Kanellis, "Using building simulation for moving innovations across the 'Valley of Death,'" *REHVA J.*, vol. 52, no. 3, pp. 58–62, 2015
- ▶ [5] M. Deru et al., "U.S. Department of Energy Commercial Reference Building Models of the National Building Stock - NREL/TP-5500-46861," 2011
- ▶ [6] ISSO, "ISSO publicatie 74. Thermische behaaglijkheid," *ISSO Publ. 74. Therm. Comf.*, 2014
- ▶ [7] F. Roberz, "Energy Aspects and Indoor Climate Performance of Ultra-Lightweight Concrete: A simulation-based investigation of the potential of a monolithic structure," *MSc Thesis - Eindhoven University of Technology*, 2016

■ **WIL JE BIJDAGEN AAN DE
ONTWIKKELING VAN BOUWFYSICA?
WIJ ZOEKEN ENTHOUSIASTE
REDACTIE- EN COMMISSIELEDEN**

redactie@nvbv.org

